

HANDBOOK

IKLIM PERTANIAN

INDONESIA

Editor:

Irsal Las, Istiqal Amin, Hermanto,
Harris Syahbuddin, Yayan Apriyana



IAARD
PRESS

IKLIM PERTANIAN INDONESIA

IKLIM PERTANIAN INDONESIA

Editor:

Irsal Las
Istiqlal Amin
Hermanto
Harris Syahbuddin
Yayan Apriyana



Iklim Pertanian Indonesia
@2018 IAARD PRESS

Edisi 1: 2018

Hak cipta dilindungi Undang-undang
@IAARD PRESS

Katalog dalam terbitan (KDT)

IKLIM Pertanian Indonesia / Irsal Las ... [dkk.]-Jakarta : IAARD Press, 2018.
xxxv, 445 hlm.; 21 cm.
ISBN: 978-602-344-254-6
551.58:63(594)

-
- I. Iklim 2. Pertanian 3. Indonesia
II. Judul
-

Penulis:

Muhammad Syakir	Budi Kartiwa	Eleonora Runtunuwu
Haris Syahbuddin	Erni Susanti	Trikoesoemaningtyas
Yeli Sarvina	Elza Surmaini	Nani Heryani
Armi Susandi	Woro Estiningtyas	M Noor
Didi Sopandie	Dede Dirgahayu	Elsa Rakhami Dewi
Yayan Apriyana	Aris Pramudia	Tri Nandar Wihendar
Suciantini	Parwati	

Editor:

Irsal Las, Istiqlal Amin, Hermanto,
Harris Syahbuddin, Yayan Apriyana

Perancang cover dan Tata Letak :
Tim Kreatif IAARD Press

Penerbit
IAARD PRESS
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Jl. Ragunan No 29, Pasar Minggu, Jakarta 12540
Email: iaardpress@litbang.pertanian.go.id
Anggota IKAPI No: 445/DKI/2012

PENGANTAR

Variabilitas dan perubahan iklim merupakan tantangan paling serius yang dihadapi sektor pertanian saat ini dan yang akan datang, baik musiman maupun jangka panjang, baik lokal, regional maupun global. Dampak dari kedua fenomena tersebut akan makin menekan produksi pertanian dan ketersediaan pangan. Untuk membalik arah dan mengambil keuntungan dari kedua fenomena tersebut dibutuhkan strategi antisipasi dan penyiapan teknologi adaptasi yang memadai, holistik, terintegrasi dan unggul. Dengan demikian akan tercipta pembangunan pertanian yang tahan (resilience) terhadap perubahan iklim. Upaya ini tidak saja disiapkan untuk sub sektor tanaman pangan yang paling sensitif terhadap dinamika dan variabilitas iklim, tetapi juga untuk sub sektor lainnya.

Berbagai studi mutakhir menunjukkan sejumlah bukti nyata yang sangat signifikan terkait dengan peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian La Nina dan El Nino. Di mana keduanya dapat menyebabkan banjir dan kekeringan, penuruan luas panen, penurunan produktivitas dan produksi pertanian. Pada tahun 1997/1998, Indonesia khususnya dan dunia pada umumnya pernah mengalami kondisi yang buruk akibat terjangan El Nino yang kemudian diikuti oleh La Nina yang sama-sama kuat. Seluruh lapisan dunia mengalami gangguan ketersediaan pangan. Pengalaman ini juga sekaligus membuktikan tangguhnya sub sektor perkebunan dalam mengkompensasi gejolak ekonomi di Indonesia.

Posisi geografis Indonesia yang berdekatan dengan sumber engine La Nina dan El Nino suatu saat nanti pasti akan mengalami hal yang sama di masa yang akan datang. Hal ini harus dipahami,

dipelajari, dan diantisipasi oleh semua pihak, tidak saja oleh sektor pertanian, tetapi juga oleh sektor pendukung lainnya. Kekeringan panjang dapat menyebabkan penurunan ketersediaan air untuk pertanian, industri, dan kebutuhan rumah tangga. Kecukupan pangan dan gizi, serta kualitas kesehatan dapat menurun drastis dan butuh waktu lama untuk memulihkannya kembali. Tidak kalah dari dampak kekeringan, kebanjiran yang masif dapat merusak fasilitas dan infrastruktur, serta memicu situasi buruk pada berbagai sendi kehidupan.

Oleh karena itu, dalam menghadapi dinamika, variabilitas dan perubahan iklim tersebut diperlukan perencanaan yang matang, program aksi yang jelas serta mudah dilaksanakan oleh seluruh lapisan masyarakat. Handbook “IKLIM DALAM PERTANIAN INDONESIA” merupakan salah satu sumber informasi, pembelajaran, strategi dan rekomendasi adaptasi untuk menghadapi dan mengantisipasi dampak dinamika iklim tersebut di atas pada sektor pertanian. Buku ini juga dapat menjadi harapan kita bersama dalam memberikan pedoman dalam mengurangi risiko pertanian akibat iklim. Saya mengajak dan mendorong semua insan pertanian untuk membaca buku ini. Kepada seluruh penulis serta kontributor materi yang dimuat didalamnya, saya ucapkan terimakasih dan apresiasi yang tinggi.

Jakarta, Oktober 2018

Kepala Badan,

Muhammad Syakir

TANTANGAN DAN STRATEGI PEMBANGUNAN PERTANIAN DALAM PERSPEKTIF ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM

Muhammad Syakir dan Haris Syahbuddin

Pendahuluan

Pembangunan pertanian di Indonesia semestinya sudah tidak lagi mengandalkan impor untuk memenuhi kebutuhan pangan di dalam negeri. Indonesia harus mampu meningkatkan produksi pangan strategis sehingga volume impor turun bahkan tidak ada impor untuk komoditas strategis seperti padi, cabai dan bawang merah. Pembangunan pertanian harus mampu meningkatkan kesejahteraan petani, kepuasan petani dan indeks ketahanan pangan. Namun demikian kegiatan pembangunan pertanian secara teknis akan selalu dihadapkan kepada risiko ketidakpastian yang cukup tinggi. Risiko ketidakpastian tersebut terutama akibat perubahan iklim yang dapat memicu berbagai bencana alam, diantaranya banjir, kekeringan, serta serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Perubahan iklim menjadi faktor utama dan faktor global, di sisi lain degradasi lahan dan ketersediaan air juga merupakan penyebab eskalasi terjadinya bencana sehingga pada gilirannya akan menjadi faktor perubahan lingkungan lokal yang berintegrasi menjadi bencana alam domestik di Indonesia. Permasalahan pokok lainnya adalah

ketidakstabilan produktivitas pertanian yang dicirikan oleh tingkat hasil dan mutu produksi pertanian yang diperoleh kurang memuaskan dan bahkan gagal sama sekali. Kondisi tersebut sangat dipengaruhi oleh kurang selarasnya budidaya pertanian dalam sistem usaha tani dengan kondisi iklim setempat yang diperparah dengan kekurangmampuan dalam memahami karakteristik dan prediksi iklim, sehingga upaya antisipasi risiko dan sifat ekstrimnya tidak dapat dilakukan dengan baik. Dengan kompleksnya permasalahan faktor tersebut tentunya kemampuan dalam mengendalikan dan memodifikasi iklim sangat terbatas. Untuk itu diperlukan upaya pendekatan yang lebih efektif dalam memanfaatkan sumberdaya iklim dengan menyesuaikan sistem usahatani dan paket teknologinya dengan kondisi iklim setempat yang didasarkan pada pemahaman terhadap karakteristik dan sifat iklim secara baik melalui analisis dan interpretasi data iklim. Lebih jauh diperlukan upaya integrasi pengurangan risiko bencana dan adaptasi perubahan iklim yang ditujukan untuk mengurangi potensi kerugian dan tingginya biaya atau investasi pembangunan maupun pemulihan wilayah bencana. Upaya integrasi tersebut mencakup kebijakan dan kelembagaan, pendanaan, program dan kegiatan.

Kebijakan nasional strategi adaptasi perubahan iklim dilaksanakan melalui Penurunan risiko bencana dengan cara mengurangi kerentanan dan potensi yang dapat menimbulkan kerugian serta peningkatan kapasitas yang ada baik di lembaga-lembaga terkait maupun yang ada di masyarakat. Kebijakan tersebut diimplementasikan melalui program dan kegiatan yang dilaksanakan berupa 1) Penguatan peraturan perundangan dan kapasitas kelembagaan, 2) Perencanaan penanggulangan bencana yang terpadu, 3) Penelitian, pendidikan dan pelatihan, serta 4) Peningkatan kapasitas dan partisipasi masyarakat dan para pemangku kepentingan lainnya dalam pengurangan risiko bencana. Disamping itu terdapat beberapa strategi yang mengarah khusus kepada pertanian, diantaranya 1) Refokusung

pengembangan ekonomi pada sektor-sektor yang menghidupi mayoritas penduduk di pedesaan yang pada umumnya berprofesi sebagai petani, 2) Prioritas pembangunan pertanian yang dititik beratkan kepada penciptaan nilai tambah (value added) bukan hanya sekedar memproduksi komoditas, dan 3) Industrialisasi harus terkait dengan kepentingan petani. Berkaitan dengan pendanaan pemerintah saat ini memberikan solusi terbaik berupa program Asuransi Usaha Tani Padi (AUTP), yang diharapkan dapat memberikan perlindungan terhadap risiko ketidakpastian dengan menjamin petani mendapatkan modal kerja untuk berusaha tani dari klaim asuransi.

Solusi Permanen Dampak Perubahan Iklim

Banjir dan kekeringan merupakan permasalahan yang kompleks yang diakibatkan bukan saja oleh faktor klimatis namun diakibatkan pula oleh berbagai faktor keragaman yang relatif besar, oleh karena itu tidak mungkin dikaji atau dikendalikan oleh satu atau dua metode spesifik saja. Dalam hal ini, solusi dalam menanganinya memerlukan meta konsep interdisiplin yang secara formal mampu memadukan proses keseluruhan disiplin ilmu dan pengetahuan sosial dengan baik.

Untuk mengantisipasi dampak anomali iklim yang mengakibatkan banjir dan kekeringan, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian bekerjasama dengan Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian telah mempersiapkan skenario terburuk mengantisipasi dampak tersebut. Upaya tersebut yakni melalui manajemen tata kelola infrastruktur pertanian. Ketika berbicara tata kelola air maka itu tidak hanya berbicara hanya mencari air, panen air dan distribusinya saja tetapi juga bagaimana mengatasi fenomena yang muncul akibat kelebihan atau berlimpahnya air.

Sampai saat ini, penanganan banjir masih dilakukan secara sektoral, parsial dan bersifat sesaat berdasarkan tugas pokok fungsi dari masing-masing instansi sehingga kinerja pengelolaan banjir tidak bisa optimal. Upaya antisipasi dan penanganan banjir harus dilakukan melalui kolaborasi kementerian dan lembaga terkait secara holistik dan sinergis dari seluruh instansi meskipun harus lintas wilayah administrasi terkait aliran air dari hulu sampai hilir. Beberapa upaya tersebut antara lain melalui normalisasi Daerah Aliran Sungai (DAS) dan perbaikan pintu-pintu air yang rusak, melakukan penertiban terhadap bangunan liar yang berdiri di sepanjang DAS, normalisasi sepanjang saluran drainase setiap tahun melalui pengangkatan sedimentasi dan pelebaran, dan membangun infrastruktur pencegah lumpur yang berasal dari laut. Disamping itu perlu dipikirkan rujukan regulasi yang tepat Dana Alokasi Khusus (DAK) pada level desa agar otoritas pemerintah daerah mudah melakukan eksekusi dalam menjadikan alokasi dana desa sehingga mampu mendukung upaya solusi permanen dalam mengatasi banjir terutama di desa terdampak. Dengan demikian semua pihak yang terlibat mampu berkontribusi penuh terhadap masalah tersebut dengan mendalami semua aspek yang berkaitan dengan masalah banjir dengan mengkaji faktor apa yang saja yang menyebabkan banjir, pada situasi dan kondisi iklim seperti apa yang mengakibatkan banjir terjadi dan daerah mana saja yang terkena banjir.

Untuk menanggulangi dampak kekeringan terutama akibat anomali Iklim El-Nino, diperlukan pengkajian dan strategi kompleksitas masalah yang terjadi dengan memaksimalkan seluruh potensi yang ada, sehingga dapat diurai langkah dan upaya-upaya untuk mengatasinya. Langkah strategis yang dilakukan adalah dengan menetapkan program solusi permanen melalui pembentukan tim khusus dalam menanggulangi dampak kekeringan. Tim tersebut harus mampu mengendalikan dampak kekeringan agar tidak meluas. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui penyaluran pompa air tanah, pembuatan sumur dangkal,

pembangunan saluran irigasi, long-storage, hingga pembuatan embung-embung untuk menampung air ke areal pertanian disekitarnya. Disamping itu petani juga disarankan menanam padi yang umurnya pendek dan tahan kekeringan, dengan demikian diharapkan lahan yang sering kali dilanda kekeringan pada musim kemarau tetap produktif. Langkah strategis lainnya adalah mengoptimalkan penganggaran dalam upaya penanganan banjir tersebut dengan mengintegrasikan beberapa Kementerian/Lembaga yang terkait yaitu KemenLHK, Kementan, KemenPUPR , Kemendesa, KKP dan Pemda untuk duduk bersama membicarakannya secara komprehensif mengatasi banjir yang mengganggu swasembada pangan nasional agar mendapatkan solusi permanen mengatasi kebanjiran dan kekeringan dalam mendukung swasembada beras nasional berkelanjutan.

Keragaan Pertanian yang Sudah dan Akan Dilakukan

Beberapa keragaan penting yang sudah dan akan terus dilakukan oleh Kementerian Pertanian khususnya Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian dalam mengantisipasi dan menanggulangi dampak perubahan iklim adalah melalui upaya efisiensi penggunaan air terutama pada budidaya padi sawah yang merupakan konsumen terbesar dalam penggunaan air. Efisiensi penggunaan air berperan penting dalam peningkatan nilai ekonomi produksi padi sawah pada lahan beririgasi. Inovasi teknologi hemat air dalam budidaya padi sawah merupakan isu penting dalam kaitannya dengan pencapaian target produksi padi. Di tingkat petani, efisiensi penggunaan air masih rendah, kurang dari 30%.

Untuk menanggulangi dampak negatif kekeringan dapat dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, pendekatan sistem produksi. Air yang tersedia dalam satuan waktu dimanfaatkan

untuk meningkatkan atau mempertahankan intensitas tanam dengan memperpendek periode pertumbuhan tanaman. Kedua, pendekatan komoditas. Air yang tersedia dalam satuan volume digunakan secara efisien bagi masing-masing komoditas dalam suatu pola tanam untuk meningkatkan dan mempertahankan areal tanam dan tingkat produktivitas.

Pendekatan sistem produksi dilakukan melalui upaya efisiensi air yang dilakukan dari fase persiapan lahan, saat tanam dan periode pertumbuhan tanaman. Efisiensi air dilakukan melalui sistem pengolahan tanah minimal atau tanpa olah tanah (TOT) untuk mengurangi periode pertumbuhan tanaman. Pada periode pertumbuhan tanaman, alternatif teknik penghematan air dilakukan melalui budidaya jenuh air, irigasi macak-macak, irigasi berselang (basah dan kering) dan irigasi bergilir. Pendekatan komoditas dapat ditempuh melalui efisiensi sistem pendistribusian air irigasi dan efisiensi penggunaan air irigasi. Total penggunaan air dihitung dari sejak pengolahan tanah sampai pertumbuhan. Kebutuhan air selama pertumbuhan ditentukan oleh varietas dan teknik irigasi.

Pendekatan lainnya yang sudah dilakukan dan tidak kalah penting adalah melalui optimalisasi lahan rawa pasang surut yang tersebar di Kalimantan dan Sumatera. Karena di wilayah tersebut pada musim kemarau justru mampu meningkatkan luas tambah tanam. Artinya Jika yang terkena El-Nino pada umumnya di bagian selatan Indonesia, terutama di Jawa, maka di wilayah Utara, Kalimantan dan Sumatera yang airnya masih tersedia.

Perkembangan Isu-isu Penting

1. *Database Iklim Nasional*

Permasalahan yang terjadi saat ini adalah sistem peringatan dini yang belum dibangun dengan baik untuk membuat

manajemen dampak terhadap dampak-dampak perubahan iklim yang terjadi. Permasalahan tersebut di atas menjadi masukan utama di dalam Pengembangan Sistem Informasi Spasial Database Iklim Nasional. Pemerintah perlu mempunyai database daerah-daerah rawan akibat pemanasan global, sehingga mempunyai strategi untuk mengantisipasinya. Dengan demikian sangat perlu dibuat manajemen database yang baik mengenai data-data dampak perubahan iklim terutama pada wilayah rawan perubahan iklim. Sistem database yang dibangun sebagai langkah-langkah yang penting dalam mengembangkan strategi adaptasi nasional untuk mengantisipasi dampak perubahan iklim. Database iklim dibangun untuk mengidentifikasi dampak-dampak perubahan iklim yang telah dan akan terjadi di Indonesia, serta menetapkan daerah-daerah yang kritis terdampak sebagai prioritas untuk melakukan tindakan adaptasi.

Sistem Informasi Spasial Database Iklim Nasional menggabungkan data tabular (data iklim, infomasi stasiun iklim) dan spasial (peta administrasi) dengan menggunakan teknologi pemrograman yang dapat mendisain sistem database menurut kebutuhan pengguna misalnya: (a) menampilkan data dan informasi iklim secara cepat berdasarkan pilihan jenis parameter, periode waktu, dan lokasi stasiun yang diinginkan, (b) menampilkan distribusi stasiun pengamat iklim/curah hujan, (c) mengolah data iklim ke beberapa satuan waktu seperti data dasarian, bulanan, dan tahunan, dan (d) menampilkan hasil olahan tersebut dalam beberapa kemasan baik secara display di monitor komputer secara tabular ataupun histogram, printout, dan file. Mutu hasil analisis dan interpretasi data iklim, selain ditentukan oleh metode analisis yang digunakan, juga sangat ditentukan oleh jumlah dan mutu data.

Kegiatan penyusunan basis data perlu disertai dengan analisis terhadap kebijakan dan strategi adaptasi perubahan iklim berdasarkan kriteria dan indikator apa yang dapat dipakai untuk menentukan tipe dan efektivitas kegiatan adaptasi

perubahan iklim tersebut secara terstruktur. Agroklimat dan Hidrologi sebagai salah satu institusi di bawah Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian memiliki mandat untuk mengembangkan database sumber daya iklim untuk kebutuhan pertanian nasional.

2. Menghadapi Iklim Ekstrim

Perubahan pola hujan akibat kejadian iklim ekstrim seperti El Niño dan La Niña sudah terjadi sejak beberapa dekade terakhir di beberapa wilayah di Indonesia, seperti pergeseran awal musim hujan dan perubahan pola curah hujan. Selain itu terjadi kecenderungan perubahan intensitas curah hujan bulanan dengan keragaman dan deviasi yang semakin tinggi serta peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrim sehingga mengakibatkan terjadinya peningkatan luas tanaman terkena banjir, kekeringan, dan serangan OPT secara signifikan serta terjadinya penurunan produktivitas tanaman. Data historis antara tahun 2001-2005 menunjukkan peningkatan frekuensi banjir yang ditunjukkan dengan kejadian banjir hingga 530 kali yang terjadi di berbagai wilayah di Indonesia. Demikian pula untuk kekeringan, data antara tahun antara tahun 1844 dan 1960 terjadi setiap 3-4 tahun, dan antara tahun 1961 dan 2006 meningkat menjadi setiap 2-3 tahun. Sebagian besar kekeringan tersebut bersamaan dengan kejadian El Niño.

Untuk menghadapi Iklim ekstrim serta mengantisipasi dampak yang ditimbulkannya di masa yang akan datang perlu disiapkan kajian yang komprehensif mengenai karakteristik keragaman iklim melalui pendekatan prediksi dan proyeksinya. Prediksi iklim merupakan prakiraan mengenai kondisi cuaca/iklim dalam jangka harian, mingguan atau satu musim ke depan berdasarkan data pengamatan terbaru sampai dengan 3-6 bulan ke depan, sedangkan proyeksi iklim adalah gambaran iklim pada masa

depan dalam jangka waktu panjang berdasarkan skenario yang berkaitan dengan perubahan iklim. Penanganan dampak iklim ekstrim terhadap ketahanan pangan memerlukan manajemen antisipasi risiko iklim yang efektif lintas-sektor baik pada tingkat nasional, regional, maupun lokal dan secara bersamaan juga mampu mengembangkan sistem ketahanan pangan yang terhadap dampak perubahan iklim jangka panjang. Upaya tersebut membutuhkan pendekatan strategis baik melalui adaptasi disertai dengan upaya mitigasi.

Strategi adaptasi dapat dilakukan melalui penanganan jangka panjang dan jangka pendek. Penanganan jangka panjang lebih diarahkan kepada upaya-upaya untuk meningkatkan daya dukung agroklimat yang sesuai serta ketersediaan sumberdaya air untuk mendorong peningkatan produktivitas sistem usaha tani. Penanganan jangka pendek lebih diarahkan kepada penyusuaian/perbaikan pola tanam baik untuk wilayah lahan sawah maupun lahan kering serta pengkajian terhadap komoditas-komoditas yang memiliki daya tahan terhadap perubahan iklim dan pola usaha tani yang sesuai dengan agroklimat setempat. Upaya mitigasi bertujuan untuk menurunkan laju emisi Gas Rumah Kaca (GRK) global sehingga konsentrasi GRK di atmosfer masih berada dalam tingkatan yang dapat ditolerir. Penurunan konsentrasi GRK harus dilakukan secara terintegrasi dengan pendekatan lintas sektoral.

DAFTAR ISI

Pengantar	v
Tantangan dan Strategi Pembangunan Pertanian dalam Perspektif Adaptasi Perubahan Iklim	vii
Pendahuluan.....	vii
Solusi Permanen Dampak Perubahan Iklim	ix
Keragaan Pertanian yang Sudah dan Akan Dilakukan Perkembangan Isu-isu Penting	xi
1. Database Iklim Nasional	xii
2. Menghadapi Iklim Ekstrim.....	xiv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxv
 BAGIAN I. MODEL.....	4
Bab 1. Meteorologi Pertanian Indonesia	3
Pendahuluan.....	3
Definisi Meteorologi Pertanian dan Ruang Lingkup	6
Informasi dan Pelayanan Meteorologi Pertanian.....	12
Histori data (data lampau)	12
Prakiraan Iklim untuk Pertanian.....	13
Prakiraan Iklim Jangka Pendek dan Menengah.....	14
Informasi Meteorologi untuk Mengurangi Bencana pada Budidaya Pertanian	14
Proyeksi Iklim.....	14
Meteorologi Pertanian di Indonesia (State Of The Art)	15
Sekolah Lapangan Iklim	17
Tantangan Meteorologi Pertanian Indonesia.....	19
Daftar Bacaan	21

Bab 2. Model Perubahan Iklim Untuk Pertanian	23
Armi Susandi.....	23
Pendahuluan.....	23
Pengembangan Smart Climate Model (Model Iklim Cerdas) untuk Pertanian.....	24
Model Iklim Cerdas	24
Proses Verifikasi terhadap Hasil Prediksi Model Iklim	28
Proses Validasi terhadap Hasil Prediksi Model Iklim.....	30
Peta Kalender Masa Tanam Padi	32
Pengembangan Interface Sistem Informasi Kalender Tanam Padi	34
Konsep Database untuk Pengembangan Sistem Informasi Masa Tanam Padi.....	35
Website Sistem Informasi Kalender Tanam Padi	37
Daftar Bacaan	44
 BAGIAN II. PERAN	45
Bab 1. Cekaman Abiotik dan Produktivitas Tanaman	47
Pendahuluan.....	47
Dampak Perubahan Iklim terhadap Proses Fisiologi Tanaman	51
Daftar Bacaan	89
Bab. 2 Variabilitas Iklim dan Dinamika Waktu Tanam Padi....	99
Daftar Bacaan	120
Bab 3. Kebutuhan Air Tanaman Semusim	125
Daftar Bacaan	143
Bab 4. Neraca Air Berbasis DAS	147
Daftar Bacaan	175
Bab 5. Iklim Esktrim.....	177
Daftar Bacaan	187

BAGIAN III. STRATEGI.....	189
Bab 1. Antisipasi Dan Perbaikan Tanaman Untuk Adaptasi ...	191
Daftar Bacaan	231
Bab 2. Teknologi Inovasi Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu Sebagai Upaya Adaptasi Perubahan Iklim.....	241
Daftar Bacaan	268
Bab 3. Pemanfaatan Prediksi Musim Untuk Pengelolaan Risiko Pertanian	275
Daftar Bacaan	288
Bab 4. Prediksi Iklim Untuk Pertanian.....	293
Daftar Bacaan	321
Bab 5. Dinamika Pertumbuhan Tanaman Padi Dan Curah Hujan Di Pulau Jawa Periode Tahun 2007-2009 Berdasarkan Data Modis Dan TRMM	323
Daftar Bacaan	355
 BAGIAN IV. TEKNOLOGI.....	359
Bab 1. Hubungan Anomali Curah Hujan Dengan ENSO Modoki Indeks (EMI) Pada Kondisi El-Nino dan La-Nina untuk Mendukung Pengembangan Model Prediksi Curah Hujan di Indonesia.....	361
Daftar Bacaan	381
Bab 2. Prediksi Curah Hujan Untuk Pengelolaan Pertanian yang Tahan Risiko Iklim	385
Daftar Bacaan	401
Bab 3. Penggunaan Sistem Modeling Dampak Perubahan Iklim terhadap Pertanian untuk Proyeksi Produktivitas Tanaman Pangan.....	405
Daftar Bacaan	420

Editor dan Kontributor	423
Indeks	427
Glosarium	433

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Parameter meteorologi dan fungsinya untuk aktivitas pertanian	9
Tabel 2.	Hasil verifikasi hasil prediksi curah hujan dasarian	30
Tabel 3	Batas suhu tinggi beberapa tanaman (Wahid et al., 2007).....	60
Tabel 4	Suhu letal (heat-killing temperatures) untuk beberapa Tanaman (Wahid et al., 2007).....	62
Tabel 5.	Ambang batas salinitas beberapa tanaman dan Persentase penurunan hasil pada kondisi salin (Ghafoor et al., 2004).....	85
Tabel 6.	Potensi waktu tanam padi di wilayah monsunal.....	116
Tabel 7.	Potensi waktu tanam padi di wilayah equatorial	117
Tabel 8.	Perhitungan Neraca Air Lahan di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok.....	150
Tabel 9.	Variabel Neraca air lahan multi tahun di Losarang, Kabupaten Indramayu, berdasarkan perhitungan berbasis curah hujan dan ETP harian kumulatif.....	155
Tabel 10.	Nilai Kr rata-rata untuk setiap kecamatan di DTA Danau Singkarak.....	161
Tabel 11.	Ketersedian Air DTA Danau Singkarak pada Tingkat Kecamatan berdasarkan Analisis Neraca Air DAS Tahunan.	164
Tabel 12.	Potensi ketersediaan air irigasi pada Saluran Sekunder Ramba (Intake BGKn3)	172

Tabel 13. Analisis neraca air D.I. Gumbasa menurut Skenario IP 200 (aktual) dan IP 300 (rekomendasi).....	174
Tabel 14. Tingkat adaptasi tanaman terhadap Na berdasarkan Na yang dapat ditukarkan di lapang.....	202
Tabel 15. Respons tanaman terhadap salinitas	202
Tabel 16. Perbedaan Karakteristik Anter Antara Genotipe Toleran dan Peka Suhu Tinggi.....	213
Tabel 17. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan pada beberapa kombinasi peubah masukan di Stasiun Baros Serang (Wilayah IIA Pantura Banten).....	307
Tabel 18. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan terbaik dari stasiun-stasiun pewakil di sentra produksi padi.	312
Tabel 19. Tingkat ketepatan dan kisaran kesalahan pendugaan data curah hujan pada proses validasi model di beberapa stasiun pewakil di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut.	316
Tabel 20. Pengaruh kenaikan suhu permukaan laut Pasifik Tropik terhadap produksi padi di Indonesia (Falcon et al, 2004).....	327
Tabel 21. Kebutuhan air pada fase pertumbuhan padi di Pulau Jawa.....	330
Tabel 22. Data TRMM dan SST Pasifik Tropik yang digunakan..	335
Tabel 23. Rekode EVI_Maksimum dan EVI Maksimum-EVI Tanam serta Hasil Kombinasinya (Overlay Matriks).....	337
Tabel 24. Contoh Rekapitulasi hasil ekstraksi Mean EVI pada region Padi_Id	338

Tabel 25. Distribusi Luas Lahan Sawah di Pulau Jawa Berdasarkan Kelas EVI Maksimum	340
Tabel 26. Kisaran EVI untuk menduga Umur Tanaman Padi... ..	342
Tabel 27. Korelasi Tinggi (Negatif) Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 1.....	370
Tabel 28. Korelasi (Negatif) Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1	373
Tabel 29. Signifikansi sangat kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 4.....	374
Tabel 30. Signifikansi Sangat Kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1	375
Tabel 31. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi El Niño.....	377
Tabel 32. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi La Niña	377
Tabel 33. Korelasi dan Signifikansi Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño	378
Tabel 34. Periode update prediksi karakteristik curah hujan	395
Tabel 35. Data untuk produktivitas dan anomali produktivitas....	411
Tabel 36. Hasil Uji Signifikansi (Padi Tadah Hujan)	413
Tabel 37. Perubahan Anomali Produktivitas (a) untuk padi pada proyeksi dibandingkan dengan data historis	414

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Ruang lingkup meteorologi pertanian	9
Gambar 2.	Contoh buletin agrometeorologi yang di keluarkan oleh USDA	13
Gambar 3.	Climate Smart Model: (a) model awal, (b) model anomali dan (c) model prediksi.....	28
Gambar 4.	Proses verifikasi model iklim dengan data observasi.	29
Gambar 5.	Proses validasi hasil prediksi climate smart model..	31
Gambar 6.	Proses validasi lapangan.	32
Gambar 7.	Contoh peta prediksi masa tanam padi pada musim kemarau (MK) 2014 di Kabupaten Indramayu: (a) sawah Indramayu, (b) peta sawah Indramayu + prediksi masa tanam padi	33
Gambar 8.	Diagram alir pembuatan database untuk aplikasi website.....	36
Gambar 9.	Tampilan tabel database stasiun smart climate model dalam interface phpmyadmin	37
Gambar 10.	Alur sistem informasi.....	38
Gambar 11.	Konsep pengembangan website sistem informasi masa tanam padi.....	39
Gambar 12.	Halaman web prediksi curah hujan untuk wilayah Indramayu	41

Gambar 13. Halaman web untuk informasi peta masa tanam di desa Mekarjaya, Kab. Indramayu.....	41
Gambar 14. Informasi detil prediksi masa tanam di desa Mekarjaya dalam format PDF.....	42
Gambar 15. Suhu tinggi menginduksi penghambatan evolusi oksigen dan aktivitas PSII. Suhu tinggi menyebabkan (1) disosiasi atau (2) penghambatan OEC. Hal ini menyebabkan donor e-internal alternatif seperti prolin sebagai pengganti H_2O untuk mendonorkan elektron kepada PSII (De Ronde et al. 2004).....	72
Gambar 16. Representasi skematik pembentukan dan penghilangan radikal superoksida, hidrogen peroksida, radikalhydroxyl pada kondisi berbagai cekaman lingkungan.....	78
Gambar 17. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian ENSO di (a) Karawang; (b) Subang dan (c) Indramayu, Jawa Barat.	105
Gambar 18. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian IOD di (a) Karawang; (b) Subang (c) dan Indramayu, Jawa Barat.	106
Gambar 19. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian IOD di (a) Sukabumi; (b) Garut dan (c) Tasikmalaya, Jawa Barat.	107
Gambar 20. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian (a)ENSO dan (b) IOD di Jawa Barat.....	107
Gambar 21. Hubungan kejadian ENSO dan IOD dengan onset di Jawa Barat.	108
Gambar 22. Distribusi onset pada saat terjadi (a) ENSO dan (b) IOD di wilayah equatorial (Sumatera Barat)...	109

- Gambar 23. Fluktuasi indeks kecukupan air pada lahan tada hujan di wilayah terkena dampak ENSO dan IOD. Di (a) Anjatan, (b) Krangkeng dan (c) Kertasemaya, Kabupaten Indramayu 114
- Gambar 24. Fluktuasi defisit ketersediaan air pada lahan irigasi di wilayah terkena dampak ENSO dan IOD. Di (a) Anjatan, (b) Krangkeng dan (c) Kertasemaya, Kabupaten Indramayu..... 115
- Gambar 25. Fluktuasi indeks kecukupan air dan defisit ketersediaan air di wilayah terkena dampak ENSO (atas) dan IOD (bawah) di (a) Tarusan dan (b) Batang Kapas, Kabupaten Pesisir Selatan. 118
- Gambar 26. Diagram alir sistem irigasi berdasarkan sensor gypsum..... 139
- Gambar 27. Pola ouput sensor gypsum dalam % dan volt..... 139
- Gambar 28. Water torn sebagai sistem penampung air (kiri), b) sistem pengatur waktu (kanan) 140
- Gambar 29. Neraca Air Bulanan (a) dan Surplus-Defisit Air Bulanan (b) di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok..... 151
- Gambar 30. Grafik Curah hujan dan ETP harian kumulatif serta periode defisit lahan sawah di Losarang, Kecamatan Losarang, Kabupaten Indramayu, Jabar. 154
- Gambar 31. Peta Sebaran Nilai Koefisien Aliran Permukaan (KR) Pada Daerah Tangkapan Air Danau Singkarak Berdasarkan Analisis Metode Cook..... 162
- Gambar 32. Neraca air agroekosistem lahan sawah..... 165
- Gambar 33. Daerah Irrigasi Gumbasa (7,922 Ha) 169

Gambar 34. Variasi Debit Sungai Palu dan Debit Saluran Primer D.I. Gumbasa Periode 2010-2012.....	170
Gambar 35. Jumlah dan persentase kejadian bencana alam di dunia dalam kurun waktu 1994-2013 (sumber: CRED, 2015)	178
Gambar 36. Jumlah kejadian bencana alam per negara dalam kurun waktu 1994-2013 (sumber : CRED, 2015).....	178
Gambar 37. Perbandingan bencana hidrometeorologi dan bencana geofisik di 10 negara dengan jumlah tingkat kejadian terbesar di dunia (sumber : CRED, 2015)	179
Gambar 38. Analisis perubahan nilai mean dan variance pada suhu ekstrim. (a) ketika nilai rata-rata meningkat, (b) ketika nilai variance (ragam) meningkat dan (c) ketika kedua nilai baik rata-rata dan variance meningkat untuk distribusi normal (After IPCC, 2001).....	185
Gambar 39. Mekanisme hipotetik toleransi terhadap cekaman suhu tinggi pada tanaman. MAPK, mitogen activated protein kinases; ROS, reactive oxygen species; HAMK, heat shock activated MAPK; HSE, heat shock element; HSPs, heat shock proteins; CDPK, calcium dependent protein kinase; HSK, histidine kinase (Sung et al., 2003)	195
Gambar 40. Perubahan suhu udara global tahunan (0C*10) periode 1901-1920 dibandingkan dengan 1990-1995 (Runtunuwu dan Kondoh 2008).	242
Gambar 41. Kalender pertanian Jawa (http://senijawakuno.blogspot.com/2012/12/tanda-dan-ciri-pranata-mangsa-arisan.html).....	244

Gambar 42. Distribusi luas tanam tanaman padi rata-rata bulanan per provinsi di Sulawesi.....	245
Gambar 43. Peta Kalender Tanam Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan pada kondisi tahun basah (kiri) dan tahun kering (kanan).....	247
Gambar 44. Tiga subsistem pengelolaan informasi	251
Gambar 45. Alur pengembangan SI Katam Terpadu	252
Gambar 46. Bagan Alir sistem Katam Terpadu	253
Gambar 47. Algoritma model integrasi dinamik (Sumber: Pramudia et al. 2013).....	256
Gambar 48. Informasi estimasi awal waktu tanam.....	257
Gambar 49. Informasi spasial tingkat kerawanan banjir	259
Gambar 50. Informasi tabular tingkat kerawanan serangan OPT	259
Gambar 51. Informasi tabular rekomendasi varietas	261
Gambar 52. Informasi tabular rekomendasi pupuk	262
Gambar 53. Informasi tabular rekomendasi traktor	263
Gambar 54. Informasi SI Katam Terpadu melalui SMS	264
Gambar 55. Informasi SI Katam Terpadu melalui smartphone.....	264
Gambar 56. Informasi SI Katam Terpadu melalui smartphone.....	266
Gambar 57. Perbandingan hasil pengamatan pada ketinggian 4, 5, 6, dan 7 meter di BB Padi.....	267
Gambar 58. Prediksi kekeringan operasional di Amerika yang secara rutin dikeluarkan oleh NOAA. Diakses dari http://www.cpc.ncep.noaa.gov/ tanggal 18 November 2018	278

Gambar 59. Prediksi operasional produksi hijauan ternak di New South Wales, Australia. Diakses dari https://www.longpaddock.qld.gov.au/aussiegrass/ tanggal 18 November 2018.....	278
Gambar 60. Proses downscaling keluaran model GCM (sumber: http://epscorspo.nevada.edu/).....	281
Gambar 61. Ilustasi prediksi probabilistik (sumber: www.chrs.web.uci.edu)	282
Gambar 62. Hasil simulasi tanaman jagung dengan berbagai tanggal tanam pada a) lahan tada hujan dan b) lahan irigasi di Piracicaba, Brazil (sumber: Soler et al., 2007).....	284
Gambar 63. Box plot ansambel prediksi dan observasi hasil padi pada beberapa tanggal tanam periode 2001-2005 pada MK1 tada hujan di Kecamatan Arahan, Kabupaten Indramayu (sumber : Surmaini et al, 2018)	285
Gambar 64. Konsep jaringan syaraf manusia dan model jaringan syaraf tiruan.....	297
Gambar 65. Skema neural network	297
Gambar 66. Struktur umum recurrent network.....	299
Gambar 67. Analisis dan pemodelan prediksi curah hujan.	305
Gambar 68. Hasil pembentukan model dengan kombinasi beberapa peubah X1, X2, X3, X4, X5 dan X6 di Stasiun Baros Serang (Wilayah IIA Pantura Banten).	309
Gambar 69. Hasil training atau pembentukan model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.	313

Gambar 70. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.....	318
Gambar 71. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.....	320
Gambar 72. Peran data penginderaan jauh dalam mendukung informasi yang diperlukan untuk Ketahanan Pangan.....	325
Gambar 73. Diagram alir metode penelitian.....	332
Gambar 74. Diagram alir metode penentuan tanaman padi dan non padi di lahan sawah.....	333
Gambar 75. Pembagian wilayah Nino di Samudera Pasifik Tropik (Sumber: Climate Prediction Center /NCEP)	335
Gambar 76. Citra Klasifikasi Lahan Sawah berdasarkan Indeks Vegetasi (EVI) Maksimum.....	339
Gambar 77. Distribusi Luas Sawah di P Jawa berdasarkan EVI Maksimum	340
Gambar 78. Profil pertumbuhan tanaman padi kelas 8	341
Gambar 79. Estimasi Umur Tanaman Padi Awal Januari 2009 di Kabupaten Indramayu, Jawa Barat	343
Gambar 80. Hasil Analisis EOF terhadap anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober.....	345
Gambar 81. Hasil Analisis EOF terhadap anomali curah hujan TRMM di Indonesia secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober.....	346

Gambar 82. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari....	347
Gambar 83. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Juli dan anomali curah hujan Indonesia bulan Agustus. ...	348
Gambar 84. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Oktober dan anomali curah hujan Indonesia bulan November.	349
Gambar 85. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari.....	349
Gambar 86. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.45-0.50	350
Gambar 87. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.50-0.55	351
Gambar 88. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.55-0.60	352
Gambar 89. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.60-0.65	352
Gambar 90. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.65-0.70	352
Gambar 91. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max > 0.70.....	353
Gambar 92. Tipe hujan di Indonesia (Sumber : Aldrian dan Susanto, 2003).....	364

Gambar 93. Wilayah yang digunakan untuk menghitung EMI (sumber: http://www.jamstec.go.jp/frcgc/).....	367
Gambar 94. Peta Korelasi antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña 372	
Gambar 95. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi El Niño..... 374	
Gambar 96. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña 376	
Gambar 97. Komposit curah hujan bulanan Juli-Juni dari data pengamatan curah hujan jangka panjang di Ciparay, Jawa Barat (kiri) dan plot data runut waktu curah hujan Januari dari 1960-2005 di stasiun yang sama (kanan) (Sumber : Hadi et al., 2009)..... 386	
Gambar 98. Skenario jumlah pemberian air pada setiap fase tanaman padi di Ngale tanggal tanam 30 April 2006 (Estiningtyas et al., 2005) 389	
Gambar 99. Contoh produk prediksi anomali curah hujan ansambel Januari-Maret 2019 yang dikeluarkan oleh ECMWF (http://www.ecmwf.int/) diakses 16 Desember 2018 391	
Gambar 100. Sebaran dari 30 member prediksi curah hujan ansambel pada a) Bulan Maret dasarian 1 di Kecamatan Bunder, Kabupaten Cirebon, b) di Kecamatan Cimalaka, Kabupaten Sumedang, c) Bulan Juni dasarian 1 di Kecamatan Krangkeng, Kabupaten Indramayu dan d) Kecamatan Puturiase, Kabupaten Sidrap..... 394	
Gambar 101. Tautan untuk mengunduh prediksi iklim untuk pertanian pada website Balitklimat 396	
Gambar 102. Tautan untuk memilih dan mengunduh peta prediksi 396	

Gambar 103. Peta peluang prediksi HTH Pulau Bali untuk bulan Februari –Mei 2019	397
Gambar 104. Peta peluang prediksi curah hujan > 50 mm/ dasarian untuk Provinsi Lampung untuk dasarian Februari III–Mei III tahun 2019.....	398
Gambar 105. Langkah-langkah analisis proyeksi produktivitas menggunakan Mosaicc.....	409
Gambar 106. Peta Lokasi Kabupaten Indramayu.....	410
Gambar 107. Tren peningkatan luasm panen, produksi dan produktivitas padi sawah di Indramayu	412
Gambar 108. ResUME klasifikasi perbedaan tanaman menghasilkan proyeksi anomali (salah satu model CANES-M2, CNRM-CM5, dan MPI-ESM-RM).....	415
Gambar 109. Peta proyeksi produktivitas padi sawah tadaH hujan di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi menengah (RCP 4.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.....	416
Gambar 110. Peta proyeksi produktivitas padi sawah tadaH hujan di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi tinggi (RCP 8.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.....	416
Gambar 111. Peta proyeksi produktivitas akan menghasilkan perubahan produktivitas padi sawah irigasi di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi menengah (RCP 4.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.....	418

Gambar 112. Peta proyeksi produktivitas akan menghasilkan perubahan produktivitas padi sawah irigasi di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi tinggi (RCP 8.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM..... 418

BAGIAN I. MODEL

Bab 1.

METEOROLOGI PERTANIAN INDONESIA

Yeli Sarvina

Pendahuluan

Budidaya pertanian adalah proses biologi yang sangat bergantung pada kondisi lingkungan terutama air, tanah dan iklim. Variabilitas musiman iklim dan cuaca berpengaruh terhadap penjadwalan sekaligus efisiensi operational rutin budidaya pertanian seperti penanaman, pembibitan, panen dan juga mempengaruhi kemanjuran penggunaan input pertanian seperti pemupukan, insektisida dan pestisida.

Iklim dan cuaca serta interaksinya dengan budidaya pertanian mulai dari tahapan persiapan sampai panen adalah faktor yang sangat menentukan tingkat produksi pertanian pada berbagai agroekosistem. Sementara itu variabilitas iklim mempengaruhi tingkat produksi antar waktu.

Dalam beberapa dasawarsa belakangan ini perubahan iklim muncul sebagai isu utama dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Permintaan terhadap informasi meteorologi pertanian semakin meningkat seiring dengan banyaknya bencana alam dan kerugian pertanian disebabkan oleh faktor iklim dan cuaca. Variabilitas iklim dan cuaca juga dipengaruhi oleh bagaimana pola hubungan manusia dengan lingkungan. Peningkatan serangan hama dan penyakit pada budidaya

pertanian, peningkatan gagal panen karena kekeringan dan banjir, serta semakin berkurangnya lahan-lahan pertanian di daerah pesisir karena intrusi air laut adalah fenomena yang berkaitan dengan iklim dan cuaca yang mengancam produksi pertanian sekaligus mengancam ketahanan pangan nasional.

Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menyebutkan bahwa banjir dan kekeringan adalah dua bencana dengan tingkat kejadian dan kerugian yang paling besar di Indonesia dengan tingkat kejadian terus menunjukkan *trend* peningkatan. Dalam kurun waktu 2003-2012 tercatat 1766 kejadian kekeringan atau setara dengan 36,6% kejadian bencana di Indonesia dan kejadian banjir tercatat sebanyak 2.698 kejadian atau setara dengan 55,92% dari seluruh kejadian bencana di Indonesia. Sedangkan data areal pertanian yang dilaporkan mengalami kekeringan selama kurun waktu tersebut adalah 2.591.897 ha dan kejadian banjir 2.212.661 ha. Semua kejadian kekeringan dan banjir tersebut tentu menyebabkan kerugian yang tidak sedikit dan pada akhirnya mengancam ketahanan pangan nasional. Sehingga saat ini kebutuhan dan desakan untuk memperbaiki sistem budidaya pertanian menuju pertanian yang adaptif terhadap kondisi iklim dan cuaca terus diupayakan.

Prakiraan kondisi iklim/cuaca dan *early warning system* kejadian iklim ekstrim berpotensi untuk menolong petani untuk mengambil tindakan pencegahan yang diharapkan dapat mengurangi kerugian ekonomi. Ketersediaan informasi cuaca dan iklim yang real time dapat dijadikan dasar kebijakan untuk mengambil keputusan statis dan keputusan strategis. Keputusan strategis meliputi potensi produksi, identifikasi kesesuaian lahan untuk budidaya tanaman tertentu, pemilihan tanaman dan sistem budidaya, pengolahan dan pemasaran produksi pertanian. Sedangkan keputusan taktis meliputi keputusan yang melibatkan ruang lingkup yang luas, operasional harian budidaya yang berfokus pada tanah, tanaman dan pengaturan air.

Peningkatan kebutuhan pangan akibat peningkatan laju penduduk menuntut sistem budidaya pertanian yang efisien dalam menggunakan sumber daya alam, sekaligus bisa menjaga kelestarian lingkungan. Hal ini menuntut adanya layanan informasi meteorologi yang lebih baik seperti prakiraan cuaca, prakiraan iklim, informasi indeks kekeringan, neraca air dan informasi meteorologi pertanian lainnya. Informasi ini diharapkan dapat digunakan untuk perencanaan dan pengambil keputusan yang tepat.

Perencanaan pertanian dan penggunaan teknologi pertanian membutuhkan aplikasi meteorologi pertanian. Meteorologi pertanian dan sistem data sangat diperlukan untuk mempercepat produksi, analisis dan prakiraan efek berbagai keputusan dalam budidaya pertanian, penjadwalan irigasi, perdagangan komoditas pertanian dan pasar, dan berbagai upaya untuk penanganan bencana, konservasi dan perlindungan lingkungan.

Informasi *Agrometeorological* memiliki peranan penting tidak hanya dalam manajemen dan operasional pertanian harian dan musim, tetapi juga berkaitan dengan manajemen risiko dan peringatan dini. Informasi cuaca dan iklim dengan berbagai perkembangan teknologinya serta *database* yang baik dapat digunakan untuk kajian risiko dan kuantifikasi probabilitas yang terkait variabilitas iklim dan cuaca. Implikasi yang sangat besar tidak hanya untuk layanan penyuluhan pertanian, yang menghubungkan hasil-hasil penelitian terbaru dan penerapan operasional di lapangan, tetapi juga untuk para pengambil keputusan yang bertanggung jawab untuk menjaga ketahanan pangan. Informasi meteorologi pertanian tersebut memungkinkan peluang perencanaan jangka panjang yang lebih baik.

Seiring dengan semakin meningkatnya kesadaran akan pentingnya informasi meteorologi pertanian, secara garis besar berikut adalah hal-hal yang harus tercakup dalam meteorologi pertanian:

- (1) Informasi meteorologi pertanian diharapkan dapat mengurangi dampak bencana dalam pertanian seperti kekeringan, banjir termasuk di dalamnya serangan hama dan penyakit tanaman
- (2) Sistem peringatan dini dan monitoring
- (3) Prakiraan cuaca jangka pendek dan menengah
- (4) Prakiraan dan prediksi iklim
- (5) Informasi yang membantu mengurangi kontribusi sektor pertanian dalam *global warming*

Definisi Meteorologi Pertanian dan Ruang Lingkup

Meteorologi pertanian didefinisikan sebagai semua informasi meteorologi pertanian dan klimatologi yang dapat diaplikasikan dan digunakan secara langsung dalam budidaya pertanian secara umum, dengan tujuan untuk memperbaiki dan meningkatkan produksi pertanian baik kualitas maupun kuantitas, peningkatan pendapatan dari peningkatan produksi dan sekaligus menjaga kelestarian sumber daya alam (Sitger, 2004).

Dalam bahasa sederhana meteorologi pertanian adalah pemanfaatan informasi meteorologi yang berhubungan dengan pengaruh iklim/cuaca dalam budidaya pertanian. Meteorologi pertanian fokus terhadap proses fisik lingkungan yang dapat dimanfaatkan atau diexploitasi untuk menyelesaikan berbagai masalah yang berhubungan dengan produksi pertanian

Berbagai komponen dan aspek yang menentukan perkembangan meteorologi pertanian (WMO, 2009)

- (1) Peralatan dan instrumen yang canggih
- (2) Sistem manajemen data dan prosedur yang modern
- (3) Riset dan penelitian
- (4) Model simulasi (*modeling*)
- (5) Strategi adaptasi meteorologi pertanian untuk menghadapi variabilitas dan perubahan iklim

- (6) Perbaikan deminasi pertanian
- (7) Pendidikan dan *training*

Bericara tentang meteorologi pertanian tidak pernah lepas dari data pengamatan. Data dan informasi meteorologi pertanian dapat dilihat dari awal data dikumpulkan yang diukur melalui berbagai instrument dan berbagai teknik seperti data observasi permukaan menggunakan stasiun iklim otomatis maupun data observasi radar dan satelit. Agrometeorologi data dikumpulkan dalam bentuk data jam-jaman maupun harian tergantung pada tipe stasiun pengamatan (manual atau otomatis). Pada saat ini kemajuan teknologi untuk pengiriman data dan informasi secara elektronik telah membuka peluang yang sangat luas untuk menyampaikan informasi secara tepat waktu dan efektif.

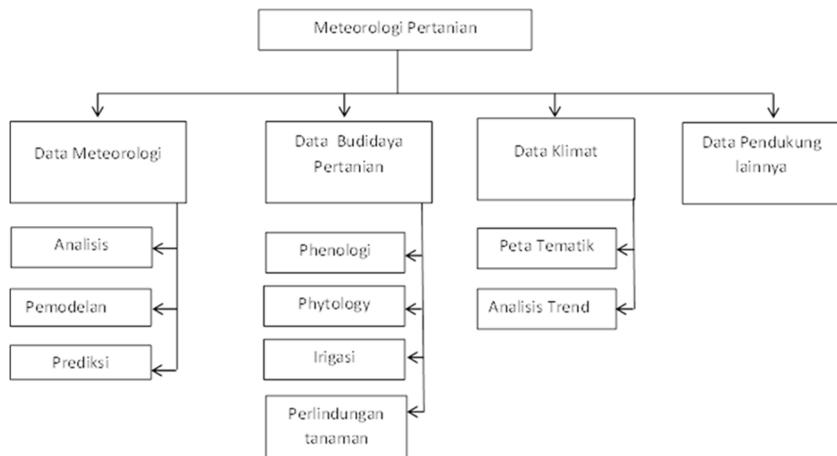
Data dalam meteorologi pertanian memiliki ruang lingkup yang cukup besar dan sangat beragam. Penggunaan data tergantung kepada aplikasi dan tujuan yang ingin dicapai. Data dasar yang umum digunakan dalam meteorologi pertanian adalah data runut waktu (*time series data*), data spasial dan data *phenology* tanaman. Untuk aplikasi dan analisis lain yang lebih kompleks data produksi tanaman dan peternakan, data irigasi dan berbagai informasi terkait budiaya pertanian sangat dibutuhkan.

Secara umum data meteorologi pertanian mencakup data yang berhubungan dengan kondisi atmosfir atau sering disebut data meteorologi dan data yang yang menujukkan hubungan tanah dan atmosfir data ini mencakupi data suhu udara, kelembaban, data curah hujan, angin, radiasi matahari, dan kelembaban tanah. Parameter meteorologi dan kegunaanya dalam budidaya pertanian secara spesifik ditampilkan pada Tabel 1. *Agrometeorologist* juga membutuhkan data klimatologi untuk data *atmosphere* tertentu. Data klimatologi adalah data runut waktu panjang biasanya dalam bentuk bulanan dengan standar panjang data 30 tahun (Raymond. 2001).

Data tanah meliputi data kapasitas simpan air tanah, data tekstur tanah, kandungan nutrisi tanah, ph tanah, carbon dan

kedalaman lapisan tanah. Data agronomi tanaman yang dibutuhkan meliputi informasi yang berkaitan dengan budidaya pertanian seperti waktu tanam, jarak tanam, kedalaman tanam, pengamatan *phenology*, data irigasi, pemilihan bibit, data *history* produksi, data hama penyakit, data bibit dan benih, dan data aplikasi pemupukan seperti takaran, jumlah dan waktu pemupukan.

Secara garis besar dari uraian di atas data dalam meteorologi pertanian dapat dibagi dalam empat bagian, data *atmosphere*/meteorologi, data budidaya pertanian, data iklim dan data pendukung lainnya (gambar 1). Data atmosfir atau meteorologi dapat digunakan untuk analisis, pemodelan tanaman dan untuk prediksi. Data budidaya pertanian seperti data *phenology* digunakan untuk menentukan fase tanaman dan umur tanaman, data *phytology* digunakan untuk monitoring hama dan penyakit tanaman sekaligus untuk peringatan dini serangan hama dan penyakit, data irigasi penting untuk mengetahui kebutuhan air tanaman, penjadwalan irigasi dan perhitungan neraca air tanaman, selanjutnya adalah data-data perlindungan tanaman yang bisa dimanfaatkan untuk perencanaan aplikasi pemupukan dan obat-obatan untuk perlindungan tanaman. Data iklim yang merupakan data *time series* dari data-data cuaca dapat digunakan untuk analisis *trend* karakteristik iklim dan produksi suatu wilayah di samping itu juga bisa digunakan untuk pembuatan peta tematik yang penting untuk perencanaan dan operasional pertanian.



Gambar 1 Ruang lingkup meteorologi pertanian

Tabel 1 Parameter meteorologi dan fungsinya untuk aktivitas pertanian

Tipe data	Skala waktu	Aktivitas pertanian
Suhu (global)	Jam-jaman, rata-rata dan ekstrim	penanaman, panen, monitoring cuaca pada tanaman, deteksi kabut dan perlindungannya, pemodelan tanaman, risiko hama dan penyakit, kontrol hama dan penyakit, perhitungan defisit uap air dan perhitungan tingkat pertumbuhan harian
Suhu maksimum	Harian dan ekstrim mingguan	dibutuhkan untuk menentukan kondisi optimum dan non optimum untuk tanaman dan ternak, pemodelan tanaman, pemantauan keadaan ekstrim,
Suhu minimum	Harian dan ekstrim mingguan	dibutuhkan untuk menentukan kondisi optimum dan non optimum untuk tanaman dan ternak, pemodelan tanaman, pemantauan keadaan ekstrim,

Tipe data	Skala waktu	Aktivitas pertanian
		pemantauan pembekuan dan defoliation, prakiraan penutupan salju
Curah hujan	Harian	Penanaman, panen, aplikasi pemupukan, pengolahan tanah, penyemprotan, irigasi, pemanfaatan kondisi cuaca tanaman, pemodelan tanaman, resiko hama dan penyakit proteksi peternakan, pemantauan, kejadian ekstrim (banjir dan kekeringan)
Intensitas curah hujan	15 menitan, jam-jaman	Potensi banjir, erosi, limpasan dan kualitas air
Kelembaban dan titik embun	Jam-jaman	Panen, penentuan potensi pembekuan, polinasi, penyemprotan, kondisi pengeringan, perhitungan defisit uap air, potensi <i>stress</i> tanaman dan perhitungan PET
Hujan es	Jam-jaman	kerusakan tanaman, kajian risiko dan dampak pengurangan produksi
Suhu inversi	Jam-jaman	Penyemprotan dari udara, perlindungan dari kabut
Tekanan atmosphere	Jam-jaman	<i>Monitoring</i> keadaan tanaman secara umum.
Penutupan awan	Jam-jaman	Aplikasi pemupukan, penyemprotan dan perhitungan PET
Ketinggian awan	Jam-jaman	Aplikasi pemupukan dan penyemprotan
Keadaan cuaca sesaat	Jam-jaman	Perkiraan penutupan salju, kerja lapangan, potensi <i>stress</i> tanaman

Tipe data	Skala waktu	Aktivitas pertanian
Kecepatan angin	Jam-jaman	Panen, penentuan potensi pembekuan, polinasi, penyemprotan, kondisi pengeringan, perhitungan defisit uap air, potensi stress tanaman, perhitungan PET dan badai
Arah angin	Jam-jaman	Potensi pembekuan, udara dingin dan hangat di atas area pertanaman
<i>Soil moisture</i>	Harian	Penanaman, panen, pemupukan, pemodelan tanaman, transplant, penyemprotan, irrigasi, pemantauan kondisi pertumbuhan dan indeks stress tanaman
Radiasi dan lama penyinaran	Harian	Pemodelan tanaman, penanaman dan panen
Badai	Harian	Pemantauan kondisi tanaman, kajian produktivitas dan risiko kerusakan tanaman, perlindungan sumber daya
Kekuatan badai	Harian	Manajemen risiko, potensi banjir dan pemantauan kekeringan
Suhu tanah	Harian	Penanaman, pemodelan tanaman, transplanting dan pemupukan
Evaporasi	Harian	Pengaturan jadwal irrigasi, perhitungan neraca air, dan kebutuhan air tanaman

Informasi dan Pelayanan Meteorologi Pertanian

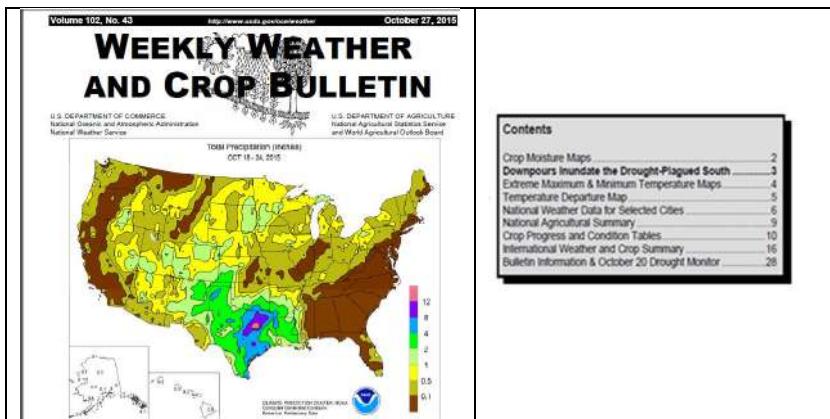
Histori data (data lampau)

Data klimatologis runut waktu yang panjang, baik dalam bentuk mentah maupun yang sudah diolah dapat disajikan dalam berbagai bentuk tergantung pada tujuan dan pengguna akhirnya. Sivakumar (2006) merinci penyajian dan pemanfaatan data meteorologi pertanian sebagai berikut:

- (1) Data mentah dan *quality control data*.
- (2) Informasi ini meliputi nilai rata-rata, nilai normal, distribusi frekuensi, nilai ekstrim, indeks kekeringan, defisit kelembaban tanah, indeks panas (*degree days*), biometeologi indeks dan indeks klimatologis tanaman.
- (3) *Sequence* waktu meteorologi pertanian
- (4) Membandingkan data pada suatu periode tertentu dengan periode sebelumnya. Sehingga informasi peningkatan atau penurunan bisa diperoleh (informasi *anomaly* iklim). Analisis ini bisa dilakukan dalam bentuk bulanan, tahunan, perlama tahunan atau persepuluh tahunan.
- (5) *Spatial analysis* meliputi analisis model, data grid dan peta tematik meteorologi pertanian
- (6) Regresi atau menghubungkan data meteorologi dengan data pengamatan tanaman seperti produksi, indeks kualitas, kejadian serangan hama penyakit dll.

Informasi-informasi diatas dapat disajikan dalam buletin agrometeorologi, publikasi atau disajikan dalam website mingguan, per dua mingguan atau bulanan. Salah satu contoh buletin agrometeorologi disajikan pada gambar 2. Informasi dalam buletin ini disajikan secara spasial dalam bentuk map yaitu informasi mengenai tingkat kelembaban, genangan, suhu minimum dan maksimum, ringkasan mengenai kondisi pertanian

nasional, perkembangan tanaman, cuaca internasional dan ringkasan pertanaman serta monitoring kekeringan.



Gambar 2 Contoh buletin agrometeorologi yang di keluarkan oleh USDA

Prakiraan Iklim untuk Pertanian

Salah satu kebutuhan penting pertanian adalah prakiraan iklim yang akurat karena hal ini dapat menolong petani untuk mengambil keputusan yang tepat, seperti keputusan tentang tanaman apa yang akan dibudidayakan, sistem dan metode yang akan digunakan serta kapan akan dilaksanakan. Hal ini harus diputuskan dengan baik sebelum proses budidaya. Kebutuhan skala waktu informasi prakiraan dapat bervariasi dari mulai prakiraan tahunan, musim, dan prakiraan dalam musiman, bulanan, dasarian bahkan perlama harian. Dalam proses budidaya pun, petani membutuhkan informasi prakiraan iklim/cuaca. Terutama pada fase-fase pertumbuhan tamanan yang kritis terhadap cekaman air dan iklim.

Prakiraan Iklim Jangka Pendek dan Menengah

Prakiraan cuaca 5-10 hari kedepan untuk semua parameter yang berhubungan dengan perkembangan dan pertumbuhan tanaman sangat berguna untuk mengambil keputusan taktis.

Informasi Meteorologi untuk Mengurangi Bencana pada Budidaya Pertanian

Bencana alam memainkan peranan penting dalam perkembangan pertanian. Kerugian ekonomi yang disebabkan oleh bencana alam terus meningkat. *Impact* iklim ekstrim pada lahan pertanian terus meningkat. Survei *impact* iklim ekstrim di 57 negara di dunia menunjukkan bahwa bencana di lahan pertanian meliputi kekeringan (91%).

Salah satu upaya yang terus dilakukan untuk mengurangi risiko iklim ekstrim di lahan pertanian adalah pengembangan *early warning system* (sistem peringatan dini) banjir, kekeringan dan serangan hama dan penyakit. Berbagai upaya terus dilakukan untuk mengembangkan sistem peringatan dini. Transfer teknologi sistem peringatan dini menjadi perhatian utama.

Disamping itu untuk mengurangi resiko kerugian karena serangan hama dan penyakit, informasi nilai *threshold* parameter iklim yang mendorong penyebaran hama dan penyakit tanaman terus harus diteliti. Model simulasi pada saat ini penggunaan semakin meningkat untuk memprakirakan onset dan tingkat keparahan serangan hama dan penyakit. Di beberapa negara informasi ini sudah digunakan secara online.

Proyeksi Iklim

Salah satu hal yang sangat penting dalam meteorologi pertanian adalah informasi proyeksi iklim ke depan. Informasi ini

sangat penting terkait perencanaan dan strategi adaptasi. Salah satu *tool* yang digunakan untuk mengetahui proyeksi iklim ke depan adalah pemodelan iklim. Pemodelan iklim digunakan untuk menganalisis dan memprediksi perubahan dan variabilitas karakteristik iklim ke depan.

Global circulation model (GCM) adalah comprehensive model iklim yang digunakan untuk mendapatkan informasi tentang kondisi iklim ke depan. GCM merupakan penggambaran matematis dari sejumlah besar interaksi fisika, kimia dan dinamika atmosfer bumi. GCM mempunyai resolusi yang sangat kecil yaitu ratusan kilo meter. Untuk kajian-kajian dampak perubahan iklim, resolusi ini tidak cukup sehingga perlu di downscaling untuk mendapatkan resolusi yang lebih besar. Isu utama GCM adalah adanya gap atau perbedaan antara resolusi *spatial* keluaran model iklim dengan input yang dibutuhkan dalam pemodelan kajian dampak perubahan iklim.

Downscaling adalah teknik yang dikembangkan untuk mengatasi masalah resolusi pada model iklim. Proses ini menghubungkan skala global dan lokal. Dua pendekatan *downscaling* yang dikembangkan adalah *statistical* dan *dynamical downscaling*. *Statistical downscaling* adalah teknik downscale dengan mencari hubungan antara parameter iklim lokal (predictand) dan parameter iklim global (predictor).

Saat ini berbagai studi dan penelitian terkait metode *downscaling* terus dilakukan. Banyak metode *downscaling* yang telah diterapkan. Pemilihan metode *downscaling* tergantung pada tujuan studi dan penelitian dan untuk apa data *downscaling* akan digunakan (Wilby *et al.* 2004).

Meteorologi Pertanian di Indonesia (*State Of The Art*)

Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan Kementerian Pertanian adalah dua lembaga yang saling berkait

dalam pelayanan meteorologi pertanian di Indonesia. Undang-undang No. 31 Tahun 2009 adalah Peraturan yang Menjelaskan Penyelenggaraan Kemeteorologian, Klimatologi, dan Geofisika. Lebih lanjut dijelaskan bahwa BMKG adalah satu-satunya lembaga yang bertanggung jawab dalam memberikan pelayanan informasi meteorologi, klimatologi dan geofisika. Pelayanan publik yang dimaksud dalam peraturan ini mencakup prakiraan cuaca, prakiraan musim, prakiraan gelombang laut, potensi kebakaran hutan, informasi kualitas udara, informasi gempa bumi dan informasi terkait lainnya. Selanjutnya Undang-Undang No 31 Tahun 2014 mengatur lebih lanjut bahwa pelayanan meteorologi harus meningkatkan pelayanannya secara luas, cepat, tepat, akurat dan mudah dipahami.

Berkaitan dengan meteorologi pertanian, BMKG menyediakan informasi terkait prakiraan iklim yang meliputi awal musim hujan, sifat curah hujan (normal, di bawah normal dan di atas normal), prakiraan hujan bulanan, *outlooks elnino*, informasi hari tanpa hujan, neraca air, dinamika atmosfir, potensi banjir, analisa kejadian iklim ekstrim, indeks presipitasi terstandarisasi, informasi suhu muka laut, informasi indeks elnino dan informasi perubahan iklim.

Prakiraan curah hujan yang dikeluarkan BMKG disajikan berdasarkan zonasi musim (ZOM). BMKG terus melakukan pemuktahiran ZOM. Berdasarkan data historis tahun 1981-2010, BMKG membagi wilayah Indonesia menjadi 342 ZOM dan 65 daerah non ZOM. Hal ini merupakan hasil pemuktahiran yang sebelumnya hanya 220 ZOM.

Disamping pelayanan informasi, berbagai upaya penelitian dan pengembangan bidang meteorologi pertanian pun terus dilakukan. Penelitian terkait bagaimana mengaplikasikan informasi-informasi meteorologi untuk peningkatan produksi pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pertanian melalui Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi memiliki tugas melakukan penelitian terkait pemanfaatan

informasi iklim, cuaca dan air untuk pertanian. Baliklimat juga mempunyai sistem pengamatan iklim dan cuaca di sentra-sentra pertanian. Sesuai mandatnya informasi dan data pengamatan ini digunakan untuk mendukung berbagai kegiatan penelitian.

Pusat Penelitian Air Kementerian Pekerjaan Umum adalah lembaga penelitian lain yang juga terkait dengan meteorologi pertanian dalam hal ini khususnya dalam pengelola air dan irigasi. Pekerjaan umum juga mempunyai jaringan pengamatan cuaca/iklim, stasiun/pos pengamatan hujan dan pengamatan muka air.

Di samping itu berbagai data satelit dan penginderaan jauh pun sudah banyak dimanfaatkan untuk pengembangan pertanian. Lembaga terkait yang mengelola data satelit dan penginderaan jauh di Indonesia adalah Lembaga penerbangan Nasional (LAPAN). Salah satu produk LAPAN yang sangat penting untuk meteorologi pertanian adalah informasi SADEWA (*Satelite Disaster Early Warning system*).

Pengembangan *standing crop* oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian bekerjasama dengan LAPAN adalah salah contoh pemanfaatan citra satelit untuk pengamatan kondisi pertanaman di wilayah Indonesia. Hasil monitoring ini kita dapat mempunyai informasi kondisi pertanaman terutama padi.

Peran perguruan tinggi, sebagai lembaga tinggi tentu tidak bisa dielakkan. Institut Pertanian Bogor (IPB) dan Institut teknologi Bandung (ITB) adalah dua universitas yang juga melakukan riset dan penelitian terkait dengan aplikasi meteorologi untuk bidang pertanian.

Sekolah Lapangan Iklim

Salah satu kegiatan pelatihan dan pendidikan meteorologi pertanian yang sudah dikembangkan di Indonesia adalah sekolah lapangan iklim (SLI). SLI ini menjembatani peningkatan pemahaman mengenai informasi iklim bagi para petugas di

lingkungan dinas pertanian daerah, penyuluh dan petani. Boer (2009) menyatakan bahwa tujuan pelaksanaan SLI adalah meningkatkan kemampuan petani tentang iklim dan kemampuan mengatasi iklim ekstrim, membantu petani mengamati unsur iklim dan menggunakannya dalam mendukung usaha tani mereka, serta membantu petani menerjemahkan informasi prakiraan iklim untuk menyusun strategi budidaya lebih tepat.

Pengembangan SLI yang telah mencakup seluruh wilayah Indonesia, ini menunjukkan bahwa perkembangan meteorologi pertanian telah melangkah dari teori menuju aplikasi dan diseminasi informasi iklim melalui pengembangan kapasitas petani. Kementerian pertanian telah melaksanakan SLI sejak tahun 2007.

Lembaga yang selama ini terlibat dalam pengembangan sekolah lapangan iklim adalah BMKG, kementerian pertanian, perguruan tinggi dan lembaga swadaya masyarakat. Secara umum, materi SLI terdiri dari materi tentang konsep dasar prakiraan musim misalnya konsep peluang, istilah dalam prakiraan musim, informasi prakiraan yang dikeluarkan BMKG, dan pergeseran musim terkait dengan perubahan pola tanam. Selanjutnya adalah materi tentang pemanfaatan data historis pertanian seperti data kejadian kekeringan, banjir, dan panen, untuk menilai dampak dari keragaman iklim atau kejadian iklim ekstrim—khususnya kekeringan dan banjir—di daerah itu dan pengenalan beberapa teknologi sederhana untuk mengatasi kekeringan, seperti pemanenan air hujan. Materi lain yang dikembangkan adalah materi tentang pemanfaatan informasi prakiraan iklim misalnya untuk menentukan strategi pola tanam dan rotasi tanaman.

Tantangan Meteorologi Pertanian Indonesia

Saat ini informasi dan data meteorologi baik secara spacial maupun temporal di sentra-sentra pertanian sangat terbatas. Selama ini pengembangan jaringan pengamatan meteorologi dititikberatkan untuk pengembangan transportasi. Walaupun saat ini pengembangan jaringan untuk pertanian sudah mulai dilakukan. Di samping masalah jaringan pengamatan yang masih terbatas, manajemen data dan *database* juga menjadi kendala utama. Koordinasi berbagai lembaga terkait dalam hal ini lembaga pertanian dan lembaga pelayanan informasi meteorologi baik ditingkat nasional maupun tingkat lokal serta komunikasi dengan *end user* dalam hal ini petani masih harus ditingkatkan. Alur komunikasi yang jelas harus menjadi perhatian.

Diseminasi informasi meteorologi pertanian harus terus diperbaiki. Penentuan siapa target informasi yang disajikan menjadi sangat penting. Apakah informasi yang disajikan untuk lembaga pemerintah, pertanian skala besar, pengambil kebijakan, penyuluh atau petani. Sivakumar (2006) melaporkan bahwa evaluasi yang dilakukan oleh WMO menggarisbawahi bahwa tidak ada usaha yang sistematis untuk mengetahui *feedback* atau umpan balik dari *end user* atas informasi yang disajikan. Sehingga sangat sulit untuk mengetahui apakah informasi yang disajikan tepat sasaran atau tidak.

Setelah penentuan target yang tepat, penyajian informasi yang tepat, yang mudah dimengerti dan diaplikasikan dilapangan menjadi sangat penting. Pengembangan kapasitas dan pengetahuan petani (*user awareness*) tentang meteorologi pertanian menjadi salah satu tantangan. Seminar dan *workshop* harus dilakukan untuk menambah kapasitas pengguna. Katalog dan petunjuk manual produk meteorologi pertanian harus semakin mudah di akses dan dimengerti.

Dengan berbagai kendala yang ada, meteorologi pertanian kedepan menghadapi tantangan untuk menyajikan data *real time*

resolusi tinggi, prediksi iklim dan cuaca dengan tingkat akurasi tinggi sekaligus menghasilkan informasi aplikasi dan operasional di lapangan. Bagaimana mengkonversi informasi meteorologi ke dalam informasi agronomi sehingga bisa dimengerti dengan mudah oleh masyarakat non meteorologi dalam hal ini petani dan pengambil kebijakan.

Empat hal yang bisa dilakukan untuk meningkatkan pemanfaatan meteorologi pertanian ke depan adalah :

- (1) *Database* iklim yang mencakupi keragaman kewilayah dan waktu sehingga dapat mendukung pengguna yang lebih luas
- (2) Informasi meteorologi pertanian yang lebih interaktif dengan memanfaatkan kemajuan media informasi dan teknologi sehingga informasi yang disampaikan dapat diterima dengan baik
- (3) Program penelitian yang terkait aplikasi informasi iklim yang berhubungan dengan pemanfaatan sumber daya pertanian dan kebutuhan ekonomi
- (4) Program pendidikan yang menyediakan pelatihan, materi pelatihan, *workshop* untuk meningkatkan pemanfaatan informasi iklim dan cuaca di semua subsektor pertanian dan semua *user*, dan kolaborasi aktif antara lembaga meteorologi dan hidrologi, lembaga penelitian pertanian, lembaga penyuluhan pertanian dan organisasi pemerintah lainnya dalam pengembangan layanan dan informasi meteorologi yang tepat serta pengembangan proses komunikasi yang lebih baik terhadap pengguna (*end user*), sangat diperlukan.

DAFTAR BACAAN

- Boer, Rizaldi. 2009. Sekolah Lapangan Iklim Antisipasi Risiko Perubahan Iklim. Buletin Salam.
- Raymond P. Motha. 2001. Establishing and Improving Linkages between National Weather Service and Agricultural Sektor: A USDA Perspective. USDA
- Sivakumar, M.V.K. 2006. Dissemination and communication of agrometeorological information_global perspective. Meteorol.Appl.(supplement), 21-30 (2006).
- Stigter, C.J. 2004. From basic agrometeorological science to agrometeorological services and information for agricultural decision-makers: a simple diagnostic and conceptual framework. An Editorial. Agricultural and Forest Meteorology, in print Raymond P. Motha. Establishing and Improving Linkages between National Weather Service and Agricultural Sektor: A USDA Perspective. USDA.
- WMO. 2009. Guideline for the education and training of personnel in Meteorology and Operational Hydrology volume 1. WMO.Geneve-Switzerland.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L.O., 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the inter-governmental panel on climate Changde

Bab 2.

MODEL PERUBAHAN IKLIM UNTUK PERTANIAN

Armi Susandi

Pendahuluan

Saat ini dengan makin tingginya pertumbuhan penduduk, maka kebutuhan pangan nasional akan semakin meningkat. Peningkatan produktivitas pertanian menjadi hal yang wajib untuk ditingkatkan agar dapat memenuhi kebutuhan pangan tersebut. Akan tetapi, dalam upaya meningkatkan produktivitas tersebut, para petani saat ini dihadapkan pada masalah kegagalan tanam dan panen, sehingga program pemerintah dalam bidang ketahanan pangan menjadi terhambat. Di sisi lain, kehidupan ekonomi para petani makin terpuruk karena mereka harus mengeluarkan dana dari setiap kegagalan tanam tersebut.

Sebenarnya, permasalahan di atas bersumber dari kapasitas adaptasi para petani terhadap variabilitas iklim atau kejadian iklim ekstrim yang tergolong rendah. Petani kebanyakan menerapkan sistem perencanaan pertanian berdasarkan asumsi curah hujan seperti masa sebelumnya, terutama di daerah dengan keterbatasan sistem infrastruktur irigasi. Setiap terjadi fenomena El Nino, para petani akan terkena dampaknya dan diikuti oleh terjadinya penurunan signifikan produksi pertanian. Secara

khusus akibat perubahan waktu datangnya hujan, para petani menjadi sulit untuk memprediksi penanaman padi seperti biasanya. Jika terjadi cuaca ekstrim, atau menyulitkan perencanaan pada masa tanam dan panen.

Pokok bahasan pada bab ini akan menjelaskan peran *climate modeling* dalam membantu para petani untuk meningkatkan kapasitasnya menghadapi perubahan pola iklim, khususnya curah hujan. Melalui output yang dihasilkan dari *climate modeling*, para petani akan dapat menentukan strategi yang tepat dalam menghadapi musim tanam. Selanjutnya, hasil *modeling climate change* dan penerapannya pada pertanian akan dikembangkan dalam suatu *interface* berbasis website sehingga pemangku kepentingan akan memperoleh informasi tersebut pada waktunya. Sistem informasi tersebut menggunakan teknologi *Google Maps* yang juga digunakan oleh Kementerian Pertanian dalam mengembangkan sistem informasi Kalender Tanam (KATAM.info). Dengan demikian, *modeling climate change* dan *interface* website ini akan dapat memperkuat sistem KATAM yang telah terbangun tersebut.

Pengembangan *Smart Climate Model* (Model Iklim Cerdas) untuk Pertanian

Model Iklim Cerdas

Model iklim cerdas (*Smart Climate Model*) merupakan sebuah model iklim yang saat ini dikembangkan oleh Laboratorium Aplikasi Meteorologi, Institut Teknologi Bandung. Model ini mampu memprediksi curah hujan skala dasarian dengan resolusi spasial tinggi (tingkat desa) sehingga dapat dimanfaatkan oleh para petani untuk memperkirakan masa tanam padi atau palawija. Untuk menghasilkan hasil proyeksi yang baik, model ini memerlukan 3 langkah analisis, yaitu analisis prediksi awal

berupa pembentukan persamaan model iklim dasarian, analisis anomali dan analisis sifat periodik. Ketiganya digunakan untuk mengoreksi hasil proyeksi satu dengan yang lain sehingga dihasilkan data proyeksi yang stabil dan lebih akurat.

Untuk menghasilkan estimasi masa tanam padi yang didasarkan pada prediksi curah hujan, maka pemodelan iklim yang bisa memprediksi curah hujan merupakan hal pertama yang perlu dilakukan. Model iklim yang baik adalah model iklim yang dapat diimplementasikan oleh pengguna terkait dengan fenomena variabilitas iklim. Model dibuat untuk membuat prediksi secara kuantitatif (deterministik atau probabilistik) yang dapat digunakan baik untuk menguji dan menyempurnakan model sebelumnya, atau untuk digunakan secara praktis (Howison *et al.*, 2005).

Untuk itu, salah satu model stokastik telah digunakan dalam penelitian ini, yaitu model yang mengkombinasikan metode *Non Linier Least Square* dan *Fast Fourier Transform*. Kedua metode tersebut sebenarnya sudah umum digunakan oleh para peneliti untuk melakukan analisis dan prediksi iklim. Namun dalam penelitian ini, terdapat pengembangan terhadap salah satu fungsi matematika yang digunakan, yaitu fungsi deret *Fourier* (*Fourier series*). Deret tersebut dimodifikasi menjadi deret yang tidak linier seperti dalam persamaan (1). Hal ini dimungkinkan agar fungsi tersebut dapat mengikuti variasi curah hujan yang sedemikian tidak linier.

$$a_0 + \sum a_i x \sin(iwx) + \sum b_i \cos(iwx) + f(x) \quad (1)$$

Analisis *Fourier* adalah perangkat penting dalam analisis data iklim. Gunanya adalah untuk memberikan gambaran sifat keperiodikan data iklim menggunakan kombinasi komponen sinusoidal dengan frekuensi berbeda. Amplitudo dan fase setiap komponen dalam deret menentukan kontribusi komponen frekuensi relatif terhadap keseluruhan data.

Untuk mengembangkan model iklim *Fast Fourier Transform*, data curah hujan dan temperatur akan menjadi input model proyeksi musim dan iklim (Susandi *et al.*, 2008). Untuk menghasilkan hasil proyeksi yang baik, model ini memerlukan 3 langkah analisis, yaitu analisis prediksi awal, analisis anomali dan analisis sifat periodik. Ketiganya digunakan untuk mengoreksi hasil proyeksi satu sama lain sehingga dihasilkan data proyeksi yang stabil dan lebih akurat. Langkah-langkah ini didasarkan pada metode inversi untuk mendapatkan model terbaik (Aster, *et al.*, 2005).

(i) Model prediksi awal

Data curah hujan untuk satu lokasi dianalisis dengan *Least Square* untuk menghasilkan kurva *fitting* yang bersesuaian. Persamaan kurva yang dipilih adalah Deret Fourier yang dimodifikasi sedemikian rupa hingga bisa cocok dengan data curah hujan.

(ii) Analisis anomali model

Analisis ini dilakukan untuk melacak perubahan dari waktu ke waktu yang terjadi sehingga *trend* perubahan cuaca itu sendiri dapat teridentifikasi. Untuk mendapatkan data perubahan ini, data lapangan akan direduksi oleh data rata-rata curah hujan. Hasil dari reduksi ini menghasilkan data dengan *noise* yang cukup tinggi sehingga untuk menganalisisnya secara langsung hanya akan memunculkan *error* simpangan yang tinggi pula. Karena pada langkah penelitian ini menitikberatkan pada pelacakan *trend* perubahan data, maka data dapat difilter untuk menghilangkan *noise-noise* tersebut dengan metode *Kalman Filter*. Metode ini dipilih karena metode ini dapat memfilter data dari awal data hingga akhir dengan sempurna. (Tidak seperti metode *smoothing*

data yang hanya baik untuk memfilter pertengahan data) Hasil filter ini akan dianalisis lebih lanjut menggunakan analisis kurva *fitting* seperti langkah pertama sehingga memberikan *trend* perubahan curah hujan yang akan digunakan dalam koreksi data prediksi sebelumnya.

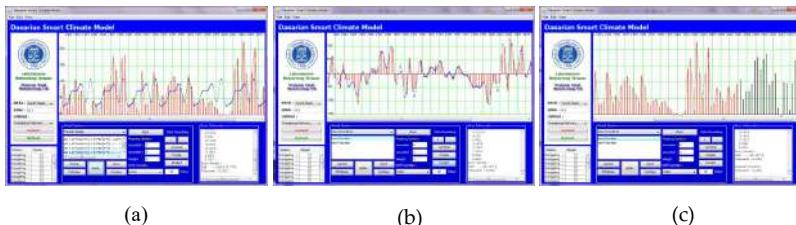
(iii) Analisis sifat periodik

Analisis sifat periodik data dilakukan untuk memberikan informasi waktu berulangnya suatu simpangan curah hujan berskala besar yang diduga akibat suatu fenomena alam, misalnya La-Nina dan El-Nino. *Fast Fourier Transform* diskrit digunakan untuk mengubah data curah hujan domain waktu (*time series*) menjadi data frekuensi curah hujan. Perubahan yang signifikan dengan periode tertentu akan dipilih secara manual sebagai bahan koreksi data prediksi dalam kurun waktu jangka panjang.

Selanjutnya, pemetaan kontur curah hujan yang dihasilkan dari hasil prediksi dilakukan untuk suatu wilayah dengan menggunakan metode *Universal Kriging*. Metode *universal* dipakai karena memberikan keleluasan dalam menentukan tingkat kemiringan distribusi data (curah hujan) atau fungsi *drift* yang berbentuk polinomial orde n . Penentuan fungsi *drift* ini sendiri ditentukan dengan mengacu data citra satelit untuk daerah tersebut. Geostatistika merupakan prosedur statistik untuk menggambarkan korelasi spasial dari variabel-variabel yang terdistribusi secara acak (juga dinamakan dengan variabel terregionalisasi) dan untuk melakukan interpolasi dan prediksi area dari variabel-variabel ini.

Gambar 1 menunjukkan *interface climate smart model* yang telah dikembangkan oleh Laboratorium Aplikasi Meteorologi, ITB. *Interface* model terdiri dari tiga bagian, yaitu: model awal, model anomali dan model akhir. Pada model awal, data curah hujan dianalisis menggunakan *Fourier function* orde ke-5. Selanjutnya,

residu dari data curah hujan terhadap kurva *Fourier function* tersebut didekati menggunakan model anomali. Sehingga pada model akhir diperoleh fungsi gabungan antara model awal dan model akhir yang memiliki akurasi paling tinggi dari kedua model sebelumnya.



Gambar 3. *Climate Smart Model*: (a) model awal, (b) model anomali dan (c) model prediksi.

Proses Verifikasi terhadap Hasil Prediksi Model Iklim

Proses verifikasi dilakukan dengan menggunakan *R-Square*, *R-Skill* dan *RMSE* (Root Mean Square Error) (Gambar 2). Metode ini dilakukan dengan membandingkan antara hasil prediksi dengan data observasi iklim. Karena dalam penelitian ini, parameter yang digunakan adalah curah hujan, maka verifikasi digunakan untuk menghitung mengukur ketepatan antara hasil prediksi curah hujan dengan data curah hujan pada waktu dan lokasi yang sama.

Sebagai contoh perhitungan *R-Square*, Gambar 2. Menunjukan deret waktu data curah hujan tahun 1982 hingga tahun 2013. Data curah hujan yang dimasukkan ke dalam *database* adalah 1982 hingga 2012. Karena prediksi juga dilakukan pada waktu-waktu ke belakang, maka perbandingan antara prediksi tersebut terhadap data curah hujan selama kurun waktu 1982-2012 dapat dilakukan.

Untuk perhitungan *R-Skill*, data curah hujan yang dimasukkan ke dalam *database* adalah 1982 hingga 2012 untuk memprediksi

dari sejak tahun 2013 hingga tahun mendatang. Oleh karena itu, akan terdapat tahun yang sama antara tahun data dengan tahun prediksi, yaitu tahun 2013. Data dan hasil prediksi curah hujan pada tahun ini selanjutnya dikorelasikan, sehingga akan diperoleh suatu hasil korelasi, yang dinamakan dengan *R-Skill* hasil prediksi. Menurut para ahli, bahwa korelasi antara hasil prediksi dengan data, yang lebih tinggi dari 0,8 yang paling baik, sedangkan jika nilai korelasi adalah kurang dari 0,5, maka akurasi model prediksi adalah lemah (McLean, 2006).

1. R-Square



2. R-Skill



3. RMSE



Gambar 4. Proses verifikasi model iklim dengan data observasi.

Sedangkan untuk perhitungan *RMSE* (*Root Mean Square Error*), perhitungan dilakukan pada tahun yang sama antara hasil prediksi dengan data curah hujan. Hasil *RMSE* akan menunjukkan seberapa besar kesalahan antara hasil prediksi dan data curah hujan tersebut. Dari ketiga metode verifikasi tersebut, berikut ini

ditunjukkan contoh hasil verifikasi di wilayah Indramayu yang ada pada Tabel 1.

Tabel 2. Hasil verifikasi hasil prediksi curah hujan dasarian

No	Stasiun	R-Square	R-Skill	RMSE
1	Anjatan	0,77	0,74	65,44
2	Bondan	0,76	0,82	31,23
3	Bugel	0,72	0,73	35,10
4	Cidempet	0,76	0,79	49,55
5	Cikedung	0,77	0,68	43,43
6	Gabuswetan	0,79	0,76	34,55
7	Indramayu	0,80	0,77	50,86
8	Jatibarang	0,74	0,70	46,03
9	Jutinyuat	0,82	0,65	65,11
10	Kedokan Bunder	0,81	0,73	44,60
11	Krangkeng	0,81	0,63	53,56
	Rata-rata	0,78	0,73	47,22

Berdasarkan Tabel 1 tersebut, terlihat bahwa R-Square dan R-skill menunjukkan hasil secara rata-rata mendekati hasil sangat baik, Dapat dikatakan bahwa model tersebut sangat baik untuk dapat diterapkan, begitu pada simpangan data (RSME) menunjukkan hasil yang tidak begitu besar dan layak untuk digunakan.

Proses Validasi terhadap Hasil Prediksi Model Iklim

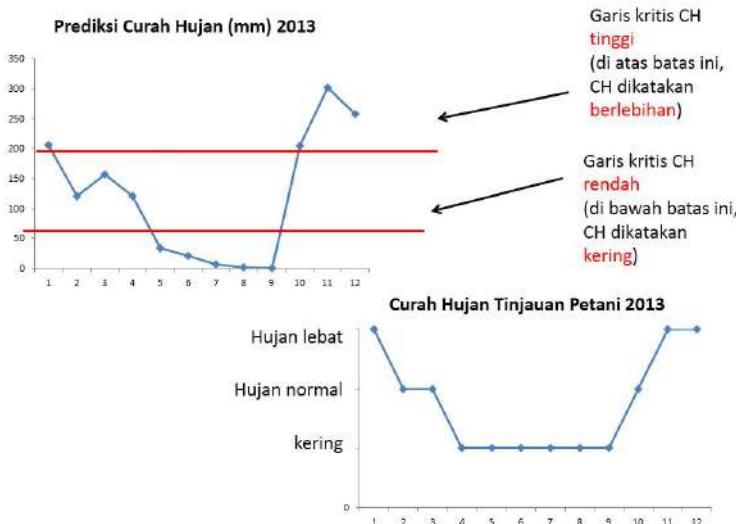
Selain verifikasi, karena hasil prediksi model akan diimplementasikan oleh masyarakat, maka sangat direkomendasikan untuk melakukan validasi. Validasi tersebut dilakukan dengan cara membandingkan hasil prediksi model

dengan hasil pengamatan masyarakat di lapangan. Sebagai contoh ditunjukkan pada Gambar 3, dimana hasil prediksi tahun 2013 akan dibandingkan dengan hasil pantauan masyarakat selama tahun 2013. Validasi ini dapat dilakukan untuk hasil prediksi dasarian maupun bulanan. Dengan kriteria yang sama dengan proses *R-Square* dan *R-Skill*, akan diperoleh derajat akurasi validasi dari nilai 0 hingga 1. Jika hasil validasi mendekati satu (atau 100%), maka hasil prediksi model sangat baik. Selanjutnya, validasi dilakukan baik untuk prediksi parameter curah hujan maupun prediksi masa tanam.



Gambar 5. Proses validasi hasil prediksi *climate smart model*

Proses validasi lapangan dilakukan dengan metode pengisian kuesioner oleh sejumlah responden (petani). Para petani memberikan informasi intensitas curah hujan yang dikategorikan menjadi tiga sifat hujan; hujan lebat, normal dan kering. Hujan lebat memiliki intensitas curah hujan di atas 199 mm, hujan normal memiliki intensitas 50–199 mm, sedangkan kering di bawah 50 mm. Hal ini dilakukan untuk mempermudah petani dalam penentuan besarnya curah hujan yang telah terjadi.



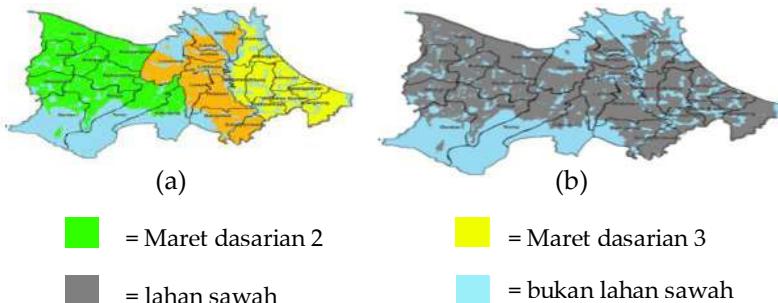
Gambar 6. Proses validasi lapangan.

Berikut ini ditampilkan contoh validasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Pada contoh tersebut, ketepatan model mencapai 83%. Prediksi pada bulan April dan Oktober tidak sesuai dengan kriteria petani. Pada bulan April hasil model menunjukkan intensitas curah hujan di bawah 50 mm, sedangkan menurut petani pada bulan April memiliki curah hujan normal (50–200 mm). Bulan Oktober merupakan bulan basah yang memiliki intensitas curah hujan tinggi (>199 mm), tetapi menurut para petani pada bulan ini hanya terjadi hujan yang normal.

Peta Kalender Masa Tanam Padi

Untuk mendapatkan peta estimasi masa tanam padi skala dasarian di wilayah Indramayu, akan dilakukan metode *overlay* antara peta lahan sawah dengan peta prediksi curah hujan dasarian. *Overlay* ini menerapkan teori *threshold* padi yang menyatakan bahwa jika curah hujan pada dasarian pertama dan

kedua mencapai jumlah sebesar 50 mm/dasarian, maka sawah tersebut sudah dapat untuk ditanami padi. Proses pemetaan ini akan memerlukan peta lahan sawah, peta administratif skala desa, dan peta prediksi curah hujan skala dasarian.



Gambar 7. Contoh peta prediksi masa tanam padi pada musim kemarau (MK) 2014 di Kabupaten Indramayu: (a) sawah Indramayu, (b) peta sawah Indramayu + prediksi masa tanam padi

Berikut ini ditunjukkan peta prediksi masa tanam pada musim kemarau 2014 yang dapat dilihat pada Gambar 5. Terlihat pada musim hujan ini, wilayah Kabupaten Indramayu dibagi menjadi 3 waktu tanam. Pada dasarian 2 bulan Maret 2014, awal masa tanam padi dapat dilakukan untuk di kecamatan Sukra, Anjatan, Haurgeulis, Gantar, Kroya, Terisi, Cikedung, Gabuswetan, Kandanghaur, dan Bongas. Untuk dasarian 3 Maret 2014, wilayah yang bisa mulai tanam yaitu kecamatan Indramayu, Balongan, Sliyeg, Jutinyuat, Karangampel, Kertasemaya, Kedokan Bunder, dan Krangkeng.

Pengembangan Interface Sistem Informasi Kalender Tanam Padi

Pada sub-bab ini dijelaskan salah satu pengembangan sistem informasi masa tanam, khususnya padi, menggunakan teknologi *Google Maps* yang bisa terhubung secara *online*. *Google Maps* adalah sebuah jasa *global virtual* dan *online* yang disediakan oleh *Google* dan dapat ditemukan pada halaman web <http://maps.google.com>. *Google Maps* menyediakan gambar yang memiliki resolusi tinggi dari satelit untuk menunjukkan daerah-daerah di seluruh bagian bumi, termasuk di wilayah Indonesia (Wikipedia).

Seperti banyak aplikasi web *Google* lainnya, *Google Maps* juga menggunakan *JavaScript* secara ekstensif. Tujuan penggunaan *Google Maps* API adalah mengetahui lokasi, mencari alamat, mendapatkan petunjuk arah dan lain sebagainya. Hampir semua hal yang berkaitan dengan peta dapat memanfaatkan teknologi *Google Maps*.

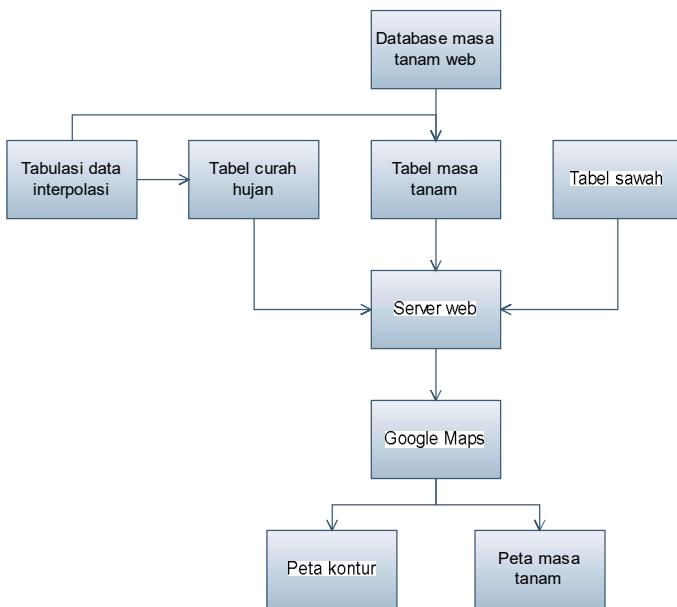
Salah satu contoh pemanfaatan *Google Map* pada bidang pertanian adalah memberikan informasi mengenai risiko atau ancaman terhadap tanaman di dunia yang terancam punah. Pengembangan yang melibatkan kerjasama Kew, *International Union for Conservation of Nature* (IUCN), dan *Natural History Museum*, London, telah dapat melakukan analisis dalam memetakan secara tematik mengenai tanaman yang diperlukan untuk segera dikonservasi. Peta interaktif ini mampu memberikan gambaran yang cukup baik mengenai profil tanaman dan juga detail dari persentase jumlah spesies tanaman yang terancam di setiap negara.

Berikut ini akan dijelaskan pengembangan *website* untuk informasi masa tanam dari aspek pembangunan database dan pengembangan *interface* yang mengacu pada sistem database yang telah dibangun.

Konsep Database untuk Pengembangan Sistem Informasi Masa Tanam Padi

Untuk membuat suatu *website* yang dapat berisi ratusan hingga ribuan data, maka peranan *database* sangat diperlukan. Hal ini pun juga dilakukan pada *website* informasi pertanian yang dipastikan akan banyak data informasi curah hujan dan masa tanam. Pada contoh *database* yang akan ditunjukkan, data informasi curah hujan dihasilkan dari hasil prediksi *climate smart model*. Pembuatan *database* menggunakan *MySQL*. Sistem database ini merupakan sistem manajemen *database* yang gratis, *open source*, *multithreaded*, dan dapat digunakan secara *multi user*. Sistem database *MySQL* sangat handal digunakan baik dalam versi *desktop* maupun *web based platform* (Bassil, 2012).

Data hasil prediksi curah hujan di suatu desa merupakan hasil interpolasi dari hasil prediksi curah hujan di titik-titik stasiun yang ada di suatu wilayah. Dalam contoh ini adalah wilayah Indramayu. Data hasil interpolasi curah hujan dikonversi menjadi tabel *database* yang kemudian dimasukkan ke dalam *webserver*. Peta sawah hasil digitasi juga dimasukkan ke dalam *webserver* dengan nama *file* sesuai dengan nama pada table *database*. Peta sawah yang ditampilkan merupakan peta sawah yang sudah di *overlay* dengan peta administrasi desa dan *Google Maps*, sehingga terlihat jelas batas-batas administrasi peta sawah tersebut (lihat Gambar 6).



Gambar 8. Diagram alir pembuatan *database* untuk aplikasi website

Gambar 7 merupakan salah satu contoh tabel curah hujan skala dasarian yang dapat digunakan untuk menentukan masa tanam padi di wilayah Indramayu. Dengan menggunakan informasi ini, maka para petani dapat memperkirakan waktu untuk mulai mengolah lahan sawah, penyemaian bibit, dan melakukan tanam padi. Data prediksi curah hujan tersebut ditampilkan dalam *website* informasi pertanian dengan menggunakan fitur API *Google Maps* sebagai basis pemetaan. Sedangkan bahasa pemrograman *web* yang digunakan adalah PHP dan didukung oleh *Javascript*. Bahasa pemrograman ini sangat powerful digunakan dalam server yang kemungkinan bisa terjadi *overload* (Qadeer, 2012). Untuk menampilkan peta curah hujan di atas layer *Google Maps*, maka format file yang diperlukan adalah *KML*. Format *KML* yang terkombinasi dengan *geobrowsers* tersebut merupakan cara

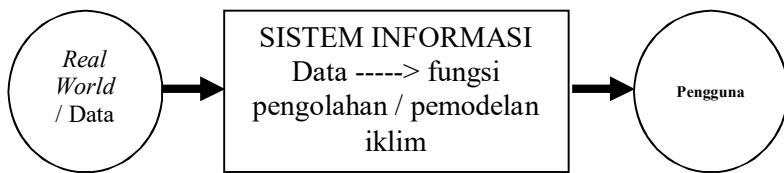
pemetaan tematik yang sangat potensial untuk dikembangkan, akan tetapi terdapat beberapa fungsi yang perlu diperbaiki (Sandvik, 2008).

1	1	0	12/2014	1	1	2015	3	10	2014	2	
2	2	0	12/2014	2	11	2014	2	11	2014	3	
3	3	0	12/2014	3	12	2014	2	10	2014	1	
4	4	1	12/2014	3	12	2014	2	10	2014	1	
5	5	2	12/2014	3	12	2014	2	10	2014	1	
6	6	2	12/2014	3	12	2014	2	10	2014	1	
7	7	20	12/2014	1	11	2014	3	11	2014	2	
8	8	20	12/2014	1	11	2014	3	9	2014	2	
9	9	20	12/2014	1	11	2014	1	12	2014	3	
10	10	20	12/2014	2	11	2014	2	3	2014	2	
11	11	0	12/2014	2	11	2014	3	1	2015	2	
12	12	0	12/2014	2	11	2014	3	1	2015	2	
13	13	1	12/2014	2	11	2014	3	2	2015	2	
14	14	2	12/2014	2	1	2015	3	1	2015	2	
15	15	2	12/2014	2	11	2014	2	4	2015	1	
16	16	20	12/2014	2	11	2014	3	2	2015	2	
17	17	20	12/2014	3	11	2014	3	3	2015	2	

Gambar 9. Tampilan tabel database stasiun smart climate model dalam interface phpmyadmin

Website Sistem Informasi Kalender Tanam Padi

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, sistem informasi pertanian yang dibentuk dalam suatu sistem informasi meteorologi ditandai dengan dikembangkan sistem basis data sebagai salah satu basis dari suatu bentuk sistem informasi. Pola sistem informasi secara umum memanipulasi dunia-nyata (*real-world*) sedemikian rupa sehingga diabstraksikan menjadi sekelompok data dasar; Data ini diolah dengan menggunakan fungsi-fungsi; kemudian disampaikan ke para pengguna (*users*) sebagai informasi yang sesuai dengan yang diinginkan (Gambar 8).



Gambar 10. Alur sistem informasi

Manfaat yang dapat diperoleh dari adanya *website* informasi pertanian ini adalah para *stakeholder* pertanian akan mendapatkan informasi secara lengkap mengenai perencanaan masa tanam padi. Selain itu, para *stakeholder* tersebut dapat juga memberikan respon yang interaktif untuk bisa mengoreksi hasil prediksi yang sudah dilakukan. Hal ini akan menjadi *feedback* yang bermanfaat untuk memperbaiki model iklim dan model prediksi masa tanam padi secara lebih baik lagi.

Interface tidak diproses setahap, tetapi melalui beberapa tahapan, termasuk diantaranya *update* data dan validasi. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil prediksi model yang ditampilkan oleh *web* dengan melakukan beberapa tahap validasi terhadap data di lapangan. Salah satu ilustrasi *interface* sistem informasi yang akan dibangun ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 11. Konsep pengembangan website sistem informasi masa tanam padi

Konsep pemrograman yang dibangun adalah sebagai berikut: (1) membangun *database* yang terdiri dari tabel prediksi curah hujan dan tabel peta lahan sawah, (2) *library* peta lahan sawah yang terhubung dengan tabel peta lahan sawah, (3) membangun peta batas administratif desa yang *di-embed* dengan peta *google maps*, (4) membangun peta lahan sawah keseluruhan yang *di-embed* dengan *Google Maps*. Keseluruhan data tersebut *di-overlay* pada peta dasar *Google Maps* yang terhubung secara *online* (Gambar 9).

Untuk membangun sistem informasi bidang pertanian yang berisi informasi rencana masa tanam padi di Indramayu yang berbasis *website*, maka diperlukan beberapa hal, yaitu nama domain, *hosting*, *database*, dan desain tampilan *website*. *Interface* dalam *browser* menampilkan waktu prediksi dan parameter iklim yang diinginkan. Selanjutnya, *browser* dapat langsung menampilkan dalam format peta spasial sesuai dengan waktu prediksi yang diinginkan tersebut. Website yang dibangun harus

web dinamis sehingga dapat menampilkan *content* yang bisa berubah secara otomatis. *Database* akan dibaca oleh server dan ditampilkan secara informatif.

Hasil prediksi curah hujan ditampilkan sesuai dengan keinginan dari *user*. *User* dapat melakukan *setting/customization* waktu curah hujan yang ingin ditampilkan, terdiri dari tahun, bulan, dan dasarian. Peta prediksi curah hujan di-*overlay* juga dengan peta batas administratif skala desa, sehingga memungkinkan *user* untuk meng-klik setiap desa, sehingga *website* akan menampilkan penjelasan detil mengenai kondisi curah hujan di desa tersebut. Selain itu, penelitian ini juga sedang mengembangkan aplikasi *feedback* bagan *user* untuk dapat langsung memberikan evaluasi terhadap hasil prediksi curah hujan di desa dimana *user* tinggal. *User* juga dapat melakukan evaluasi terhadap hasil prediksi di desa lain yang berdekatan dengan lokasi desa *user*.

Peta lahan sawah dilengkapi dengan batas administratif desa sehingga *user* akan mengetahui batas-batas lahan sawah di setiap desa, sekaligus bisa mendapatkan penjelasan detil mengenai kondisi lahan sawah di setiap desa tersebut. Pembuatan peta lahan sawah ini dilakukan dengan mendigitasi keseluruhan lahan sawah (dalam format *shp*) menjadi lahan sawah skala sub-desa. Selanjutnya dalam *website*, peta lahan sawah per desa ini di-*overlay* dengan *Google maps*. Setting pada *Google maps* dapat memungkinkan *user* untuk menampilkan peta dalam bentuk *street map* atau *satellite imagery*. Hal ini dapat memudahkan *user* untuk mengetahui lokasi lahan sawah di suatu daerah berada di dekat jalan atau tidak. Selain itu, dengan menggunakan setting *satellite imagery*, maka peta lahan sawah dapat diidentifikasi lokasinya apakah berada di wilayah berbukit dan bertopografi.

Untuk menampilkan prediksi curah hujan dalam *web*, pada *server* terdapat *library* yang terdiri dari peta-peta prediksi curah hujan selama 2014 dan 2015 (Gambar 10). Data tersebut dapat menjadi *input* untuk merencanakan tanam padi di musim basah

2014/2015 dan musim kering 2015. Peta lahan padi akan menjadi dasar untuk estimasi tanam padi setelah melihat 3 prediksi curah hujan dasarian di sawah yang berada di suatu desa. Aturan tersebut mengikuti hasil penelitian yang menyatakan: (1) *threshold* untuk produksi padi di area non-irigasi dapat diperoleh setelah curah hujan mencapai 50 mm/dasarian; (2) masa tanam padi dapat dimulai pada dasarian dimana curah hujan sebelum, sesudah dan pada dasarian tersebut telah mencapai 50 mm.



Gambar 12. Halaman web prediksi curah hujan untuk wilayah Indramayu



Gambar 13. Halaman web untuk informasi peta masa tanam di desa Mekarjaya, Kab. Indramayu

Jumlah desa yang ada di Indramayu dalam *database website* adalah 314 desa. Setiap desa memiliki data informasi prediksi curah hujan dan masa tanam padi. Dalam suatu halaman *web*, pengguna dapat melihat informasi detil mengenai masa tanam padi dari tahun 2014 hingga 2015. Untuk informasi spesifik, halaman *web* juga dibagi menjadi 3 sub-desa jika desa tersebut memiliki area yang luas. Informasi detil dapat dilihat dengan mengklik salah satu desa atau sub-desa pada *Google maps* dan selanjutnya muncul *pop up* yang menunjukkan informasi detil tersebut (lihat Gambar 11).

Jika pengguna meng-klik info detail di menu *pop up*, *file pdf* akan ditampilkan di *tab baru browser* untuk menampilkan informasi lebih detail, termasuk nama desa, musim tanam, prediksi curah hujan selama 8 dasarian ke depan di setiap musim tanam (lihat Gambar 12). Dengan menggunakan informasi ini pada prediksi curah hujan selama 8 dasarian ke depan, petani bisa membuat strategi penanaman kegiatan untuk mendapatkan produktivitas padi yang optimal mulai dari pengolahan lahan, pembibitan, penanaman padi, pemupukan dan distribusi pestisida.



Gambar 14. Informasi detil prediksi masa tanam di desa Mekarjaya dalam format PDF

Pada Gambar 12 ditunjukkan contoh informasi detil tentang perencanaan pertanian di desa Mekarjaya, Kabupaten Indramayu. Pada contoh tersebut, musim pertama penanaman dapat dimulai pada 2 dasarian bulan Januari 2015. Di bawah informasi musim tanam 1, terdapat informasi tentang prediksi curah hujan selama 8 dasarian berikutnya. Pada musim tanam ke-2, penanaman padi dapat dimulai pada 2 dasarian bulan Februari 2015. Seperti pada musim tanam 1, di bawah informasi musim tanam 2 juga memberikan informasi tentang prediksi curah hujan selama 8 dasarian. Oleh karena itu, baik pada musim hujan maupun musim kemarau, petani dapat membuat perencanaan dengan menggunakan informasi lengkap prediksi curah hujan dan musim tanam padi untuk mendapatkan produktivitas yang mereka harapkan.

DAFTAR BACAAN

- Aster, R.C., Borchers, B., Clifford, T.H., 2005. Parameter Estimation and Inverse Problems. Elsevier Academic Press.
- Bassil, Y., 2012, A Comparative Study on the Performance of the Top DBMS Systems, Journal of Computer Science & Research (JCSCR), Vol. 1, No. 1: 20-31.
- Howison, S., Crighton, C. G., Ablowitz, M. J., Davis, S. H., Hinch, E. J., Iserles, A., Ockendon, J., Olver, P. J. 2005 Practical Applied Mathematics: Modelling, Analysis, Approximation. Cambridge University Press.
- J.D. McLean, A Critical Review of Some Recent Australian Regional Climate Reports. 2006. J. Energy and Environment. V. 17 No. 1.
- Qadeer, M.A., 2012, Design and Implementation of Location Awareness and Sharing System using GPS and 3G/GPRS, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Vol. 7, No. 4.
- Sandvik, B., 2008, Using KML for Thematic Mapping, Research Paper, Institute of Geography School of GeoSciences University of Edinburgh.
- Susandi A., Indriani Herlianti, Mamad Tamamadin, dan Irma Nurlela. 2008. Dampak perubahan iklim terhadap ketinggian muka laut di Wilayah Banjarmasin. Jurnal Ekonomi Lingkungan 12(2).

BAGIAN II. PERAN

BAB 1. CEKAMAN ABIOTIK DAN PRODUKTIVITAS TANAMAN

Didy Sopandie, Trikoesoemaningtyas, dan Nani Heryani

Pendahuluan

Pertanian sangat penting dalam upaya meningkatkan kesejahteraan masyarakat di seluruh dunia. Kegiatan pertanian telah menggunakan 40% permukaan lahan yang ada, mengkonsumsi 70% sumber daya air global dan mengelola keanekaragaman hayati pada tingkat genetik, spesies dan ekosistem. Namun demikian, penyediaan pangan yang cukup untuk penduduk dunia saat ini menjadi lebih sulit, karena adanya peningkatan populasi yang tinggi, terlebih lagi dengan munculnya berbagai dampak yang buruk akibat terjadinya perubahan iklim. Radiasi matahari, suhu dan presipitasi adalah faktor penting untuk pertumbuhan tanaman, oleh karena itu kegiatan pertanian memiliki ketergantungan yang sangat tinggi terhadap pola iklim dan variasinya. Namun demikian, dengan adanya revolusi industri manusia telah mengubah iklim global secara cepat akibat tingginya emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dan dilepaskan ke atmosfir. Akibatnya telah terjadi kenaikan suhu global, yang mendorong terjadinya perubahan rezim hidrologi dan peningkatan variabilitas iklim di berbagai belahan dunia. Perubahan iklim akan memberikan pengaruh

yang sangat besar terhadap kondisi pertanian, suplai pangan, dan ketahanan pangan.

Telah diketahui bahwa pertanian itu sendiri telah berkontribusi terhadap perubahan iklim, diprediksi bahwa kira-kira sepertiganya disebabkan oleh kegiatan pertanian. Secara umum telah diketahui bahwa sekitar 25% emisi CO₂ diproduksi oleh berbagai aktivitas pertanian, yaitu melalui deforestasi, penggunaan energi fosil untuk pembuatan pupuk, dan pembakaran biomassa. Sebagian besar gas metan di atmosfer dihasilkan dari aktivitas ruminansia domestik, pembakaran hutan, budidaya padi sawah dan limbahnya, sedangkan pengolahan tanah secara konvensional dan penggunaan pupuk menyumbang sekitar 70% terhadap emisi nitrat oksida.

Emisi karbon yang berhubungan dengan kegiatan manusia berkontribusi secara nyata terhadap peningkatan kadar CO₂ atmosfer dan suhu. Secara teori, kondisi ini akan menyebabkan percepatan dalam respon fisiologis, dimana tanaman akan tumbuh lebih cepat dengan sedikit perubahan dalam perkembangannya, seperti pembungaan dan pembuahan, bergantung pada spesies tanaman. Terdapat informasi yang berkembang bahwa tanaman C₃ mungkin bisa menghasilkan lebih banyak produk yang bisa dipanen. Tanaman C₃ dan C₄ akan cenderung menggunakan lebih sedikit air dengan meningkatnya CO₂ atmosfer dalam kondisi normal tanpa stres. Namun, dampak langsung yang menguntungkan dari peningkatan CO₂ pada hasil panen bisa menjadi tidak berarti karena diimbangi dengan efek lain dari perubahan iklim, seperti suhu yang tinggi dan perubahan pola presipitasi. Ketika suhu meningkat dan perubahan pola presipitasi terjadi secara ekstrim malah akan berakibat buruk bagi produktivitas tanaman. Perubahan terhadap kualitas pangan akan terjadi, misalnya, penurunan protein dan konsentrasi mineral nutrisi serta terjadinya perubahan komposisi lipid. Oleh karena itu, studi yang berhubungan dengan perubahan hasil tanaman dan kualitas pangan, sebagai akibat perubahan iklim

global harus menjadi prioritas dalam penelitian lebih lanjut, terutama karena terkait dengan ketahanan pangan.

Temperatur yang tinggi akan mengurangi perolehan karbon bersih pada spesies C₃ karena terjadinya fotorespirasi. Dengan mengurangi fotorespirasi, pengayaan CO₂ diharapkan dapat meningkatkan fotosintesis dibandingkan pada suhu rendah, dan dengan demikian setidaknya sebagian mengimbangi efek suhu supra-optimal terhadap hasil. Oleh karena itu, peningkatan hasil pada CO₂ tinggi bisa terjadi di daerah di mana suhu mendekati optimum untuk pertumbuhan tanaman. Sebaliknya, di daerah hangat dimana suhu tinggi sudah sangat membatasi, kenaikan suhu lebih lanjut akan menekan produksi tanaman terlepas dari perubahan konsentrasi CO₂ (Polley, 2002). Easterling *et al.* (2003) menyatakan bahwa hasil pemodelan matematika menunjukkan bahwa, pada daerah dataran menengah – tinggi, kenaikan suhu lokal 1-3 °C bersamaan dengan peningkatan CO₂ dan perubahan curah hujan, bisa saja memiliki dampak yang menguntungkan terhadap hasil panen, tetapi di daerah-daerah dataran rendah, peningkatan suhu sedang saja (1-2 °C) akan cenderung memiliki dampak negatif terhadap hasil tanaman sereal utama. Dengan demikian, perubahan iklim dapat mengganggu produksi pangan, terutama di negara-negara berkembang, yang sebagian besar terletak di daerah tropis dengan iklim yang awal yang lebih hangat, mengingat dampak perubahan iklim juga menyebabkan penurunan kesesuaian lahan akibat dari dampak dari perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrim dan peningkatan permukaan air laut.

Hulme dan Sheard (1999) yang membuat skenario iklim Indonesia menyebutkan bahwa sejak tahun 1900 rata-rata suhu sudah meningkat sebesar 0,3°C per tahun. Selanjutnya disebutkan juga bahwa pada periode tahun 1990an tepatnya pada tahun 1998 merupakan periode terpanas dan hampir mencapai 1°C lebih tinggi dibandingkan pada periode tahun 1960-1990. BMKG memperlihatkan adanya kenaikan suhu udara di berbagai tempat

di Indonesia walaupun hasilnya masih terdapat beragam tingkat kepercayaan. Berdasarkan data suhu tahun 1983 – 2003, di Indonesia telah terjadi peningkatan suhu sebesar $0,036 - 1,383\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Litbang BMKG, 2009). Lebih lanjut disebutkan bahwa khusus untuk kota-kota di Indonesia, kenaikan suhunya mencapai $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam 10 tahun. Menurut Sakya (2014) kenaikan suhu di Banten tercatat tertinggi selama 30 tahun sebesar $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, disusul wilayah lampung $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Jawa Barat $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, Jawa Tengah $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan Jawa Timur $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Penelitian Runtunuwu dan Kondoh (2008) menunjukkan telah terjadi peningkatan suhu udara global selama 100 tahun terakhir, rata-rata $0,57\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Diprediksi akan terjadi kenaikan permukaan air laut 40 cm dalam 100 tahun ke depan, yang akan menenggelamkan lahan pertanian yang berharga di daerah pesisir. Intensitas kejadian serangan hama penyakit akan meningkat. Zona agro-ekologis bisa bergeser, lebih dari ratusan kilometer horizontal dan ratusan meter secara altitude, yang mengakibatkan beberapa tanaman, terutama pohon, dan spesies hewan tidak bisa mengikuti perubahan ini. Sebagai akibatnya, sistem pertanian tidak dapat menyesuaikan secara sendiri. Pada wilayah yang memiliki empat musim, suhu yang lebih tinggi akan memperpanjang musim tanam bagi beberapa tanaman, karena pada musim dingin suhu masih hangat. Demikian juga penanaman tanaman masih bisa dilakukan di daerah pegunungan pada musim dingin. Dalam beberapa hal, kondisi ini memungkinkan terjadi peningkatan pertanaman dan produksi tanaman. Sebaliknya, di area yang sudah hangat seperti di daerah tropika, perubahan iklim dapat menyebabkan penurunan produktivitas (Sombroek dan Gommes, 1998). Efek ini mempengaruhi kemampuan untuk memperluas produksi pangan yang diperlukan.

Dampak Perubahan Iklim terhadap Proses Fisiologi Tanaman

Elemen perubahan iklim yang akan berdampak terhadap pertanian adalah peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrim dan peningkatan permukaan air laut. Peningkatan suhu akan menyebabkan pematangan terjadi lebih awal, kegagalan proses reproduksi tanaman, kekeringan, penurunan produktivitas tanaman, serta dapat memicu peningkatan serangan hama dan penyakit. Perubahan pola curah hujan akan mempengaruhi produksi tanaman, menimbulkan fluktuasi ketersediaan air, serta berpeluang meningkatkan serangan hama penyakit. Akibat yang buruk dari peningkatan frekuensi kejadian iklim yang ekstrim adalah terjadinya banjir, longsor dan kekeringan. Peningkatan paras muka air laut akan menyebabkan kehilangan dan penyusutan luas tanam karena adanya intrusi air laut ke daratan. Secara umum, perubahan iklim akan menyebabkan penurunan kesesuaian lahan pada berbagai rezim dan wilayah, sehingga akan memicu bertambahnya lahan-lahan sub-optimal, terutama di wilayah tropika. Oleh karena itu pemahaman yang cukup terhadap proses fisiologi tanaman sangat penting untuk dapat melakukan adaptasi terhadap perubahan iklim. Di bawah ini akan diuraikan berbagai dampak perubahan iklim, terutama pengaruh kenaikan suhu udara dan kekeringan terhadap proses fisiologi tanaman serta hubungannya dengan produksi tanaman. Cekaman salinitas dan genangan akibat perubahan iklim akan dibahas secara singkat dengan fokus pembahasan diarahkan untuk tanaman padi.

Pengaruh Peningkatan Emisi CO₂ terhadap Metabolisme dan Produktivitas Tanaman

Banyak publikasi ilmiah terkait dengan efek peningkatan CO₂, kenaikan suhu dan pasokan air pada pertumbuhan tanaman secara terpisah, yang merupakan informasi berharga untuk memahami dinamika fotosintesis, akumulasi biomassa dan hasil panen. Hal ini sangat diperlukan untuk meramalkan dampak perubahan iklim pada pertanian. Walaupun demikian, tidak banyak yang melakukan prediksi tentang pengaruh gabungan dari beberapa variabel tersebut, yang akan memberikan gambaran lebih realistik tentang bagaimana tanaman akan merespon perubahan iklim global. Tanaman akan merespon secara langsung terhadap kenaikan CO₂ melalui fotosintesis dan konduktansi stomata. Namun demikian, tanaman akan memanfaatkan kenaikan CO₂ untuk peningkatan fotosintesisnya akan sangat bergantung kepada suhu (DaMatta *et al.*, 2010). Oleh karena itu, praktik agronomi harus mampu beradaptasi terhadap kenaikan suhu dan CO₂.

Fotosintesis dan Respirasi

Spesies tanaman bervariasi dalam respon mereka terhadap kenaikan CO₂, yang terkait dengan perbedaan mekanisme fotosintesisnya. Tanaman C₃ (padi, kedelai, gandum) memberikan respon negatif terhadap kenaikan CO₂, karena CO₂ yang tinggi akan mengurangi aktivitas enzim Rubisco (*ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase*). Tanaman C₄ (jagung, tebu, sorgum) hanya menunjukkan sedikit perubahan dalam proses fotosintesisnya atau bahkan tidak berespon sama sekali terhadap peningkatan CO₂, karena jalur C₄ tidak dihambat oleh O₂ dan dapat dijenuhi oleh CO₂ secara total (Ahmad *et al.*, 2010). Tanaman C₄ bisa diabaikan dalam respon fotosintesisnya terhadap kenaikan CO₂, karena siklus C₄ akan meningkatkan konsentrasi CO₂ dalam sel-

sel pembuluh seludangnya (*bundle sheath cells*) ke titik dimana fotorespirasi sangat kecil, serta dalam siklus Calvin-Benson-Bassham CO_2 hampir mencapai konsentrasi jenuhnya. Namun demikian, tidak ada kesepakatan baku terkait pengaruh secara kuantitatif akibat kenaikan CO_2 , karena adanya perbedaan respon tanaman pada setiap fase yang berbeda serta faktor pembatas pertumbuhan yang berbeda pula pada masing-masing tanaman.

Akumulasi karbohidrat non-struktural dalam daun dan organ tanaman lainnya dalam bentuk pati, karbohidrat terlarut atau *polifructosans* akan terjadi, tergantung pada spesies tanaman. Pada beberapa kasus, mungkin saja akan terjadi umpan balik negatif (*negative feedback*) dari fotosintesis, yang dikaitkan dengan akumulasi karbohidrat non-struktural. Peningkatan akumulasi karbohidrat, terutama di daun, bisa menunjukkan bahwa tanaman tidak sepenuhnya bisa menyesuaikan diri dan belum tentu mampu mengambil keuntungan dari kondisi CO_2 yang tinggi. Hal ini mungkin terjadi apabila tanaman yang mendapatkan CO_2 tinggi tidak memiliki *sink* yang memadai, atau tidak memiliki kapasitas pada jaringan floem-nya untuk memuat dan mentranslokasi karbohidrat terlarut ke semua bagian tanaman (Ahmad *et al.*, 2010). Oleh karena itu, pengembangan kultivar tanaman yang efisien dalam pemanfaatan foto-asimilat merupakan tujuan yang penting dalam perakitan varietas tanaman ke depan.

Laju respirasi per unit area diperkirakan akan meningkat dengan peringkatan fotosintesis, laju pertumbuhan dan tingkat substrat, karena biomas yang tinggi memerlukan suplai energi lebih besar untuk pemeliharaan dan pertumbuhan. Mungkin akan terjadi penurunan laju respirasi spesifik yang disebabkan akibat paparan jangka pendek terhadap peringkatan CO_2 dan pertumbuhan jangka panjang dalam kondisi CO_2 yang tinggi. Respirasi gelap pada tanaman padi per satuan luas akan meningkat dengan meningkatnya CO_2 , yang dapat dikaitkan

dengan peningkatan dalam biomas, namun laju respirasi spesifik per unit biomas menurun.

Transpirasi

Peningkatan CO₂ diperkirakan akan menurunkan konduktansi stomata pada kebanyakan spesies, yang menyebabkan penurunan kemampuan transpirasi per unit area daun. Penurunan sebesar 40% konduktansi stomata yang diinduksi oleh kenaikan dua kali lipat CO₂ sering terjadi pada 10% (atau kurang) penurunan kadar air kanopi daun pada kondisi lapang atau pada ruang tumbuh (*growth chamber*). Akan tetapi indeks luas daun beberapa tanaman dapat juga dipengaruhi dan mungkin bertambah. Perubahan aktual pada evapotranspirasi diatur oleh keseimbangan energi, seperti dimitigasi oleh konduktansi stomata, indeks luas daun, struktur tanaman dan perubahan faktor iklim. Uprety *et al.* (2002) menunjukkan bahwa stomata di epidermis bawah lebih sensitif terhadap pengayaan CO₂ dibandingkan stomata bagian atas pada tanaman padi. Peningkatan CO₂ juga dapat menyebabkan perubahan anatomi secara signifikan, namun penelitian tentang ini sangat terbatas. Penggunaan TEM (*transmission electron microscope*) menunjukkan peningkatan yang nyata terhadap ketebalan epidermis, ukuran sel mesofil, akumulasi pati, seperti juga pada ukuran dan jumlah granula pati per kloroplas tanaman *Brassica juncea* yang ditumbuhkan pada kondisi CO₂ yang tinggi (Uprety *et al.*, 2001).

Asimilasi Nitrogen

Rasio C:N pada daun tanaman umumnya meningkat dalam kondisi kadar CO₂ atmosfir yang tinggi. Tanaman tampaknya mampu beraklimatisasi terhadap peningkatan CO₂ melalui pengurangan kebutuhan terhadap enzim rubisco dan

perlengkapan fotosintetik, yang akan menyebabkan rendahnya kandungan N (Foyer dan Noctor, 2002). Perubahan rasio C:N diatur baik oleh karbohidrat terstruktur maupun oleh non-struktural karbohidrat, serta diatur juga oleh penurunan kandungan protein. Namun demikian, kandungan N dalam biji umumnya tidak dipengaruhi (Allen *et al.*, 1988). Paparan konsentrasi CO₂ yang tinggi dalam jangka pendek menyebabkan pengalihan reduktor fotosintesis dari NO₃⁻ atau NO₂⁻ reduksi menjadi bentuk fiksasi CO₂, sedangkan paparan jangka panjang oleh CO₂ tinggi menyebabkan pengurangan kapasitas daun gandum untuk foto-asimilasi NO₃ pada setiap konsentrasi CO₂ (Bloom *et al.*, 2002). Selain itu, tingkat bikarbonat yang tinggi dapat menekan translokasi NO₂ ke dalam kloroplas daun gandum dan pea. Oleh karena itu, peningkatan CO₂ menghambat foto-asimilasi NO₃, dan ketika tanaman menerima NO₃ sebagai sumber N, peningkatan CO₂ menyebabkan hambatan pertumbuhan pucuk hanya setengahnya dan adanya penghambatan terhadap protein di pucuk menjadi dua kali lipat. Studi ini memiliki implikasi bahwa pada kondisi CO₂ tinggi, untuk tanaman tertentu seperti gandum dan pea harus memiliki kemampuan yang tinggi dalam menggunakan NO₃ sebagai sumber nitrogen.

Efisiensi Penggunaan Air

Cekaman air merupakan faktor pembatas penting dalam pertumbuhan dan produksi tanaman. Pada serealia, pada umumnya tanaman akan mampu bertahan terhadap cekaman air pada fase vegetatif. Beberapa tanaman akan mampu beradaptasi terhadap kekurangan air dengan memperpendek daur hidupnya, atau tanaman memiliki kemampuan dalam menghindari cekaman dengan meningkatkan pertumbuhan akarnya agar dapat meningkatkan serapan akar. Dalam kondisi CO₂ tinggi, diperlukan waktu lebih lama bagi tanaman untuk mengalami

kekeringan, karena konduktansi stomata yang rendah dan laju transpirasi yang rendah (Bunce, 1998). Potensial osmotik menurun lebih tajam pada kondisi CO₂ tinggi dibandingkan pada konsentrasi ambien CO₂, menyebabkan tekanan turgor dapat dipertahankan, sehingga pertumbuhan tanaman tetap berlanjut pada kondisi defisit air. Lebih lanjut, tanaman yang tumbuh dalam kondisi CO₂ tinggi menggunakan air lebih sedikit, lebih efisien dan lebih toleran terhadap kekeringan.

Produktivitas Tanaman

Peningkatan konsentrasi CO₂ diprediksi akan mempengaruhi produktivitas tanaman akibat adanya peningkatan suhu rata-rata di permukaan dan jumlah CO₂ yang tersedia untuk fotosintesis (Aggarwal, 2003). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketika temperatur tetap, kenaikan dua kali lipat konsentrasi CO₂ akan meningkatkan hasil padi (Bouman dan Van Laar, 2006; Krishnan *et al.*, 2007). Namun demikian terdapat variasi hasil terkait pengaruh perubahan iklim terhadap produktivitas padi. Studi pemodelan di Jepang (Horie *et al.*, 2000), menunjukkan variasi yang luas dalam produksi padi yang diantisipasi karena adanya perubahan iklim. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa peluang terjadinya kenaikan hasil padi akibat naiknya suhu sangat kecil, sebaliknya akan terjadi penurunan hasil padi jika terjadi kenaikan suhu dekadal $> 0.8^{\circ}\text{C}$, dimana akan terjadi penurunan terbesar pada wilayah latitude 10° dan 35° Utara. Masih terdapat perbedaan pendapat tentang pengaruh peningkatan konsentrasi CO₂ terhadap pertumbuhan tanaman C₄. Brown dan Rosenberg (1997) mengamati bahwa suhu tinggi menyebabkan penurunan hasil biji pada lima tanaman termasuk jagung dan sorgum, dimana pada tingkat tertentu dimitigasi oleh kenaikan CO₂ dan presipitasi yang naik. Efek mitigasi lebih terlihat pada sorgum. Walaupun sangat banyak perbedaan

pendapat terkait dampak perubahan iklim terhadap hasil tanaman C₄, Young dan Long (2000) menyatakan bahwa hasil tanaman C₄ akan menurun pada berbagai skenario perubahan iklim. Beberapa hasil penelitian ini memberikan implikasi bahwa diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menguji teori bahwa fotosintesis tanaman C₄ tidak mengalami perubahan terhadap kenaikan CO₂ jika ditumbuhkan pada kondisi normal, sehingga potensi produksi tanaman C₄, khususnya jagung, tidak akan banyak dipengaruhi oleh kenaikan CO₂ secara global (Ahmad *et al.*, 2010).

Cekaman Suhu Tinggi Akibat Perubahan Iklim

Sesuai dengan laporan IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) bahwa diproyeksikan akan terjadi kenaikan suhu sebesar 0.2 °C setiap dekade selama dua dekade ke depan (Ahmad *et al.*, 2010). Hiscock *et al.* (2004) memprediksi bahwa pada tahun 2050, suhu permukaan bumi akan meningkat 2.1 °C dibandingkan dengan suhu pada tahun 2000, dimana suhu air laut kenaikannya akan lebih tinggi, yaitu meningkat lebih dari 2.5 °C.

Cekaman suhu tinggi sering didefinisikan ketika terjadi kenaikan suhu di luar batas selama jangka waktu yang cukup untuk menyebabkan terjadinya kerusakan pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang tidak dapat balik. Menurut Ahmad *et al.* (2010), suhu tinggi menyebabkan kerusakan dan gangguan terhadap keseimbangan yang baik antara fotosintesis dan respirasi. Ketika suhu meningkat di atas maksimum untuk pertumbuhan, tanaman mengalami penuaan. Daun tanaman kehilangan warna hijauanya sehingga tidak mampu berfotosintesis. Ketika suhu sangat tinggi akan menyebabkan kematian. Suhu di atas optimal suhu kardinal akan menyebabkan aktifitas fisiologi menurun yang berdampak terhadap inaktivasi beberapa enzim. Selain menyebabkan kekeringan, suhu tinggi mengganggu keseimbangan fotosintesis dan respirasi, dimana tanaman

mengalami kerusakan melalui beberapa cara seperti respirasi yang berlebihan pada biji. Kegagalan fungsi enzim penting dapat menyebabkan kematian tanaman. Fakta ini menunjukkan bahwa kebanyakan tanaman dapat bertahan pada suhu tinggi dalam kisaran yang sempit yaitu maksimum pada 40-45 °C.

Secara umum, peningkatan 10-15 °C di atas suhu ambien dianggap sebagai cekaman suhu tinggi (*heat shock, heat stress*). Namun demikian, cekaman suhu tinggi adalah fungsi yang kompleks dari intensitas suhu, durasi, dan laju peningkatan suhu. Beberapa peneliti menyatakan bahwa suhu malam hari merupakan faktor pembatas utama, namun beberapa peneliti lainnya menyatakan bahwa suhu malam hari dan tengah hari tidak mempengaruhi tanaman secara terpisah, namun rata-rata suhu harian merupakan angka yang paling tepat digunakan sebagai penentu respon tanaman terhadap suhu tinggi, sedangkan suhu siang hari memegang peran berikutnya (Wahid *et al.*, 2007).

Dalam kondisi suhu yang ekstrim, kerusakan sel yang parah atau bahkan kematian sel dapat terjadi dalam hitungan menit, yang dapat menyebabkan kerusakan parah pada organisasi sel tanaman. Cekaman suhu tinggi pada tingkat moderat, kerusakan atau kematian sel mungkin terjadi setelah jangka waktu yang lama berada dalam cekaman. Kerusakan langsung akibat suhu tinggi termasuk denaturasi protein dan agregasi protein, dan peningkatan fluiditas lipida membran. Secara tidak langsung atau cekaman lebih lambat suhu tinggi meliputi inaktivasi enzim dalam kloroplas dan mitokondria, penghambatan sintesis protein, degradasi protein, dan kehilangan integritas membran (Howarth, 2005). Cekaman suhu tinggi juga berpengaruh terhadap organisasi mikrotubul (*microtubules*) karena terjadinya pemisahan/pemanjangan benang-benang spindel, pembentukan “*microtubules asters*” pada sel-sel mitotik, dan pemanjangan dari “*pragmoplast microtubules*”. Kerusakan ini berakibat kepada terjadinya kelaparan (*starvation*), penghambatan pertumbuhan,

reduksi dalam ion flux, produksi senyawa toksik dan oksigen reaktif (ROS).

Batas Suhu Tinggi

Batas cekaman suhu tinggi ditentukan berdasarkan suhu rata-rata harian yang menyebabkan awal terjadinya penurunan pertumbuhan tanaman. Batas atas suhu tersebut (*threshold*) adalah suhu satu derajat di atas nilai batas tersebut yang menyebabkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman berhenti. Batas suhu bawah tanaman sangat bervariasi berdasarkan spesies, namun untuk spesies untuk musim dingin batas suhu bawah adalah 0°C sebagai perkiraan. Batas suhu atas bervariasi antar spesies dan bahkan antar genotipe dalam spesies yang sama. Penetapan suhu batas atas yang konsisten sangat sulit karena perilaku tanaman akan berbeda tergantung kepada kondisi lingkungan lainnya. Pada tomat, ketika temperatur ambien melampaui 35°C, perkembahan biji, pertumbuhan biji dan vegetatif berjalan, namun pembungaan, pembentukan buah dan pemasakan buah sangat dihambat. Pada Tabel 1 ditunjukkan batas atas temperatur untuk beberapa tanaman penting. Mengetahui sensitivitas terhadap suhu tinggi sangat penting bagi tanaman tropis dan subtropis, karena cekaman suhu tinggi bisa menjadi faktor penghambat pertumbuhan tanaman.

Tabel 3 Batas suhu tinggi beberapa tanaman (Wahid *et al.*, 2007)

Tanaman	Threshold temperatur (°C)	Stadia Pertumbuhan
Gandum	26	Pasca pembungaan
Jagung	45	Reproduktif
Milet	35	Fase bibit, semai (<i>seedling</i>)
Tomat	30	Perkecambahan (<i>emergence</i>)
Kubis-kubisan (<i>Brassica</i>)	29	Pembungaan
Kacang-kacangan musim dingin	25	Pembungaan
Kacang tanah	34	Produksi polen
Kacang tunggak (<i>Cowpea</i>)	41	Pembungaan
Padi	34	Pembentukan biji

Pemaparan terhadap suhu tinggi dalam waktu singkat selama pengisian biji akan menginduksi senesen, mengurangi pembentukan biji, bobot biji dan mengurangi hasil tanaman. Tanaman akan menggunakan fotosintat untuk menghadapi cekaman suhu tinggi, sehingga hanya fotosintat dalam jumlah yang terbatas yang tersedia untuk perkembangan reproduksi tanaman.

Kebanyakan jaringan tanaman tingkat tinggi tidak mampu hidup pada suhu di atas 45 °C dalam waktu lama. Jaringan tanaman yang tidak sedang tumbuh (*non-growing cells*) atau jaringan yang terdehidrasi (*dehydrated tissue*) seperti biji dan pollen dapat hidup pada suhu tinggi dibandingkan jaringan terhidrasi (*hydrated tissue*). Biji kering dapat tahan pada suhu 120 °C, sedangkan serbuk sari (*pollen*) beberapa spesies dapat tahan pada 70°C. Tabel 2 di bawah ini menunjukkan suhu letal (mematikan) untuk beberapa tanaman dan jaringan tanaman.

Pengaruh lain dari cekaman suhu tinggi pada beberapa spesies tanaman adalah induksi sterilitas ketika tanaman terpapar suhu tinggi secara tiba-tiba pada fase sebelum atau selama pembungaan berlangsung. Legum sangat sensitif terhadap cekaman suhu tinggi pada fase pembungaan, hanya dalam beberapa hari mengalami cekaman suhu 30-35°C dapat menyebabkan kehilangan hasil yang besar karena gugurnya bunga dan aborsi polong. Secara umum, batas bawah dan batas atas suhu berbeda antar spesies tanaman sesuai perbedaan habitat. Oleh karena itu, sangat diperlukan untuk menentukan ambang batas (*threshold*) temperatur kultivar baru tanaman untuk mencegah kerusakan akibat suhu yang tidak sesuai selama ontogeni tanaman.

Suhu Tinggi pada Malam Hari

Menurut Wassmann (2009), IRRI melakukan pengamatan rata-rata suhu maksimum dan minimum sejak tahun 1979-2003, yang menunjukkan adanya peningkatan suhu maksimum dan minimum sebesar 0.35 dan 1.13 °C. Hasil korelasi antara kenaikan suhu dan hasil biji tanaman padi menunjukkan bahwa terjadi penurunan 10% hasil biji setiap peningkatan 1 °C suhu minimum pada musim kemarau, sementara pengaruh suhu maksimum tidak signifikan. Pada saat terjadinya peningkatan suhu minimum itu terjadi pada malam hari, sehingga disimpulkan bahwa terjadinya penurunan radiasi matahari dan peningkatan suhu minimum adalah penyebab dari penurunan hasil padi. Penelitian tentang pengaruh suhu malam yang tinggi ini belum memberikan penjelasan yang cukup.

Tabel 4 Suhu letal (*heat-killing temperatures*) untuk beberapa Tanaman (Wahid *et al.*, 2007)

Nama Tanaman	Suhu mematikan (°C)	Periode paparan
<i>Nicotiana rustica</i>	49-51	10 menit
<i>Zea mays</i>	49-51	10 menit
<i>Brassica napus</i>	49-51	10 menit
<i>Citrus aurantium</i>	50.5	15-30 menit
Opanta (cactus)	> 65	-
<i>Sempervivum</i>	57-61	-
<i>arachnoidem</i> (sukulen)		
Medicago seeds (alfalfa)	120	30 menit
Serbuk sari tanaman red fine	70	1 jam
Kondisi terhidrasi (hydrated)	42-51	-
Kondisi dehidrasi (dehydrate)	82-110	-

Respons Morfologi dan Fenologi Tanaman terhadap Cekaman Suhu Tinggi

Perubahan Morfologi.

Suhu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada fase prapanen dan pasca-panen, termasuk terbakarnya daun, cabang dan batang, senesen dan absisi daun, penghambatan pertumbuhan, perubahan warna (*discoloration*) dan kerusakan buah dan penurunan hasil (Wahid *et al.*, 2007). Perubahan morfologi tanaman mungkin berkaitan dengan proses fisiologi yang sedang terjadi atau secara tidak langsung berkaitan dengan pola perkembangan tanaman yang berubah. Respon tersebut akan berbeda dari satu fase fenologi yang satu dengan lainnya. Sebagai contoh, pengaruh jangka panjang cekaman suhu tinggi terhadap

perkembangan biji mungkin termasuk penangguhan germinasi atau kehilangan vigor, akan menurunkan kemampuan benih untuk muncul di permukaan dan pertumbuhan bibit. Pertumbuhan koleoptil jagung menurun pada suhu 40°C dan terhenti pada suhu 45°C. Suhu tinggi secara nyata menurunkan bobot kering pucuk, laju tumbuh relatif dan asimilasi netto pada jagung, millet dan tebu, walaupun perpanjangan daun hanya sedikit dipengaruhi (Wahid *et al.*, 2007). Pengaruh terburuk suhu tinggi terhadap pertumbuhan pucuk adalah penurunan yang tajam panjang buku pertama, yang bisa menyebabkan kematian secara prematur pada tanaman. Sebagai contoh, tebu yang ditanam pada suhu tinggi memiliki buku yang lebih kecil, peningkatan tunas, senesen lebih dini, dan menurunkan biomass total (Ebrahim *et al.*, 1998).

Wahid *et al.* (2007) menjelaskan bahwa suhu tinggi secara sendiri atau bersama-sama dengan cekaman kekeringan adalah kendala utama selama antesis dan pengisian biji beberapa tanaman serealia di daerah empat musim. Suhu tinggi memperpanjang lamanya pengisian biji dan mereduksi pertumbuhan kernel, yang menyebabkan kehilangan densitas kernel dan berat kernel sampai 7% pada gandum musim semi. Tingkat reduksi yang sama terjadi pada pati, protein dan kandungan minyak kernel jagung. Pada gandum, baik bobot biji maupun jumlah biji setiap malai (*ear*) sangat sensitif terhadap suhu tinggi, seperti ditunjukkan oleh penurunan jumlah biji per malai dengan meningkatnya suhu. Pada tomat, fase reproduktif sangat peka terhadap suhu tinggi, yang meliputi proses meiosis organ betina dan jantan, germinasi polen, pertumbuhan selongsong (tube) polen, viabilitas ovule, posisi stigma dan style, jumlah biji polen yang diikat oleh stigma, proses fertilisasi dan pasca fertilisasi, pertumbuhan endosperm, pro-embrio dan embrio fertil. Pressman *et al.* (2002) menjelaskan bahwa pengaruh utama cekaman suhu tinggi pada perkembangan polen tanaman tomat adalah disebabkan menurunnya konsentrasi pati 3 hari sebelum

antesis, yang menyebabkan penurunan kandungan gula pada biji polen (*pollen grains*). Hal ini akan menyebabkan penurunan viabilitas polen pada tomat. Selain itu, pengaruh yang sangat nyata dapat dilihat pada produksi *exserted style* (stigma yang dipanjangkan di luar kerucut anther), yang mungkin akan menghalangi terjadinya polinasi sendiri (*self-pollination*). Kurangnya tanda buah pada suhu tinggi juga dihubungkan dengan rendahnya tingkat karbohidrat dan ZPT yang dilepas ke dalam jaringan *sink* tanaman. Secara umum, tampaknya respon tanaman terhadap suhu tinggi sangat bervariasi dengan perbedaan spesies tanaman dan stadia fenologi. Pada kebanyakan tanaman, proses reproduksi secara nyata sangat dipengaruhi oleh suhu tinggi, terlebih untuk proses fertilisasi dan pasca-fertilisasi yang akan menurunkan produksi tanaman secara nyata.

Perubahan Anatomi

Cekaman suhu tinggi sangat mempengaruhi struktur anatomi, tidak hanya pada tingkat jaringan dan selular, namun juga pada tingkat sub-selular. Perubahan tersebut menyebabkan terhambatnya pertumbuhan dan penurunan hasil tanaman. Menurut Wahid *et al.* (2007) perubahan anatomi pada kondisi suhu ambien yang tinggi umumnya hampir sama dengan perubahan yang terjadi pada kondisi cekaman kekeringan. Pada tingkat tanaman, secara umum terjadi penurunan ukuran sel, penutupan stomata yang membatasi kehilangan air, meningkatnya kerapatan stomata dan trikoma, peningkatan ukuran pembuluh xylem pada akar dan pucuk. Suhu tinggi menurunkan fotosintesis karena struktur organisasi membran thylakoids yang berubah, perubahan yang spesifik terhadap membran tersebut adalah kehilangan susunan grana atau terjadi pembengkakan grana. Zhang *et al.* (2005) menyatakan bahwa sebagai respon terhadap stres suhu tinggi, kloroplas pada mesofil tanaman anggur bentuknya menjadi

bundar, stroma lamella membengkak, dan isi vakuola membentuk rumpun, sementara krista terganggu dan mitokondria menjadi kosong. Perubahan tersebut menyebabkan terganggunya pembentukan PSII dan karenanya mengurangi fotosintesis dan respirasi.

Perubahan Fenologi

Wahid *et al.* (2007) menjelaskan bahwa fase fenologi yang berbeda memiliki tingkat kepekaan yang berbeda terhadap cekaman suhu tinggi, bergantung kepada genotipe dan spesies, dimana terdapat variasi intra-spesifik yang besar. Kerentanan beberapa spesies dan genotipe terhadap suhu tinggi mungkin bervariasi dengan stadia perkembangan tanaman, namun seluruh stadia vegetatif dan reproduktif akan dipengaruhi oleh cekaman suhu tinggi. Selama stadia vegetatif, suhu siang hari yang tinggi akan merusak daun tempat pertukaran gas. Selama fase reproduktif, cekaman suhu tinggi dalam periode singkat sekalipun dapat menggugurkan bakal bunga dan bunga yang mekar, walaupun terdapat variasi yang besar di antara spesies tanaman. Kegagalan perkembangan pollen dan anter oleh peningkatan suhu merupakan faktor penting yang berkontribusi terhadap penurunan jumlah bunga pada beberapa tanaman pada kondisi suhu tinggi yang moderat. Tanaman sereal hanya dapat mentoleransi kenaikan suhu dalam kisaran sempit, dan jika terjadi kenaikan suhu selama fase pembungaan akan merusak fertilisasi dan produksi biji, yang akan menurunkan hasil tanaman. Pada kondisi suhu tinggi, heading yang awal sangat menguntungkan dalam upaya mempertahankan daun tetap hijau (*stay green*) pada fase antesis, yang dapat mengurangi penurunan hasil tanaman.

Pengaruh Suhu Tinggi pada Beberapa Fase Ontogenik Tanaman Padi

Menurut Wassman *et al.* (2009), suhu yang lebih tinggi dapat mempengaruhi hasil panen padi melalui dua jalur utama, yaitu (i) suhu tinggi maksimum dengan kombinasi kelembaban tinggi akan menyebabkan kemandulan spikelet dan pengaruh buruk terhadap kualitas spikelet, dan (ii) peningkatan suhu malam hari yang dapat mengurangi akumulasi asimilat. Pada tanaman padi, suhu tinggi dapat menginduksi kehampaan apabila proses fisiologi yang sangat kritis terganggu seperti: proses membukanya anter, polinasi, perkembangan serbuk sari pada stigma, pertumbuhan tabung polen atau peristiwa awal pembuahan. Antesis pada padi sangat peka terhadap suhu tinggi, dimana pembukaan kluster bunga padi (*spikelet*) pada setiap waktu berbunga selama periode pembungaan (5-7 hari) dapat dipengaruhi secara berbeda bergantung kepada lamanya terpapar suhu tinggi (Wassmann *et al.*, 2009), yaitu:

- a. Suhu tinggi selama 4 jam yang bersamaan dengan antesis akan mereduksi fertilitas spikelet dari 90 menjadi < 20%.
- b. Pada suhu $> 33.7^{\circ}\text{C}$ (suhu udara ambien 35°C) selama 0.5 jam akan menginduksi kehampaan, yang menunjukkan kepekaan yang sangat tinggi tanaman padi terhadap suhu tinggi pada saat antesis
- c. Pembukaan spikelet 1 jam lebih cepat sebelum deraan suhu tinggi tidak akan berpengaruh terhadap kerusakan spikelet
- d. Spikelet membuka dalam waktu 1 jam setelah cekaman suhu tinggi akan mempengaruhi kantung polen
- e. Pembukaan spikelet satu jam di luar waktu cekaman suhu tinggi tidak akan mempengaruhi antesis

Fase membukanya anter adalah proses paling kritis selama antesis pada kondisi suhu tinggi. Menurut Wassmann *et al.* (2009) suhu tinggi menyebabkan peningkatan defisit tekanan udara yang meningkatkan evaporasi dari anter, sehingga menyebabkan

kehilangan kelembaban yang dibutuhkan untuk pengembangan serbuk sari. Perbedaan karakteristik anter antara genotipe toleran dan peka suhu tinggi (Wassmann *et al.*, 2009) telah dijelaskan pada Tabel 3 pada tulisan kami ke-2. Mekanisme mekarnya anter sudah diketahui, namun basis fisiologi dan biokimia yang mendasari hal itu masih belum jelas.

Fase Vegetatif

Mengacu pada Wassmann *et al.* (2009), bahwa selama fase vegetatif tanaman padi secara relatif dapat mentoleransi suhu yang lebih tinggi (32/25 °C suhu siang/malam hari). Suhu di atas itu akan mengurangi tinggi tanaman, jumlah anakan, dan berat kering total. Pada penelitian suhu tinggi di ruang tumbuh (*growth chamber*), suhu yang lebih tinggi 3,6-7,0°C dari suhu ambien pada fase bunting sampai panen menyebabkan penurunan fotosintesis sebesar 11,2-35,6%. Penurunan fotosintesis ini diduga berkaitan dengan perubahan struktural dalam organisasi membran tilakoid, terutama disebabkan oleh kehilangan susunan grana pada kloroplas atau kehilangan kemampuan untuk mengembang. Pengukuran toleransi terhadap suhu tinggi pada fase vegetatif pada beberapa tanaman dilakukan terhadap QEL (*quantitative electrolite leakage, kebocoran elektrolit kuantitatif*) dan CMT (*cellular membrane thermostability, stabilitas panas membran sel*). Pada kacang tunggak (*cowpea*), CMT berkorelasi positif dengan toleransi terhadap suhu tinggi pada fase pembungaan. Pada tanaman padi, tidak diperoleh korelasi yang tinggi antara toleransi fase vegetatif yang diukur dengan CMT dengan toleransi pada fase pembungaan yang diukur dengan fertilitas spikelet, yang menunjukkan bahwa toleransi pada tiap fase tanaman padi berbeda-beda terhadap suhu tinggi. Hal ini juga didapatkan pada kacang tanah.

Fase Reproduktif

Fase reproduktif pada padi lebih sensitif terhadap suhu tinggi dibandingkan pada fase vegetatif (Wahid *et al.*, 2007; Wassmann *et al.*, 2009). Pembungan atau antesis ditunjukkan dengan kemunculan anter (organ reproduktif jantan, bagian dari stamen yang mengandung polen atau tepung sari), merupakan fase paling sensitif selama fase reproduktif terhadap suhu tinggi, diikuti oleh fase mikrogametogenesis. Sedangkan organ reproduktif betina atau pistil tampaknya kurang dipengaruhi suhu tinggi. Studi resiprokal dengan menuangkan tepungsari dari tanaman kontrol pada stigma yang terkena suhu tinggi, atau sebaiknya, menunjukkan kemampuan putik untuk dibuahi tetap tidak terpengaruh oleh suhu tinggi bahkan selama periode 5 hari pada 41 °C. Hampir serupa, fertilitas spikelet gandum meningkat dari 30% menjadi 80% dengan melakukan polinasi pistil tercekam suhu tinggi dengan tepung sari tanaman yang tumbuh dalam kondisi normal (Wassmann *et al.*, 2009). Oleh karena itu, organ reproduktif jantan berperan sangat penting terhadap fertilitas spikelet tanaman, sehingga menjadi target untuk ditingkatkan toleransinya pada kondisi perubahan iklim.

Fase Pemasakan (Ripening Phase)

Cekaman suhu tinggi pada fase pematangan mempengaruhi beberapa proses pertumbuhan dan perkembangan selular, yang menyebabkan penurunan fertilitas dan kulitas biji. Penurunan bobot biji, pengurangan pengisian biji, dan peningkatan persentase beras-kapur putih dan beras-putih susu adalah pengaruh yang umum terjadi. Selain itu, suhu tinggi menyebabkan reduksi ukuran biji dan kandungan amilase, yang selanjutnya menyebabkan penurunan produktivitas. Suhu tinggi pada fase pengisian biji memerlukan lebih banyak asimilat ke wadah (sink) untuk menghindari warna

putih-susu pada kernel. Oleh karena itu pengukuran agronomis yang sederhana seperti bagaimana mengatur kepadatan tanaman yang optimum di lapang merupakan hal yang penting. Satu benih per lubang dianggap cukup dalam memberikan suplai asimilate ke kernel selama fase pengisian biji dalam kondisi cekaman suhu tinggi, sehingga diharapkan dapat menanggulangi persentase biji yang berwarna kapur putih dan reduksi dalam bobot biji (Wassmann *et al.*, 2009).

Fase Paling Sensitif Tanaman Padi terhadap Suhu Tinggi.

Proses mendekati tahap meiosis selama tahap pembentukan tetrad dan mikrospora muda adalah tahap paling sensitif terhadap suhu tinggi selama mikrosporo genesis (Yoshida *et al.*, 1981), mirip tanggap terhadap kekeringan (Sheoran dan Saini, 1996) dan stres dingin. Penurunan produksi serbuk sari yang signifikan pada suhu 5°C diatas suhu udara ambien disebabkan oleh pembelahan sel mikrospora betina terganggu (Takeoka *et al.*, 1992). Pada suhu yang lebih rendah (20 °C), spikelets gandum memiliki 93% serbuk sari yang layak pada antera, sementara pada suhu yang lebih tinggi pada 30°C selama 3 hari serbuk sari yang layak hanya 59%. (Saini dan Aspinall, 1982). Oleh karena itu, suhu tinggi (35°C) selama mikrosporo genesis mengakibatkan penurunan 34% dalam fertilitas spikelet.

Respons Fisiologi Tanaman terhadap Cekaman Suhu Tinggi Status Air Tanaman

Status air tanaman adalah variabel yang sangat penting dalam perubahan suhu ambien lingkungan. Pada umumnya tanaman cenderung mempertahankan status airnya tanpa terpengaruh oleh perubahan suhu bila kelembaban cukup, namun pada kondisi suhu tinggi sama sekali tidak memungkinkan karena ketersediaan

air sangat terbatas. Pada kondisi lapang, cekaman suhu tinggi sering dihubungkan dengan penurunan ketersediaan air. Pada umumnya, saat tengah hari kenaikan transpirasi menyebabkan defisit air pada tanaman, yang menginduksi penurunan potensial air yang menimbulkan gangguan terhadap beberapa proses fisiologi (Wahid *et al.*, 2007).

Akumulasi *Compatible Osmolytes*

Kunci mekanisme adaptasi tanaman yang ditanam pada kondisi cekaman abiotik, termasuk salinitas, kekeringan, dan suhu ekstrim, adalah akumulasi senyawa organik tertentu yang memiliki BM rendah, yang disebut sebagai *compatible osmolytes* (Sakamoto dan Murata, 2002). Dalam keadaan tercekam, tanaman yang berbeda akan mengakumulasi senyawa organik yang bervariasi seperti gula, gula alkohol (*polyols*), prolina, senyawa ammonium tersier atau kuarter, dan senyawa *sulphonium* tersier. Akumulasi senyawa tersebut akan meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik tertentu. Diketahui bahwa prolina dan glisinbetain (GB) diakumulasi oleh banyak tanaman secara meluas sebagai respon terhadap cekaman abiotik. Dalam menentukan fungsinya akumulasi senyawa osmolit kompatibel, diduga bahwa sintesis prolina dan GB mungkin terkait dengan fungsi sebagai bufer selular potensial redox pada kondisi cekaman suhu tinggi dan cekaman abiotik lainnya (Wahid dan Close, 2007). Seperti halnya akumulasi gula pada tebu dalam kondisi cekaman suhu tinggi telah dilaporkan memberikan implikasi yang besar terhadap toleransi suhu tinggi. Dalam kondisi cekaman suhu tinggi, pembentukan buah tomat mengalami kegagalan karena adanya metabolisme gula dan transpor prolina yang dihambat selama perkembangan reproduktif bunga jantan (Sato *et al.*, 2006). Tanaman transgenik dirakit untuk memproduksi *trehalose*, *fructans* atau *mannitol* yang mungkin bisa merupakan faktor penting

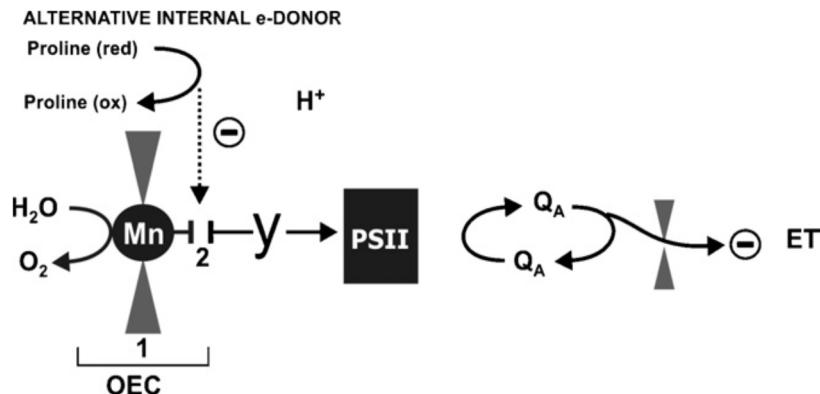
fenotipe tanaman yang toleran terhadap cekaman. Sebagai kesimpulan, karena fungsinya yang jelas dari senyawa osmolit sebagai respon terhadap cekaman abiotik pada tanaman, maka toleransi tanaman terhadap cekaman mungkin dapat ditingkatkan dengan meningkatkan akumulasi senyawa osmolit kompatibel melalui pemuliaan konvensional, MAS, atau pendekatan rekayasa genetik.

Fotosintesis

Reaksi fotokimia pada lamela thyllakoid dan metabolisme karbon pada stroma telah diindikasikan sebagai tempat utama terjadinya kerusakan. Fluoresen klorofil, rasio antara variabel fluoresen terhadap maksimum fluoresen (Fv/Fm), dan dasar fluoresen (Fo) adalah parameter fisiologi yang telah ditunjukkan memiliki korelasi dengan toleransi terhadap cekaman suhu tinggi. Peningkatan suhu daun dan '*photosynthetic photon flux density*' mempengaruhi penyesuaian termotoleran PSII, yang menunjukkan potensi fotosintesis pada berbagai kondisi lingkungan sepanjang batas suhu tidak dilampaui (Marchand *et al.*, 2005). Pada genotipe tomat yang berbeda dalam hal termotoleran, seperti juga pada tebu, peningkatan rasio klorofil a:b dan penurunan rasio klorofil:karotenoid dapat ditemui pada genotipe toleran dalam kondisi cekaman suhu tinggi, yang menunjukkan bahwa perubahan tersebut berhubungan dengan termotoleran (Wahid dan Ghazanfar, 2006).

Diketahui bahwa PSII sangat labil terhadap perubahan suhu, karena aktivitasnya sangat menurun pada kondisi suhu tinggi, yang mungkin disebabkan oleh adanya kerusakan pada propertinya membran thyllakoid, tempat dimana PSII berada. Cekaman suhu tinggi mungkin menyebabkan terjadinya disosiasi *oxygen evolving complex* (OEC), yang menghasilkan ketidakseimbangan arus elektron dari OEC menuju bagian aseptor

PSII dalam arah "PSI reaction center" (Gambar 1) (De Ronde *et al.*, 2004). Cekaman suhu tinggi menyebabkan disosiasi (*Mn*)-stabilizing 33-kDa protein pada kompleks *PSII reaction center* yang diikuti oleh pelepasan atom Mn. Cekaman suhu tinggi mungkin melemahkan bagian lain dari *pusat reaksi* seperti protein D1 dan D2.



Gambar 15. Suhu tinggi menginduksi penghambatan evolusi oksigen dan aktivitas PSII. Suhu tinggi menyebabkan (1) disosiasi atau (2) penghambatan OEC. Hal ini menyebabkan donor e-internal alternatif seperti prolin sebagai pengganti H₂O untuk mendonorkan elektron kepada PSII (De Ronde *et al.* 2004).

Suhu tinggi mempengaruhi kapasitas fotosintesis tanaman C₃ dan C₄. Hal ini menyebabkan perubahan distribusi energi dan merubah aktivitas enzim metabolisme karbon, terutama rubisco, yang menyebabkan perubahan laju regenerasi RuBP melalui gangguan pada transpor elektron dan inaktivasi enzim yang berfungsi mengembangkan oksigen pada PSII (Salvucci dan Crafts-Brandner, 2004). Cekaman panas (*heat shock*) mengurangi jumlah pigmen fotosintetik, protein terlarut, RBP (*rubisco binding proteins*), LS-rubisco dan SS-rubisco dalam gelap, namun dalam kondisi cahaya naik kembali, menunjukkan fungsinya

menyerupai chaperone dan HSPs. Selain itu, pada kondisi suhu tinggi sintesis pati dan sukrosa sangat dipengaruhi seperti ditunjukkan oleh penurunan aktivitas enzim SPS, ADPglucose, pyrophosphorylase and invertase (Vu *et al.*, 2001).

Kemampuan mempertahankan pertukaran CO_2 pada kondisi cekaman suhu tinggi memiliki hubungan langsung dengan toleransi terhadap suhu tinggi. Selama fase vegetatif, suhu siang hari dapat menyebabkan kerusakan untuk mengkompensasi fotosintesis, yang menurunkan laju asimilasi CO_2 . Walaupun aktivitas enzim rubisco meningkat, rendahnya afinitas enzim rubisco terhadap CO_2 , yang membatasi peningkatan fotosintesis netto (Pn). Pada jagung, Pn sangat dihambat pada suhu daun di atas 38°C, penghambatan itu lebih besar pada saat suhu meningkat tajam. Telah diketahui dengan baik bahwa konsekuensi adanya peningkatan suhu adalah terjadinya ketidakseimbangan antara fotosintesis dengan respirasi. Secara umum, laju fotosintesis menurun ketika gelap, dan fotorespirasi meningkat tajam pada suhu yang tinggi. Selain itu, pada suhu tinggi laju reaksi biokimia menurun, serta terjadi inaktivasi dan denaturasi enzim, yang menyebabkan penurunan fotosintesis secara tajam (Nakamoto dan Hiyama, 1999).

Partisi Asimilat

Pada kondisi cekaman suhu tinggi yang tergolong ringan-sedang memungkinkan terjadi penurunan aktivitas *sink* dan *source*, yang dapat menyebabkan penurunan yang hebat terhadap pertumbuhan, hasil tanaman secara ekonomi, dan indeks panen. Pada gandum dapat ditunjukkan bahwa suhu optimum untuk fotosintesis pada suhu 20-30°C, dan menurun tajam pada suhu di atas 30°C. Laju optimum 14°C keluar dari daun bendera (*phloem loading*) adalah pada 30°C, namun laju pergerakan asimilat melalui batang tidak dipengaruhi dari suhu 1-50°C. Dapat disimpulkan

bahwa pengaruh suhu terhadap translokasi merupakan pengaruh tidak langsung dari efek suhu terhadap aktivitas *source* dan *sink*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi dalam mobilisasi dari cadangan dalam daun, batang, atau bagian tanaman lainnya merupakan strategi potensial untuk memperbaiki pengisian biji dan hasil gandum pada kondisi cekaman suhu tinggi (Wahid *et al.*, 2007).

Stabilitas Termal Membran Sel (*Cell Membrane Thermostability*)

Cekaman suhu tinggi meningkatkan energi kinetik dan pergerakan molekul melewati membran, maka dapat menyebabkan lepasnya ikatan kimia dalam antara molekul-molekul membran biologis. Hal ini menyebabkan lapisan ganda lipida (lipid bilayer) dari membran biologis lebih cair yang disebabkan oleh denaturasi protein dan atau peningkatan asam lemak jenuh (Savchenko *et al.*, 2002). Peningkatan asam lemak jenuh pada daun dewasa meningkatkan temperatur pencairan membran plasma dan menurunkan toleransi terhadap panas pada tanaman. Integritas dan fungsi membran biologi sangat sensitif terhadap suhu tinggi, sejalan dengan perubahan struktur tersier dan kuarter protein membran oleh cekaman suhu tinggi. Perubahan tersebut meningkatkan permeabilitas membran, seperti ditunjukkan oleh hilangnya elektrolit. Peningkatan kebocoran larutan (solute) merupakan indikasi adanya penurunan stabilitas termal membran sel (CMT), yang sudah lama dipergunakan sebagai pengukuran tidak langsung toleransi terhadap cekaman suhu tinggi pada berbagai spesies, termasuk pada kedelai, kentang, dan tomat, sorgum, *cowpea*, dan *barley* (Wahid dan Shabbir, 2005).

Perubahan Hormonal

Hormon memegang peranan penting dalam adaptasi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Dalam signal hormonal, *Cross-talk* mencerminkan kemampuan tanaman berintegrasi terhadap perbedaan input dan tanggap secara tepat. Homeostatis hormonal, stabilitas, biosintesis dan kompartementasi mengalami perubahan di bawah kondisi cekaman suhu tinggi (Maestri *et al.*, 2002). Asam absisik (ABA) dan etilen (C_2H_4), sebagai hormon terkait cekaman, terlibat dalam regulasi berbagai proses fisiologi melalui aksi sebagai molekul sinyal. Cekaman lingkungan yang berbeda, termasuk suhu tinggi, menghasilkan kenaikan ABA. ABA memfasilitasi proses adaptasi tanaman terhadap desikasi melalui modulasi *up-or down* regulasi beberapa gen. Etilen meregulasi hampir semua proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman, mulai dari biji yang germinasi sampai pembungaan dan pembuahan sebagaimana juga toleransi terhadap berbagai cekaman lingkungan. Cekaman suhu tinggi merubah produksi etilen, spesies yang berbeda menunjukkan tingkat yang berbeda. Asam salisilat merupakan komponen penting dalam lintasan sinyal dalam tanggap terhadap resistensi sistemik yang diperoleh (SAR, *systemic acquired resistance*) dan tanggap hipersensitif (HR, *hypersensitive response*). SA menstabilkan faktor transkripsi trimers untuk *heat shock* dan membantu mereka untuk menggabungkan elemen *heat shock* kepada promoter gen-gen terkait *heat shock*.

Metabolit Sekunder

Seperti cekaman lingkungan lainnya, suhu tinggi menyebabkan akumulasi metabolit sekunder pada bermacam-macam tanaman. Namun demikian, peran yang spesifik dari metabolit sekunder dalam meningkatkan toleransi terhadap suhu tinggi tampaknya berbeda satu sama lain, yang masih perlu

dipelajari lebih lanjut. Kebanyakan metabolit sekunder disintesis dari senyawa intermediat karbon primer melalui jalur fenilpropanoid, sikimat, mevalonat atau metil eritritol fosfat (MEP) (Wahid dan Ghafar, 2006). Cekaman suhu tinggi menginduksi produksi senyawa fenolik seperti flavonoid dan fenilpropanoid. Fenilalanin amonia-liase (PAL) merupakan enzim utama dalam lintasan fenilpropanoid. Aktivitas enzim *fenil amonia-liase* (PAL) yang meningkat sebagai respon terhadap cekaman suhu merupakan respon aklimatisasi utama pada sel yang mengalami cekaman suhu tinggi. Cekaman panas meningkatkan biosintesis fenolik dan menekan oksidasi fenolik, yang diduga akan memicu kemampuan aklimatisasi terhadap suhu tinggi, seperti pada semangka. Karotenoid diketahui berperan memproteksi struktur sel pada bermacam spesies tanaman sebagai respon terhadap cekaman abiotik. Siklus xantofil, interkonversi dua macam karotenoid (*violaxanthin* dan *zeaxanthin*) yang reversibel telah berkembang dan memegang peran yang esensial dalam fotoproteksi. Karena *zeaxanthin* bersifat hidrofobik, maka sering ditemukan berada pada daerah kompleks pemanenan cahaya (*light harvesting complexes*), dimana terkait dengan fungsinya untuk mencegah kerusakan akibat stres peroksidatif pada lipida membran akibat ROS.

Telah disimpulkan bahwa selain fungsinya terhadap penyaringan sinar UV, antosianin menyebabkan penurunan potensial air daun, yang dihubungkan dengan peningkatan pengambilan air (*water uptake*) dan penurunan kehilangan air melalui transpirasi pada cekaman lingkungan termasuk suhu tinggi (Chalker-Scott, 2002). Isoprenoids, kelompok lain dari metabolit sekunder disintesis melalui lintasan mevalonat. Isoprenoids memiliki BM rendah dan bersifat volatil di alam, sehingga emisi senyawa ini dari daun dapat memberikan toleransi terhadap suhu tinggi kepada aparatus fotosintesis dalam tanaman berbeda (Loreto *et al.*, 1998). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biosintesis isoprenoid sesuatu yang *cost effective*. Tanaman yang mampu mengemisikan

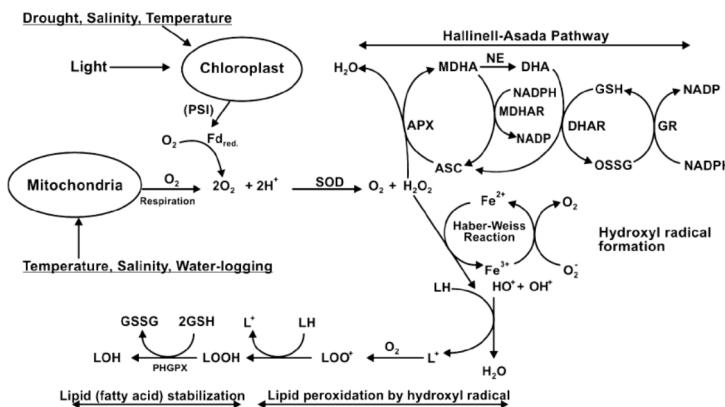
isopren dalam jumlah banyak umumnya memiliki fotosintesis yang lebih baik pada kondisi cekaman suhu tinggi. Oleh karena itu tampaknya terdapat hubungan antara emisi isoprene dengan toleransi suhu tinggi.

Respon Molekular terhadap Cekaman Suhu Tinggi Stres Oksidatif dan Antioksidan

Selain dehidrasi jaringan, cekaman suhu tinggi menyebabkan cekaman oksidatif. Hal tersebut ditunjukkan oleh adanya gejala reaksi dari spesies oksigen teraktivasi (*AOS, activated oxygen species*) termasuk singlet oksigen (1O_2), radikal superoksida (O_2^-), hidrogen peoksida (H_2O_2) dan radikal hidroksil (OH^-). AOS menyebabkan otokatalitik peroksidasi lipida membran dan beberapa pigmen, yang menyebabkan kehilangan semi-permeabilitas membran dan fungsinya menjadi berbeda (Xu *et al.*, 2006). Radikal superoksida secara reguler disintesis pada kloroplas dan mitokondria serta beberapa pada mikrobodi. Penghilangan O_2^- oleh enzim SOD (*superoxide dismutase*) menghasilkan H_2O_2 , yang dihilangkan oleh APX atau CAT. Namun demikian, tingkat toksitas O_2^- dan H_2O_2 tidak sehebat (OH^-), yang dibentuk oleh O_2^- dan H_2O_2 jika Fe^{2+} dan Fe^{3+} berada dalam jumlah yang sangat kecil saja melalui rekasi Haber-Weiss. Radikal OH^- dapat merusak klorofil, protein, DNA, lipida dan makromolekul lain yang sangat penting, yang menghambat metabolisme dan membatasi pertumbuhan dan hasil (Sairam dan Tyagi, 2004).

Tanaman telah mengembangkan sistem detoksifikasi baik melalui cara enzimatik maupun non-enzimatik untuk menghadapi AOS (*activated oxygen species*), sehingga mampu melindungi sel dari cekaman oksidatif. Over ekspresi (*over expression*) SOD pada tanaman sangat mempengaruhi berbagai fenomena fisiologi, termasuk penghilangan H_2O_2 , oksidasi

reduktan yang toksik, biosintesis dan degradasi lignin dalam dinding sel, katabolisme auksin, respon pertahanan diri terhadap pelukaan, pertahanan diri terhadap serangan patogen atau serangga dan beberapa proses respiratori. Lebih spesifik lagi adalah ekspresi dan aktivasi APX (*ascorbate peroxidase*) yang dihubungkan terhadap munculnya kerusakan fisiologi akibat cekaman termal (Gambar 2).



Gambar 16. Representasi skematis pembentukan dan penghilangan radikal superokksida, hidrogen peroksida, radikalhydroxyl pada kondisi berbagai cekaman lingkungan

Keterangan: APX, ascorbate peroxidase; ASC, ascorbate; DHA, dehydroascorbate; DHAR, dehydroascorbate reductase; Fd, ferredoxin; GR, glutathione reductase; GSH, red glutathione; GSSG, oxi-glutathione; HO, hydroxyl radical; LH, lipid; L, LOO[·]; LOOH, unstable lipid radicals and hydroperoxides; LOH, stable lipid (fatty acid); MDHA, monodehydro-ascorbate; MDHAR, mono dehydro-ascorbate reductase; NE, non-enzymatic reaction; PHGPX, phospholipid-hydroperoxide glutathione peroxidase; SOD, superoxide dismutase (Sairam dan Tyagi, 2004).

Protein Stres (Stress Proteins)

Ekspresi stres protein merupakan adaptasi penting untuk menghadapi cekaman lingkungan. Kebanyakan protein stres larut dalam air, maka bisa berperan terhadap toleransi melalui hidrasi struktur sel (Wahid dan Close, 2007). Walaupun *heat shock proteins* (HSPs) secara eksklusif disintesis untuk respon terhadap cekaman suhu tinggi, protein tertentu lainnya juga terlibat.

Heat Shock Proteins

Sintesis dan akumulasi protein spesifik dapat dipastikan terjadi selama berlangsungnya stres suhu yang cepat, protein ini disebut HSPs. Kenaikan produksi HSPs terjadi ketika tanaman mengalami cekaman suhu secara tiba-tiba atau perlahan-lahan. Pada tanaman tingkat tinggi, HSPs diinduksi pada setiap stadia perkembangan dan *HSPs major* memiliki homologi yang tinggi di antara organisme yang berbeda (Vierling, 1991). Termotoleran yang dipicu oleh HSP dihubungkan dengan pengamatan: (a) induksinya bertepatan dengan organisme dalam kondisi stres, (b) biosintesisnya sangat cepat dan intensif, dan (c) HSPs diinduksi dalam variasi yang luas pada sel dan organisme.

Terdapat tiga kelas protein yang dibedakan berdasarkan BM, yaitu: HSP90, HSP70, dan HSP dengan BM rendah 15-30 kDa. Pentingnya HSP kecil pada tanaman ialah kelimpahannya dan diversitasnya yang tidak biasa. Dalam kaitan respon terhadap suhu tinggi, HSPs spesifik telah diidentifikasi pada berbagai spesies yang berbeda. Sebagai contoh, HSP68, yang berlokasi pada mitokondria dan normalnya berekspresi secara konstitutif, telah ditemukan ekspresinya meningkat dalam kondisi cekaman suhu tinggi pada tanaman kentang, tomat, kedelai, dan barley (Neuman *et al.*, 1993).

Cekaman Kekeringan Akibat Perubahan Iklim

Cekaman kekeringan akan memperburuk dampak perubahan iklim, dimana sebagian besar lahan pertanian akan terkena dampak kekeringan akibat perubahan iklim. Terlepas dari peningkatan pasokan air total, efek dari peningkatan variabilitas curah hujan dan pergeseran musiman limpasan air, kualitas air, dan risiko banjir cenderung lebih besar dampaknya terhadap produksi pangan. Dalam kasus tanaman padi, yang berasal dari filogenetik semi akuatik, sistem produksi padi saat ini bergantung pada pasokan air yang cukup, maka tanaman padi lebih rentan terhadap kekeringan dibandingkan dengan tanaman lainnya (O'Toole, 2004). Cekaman kekeringan adalah kendala terbesar untuk produksi beras dalam sistem tada hujan, yang mempengaruhi 10 juta ha padi gogo dan lebih dari 13 juta ha padi sawah tada hujan di Asia saja (Pandey *et al.*, 2007). Pada tingkat seluruh tanaman, defisit air tanah merupakan kendala lingkungan penting yang mempengaruhi semua proses fisiologis yang terlibat dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kekeringan secara konseptual didefinisikan dalam hal kekurangan curah hujan dibandingkan dengan nilai rata-rata normal di lingkungan target. Namun, kejadian kekeringan dan efek pada produktivitas padi lebih bergantung pada distribusi curah hujan daripada total curah hujan musiman.

Cekaman kekeringan telah memberikan pengaruh yang buruk bagi produktivitas dan produksi pangan dunia. Sesuai perkiraan WHO, kekeringan telah menyebabkan kematian dari separuh penduduk dunia yang mati akibat bencana alam. Sejalan dengan adanya perubahan iklim, telah diprediksi bahwa pola curah hujan di dunia diperkirakan akan mengalami perubahan, yaitu akan menjadi curah hujan yang lebat secara eratik atau malah kekeringan yang panjang akan terjadi (Allen dan Ingram, 2002). Oleh karena itu, cekaman kekeringan akan berlanjut sebagai ancaman terhadap produksi pangan. Kebutuhan terhadap suatu

alternatif yang baru untuk sistem pertanian yang berkelanjutan, seperti tanaman yang toleran kekeringan, akan menyediakan solusi praktikal yang penting untuk menanggulangi ketersediaan air yang terbatas.

Respons Fisiologi terhadap Cekaman Kekeringan

Cekaman kekeringan akan menurunkan pertumbuhan dan fotosintesis. Penurunan fotosintesis pada kondisi kekeringan disebabkan oleh penutupan stomata dan pengaruh metabolismis. Defisit air akan menyebabkan penutupan stomata yang akan menurunkan konsentasi CO_2 seluler, sedangkan dehidrasi pada sel mesofil daun dapat menyebabkan kerusakan organ-organ fotosintesis. Efek buruk cekaman kekeringan terhadap fotosintesis akan dimediasi dengan tanggap terhadap: (i) sistem respirasi, transpor elektron, sintesis ATP pada mitokondria (Atkin dan Macherel, 2009); (ii) akumulasi metabolit yang diinduksi cekaman (Zhang *et al.*, 1999); dan (iii) ekspresi gen dan sintesis protein (Lawlor dan Tezara, 2009). Adaptasi secara langsung yang utama terhadap cekaman kekeringan adalah mengakumulasi air untuk menunda atau lolos (*escape*) dari cekaman. Berbeda halnya pada tanaman yang toleran, umumnya mampu menghadapi cekaman air dengan mengurangi fungsi metabolismis yang dilanjutkan berfungsi kembali setelah terjadi peningkatan potensial airnya pada sel. Tanaman lain mampu mempertahankan fungsi biologinya pada kondisi potensial air yang rendah, walaupun dengan pertumbuhan yang terbatas. Strategi lain untuk mengurangi kehilangan air adalah penutupan stomata yang dimediasi oleh sintesis ABA. Adaptasi ini berimplikasi terhadap menumpuknya gas CO_2 yang akan menurunkan laju fotosintesis yang akan menyebabkan ketidakseimbangan energi, di mana aliran elektron neto terjadi terhadap oksigen menyebabkan

kenaikan konsentrasi ROS (*reactive oxygen species*) dan proses-proses oksidatif.

Tanaman C₄ dan CAM telah mengembangkan strategi dalam penangkapan CO₂ untuk pembentukan gula pada kondisi ketersediaan air yang terbatas. Metabolisme ini melibatkan asimilasi CO₂ nokturnal pada CAM serta tanaman C₄ telah mengembangkan mekanisme yang efisien dalam pengikatan CO₂ oleh Rubisco. Tanaman C₄ telah mengembangkan anatomi daun khusus, di mana sel seludang pembuluhnya (*bundle sheath cells*) memiliki kloroplas, di samping sel mesofilnya seperti tanaman C₃. Sebagai pengganti fiksasi CO₂ pada siklus Calvin, CO₂ dikonversi ke dalam bentuk 4-karbon asam organik dengan kemampuan meregenerasi ulang CO₂ dalam kloroplas pada sel seludang pembuluhnya. Sel ini akan menggunakan CO₂ untuk pembentukan karbohidrat melalui lintasan konvensional C₃. Untuk proses ini stomata buka malam hari pada CAM yang memungkinkan tanaman CAM berlindung dari lingkungan panas, seperti ditunjukkan dengan tingkat konsumsi air yang sangat rendah dibandingkan dengan tanaman lain (Zhu *et al.*, 2008). Adaptasi anatomi pada tanaman toleran kekeringan terdiri atas jaringan spons, yang berperan sebagai reservoir air, pertumbuhan juga terhambat dan tanaman mengurangi luas daun untuk membatasi evaporasi. Strategi yang sama ditunjukkan dengan penggulungan daun, absisi bunga, perubahan permeabilitas kutikula.

Respons Biokimia terhadap Cekaman Kekeringan

Respons adaptasi didasarkan pada perubahan yang kompleks untuk menghadapi cekaman air difokuskan dengan mengatur potensial air pada jaringan yang penting. Pada level seluler, membran sel seperti juga sistem endo membran mengalami perubahan disposisi secara dramatis dan membatasi fungsi organel, seperti halnya integritas sel sebagai respons terhadap cekaman air (Gigon *et al.*, 2004). Dinding sel merupakan barier fisik yang juga melakukan proteksi dalam tingkat terbatas karena adanya deformasi propertinya. Ketika sel terkena cekaman air, rigiditas dari dinding sel akan menyediakan perlindungan secara mekanik, tetapi organ ini permabel sehingga memungkinkan terjadi desikasi jika cekaman yang lebih tinggi diberikan.

Adaptasi biokimia yang umum adalah penyesuaian osmotik (*osmotic adjusment*), yang merupakan akibat dari disintesisnya metabolit baru (Bartels dan Sunkar, 2005). Senyawa metabolit ini adalah molekul hidrofilik yang memiliki kelarutan tinggi (*hydrophylic highly soluble molecules*) yang mampu memproduksi permukaan solvasi (*solvation*) yang menangkap air selama ketersediaan air terbatas. Beberapa contoh osmolit tersebut adalah asam amino, glisin-betaïn, gula, gula alkohol yang merupakan molekul tidak beracun pada konsentrasi tinggi, maka tidak memberikan pengaruh terhadap metabolisme seluler. Hipotesis yang lain, osmolit tersebut memiliki fungsi tambahan di samping untuk mempertahankan turgiditas, yaitu menghadapi cekaman oksidatif melalui penekanan terhadap ROS (Bartels dan Sunkar, 2005). Gula yang diakumulasikan pada saat terjadinya cekaman tampaknya berfungsi untuk stabilitas membran dan menjaga terjadinya fusi antara membran dengan makromolekul lain seperti protein LEA. Trehalose adalah disakarida yang diakumulasikan pada kondisi cekaman kekeringan yang berfungsi selama perkembangan embrio dan pembungaan, seperti halnya juga dalam pengaturan metabolisme karbon dan fotosintesis (Itturiaga

et al., 2009). Prolin (*proline*) berada di alam, juga memiliki fungsi sebagai osmolit, selain fungsi lain untuk memproteksi integritas membran plasma, yaitu sebagai sumber karbon dan nitrogen dan berfungsi untuk menghilangkan ROS (Hong *et al.*, 2000). Glisin-betain telah dilaporkan sebagai osmoprotektan yang mengatur keseimbangan air pada organ tanaman (Chen dan Murata, 2002).

Respons Molekuler terhadap Cekaman Kekeringan

Toleransi terhadap kekeringan adalah sifat kuantitatif (*quantitative traits*) yang melibatkan satu set gen kompleks. Pada saat cekaman diterima tanaman, terjadi perubahan dalam *pola ekspresi* mulai dari gen yang produknya berperan dalam respons awal (*early response genes*) seperti sinyal transduksi, faktor transkripsi, dan translasi, sampai pada gen-gen yang responsnya di ujung (*late response genes*) seperti transpor air, keseimbangan osmotik, stres oksidatif, dan perbaikan dari kerusakan (Shinozaki dan Yamaguchi-Shinozaki, 2000). Respons adaptif yang teramat adalah konsekuensi dari terjadinya perubahan ekspresi tersebut meliputi pembungan awal dan penghambatan pertumbuhan.

Cekaman Salinitas Akibat Perubahan Iklim

Peningkatan ancaman salinitas telah menjadi isu penting terkait dengan konsekuensi dari perubahan iklim. Peningkatan konsentrasi CO₂ mungkin tidak memiliki efek merugikan pada pertumbuhan tanaman, tetapi efek tidak langsung kenaikan suhu terhadap naiknya permukaan laut akan menyebabkan hampir sebagian besar lahan basah pesisir dapat dipengaruhi oleh banjir dan salinitas dalam 50-100 tahun ke depan. Kenaikan permukaan laut 1.000 mm karena ekspansi termal diperkirakan terjadi ketika suhu naik 3,58°C. Ini tidak termasuk peningkatan permukaan laut karena es yang mencair, yang menyebabkan meningkatnya kadar

garam pesisir dan penurunan hasil tanaman, bahkan di daerah yang sebelumnya menguntungkan (Wassmann *et al.*, 2004). Selain itu, lebih dari setengah (55%) dari jumlah air tanah secara alami akan menjadi salin. Salinasi sekunder, khususnya karena penggunaan air irigasi dan pupuk yang tidak terkontrol dapat meningkatkan persentase air tanah payau. Muka air tanah, jika naik akan merusak sebagian besar vegetasi. Temperatur yang lebih tinggi memperburuk situasi dengan naiknya garam ke permukaan tanah karena gaya kapiler yang sangat sulit untuk dihilangkan di bawah zona perakaran. Peningkatan suhu juga akan mengganggu pola cuaca, yang menyebabkan lebih sering terjadinya masalah yang terkait dengan banjir, kekeringan, dan salinitas. Salinitas di daerah pesisir lebih sulit untuk ditangani melalui investasi reklamasi atau infrastruktur jangka panjang karena sifatnya yang dinamis. Di pedalaman, salinitas, dan alkalinitas, baik yang bersifat melekat atau diinduksi oleh praktik irigasi yang tidak tepat telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir dan diperkirakan akan memburuk lebih lanjut dengan kekurangan air berkualitas serta irigasi yang berlebihan untuk mengatasi peningkatan suhu.

Tabel 5. Ambang batas salinitas beberapa tanaman dan Persentase penurunan hasil pada kondisi salin (Ghafoor *et al.*, 2004)

Jenis Tanaman	Ambang Batas Salinitas (ds/m)	Penurunan Hasil (%/dsm ⁻¹)
Kacang hijau	1,0	19,0
Terung	1,1	6,9
Bawang merah	1,2	16,0
Cabai	1,5	14,0
Jagung	1,7	12,0
Tebu	1,7	5,9
Kentang	1,7	12,0
Kubis	1,8	9,7
Tomat	2,5	9,9

Jenis Tanaman	Ambang Batas Salinitas (ds/m)	Penurunan Hasil (%/dsm ⁻¹)
Padi	3,0	12,0
Kacang tanah	3,2	29,0
Kedelai	5,0	20,0
Gandum	6,0	7,1
Bit gula	7,0	5,9
Kapas	7,7	5,2
<i>Barley</i>	8,0	5,0

Tanaman padi memiliki adaptasi pada tanah tergenang membuat tanaman ini menjadi salah satu tanaman terpenting yang dapat digunakan untuk merehabilitasi sebagian besar areal pesisir dan lahan-lahan di pedalaman yang terkena garam, meskipun tanaman padi dikenal peka terhadap stres garam (Maas dan Hoffman, 1977). Hal ini akan membantu dalam pencucian garam berbahaya, selain memiliki potensi tinggi untuk perbaikan genetik. Selain itu, tanaman padi adalah satu-satunya yang bisa dikembangkan di beberapa daerah pesisir yang selalu basah berlebihan karena gerakan pasang surut dan atau hujan monsun. Meskipun demikian, produktivitas padi di daerah yang terkena garam saat ini sangat rendah, 1-1,5 ton ha⁻¹, tetapi cukup dapat ditingkatkan minimal menjadi 2 ton per ha (Ponnampерuma, 1994) yang mampu diharapkan dapat menyediakan makanan bagi jutaan rakyat miskin.

Pengembangan varietas yang toleran terhadap tanah salin pada berbagai komoditas sudah banyak dilakukan (Zeng *et al.*, 2002; Hussain *et al.*, 2003; Chinnusamy *et al.*, 2005). Ambang batas EC dan persentase penurunan hasil pada beberapa spesies tanaman dijelaskan pada Tabel 3. Kacang hijau, terung, bawang merah, dan jagung tergolong peka salinitas, sedangkan gandum, bit gula, kapas, dan *barley* tergolong toleran salinitas (Ghafoor *et al.*, 2004). Di antara berbagai tanaman, kelompok rumput-rumputan merupakan kelompok yang sangat toleran terhadap salinitas. Padi

termasuk kelompok yang *medium toleran* terhadap salinitas, tetapi padi yang dibudidayakan di daerah semi-arid dan arid adalah padi yang toleran terhadap salinitas. Beberapa varietas padi toleran terhadap salinitas adalah Kashmir Basmati dan NIAB-IRRI 9.

Cekaman Genangan Akibat Perubahan Iklim

Pada bagian ini pembahasan akan difokuskan untuk tanaman padi, yang memiliki adaptasi sangat baik terhadap genangan, sementara tanaman lain dipandang sulit untuk beradaptasi, kecuali bila digunakan teknik penanaman dengan sistem budidaya jenuh air seperti untuk kedelai yang dikembangkan di pasang surut. Cekaman genangan akan menjadi faktor penting yang membatasi produksi tanaman di wilayah Asia Selatan dan Asia Tenggara. Wassmann *et al.* (2009) menduga bahwa sekitar 10-15 juta ha tanaman padi di wilayah ini akan kehilangan hasil akibat kenaikan air laut seperti halnya akibat banjir yang disebabkan oleh kejadian cuaca ekstrim.

Tanaman padi umumnya tidak toleran ketika mengalami cekaman genangan penuh, dan akan mengalami kematian dalam beberapa hari (Wassmann *et al.*, 2009). Terdapat beberapa varietas padi yang mampu beradaptasi sampai 14 hari terhadap genangan penuh, yaitu dengan pertumbuhan ruas-ruasnya (*internode*) yang sangat cepat, yang mendorong tanaman muncul ke permukaan untuk mendapatkan oksigen dan cahaya yang cukup, sehingga mampu melakukan fotosintesis secara normal. Varietas-varietas tersebut bisa pulih kembali setelah 14 hari digenangi dan cekaman genangan penuh berhenti. Saat ini varietas-varietas tersebut digunakan sebagai donor toleran untuk program pemuliaan tanaman dan penelitian lanjutan untuk melihat mekanisme toleransi pada padi tersebut. Dari beberapa varietas tersebut, yang paling banyak digunakan adalah varietas *FR 13A*, yang

memiliki batang yang tinggi, dan sensitif terhadap fotoperiodisme sebagai tipe padi-*aus* dari India. Varietas yang toleran lainnya adalah *Karkarrupan* dan *Goda Heenati* dari Srilanka. Daerah kromosom yang paling toleran pada *FR13A* didesain sebagai *submerge 1 (Sub1)*, yang telah dipetakan pada kromosom 9 oleh kelompok yang bebas (Nandi *et al.*, 1997), lokus *Sub 1* juga telah dipetakan dan diurutkan dengan baik. Informasi ini memungkinkan untuk dilakukannya penelitian terhadap mekanisme fisiologi dan molekular dan lebih penting lagi bisa digunakan sebagai penanda untuk seleksi.

Tinjauan Ke Depan

Seperi telah diuraikan di depan bahwa pemahaman terhadap proses fisiologi cekaman abiotik akan memberikan dukungan yang besar terhadap perbaikan tanaman dan produksi tanaman dalam rangka adaptasi terhadap perubahan iklim. Ke depan, pengembangan tanaman yang memiliki ketahanan ganda terhadap cekaman yang diakibatkan perubahan iklim menjadi suatu keniscayaan. Untuk tanaman padi sangat dimungkinkan untuk dikembangkan varietas yang memiliki toleransi yang tinggi terhadap cekaman ganda salinitas dan genangan. Bahkan perlu dipikirkan untuk mengembangkan varietas padi yang ideal. Upaya antisipasi terhadap terjadinya berbagai cekaman abiotik yang mungkin timbul akan dijelaskan pada tulisan berikutnya “*Antisipasi dan Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi*”.

DAFTAR BACAAN

- Aggarwal PK. 2003. Impact of climate change on Indian agriculture. *J Plant Biol.* 30: 189–198.
- Ahmad A, Diwan H, Abrol YP. 2010. Global Climate Change, Stress and Plant Productivity. In Pareek A, Sopony SK, Bohnert HJ (eds.), *Abiotic Stress Adaptation in Plants*. Springer Link, pp 503-521.
- Allen LH Jr, Vu JCV, Valle RR, Boote KJ, Jones PH. 1988. Nonstructural carbohydrates and nitrogen of soybean grown under carbon dioxide enrichment. *Crop Sci.* 28: 84–94.
- Allen LH Jr, WJ Ingram. 2002. Constraint on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* 419: 224–232.
- Atkin OK, Macherel D. 2009. The crucial role of plant mitochondria in orchestrating drought tolerance. *Annals of Botany*. 103: 581–597.
- Bartels D, Sunkar R. 2005. Drought and salt tolerance in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24: 23–58.
- Bloom AJ, Smart DR, Nguyen DT, Searles PS. 2002. Nitrogen assimilation and growth of wheat under elevated carbon dioxide. *Proc Nat Acad Sci USA.* 99: 1730–1735.
- Bouman BAM, Van Laar HH. 2006. Description and evaluation of rice growth model ORYZA 2000 under nitrogen limited conditions. *Agric Syst.* 87: 249–273.

- Brown RA, Rosenberg NJ. 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agric Fores Meteor*. 83: 171–203.
- Bunce JA. 1998. Effect of humidity on short-term responses of stomatal conductance to an increase in carbon dioxide concentration. *Plant Cell Environ* 21: 115–120.
- Chalker-Scott L. 2002. Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? *Adv. Bot. Res.* 37: 103–106.
- Chen THH, Murata N. 2002. Enhancement of tolerance of abiotic stresses by metabolic engineering of betaines and other compatible solutes. *Curr. Opin. Plant Biol.* 5: 250–257.
- Chinnusamy V, Jagendorf A, Zhu JK. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Sci.* 45: 437–448.
- DaMatta FM, Grandis A, Arenque BC, Buckeridge MS. 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Res International* 3(7): 1814–1823.
- De Ronde JAD, Cress WA, Kruger GHJ, Strasser RJ, Staden JV. 2004. Photosynthetic response of transgenic soybean plants containing an *Arabidopsis P5CR* gene, during heat and drought stress. *J. Plant Physiol.* 61: 1211–1244.
- Easterling WE, Chhetri N, Niu XZ. 2003. Improving the realism of modelling agronomic adaptation to climate change: Simulating technological submission. *Clim Change* 60: 149–173.
- Ebrahim MK, Zingsheim O, El-Shourbagy MN, Moore PH, Komor E. 1998. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperature below and above optimum. *J. Plant Physiol.* 153: 593–602.

- Foyer C, Noctor G. 2002. Photosynthetic nitrogen assimilation and associated carbon and respiratory metabolism. *Advances in photosynthesis and respiration*, vol. 12 (series editor, Govindjee). Springer, Dordrecht.
- Ghafoor A, Qadir M, Murtaza G. 2004. *Salt-Affected Soils: Principles of Management*. 1ed. Allied Book Centre. Lahore, p. 304.
- Gigon A, Matos AR, Laffray D, Zuilly-Fodil Y, Pham-Thi AT. 2004. Effect of drought stress on lipid metabolism in the leaves of *Arabidopsis thailana* (Ecotype Columbia). *Ann. Bot.* 94: 345–351.
- Hiscock K, Southward A, Tittley I, Hawkins S. 2004. Effects of changing temperature on benthic marine life in Britain and Ireland. *Aquat Conserv: Mar Freshw Ecosyst* 14: 333–362.
- Hong Z, Lakkineni K, Zhang Z, Verma DPS. 2000. Removal of feedback inhibition of A1-pyrolline-5-carboxylate synthetase result in increased proline accumulation and protection of plants from osmotic stress. *Plant Physiol.* 112: 1129–1136.
- Horie T, Baker JT, Nakagawa H, Matsui T. 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: rice. In: Reddy KR, Hedges HF (eds) *Climate change and global crop productivity*. CAB International, Wallingford, pp. 81–106.
- Howarth CJ. 2005. Genetic improvements of tolerance to high temperature. In Ashraf M, Harris PJC (Eds.) *Abiotic Stresses: Plant Resistance Through Breeding and Molecular Approaches*. New York: Howarth Press Inc.
- Hulme M, Sheard N. 1999. *Climate Change Scenarios for Indonesia*, Climatic Research Unit, Norwich, UK.

- Hussain N, Ali A, Khan AG, Obaid-Ur-rehman, Tahir M. 2003. Selectivity of ions absorption of salt tolerance in rice (Variety Shaheen Basmati). *Asian Journal of Plant sciences.* 2(5): 445–448.
- Itturiaga G, Suarez R, Nova-Franco B. 2009. Trehalose metabolism: from osmoprotection to signaling. *Int. J. Mol. Sci.* 10: 3793–3810.
- Krishnan P, Swain DK, Bhaskar BC, Nayak SK, Dash RN. 2007. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agric Ecosys Environ.* 122: 233–242.
- Lawlor DW, Tezara W. 2009. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany.* 103: 543–549.
- Litbang BMKG. 2009. Suhu udara rata-rata di Indonesia naik. *Kompas.* 31 Maret 2009.
- Loreto F, Forster A, Durr M, Csiky O, Seufert G. 1998. On the monoterpene emission under heat stress and on the increased thermotolerance of leaves of *Quercus ilex* L. fumigated with selected monoterpenes. *Plant Cell Environ.* 21: 101–107.
- Maas EV, Hoffman GJ. 1977. Crop salt tolerance—Current assessment. *ASCEJ Irrig Drain Div.* 103: 115–34.
- Maestri E, Klueva N, Perrotta C, Gulli M, Nguyen HT, Marmiroli N. 2002. Molecular genetics of heat tolerance and heat shock proteins in cereals. *Plant Mol. Biol.* 48: 667–681.

- Marchand FL, Mertens S, Kockelbergh F, Beyens L, Nijs I. 2005. Performance of high arctic tundra plants improved during but deteriorated after exposure to a simulated extreme temperature event. *Global Change Biol.* 11: 2078–2089.
- Nakamoto H, Hiyama T. 1999. Heat-shock proteins and temperature stress. In: Pessarakli, M. (Ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker, New York. pp. 399–416.
- Nandi S, Subudhi P K, Senadhira D, Manigbas NL, SenMandi S, Huang N. 1997. Mapping QTLs for submergence tolerance in rice by AFLP analysis and selective genotyping. *Mol. General Genet.* 255: 1–8.
- Neumann DM, Emmermann M, Thierfelder JM, Zur Nieden U, Clericus M, Braun HP, Nover L, Schmitz UK. 1993. HSP68—a DNAK-like heat-stress protein of plant mitochondria. *Planta*. 190, 32–43.
- O'Toole TC. 2004. Rice water: The final frontier. In “First International Conference on Rice for the Future”, Aug. 31–Sept. 2, 2004 Bangko, Tailand. O'Toole JC, Namuco OS. 1983. Role of panicle exertion in water stress induced sterility. *Crop Sci.* 23:1093–1097.
- Pandey S, Bhandari H, Hardi B. 2007. “*Economic Costs of Drought and Rice Farmers' Coping Mechanisms: A Cross-country Comparative Analysis*,” 203 pp. International Rice Research Institute, Manila.
- Polley HW. 2002. Implications of Atmospheric and Climatic Change for Crop Yield and Water Use Efficiency. *Crop Sci* 42(1): 131-140.

- Ponnamperuma FN. 1994. Evaluation and improvement of lands for wetland rice production. In "Rice and Problem Soils in South and Southeast Asia" IRRI Discussion Paper Series No. 4 (D. Senadhira, Ed.), pp 3–19. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.
- Pressman E, Peet MM, Phaar DM. 2002. The Effect of Heat Stress on Tomato Pollen Characteristics is Associated with Changes in Carbohydrate Concentration in the Developing Anthers. *Ann. Bot.* 90 (5): 631-636.
- Runtunuwu N, Kondoh . 2008. Assessing global climate variability and change under coldest and warmest periods at different latitudinal regions. *Indon. J. Agric. Sci.* 9(1):7-18.
- Saini HS, Aspinall D. 1982. Abnormal sporogenesis in wheat (*Triticum aestivum* L.) induced by short periods of high-temperature. *Ann. Bot.* 49: 835–846.
- Sairam RK, Tyagi A. 2004. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Curr. Sci.* 86: 407–421.
- Sakamoto A, Murata N. 2002. The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant Cell Environ.* 25: 163–171.
- Sakya AE. 2014. Adaptasi Perubahan Iklim Dalam Upaya Penguatan Ketahanan Pangan. Simposium dan Seminar Nasional Perhimpunan Agronomi Indonesia: "Penguatan Ketahanan Pangan dalam Menghadapi Perubahan Iklim", UNS Surakarta, 13 – 14 Nopember 2014.
- Salvucci ME, Crafts-Brandner SJ. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiol. Plant.* 120: 179–186.

- Sato S, Kamiyama M, Iwata T, Makita N, Furukawa H, Ikeda H. 2006. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. *Ann. Bot.* 97: 731–738.
- Savchenko GE, Klyuchareva EA, Abrabchik LM, Serdyuchenko EV. 2002. Effect of periodic heat shock on the membrane system of etioplasts. *Russ. J. Plant Physiol.* 49: 349–359.
- Sheoran IS, Saini, HS. 1996. Drought-induced male sterility in rice: Changes in carbohydrate levels and enzyme activities associated with the inhibition of starch accumulation in pollen. *Sexual Plant Reprod* 9:161–169.
- Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. 2000. Molecular responses to dehydration and low temperature: Differences and cross-talk between two stress signaling pathways. *Curr.Opin.Plant Biol.* 3: 217–223.
- Sombroek WG, Gommes R. 1998. The climate change – agricultural conundrum. In: Bazzaz F, Sombroek W (eds) *Global climate change and agricultural production*. Wiley, New York, pp .1–14.
- Takeoka Y, Mamun AL, Wada AT, Kaufman PB. 1992. Primary features of the effect of environmental stress on rice spikelet morphogenesis. Reproductive adaptation of rice to environmental stress. “Developments on Crop Science,” Japan Scientific Societies Press, Elsevier, Tokyo. Vol. 22, Chapter 5, pp. 113–141.
- Upadhyay DC, Dwivedi N, Mohan R, Paswan G. 2001. Effect of elevated CO₂ concentration on leaf structures of *Brassica juncea* under water stress. *Biol Plant.* 44: 149–152.

- Uprety DC, Dwivedi N, Jain V, Mohan R. 2002. Effect of elevated CO₂ on the stomatal parameters of rice cultivars. *Photosynthetica*. 40: 315–319.
- Vierling E. 1991. The role of heat shock proteins in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 579–620.
- Vu JCV, Gesch RW, Pennanen AH, Allen LHJ, Boote KJ, Bowes G. 2001. Soybean photosynthesis, Rubisco and carbohydrate enzymes function at supra-optimal temperatures in elevated CO₂. *J. Plant Physiol.* 158: 295–307.
- Wassmann R, Hien NX, Hoanh CT, Tuong TP. 2004. Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: Water elevation in the flood season and implications for rice production. *Clim. Change* 66: 89–107.
- Wassmann R, Jagadish SVK, Heuer S, Ismail A, Redona E, Serraj R, Singh RK, Howell G, Pathak H, Sumfleth K. 2009. *Climate Change Affecting Rice Production: The Physiological and Agronomic Basis for Possible Adaptation Strategies*. In Donald LS (ed.), *Advances in Agronomy*, Vol 101. Burlington: Academic Press, pp. 59-122.
- Wahid A, Shabbir A. 2005. Induction of heat stress tolerance in barley seedlings by pre-sowing seed treatment with glycinebetaine. *Plant Growth Reg.* 46: 133–141.
- Wahid A, Ghazanfar A. 2006. Possible involvement of some secondary metabolites in salt tolerance of sugarcane. *J. Plant Physiol.* 163: 723–730.
- Wahid A, Gelani S, Ashraf M, Foolad MR. 2007. Heat tolerance in plants: An Overview. *Env. Exp. Bot.* 61(3): 199–223.
- Wahid A, Close TJ. 2007. Expression of dehydrins under heat stress and their relationship with water relations of sugarcane leaves. *Biol. Plant.* 51: 104–109.

- Xu S, Li J, Zhang X, Wei H, Cui L. 2006. Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress. *Environ. Exp. Bot.* 56: 274–285.
- Yoshida S, Satake T, Mackill D. 1981. High temperature Stress. *IRRI Res. Pap.* 67: 1–15.
- Young KJ, Long SP. 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: maize and sorghum. In: Reddy KR, Hodges HF (eds) *Climate change and global crop productivity*. CAB International, London, pp. 107–131.
- Zeng L, Shannon MC, Grieve CM. 2002. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters. *Euphytica*. 127: 235–245.
- Zhang J, Nguyen HT, Blum A. 1999. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botany*. 50: 291–302.
- Zhang HX, Blumwald E. 2001. Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulatesalt in foliage but not in fruit. *Nat. Biotechnol.* 19: 765–768.
- Zhang J-H, Huang W-D, Liu Y-P, Pan Q-H. 2005. Effects of temperature acclimation pretreatment on the ultrastructure of mesophyll cells in young grape plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) under cross-temperature stresses. *J. Integr. Plant Biol.* 47: 959–970.
- Zhu XG, Long SP, Ort DR. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert into biomass? *Curr. Opin. Biotechnol.* 19: 153–159.

BAB. 2

VARIABILITAS IKLIM DAN DINAMIKA WAKTU TANAM PADI

Yayan Apriyana

Pendahuluan

Variabilitas iklim Indonesia sangat berkaitan erat dengan ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) di Samudera Pasifik (Kirono and Khakim 1999; Naylor *et al.*, 2002) dan IOD (Indian Ocean Dipole) di Samudera Hindia (Saji *et al.*, 1999; Webster *et al.*, 1999; Ashok *et al.*, 2001; Mulyana, 2001). Pada suatu saat terjadi penurunan curah hujan yang mengakibatkan terjadinya kekeringan dan pada saat yang lain mengakibatkan tingginya curah hujan sehingga dapat menimbulkan banjir (Allan, 2000). Munculnya fenomena El Niño kuat sebanyak tujuh kali sepanjang dua puluh tahun terakhir disertai dengan terjadinya fenomena IOD positif yang hampir terjadi bersamaan mengakibatkan deraan kekeringan yang cukup serius. Berdasarkan peristiwa kekeringan yang terjadi sebanyak 43 kali sejak tahun 1844 – 1998, hanya enam peristiwa kekeringan yang tidak berkaitan dengan fenomena El Niño (Boer and Subbiah 2005). Seperti halnya kekeringan yang terjadi antara tahun 1990 – 1997, dalam kurun waktu tersebut terjadi tiga kali kekeringan yang hebat yaitu tahun 1991, 1994 dan 1997. Demikian pula secara hampir bersamaan Saji *et al.* (1999) dan Webster *et al.* (1999) menyatakan bahwa pada tahun 1997 ketika terjadi El Niño kuat, secara bersamaan terjadi pula IOD positif kuat di Samudera Hindia.

Dampak ENSO dan IOD terhadap Stabilitas Tanaman Pangan

Pada kenyataannya indikator anomali iklim ENSO dan IOD mempunyai dampak yang kuat terhadap curah hujan daerah tropis termasuk variabilitas curah hujan di Indonesia (Saji and Yamagata., 2003; Naylor *et al.*, 2007). Kedua fenomena tersebut semakin sering terjadi dengan kondisi musim yang semakin ekstrim dan durasi yang semakin panjang sehingga secara signifikan dapat menyebabkan penurunan curah hujan terutama di musim peralihan saat memasuki musim hujan (IPCC, 2007; Koesmaryono *et al.*, 2009). Kondisi tersebut menimbulkan dampak yang signifikan terhadap strategi budidaya dan produksi pertanian (IPCC, 2001; Betts, 2005; Porter and Semenov, 2005; Osborne, 2005). Terutama di daerah tropis yang mempunyai variasi curah hujan cukup besar (Slingo *et al.*, 2005). Dampak relatif dari perubahan iklim terhadap ketahanan pangan berbeda antar daerah (Gutman *et al.*, 2005; FAO, 2005) baik di daerah tropis maupun sub-tropis. Namun dampak di daerah tropis lebih besar karena mempunyai variasi curah hujan yang cukup besar (Slingo *et al.*, 2005) yang pada gilirannya mengakibatkan gangguan terhadap stabilitas sistem pertanian (Koesmaryono *et al.*, 2008).

Variabilitas iklim di satu sisi dapat menjadi potensi namun di sisi lain dapat pula menjadi ancaman bagi kemandirian pangan. Peningkatan fluktuasi, frekuensi dan intensitas anomali iklim dalam dasawarsa terakhir yang disebabkan oleh fenomena ENSO dan IOD berdampak pada perubahan pola distribusi, intensitas dan periode musim hujan sehingga awal musim hujan maupun musim kering menjadi terlambat (Las, 2000; Boer, 2006; Naylor *et al.*, 2007; D'Arrigo, 2008. Akibatnya terjadi pergeseran musim dari kondisi normal rata-ratanya yang akhirnya dapat berimplikasi serius pada tanaman pangan (Hamada *et al.*, 2002; Haylock and McBride, 2001) karena umur tanaman pangan lebih pendek dibandingkan dengan tanaman tahunan seperti perkebunan.

Stabilitas pangan khususnya ketersediaan pangan fluktuasinya sangat dipengaruhi oleh variasi iklim dan cuaca (Pendleton &

Lawson, 1989). Hasil kajian FAO (2005) menunjukkan bahwa variabilitas dan perubahan iklim mempengaruhi 11% lahan pertanian di negara-negara berkembang yang dapat mengurangi produksi bahan pangan dan menurunkan Produk Domesik Bruto (PDB) sampai 16%. Sementara itu dampak variabilitas dan perubahan iklim juga dapat menurunkan produksi tanaman pangan (serealia) di kawasan Asia Tenggara antara 2,5 % sampai 7,8 % (Fischer *et al.*, 2002). Variabilitas dan perubahan iklim dengan segala dampaknya yang terjadi berpotensi menyebabkan kehilangan produksi tanaman pangan utama sebesar (20,6%) untuk padi, (13,6%) jagung dan (12,4%) untuk kedelai (Handoko *et al.*, 2008). Sementara itu kebutuhan pangan terutama beras terus meningkat sejalan dengan pertambahan penduduk. Diperkirakan pada tahun 2020 jumlah penduduk akan mencapai 262 juta jiwa dengan konsumsi beras 134 kg per kapita, dengan demikian kebutuhan beras nasional mencapai 35,1 juta ton atau 65,9 juta ton GKG (Budianto, 2002)

Munculnya anomali iklim El Niño dan IOD positif secara bersamaan sangat jelas implikasinya terhadap waktu tanam. Misalnya pada tahun 1997/98 akibat kedua fenomena tersebut telah menggeser waktu tanam pada musim hujan 1997/98 hingga 2-3 bulan (6-9 dasarian) yang secara runut juga berpengaruh terhadap waktu tanam pada musim tanam berikutnya (Las, 2000). Sehingga produksi padi turun sebesar 6,5 % yang berdampak pada peningkatan impor beras menjadi sebesar 3 juta ton pada tahun 1998 (BPS, 1998). Demikian pula terhadap masa tanam (*growing season*) menunjukkan bahwa terjadi pergeseran sekitar 10 hingga 20 hari dari lama masa tanam normal pada satu abad terakhir ini (Linderholm, 2006).

Hubungan ENSO dan IOD dengan Kalender Tanam Padi

Dampak kedua fenomena tersebut juga sangat terasa pada perubahan pola tanam baik di lahan sawah irigasi maupun tada hujan. Saat ini, sebagian besar areal tanam padi menggunakan pola tanam padi-padi dimana pada musim tanam kedua sangat tergantung pada ketersediaan air irigasi (Las *et al.*, 2007). Kekeringan yang terjadi pada musim tanam kedua akan mengubah pola tanam dari padi-padi menjadi padi-non padi sehingga akan mengakibatkan penurunan produksi beras, yang pada gilirannya akan mengganggu stok pangan nasional.

Penetapan awal musim tanam padi merupakan salah satu strategi penting dalam budidaya pertanian di Indonesia (Naylor *et al.*, 2001; 2007) khususnya tanaman pangan yang sangat berkaitan dengan anomali iklim. Penetapan awal musim tanam merupakan bagian dari kalender tanam secara tradisional telah lama dikembangkan oleh petani secara turun temurun dengan berbagai istilah yang berbeda di setiap daerah. Namun demikian berbagai kearifan lokal tersebut tidak dapat sepenuhnya dijadikan acuan dalam menetapkan awal musim tanam karena perubahan iklim dan semakin sulitnya menemukan indikator penanda musim. Fluktuasi curah hujan yang sangat dinamis akibat munculnya anomali iklim menyebabkan terjadinya pergeseran awal musim hujan dan musim kemarau. Dampak perubahan pola hujan dan pergeseran awal musim mengakibatkan perubahan waktu tanam yang dapat mempengaruhi maju mundurnya waktu tanam sehingga sangat menyulitkan petani yang telah terbiasa dengan kalender tanam yang dilakukan.

Penyusunan kalender tanam sangat diperlukan untuk mendukung budidaya tanaman pangan. Dengan kalender tanam dapat diketahui waktu dan pola tanam di daerah tertentu selama setahun. Disamping itu kalender tanam tersebut memberikan informasi komoditas yang biasa ditanam pada suatu wilayah dari mulai persiapan lahan sampai dengan panen selama setahun. Untuk memperkuat daya tahan sektor pertanian terhadap ancaman variabilitas iklim, diperlukan upaya strategis dalam mengantisipasi

dampak variabilitas iklim dengan melakukan adaptasi budidaya pertanian. Sehingga dampak anomali yang cenderung meningkat tersebut dapat diminimalisasi agar tidak menimbulkan kerugian yang sangat besar bagi kesinambungan ketahanan pangan.

Fenomena ENSO dan IOD mempunyai dampak yang sangat luas dan dampak yang paling serius terhadap tanaman pangan terutama padi. Oleh karena itu upaya yang sangat penting dilakukan adalah dengan memahami karakteristik iklim wilayah dengan baik. Salah satu upaya adalah melalui kajian dampak kedua fenomena tersebut terhadap kalender tanam di sentra-sentra produksi padi di wilayah Indonesia, baik pada wilayah monsunal maupun equatorial. Hasil penelitian ini akan dijadikan dasar untuk pengembangan strategi adaptasi kalender tanam padi terhadap fenomena ENSO dan atau IOD.

Kajian tentang pengaruh fenomena ENSO di Samudera Pasifik dan IOD di Samudera Hindia terhadap pola distribusi dan intensitas hujan, prakiraan musim, maupun terhadap peristiwa kekeringan sudah banyak dilakukan baik oleh pakar di dalam maupun luar negeri. Permasalahannya sampai sejauh mana pengaruh kedua fenomena tersebut terhadap kalender tanam tanaman pangan, terutama padi, masih memerlukan pengkajian yang lebih mendalam.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Las *et al.* (2007) menunjukkan masih adanya perbedaan puncak tanam pada wilayah monsunal, khususnya Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur. Hal tersebut menandakan masih tingginya signifikansi awal musim hujan pada masing-masing daerah. Kondisi tersebut akan berbeda pula pada daerah dengan pola hujan equatorial, akibatnya beberapa implikasi terhadap berbagai pendistribusian sarana produksi seperti benih, pupuk maupun obat-obatan akan berpengaruh terhadap suplai dan demand beras yang pada gilirannya akan mengganggu stabilitas program Peningkatan Produksi Beras Nasional (P2BN) maupun program ketahanan pangan pada umumnya.

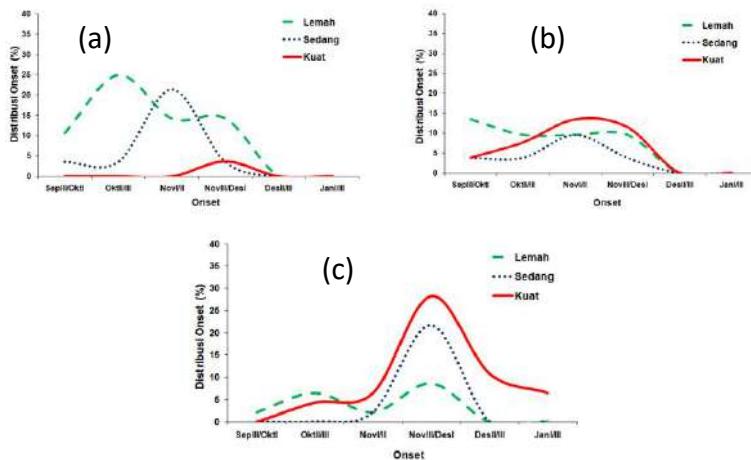
Mundurnya awal tanam akibat anomali iklim sangat berdampak serius terhadap pola tanam dan waktu tanam pada musim tanam berikutnya sehingga akan mengganggu stabilitas hasil padi. Untuk

itu perlu dilakukan analisis waktu tanam yang tepat agar tidak terjadi defisit air selama masa pertumbuhan terutama pada fase kritis tanaman. Disamping itu informasi prediksi curah hujan sangat diperlukan guna membantu dalam memberikan informasi dini untuk perencanaan tanam ke depan mengingat ketidakpastian kondisi iklim di masa mendatang terutama di wilayah yang sering terkena dampak anomali iklim.

Sampai saat ini masih banyak permasalahan yang dihadapi petani mulai dari daya saing hasil pertanian dengan negara lain, subsidi pupuk dan obat-obatan yang tidak merata, serta pendidikan dan ketrampilan yang masih relatif terbatas. Kondisi tersebut diperparah dengan ancaman perubahan iklim yang akhir-akhir ini semakin tidak menentu. Akibatnya petani semakin sulit dalam melakukan praktek budidaya pertanian terutama dalam menetapkan waktu tanam dan pola tanam yang akan diusahakan yang menjadi ciri kondisi spesifik lahan usaha tani dengan luasan tertentu. Permasalahan lain yang timbul adalah ketidakpastian ketersediaan air yang berkaitan erat dengan musim yang berubah. Pada suatu saat terjadi musim kering panjang namun pada saat lain terjadi musim hujan dengan intensitas tinggi. Namun demikian di satu sisi petani memiliki pengalaman dan cara-cara mengatasi masalah dalam menghadapi kerentanan kondisi iklim (*autonomous adaptation*) dalam beberapa tahun terakhir. Oleh karena itu, perlu dipelajari upaya petani dalam melakukan adaptasi kalender tanam. Terutama pada kondisi keterbatasan air terutama pada wilayah – wilayah yang terindikasi kuat terkena dampak anomali iklim, Sehingga akan terbangun teknik adaptasi yang lebih terencana (*planned adaptation*) yang pada akhirnya dapat dipadatkan menjadi satu informasi terpadu yang dapat dilakukan pula di wilayah lain, dengan karakteristik sumberdaya iklim dan air yang hampir sama di Indonesia.

Studi Kasus dampak ENSO dan IOD terhadap Waktu Tanam Padi di Wilayah Monsunal

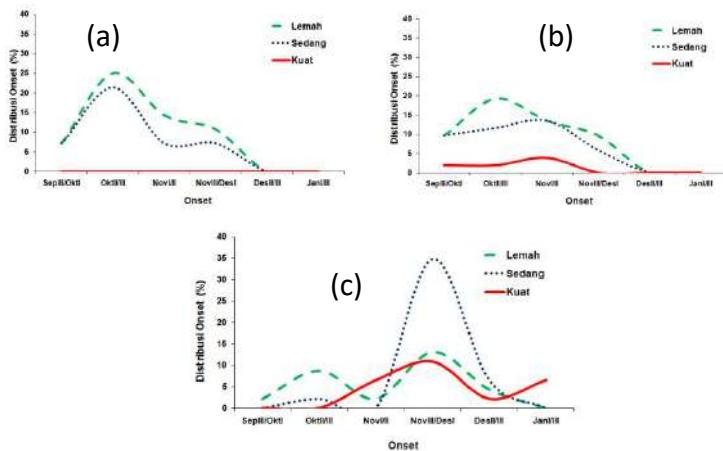
Puncak tanam atau awal musim tanam (*onset*) di wilayah dengan pola curah hujan monsunal seperti di Jawa Barat pada umumnya terjadi pada September dasarian III/ Oktober dasarian I (Las *et al.* 2007). Puncak tanam semakin mundur dari Barat ke Timur. Pada wilayah yang terpengaruh lemah oleh ENSO seperti di Karawang, sekitar 25% kecamatan mengalami keterlambatan tanam 1-3 dasarian pada Oktober II/III. Pada wilayah yang terpengaruh kuat oleh ENSO seperti di Subang Utara, puncak tanam mundur pada November I/II dengan pergeseran 3-5 dasarian dari puncak tanam pada umumnya. Pengaruh ENSO lebih kuat di Indramayu yang terjadi pada November III/Desember I atau mundur 6 dasarian dari puncak tanam pada umumnya (Gambar 1). Di Selatan Jawa Barat seperti halnya di kabupaten Garut, Ciamis dan Tasik, meskipun sebagian besar wilayahnya terpengaruh ENSO hanya mundur 1 – 2 dasarian saja.



Gambar 17. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian ENSO di (a) Karawang; (b) Subang dan (c) Indramayu, Jawa Barat.

Karawang dan Subang yang terpengaruh rendah sampai sedang oleh IOD puncak tanam di wilayah tersebut pada

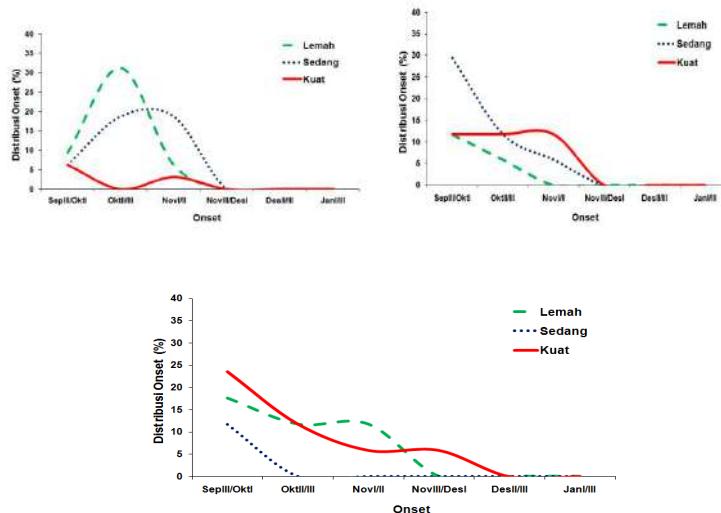
umumnya mundur 1-2 dasarian sedangkan di Indramayu mundur 6 dasarian (Gambar 2). Di wilayah yang tidak terpengaruh baik oleh ENSO maupun IOD seperti di sebagian besar kabupaten Bogor, Cianjur dan Bandung, puncak tanam tidak mengalami pergeseran, seluruh puncak tanam terjadi pada September III/Okttober I. Di wilayah Selatan Jawa Barat seperti di Garut dan Tasikmalaya kejadian IOD tidak pula menggeser puncak tanam kecuali di Sukabumi puncak tanam mundur 1 dasarian (Gambar 3).



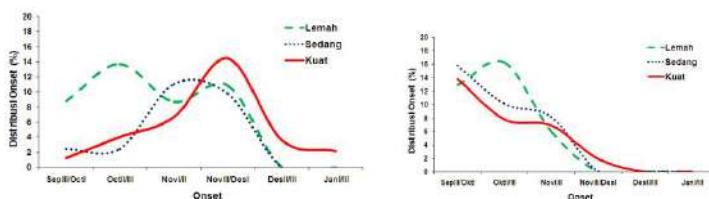
Gambar 18. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian IOD di (a) Karawang; (b) Subang (c) dan Indramayu, Jawa Barat.

Secara keseluruhan mundurnya puncak tanam di Jawa Barat terjadi pada wilayah-wilayah yang dipengaruhi ENSO terutama di Bagian utara Jawa Barat. Pada wilayah yang terpengaruh lemah oleh ENSO puncak tanam begeser sampai 1-3 dasarian yaitu pada Oktober II/III, pada wilayah terpengaruh sedang bergeser 3-5 dasarian pada November I/II dan pada wilayah terpengaruh kuat

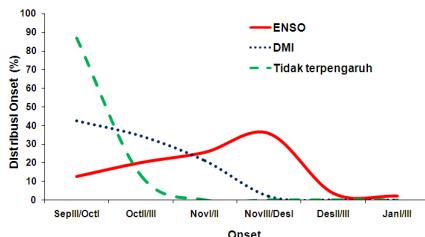
dapat mencapai hingga sampai 5-6 dasarian pada November III/Desember I. Sebaliknya di wilayah selatan Jawa Barat pergeseran puncak tanam yang didominasi IOD hanya bergeser 1 dasarian saja (Gambar 4). Dan secara keseluruhan pada pola wilayah monsunal, pergeseran puncak tanam terjadi bila kejadian ENSO mendominasi wilayah tersebut (Gambar 5).



Gambar 19. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian IOD di (a) Sukabumi; (b) Garut dan (c) Tasikmalaya, Jawa Barat.



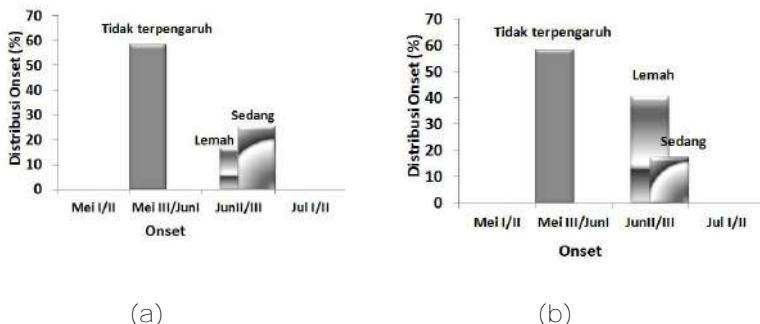
Gambar 20. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian (a)ENSO dan (b) IOD di Jawa Barat.



Gambar 21. Hubungan kejadian ENSO dan IOD dengan onset di Jawa Barat.

Studi Kasus dampak ENSO dan IOD terhadap Waktu Tanam Padi di Wilayah Equatorial

Di wilayah dengan pola hujan equatorial seperti di Sumatera Barat, pada umumnya hampir sepanjang tahun lahan terus ditanami karena distribusi curah hujan relatif merata sepanjang tahun. Pada wilayah yang tidak terpengaruh puncak tanam pada umumnya terjadi pada Mei III/Juni I. Namun pada daerah-daerah yang diindikasikan terkena pengaruh iklim ENSO dan IOD terdapat sedikit pola yang berbeda. Wilayah yang terkena dampak ENSO seperti di sebelah Timur Sawahlunto dan sebagian Pesisir Selatan *awal musim tanam* pada umumnya terjadi pada Juni II/III. Demikian pula pada sebagian wilayah-wilayah yang terkena dampak seperti Agam, Padang, Pariaman dan Pesisir Selatan awal musim tanam juga terjadi pada Juni II/III. Dengan demikian pada wilayah-wilayah yang terpengaruh lemah maupun sedang baik oleh ENSO maupun IOD hanya bergeser 1-2 dasarian dari puncak tanam pada umumnya (Gambar 6).



Gambar 22. Distribusi onset pada saat terjadi (a) ENSO dan (b) IOD di wilayah equatorial (Sumatera Barat).

Di wilayah monsunal seperti provinsi Jawa Barat, pengaruh ENSO dan IOD terhadap curah hujan baru terlihat setelah memasuki periode Juni – Agustus dan meningkat pada periode September – November. Pada periode Juni – Agustus hanya 10% stasiun hujan yang terpengaruh kedua anomali iklim tersebut sedangkan pada periode September – November meningkat tajam menjadi 75% dari seluruh stasiun di Jawa Barat.

Wilayah yang terpengaruh kuat oleh ENSO pada periode September – November meliputi Subang, Indramayu, Kuningan, Cirebon, Garut dan Ciamis. Dan wilayah yang terpengaruh kuat oleh IOD meliputi Cianjur Selatan, Garut, Tasikmalaya dan Kuningan. Wilayah yang tidak terpengaruh baik oleh ENSO maupun IOD meliputi Bogor, Cianjur dan wilayah barat Bandung.

Pada periode September – November hampir seluruh luas sawah di Jawa Barat atau sekitar 84% terpengaruh oleh ENSO dan IOD secara bersamaan dan hanya sekitar 16% luas sawah terdapat pada wilayah yang tidak terpengaruh oleh kedua fenomena tersebut. Di wilayah yang terpengaruh oleh ENSO, puncak tanam mundur 1 sampai 6 dasarian. Dan pergeseran puncak tanam tertinggi terjadi di Indramayu yaitu sekitar 5 sampai 6 dasarian.

Pada wilayah yang terpengaruh oleh IOD pada umumnya puncak tanam mundur 1 – 2 dasarian kecuali di Indramayu mundur 6 dasarian. Pada wilayah yang tidak terpengaruh kedua fenomena tersebut seperti Bogor, Cianjur dan wilayah barat Bandung, puncak tanam terjadi pada September III/Okttober I.

Wilayah sentra padi paling kuat dipengaruhi ENSO dan IOD adalah Indramayu. Hampir seluruh wilayahnya terpengaruh oleh ENSO dan IOD, sekitar 55% luas sawah di wilayah tersebut terpengaruh kuat oleh ENSO dan 13% oleh IOD. Puncak tanam terdapat pada November III/Desember I. Sentra padi yang sebagian besar sawahnya terdapat pada wilayah yang tidak terpengaruh oleh ENSO dan IOD adalah Cianjur dengan puncak tanam terdapat pada September III/Okttober I.

Pengaruh ENSO dan IOD terhadap curah hujan baru terlihat setelah memasuki periode Juni – Agustus dan meningkat pada periode September – November. Pada periode Juni – Agustus hanya 20% stasiun hujan yang terpengaruh ENSO sedangkan pada periode September – November pengaruh IOD baru terjadi. Sekitar 15% stasiun berkorelasi nyata dengan ENSO dan IOD secara bersamaan.

Wilayah equatorial yang terpengaruh kuat oleh ENSO pada periode September – November meliputi Padang dan Pesisir Selatan. Dan wilayah yang terpengaruh kuat oleh IOD meliputi Padang Panjang, Padang dan Pesisir Selatan.

Pada periode September – November hampir seluruh luas sawah di Sumatera Barat atau sekitar 73% tidak terpengaruh oleh ENSO dan IOD secara bersamaan dan hanya sekitar 20% luas sawah terdapat pada wilayah yang terpengaruh oleh kedua fenomena tersebut. Puncak tanam pada umumnya terjadi pada Mei III/Juni I. Namun pada daerah-daerah yang diindikasikan terkena pengaruh iklim ENSO dan IOD puncak tanam bergeser 1 sampai 2 dasarian

Wilayah sentra padi yang dipengaruhi ENSO dan IOD adalah Pesisir Selatan. Tetapi tidak ada wilayah yang terpengaruh kuat baik oleh ENSO maupun IOD. Pengaruh ENSO di wilayah tersebut lemah sampai sedang yang mempengaruhi luas sawah masing-masing 8 dan 49 %. Luas sawah yang tidak terkena dampak sekitar 43%. Demikian pula dengan IOD yang berpengaruh lemah pada luas sawah sekitar 58%.

Penetapan waktu tanam optimal pada wilayah terkena dampak ENSO dan IOD.

Potensi Waktu Tanam di Indramayu

Hasil analisis untuk lahan tada hujan di Indramayu dengan menggunakan WARM menunjukkan bahwa pada tahun normal, El Niño, maupun IOD positif baik di Anjatan, Kertasemaya maupun di Krangkeng, pada September III nilai Indeks Kecukupan Air masih berada di bawah nilai batas kritis (< 0.8) dan nilai transpirasi defisit masih tinggi di atas 20% (Gambar 7). Nilai Indeks Kecukupan Air berada di atas nilai batas kritis mulai Oktober III. Hal tersebut menunjukkan bahwa potensi waktu tanam dimulai pada periode tersebut sehingga dapat dikatakan bahwa awal musim tanam (*onset*) dimulai pada Oktober III. Nilai indeks kecukupan air berlangsung terus di atas batas kritisnya sampai dengan Februari III/ Maret II. Dengan demikian potensi waktu tanam pada ketiga wilayah tersebut pada tahun normal terjadi sekitar 12 – 14 dasarian dari Oktober III sampai dengan Februari III/Maret II (Tabel 1). Pada rentang waktu tersebut ketersediaan air tercukupi sehingga tanaman tidak mengalami cekaman air pada fase kritis tanaman yaitu pada fase pembungaan. Petani yang menanam pada rentang waktu tersebut dapat meminimalisasi kehilangan hasil padi karena indeks

kecukupan air pada lahan sawah tada hujan berada pada titik aman tanam.

Indeks kecukupan air turun setelah memasuki waktu tanam pada Maret III dan berfluktuasi pada periode berikutnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketersediaan air mulai April I sampai Agustus III terganggu saat memasuki periode kritis tanamannya. Dengan demikian pada bulan-bulan tersebut tidak disarankan untuk dilakukan penanaman padi. Bila petani menanam pada periode tersebut maka harus dipersiapkan pasokan irigasinya.

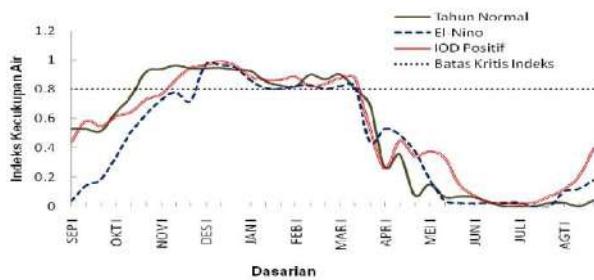
Hasil analisis potensi waktu tanam untuk lahan sawah irigasi menggunakan neraca air sawah irigasi menunjukkan bahwa pada tahun normal, El Niño, maupun IOD positif baik di Anjatan, Kertasemaya maupun di Krangkeng, pada September III defisit kehilangan air masih tinggi di atas 40% (Gambar 8). Defisit kehilangan air mulai berada di bawah 40% memasuki Oktober I dan terus berlangsung sampai dengan Mei II – Juli II. Hal tersebut menunjukkan bahwa awal musim tanam untuk lahan irigasi adalah Oktober I. Potensi waktu tanam lebih panjang dibandingkan dengan lahan tada hujan antara 22 - 28 dasarian. Memasuki waktu tanam pada Agustus I prosentase defisit ketersediaan air meningkat hingga lebih dari 40% dan terus berlangsung sampai dengan September III. Sehingga waktu tanam tidak disarankan pada periode tersebut karena tanaman akan mengalami defisit ketersediaan air.

Fenomena El Niño dapat mengakibatkan penurunan nilai indeks kecukupan air hingga di bawah ambang nilai kritis pada beberapa dasarian sehingga potensi waktu tanam di lahan tada hujan akan lebih lambat dan lebih pendek dibandingkan dengan tahun normalnya. Di wilayah yang terindikasi kuat terkena El Niño seperti di Anjatan dan Krangkeng, waktu tanam lebih lambat 5 sampai 7 dasarian masing-masing pada Desember I dan Desember III. Bahkan potensi waktu tanam di Krangkeng lebih pendek 8 dasarian dibandingkan dengan waktu tanam pada

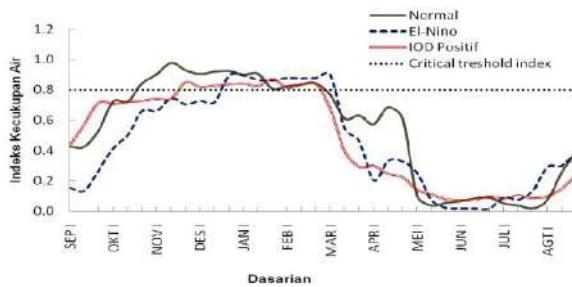
tahun-tahun normal yaitu pada November III – pada Desember I – Januari III. Pada wilayah yang terindikasi lemah terkena El Niño seperti di Kertasemaya waktu tanam juga mundur 3 dasarian dan potensi tanam pada November III – Maret II.

Mundurnya waktu tanam akibat terjadinya El Niño juga terjadi pada lahan irigasi namun lebih singkat dibandingkan dengan lahan tadah hujan. Waktu tanam di Anjatan dan Kertasemaya mundur 2 dasarian dari Oktober I menjadi Oktober III sedangkan di Krangkeng mundur hingga 3 dasarian menjadi November I (Gambar 4.4).

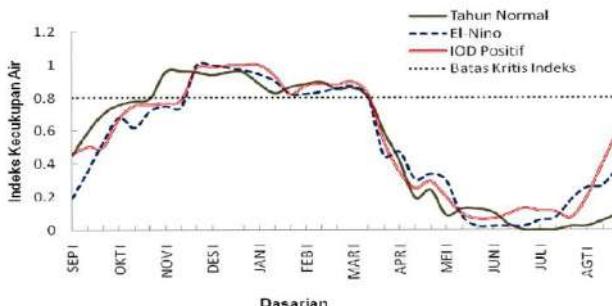
Saat terjadi IOD positif indeks kecukupan air mempunyai rentang yang lebih panjang dibandingkan dengan saat terjadi El Niño sehingga potensi waktu tanam lebih lama yaitu pada November II atau lebih lambat 2 dasarian dari tahun normalnya. Sebaliknya waktu tanam lebih panjang 2 dasarian di Anjatan dan 1 dasarian di Krangkeng dibandingkan dengan saat terjadi El Niño .Pengaruh IOD positif tidak begitu terlihat pada lahan irigasi, namun penundaan waktu tanam masih terjadi sekitar 1-2 dasarian masing-masing di Anjatan dan Krangkeng.



(a)

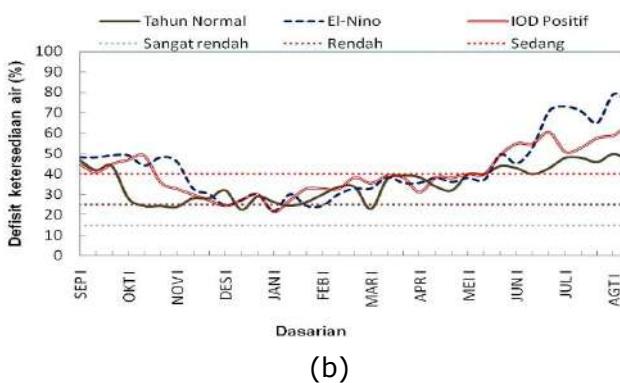
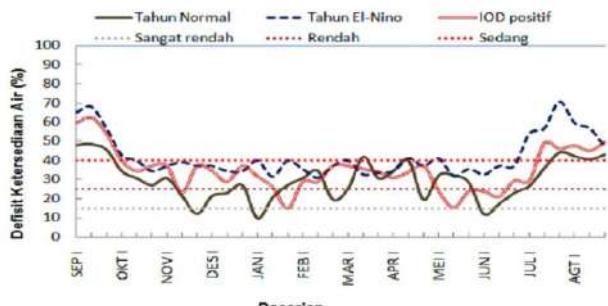


(b)



(c)

Gambar 23. Fluktuasi indeks kecukupan air pada lahan tada hujan di wilayah terkena dampak ENSO dan IOD. Di (a) Anjatan, (b) Krangkeng dan (c) Kertasemaya, Kabupaten Indramayu.



(c)

Gambar 24. Fluktuasi defisit ketersediaan air pada lahan irigasi di wilayah terkena dampak ENSO dan IOD. Di (a) Anjatan, (b) Krangkeng dan (c) Kertasemaya, Kabupaten Indramayu.

Tabel 6. Potensi waktu tanam padi di wilayah monsunal

Tahun Kejadian	Kabupaten	Kecamatan	Potensi waktu tanam (dasarian)	
			Tadah Hujan	Irigasi
Normal	Indramayu	Anjatan	Oktober III – Maret II	Oktober I – Juli II
		Kertasemaya	Oktober III – Maret II	Oktober I – Juni II
		Krangkeng	Oktober III – Februari III	Oktober I – Mei II
	Cianjur	Warungkondang	September III – Maret II	September III – April II
		Ciranjang	September III – Maret III	September III – April II
El Niño	Indramayu	Anjatan	Desember I – Maret II	Oktober III – Juni III
		Kertasemaya	November III – Maret II	Oktober III – Juni II
		Krangkeng	Desember III – Maret I	November I – Mei II
	Cianjur	Warungkondang	September III – Maret III	September III – April III
		Ciranjang	September III – April I	September III – April II
IOD Positif	Indramayu	Anjatan	November II – Maret II	Oktober III – Juli I
		Kertasemaya	November III – Maret II	Oktober I – Juni II
		Krangkeng	November III – Februari III	Oktober III – Mei II
	Cianjur	Warungkondang	September III – Maret III	September III – April III
		Ciranjang	September III – April II	September III – April II

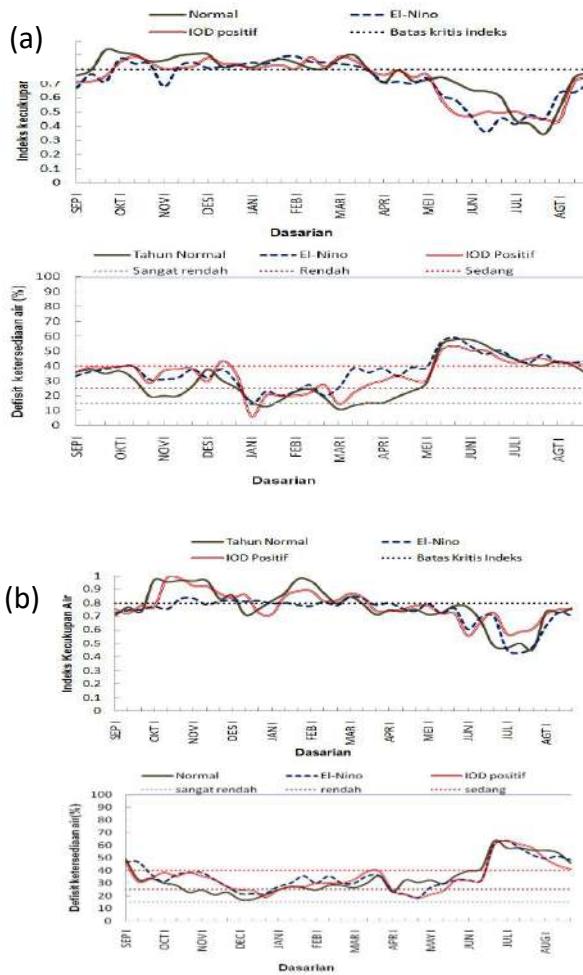
Potensi Waktu Tanam di Pesisir Selatan

Potensi waktu tanam pada tahun normal di Tarusan dan Batang Kapas masing-masing pada September III dan Oktober I yang ditandai dengan nilai indeks kecukupan air pada periode tersebut berada di atas nilai kritisnya dengan transpirasi defisit kurang dari 20% (Gambar 9). Pergeseran waktu tanam pada lahan tadah hujan terjadi saat fenomena El Niño maupun IOD positif muncul. Keterlambatan waktu tanam terjadi di Tarusan hanya 1 dasarian saat terjadi El Niño maupun saat terjadi IOD positif (Tabel 2). Hal tersebut ditunjukkan dengan penurunan indeks kecukupan air dan transpirasi defisit lebih dari 20% (Gambar 9). Di Batang Kapas pengaruh IOD positif dan El Niño dapat mengakibatkan potensi waktu tanam mundur masing-masing 1 dan 3 dasarian. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaruh IOD positif di wilayah equatorial tidak begitu besar pengaruhnya dalam pergeseran potensi waktu tanaman padi.

Potensi waktu tanam pada lahan irigasi lebih awal 3 dasarian. Pada September III tahun normal nilai defisit ketersediaan air kurang dari 40% (Gambar 9). Keterlambatan waktu tanam akibat El Niño dan IOD positif pada lahan irigasi tidak begitu terlihat jelas. Keterlambatan waktu tanam baik di Tarusan maupun di Batang Kapas hanya 1 dasarian saja saat terjadi El Niño maupun IOD positif.

Tabel 7. Potensi waktu tanam padi di wilayah equatorial

Tahun Kejadian	Kabupaten	Kecamatan	Potensi waktu tanam (dasarian)	
			Tadah Hujan	Irigasi
Normal	Pesisir Selatan	Tarusan Batang Kapas	September III – Maret II Oktober I – Maret I	Agustus III – Mei I September II – Mei III
	Solok	Saning Bakar	Mei II – Maret II	Mei I – Maret I
		Sumantri	Juni I – Maret III	Mei I – Maret II
	El Niño	Pesisir Selatan	Oktober I – Maret II Oktober III – Maret I	September I – Mei I Oktober I – Mei III
		Solok	Mei II – Maret III	Mei I – Maret I
			Juni I – Maret II	Mei I – Maret I
	IOD Positif	Pesisir Selatan	Oktober I – Maret II Oktober II – Maret I	September I – Mei I September II – Mei III
		Solok	Mei II – Maret II	Mei I – Maret I
			Juni I – Maret III	Mei I – Maret II



Gambar 25. Fluktuasi indeks kecukupan air dan defisit ketersediaan air di wilayah terkena dampak ENSO (atas) dan IOD (bawah) di (a) Tarusan dan (b) Batang Kapas, Kabupaten Pesisir Selatan.

Penutup

Pada tahun normal, awal musim tanam padi lahan tada hujan di wilayah monsunal, seperti di Indramayu terdapat pada Oktober III dengan potensi waktu tanam Februari III sampai dengan Maret II. Awal musim tanam mundur 3 sampai 6 dasarian pada November III sampai dengan Desember III pada saat terjadi El Niño. Demikian pula pada saat terjadi Dipole Mode positif, awal musim tanam mundur 2 sampai 3 dasarian menjadi November II/III. Pada lahan irigasi, di tahun normal awal musim tanam lebih dahulu 2 dasarian dibandingkan dengan lahan tada hujan yaitu pada Oktober I dengan potensi waktu tanam sampai dengan Juni II – Juli II. Awal musim tanam mundur masing-masing 1 dasarian saat terjadi Dipole Mode positif dan 2 - 3 dasarian saat terjadi El Niño dengan potensi waktu tanam pada umumnya lebih pendek 1 dasarian dari tahun normalnya.

Pada tahun Normal, awal musim tanam di wilayah equatorial seperti di Pesisir Selatan terdapat pada Oktober I/September III dengan potensi waktu tanam sampai dengan Maret I/II. Pada lahan irigasi, awal musim tanam lebih dahulu 3 dasarian dibandingkan dengan lahan tada hujan yaitu pada Agustus III dengan potensi waktu tanam sampai dengan Mei I. Pada saat terjadi El Niño maupun IOD positif baik di lahan tada hujan maupun lahan irigasi awal musim tanam hanya mundur 1 dasarian dengan potensi waktu tanam sama dengan pada tahun normalnya.

Awal musim tanam tidak bergeser pada wilayah yang tidak terkena dampak anomali iklim baik di wilayah monsunal seperti di Cianjur maupun wilayah equatorial seperti di Solok. Awal musim tanam padi lahan tada hujan maupun irigasi di Cianjur pada September III, sedangkan di Solok awal musim tanam di lahan tada hujan lebih dahulu dibandingkan dengan di Cianjur yaitu pada Mei II/Juni I dan untuk padi lahan irigasi pada Mei I.

DAFTAR BACAAN

- Allan R. 2000. ENSO and climatic variability in the past 150 years, in ENSO: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts, Diaz, H. & Markgraf, V. (Eds.), pp. 3-55. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Ashok K, Guan Z, and Yamagata T. 2001: Impact of the Indian Ocean Dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall and ENSO. *Geophys. Res. Lett.* 28: 4499–4502.
- Betts R. 2005. Integrated approaches to climate–crop modelling: needs and challenges. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360: 2049–2065.
- Boer R, and Subbiah. 2005. Agriculture drought in Indonesia. In V.J. Boken, A.P. Cracknell and R.L. Heathcote (eds). *Monitoring and predicting agriculture drought: A global study*. Oxford University Press, New York. p: 330-344.
- Boer R. 2006. Aplikasi Informasi Prakiraan Iklim di Sektor Pertanian Tanaman Pangan dan Hortikultura. Dalam Modul Pelatihan Dosen Bidang Pemodelan dan Simulasi Komputer untuk Pertanian. Bagpro PKSDM Dikti dan Dep. Geofisika dan Meteorologi IPB. Bogor. Cisarua, Bogor, 7 – 20 September 2006
- BPS (Biro Pusat Statistik). 1998. Kondisi Produksi Beras Tahun 1998 Statistik Pertanian. Jakarta.

- Budianto J. 2002. Tantangan dan peluang penelitian padi dalam perspektif agribisnis. Dalam: B. Suprihatno et al. (Eds.). Kebijakan perberasan dan inovasi teknologi. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor. p. 1-17.
- D'Arrigo R and Wilson R. 2008. El Niño and Indian Ocean Influences on Indonesian Drought: Implications for Forecasting Rainfall and Crop Productivity. International Journal of Climatology. 28: 611–616
- FAO. 2005. "Impact of Climate Change and Diseases on Food Security and Poverty Reduction". Special event background document for the 31st session of the committee on world food security. Rome, 23-26 May 2005.
- Fischer G, Shah M, Velthuizen HV. 2002. Climate Change and Agricultural Vulnerability. IIASA. Luxemburg, Austria.
- Gutman GI, Csiszar, and Romanov P. 2000. Using NOAA/AVHRR products to monitor *El Niño* impacts: focus on Indonesia in 1997-98., Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, 1189–1205.
- Hamada J, Yamanaka MD, Matsumoto J, Fukao S, Winarso PA, Sribimawati, T. 2002. Spatial and temporal variations of the rainy season over Indonesia and their link to ENSO. J Meteorol Soc Jpn 80: 285–310.
- Handoko I, Sugiarto Y, Syaukat Y. 2008. Keterkaitan Perubahan Iklim dan Produksi Pangan Strategis. Telaah kebijakan independen bidang perdagangan dan pembangunan oleh Kemitraan/Partnership Indonesia. SEAMEO BIOTROP. Bogor.

Haylock M, and McBride J. 2001. Spatial coherence and predictability of Indonesian wet season rainfall, *J. Climate* 14: 3882-3887.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis, eds Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kirono DGC, and Khakim N. 1999. ENSO Rainfall Variability and Impacts on Crop Production in Indonesia. *Physical Geography*, Vol 20. 6, pp. 508-519.

Koesmaryono Y, Las I, Aldrian E, Runtunuwu E, Syahbuddin H, Apriyana Y, Ramadhani F, Trinugroho W. 2008. Laporan Hasil Kegiatan. Sensitivitas dan Dinamika Kalender Tanam Padi Terhadap Parameter ENSO (El-Nino Southern Oscillation) dan IOD (Indian Ocean Dipole) di Daerah Monsunal dan Equatorial. Laporan KKP3T. Litbang Deptan-IPB. (Tidak dipublikasi).

Koesmaryono Y, Las I, Aldrian E, Runtunuwu E, Pramudia A, Apriyana Y, Trinugroho W. 2009. Laporan Hasil Kegiatan. Pengembangan Standar Operasional Prosedur Adaptasi Kalender Tanaman Padi terhadap ENSO-IOD Berbasis Sumberdaya Iklim dan Air. Laporan KKP3T. Litbang Deptan-IPB. (Tidak dipublikasikan).

- Las I. 2000. Peluang Kejadian El Niño dan La Niña Tahun 1900-2000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Badan Litbang Pertanian. Bogor. Tidak Dipublikasikan.
- Las I, Unadi A, Subagyono K, Syahbuddin H, Runtunuwu E. 2007. Atlas Kalender Tanam Pulau Jawa. Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. 96 hal.
- Linderholm HW. 2006. Growing season changes in the last century. *Agric. For. Meteor.* 137(1-2): 1-14.
- Mulyana E. 2001. Interannual Variation of Rainfall over Indonesia and Its Relation to the Atmospheric Circulation, ENSO and Indian Ocean Dipole Mode. Hokaido University. Japan.
- Naylor RL, Falcon WP, Rochberg D and Nikolaswada. 2001. Using El Niño/Southern Oscillation Climate Data to Predict Rice Production in Indonesia. Center for Environmental Science and Policy, Encina hall 405e, Stanford University, Stanford, Ca 94305-6055, U.S.A. *Climatic Change* 50: 255–265.
- Naylor RL, Falcon W, Wada N, and Rochberg D. 2002. Using El Niño Southern Oscillation climate data to improve food policy planning in Indonesia, *Bulletin of Indonesian Economic Studies* 38: 75-91.
- Naylor RL, Battisti DS, Vimont DJ, Falcon WP, and Burke MB. 2007. Assessing the risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 104: 7752-7757.
- Osborne TM. 2005 Towards an integrated approach to simulating crop-climate inter-actions. Ph.D. thesis, University of Reading.

- Pendleton JW, and Lawson TL. 1989. Climatic Variability and Sustainability of Crop yields in the humid tropics. International Symposium on Climatic Varability and Food Security in Developing Countries 5 – 9 Februari 1987. New Delhi. IRRI: 54 – 58.
- Porter JR, and Semenov MA. 2005. Crop responses to climatic variation. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360: 2021-2035.
- Saji NH, Goswami BN, Vinayachandran P N, Yamagata T. 1999. A Dipole in the Tropical Indian Ocean. *Nature* 401: 360-363.
- Saji NH, and Yamagata T. 2003. Structure of SST and Surface Wind Variability during Indian Ocean Dipole Mode Events: COADS Observations. *Journal of Climate*, 16, pp. 2735-2751.
- Slingo JM, Challinor AJ, Hoskins, BJ, and Wheeler TR. 2005. Introduction: food crops in a changing climate. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360: 1983-1989.
- Webster PJ, Moore AM, Loschnigg JP, and Leben RR. 1999. Coupled ocean-Atmosphere Dynamics in the Indian Ocean during 1997-98, *Nature* 401: 356-359.

BAB 3.

KEBUTUHAN AIR

TANAMAN SEMUSIM

Suciantini dan Tri Nandar Wihendar

Pendahuluan

Setiap makhluk hidup membutuhkan air untuk kelangsungan kehidupannya. Demikian pula dengan tanaman, tanaman membutuhkan air yang cukup berbeda-beda tergantung jenisnya, sesuai dengan faktor genetik. Kebutuhan air tanaman dan ketersediaannya merupakan faktor pembatas untuk pertumbuhan, perkembangan, pembungaan dan pembuahan tanaman. Tanaman membutuhkan air dalam jumlah yang berbeda. Reaksi tanaman terhadap kekurangan air berbeda-beda pula, terkait dengan interaksi di dalam tubuh tanaman. Ketersediaan air tanaman akan mempengaruhi terhadap kualitas tanaman yang dihasilkan. Tanaman yang memperoleh air dalam jumlah yang cukup sesuai kebutuhan pada setiap fasenya akan memberikan hasil yang lebih optimal dibanding tanaman yang mengalami kekurangan maupun kelebihan air.

Permasalahan yang kerap dijumpai terkait dengan ketersediaan air untuk tanaman dari faktor-faktor cuaca/iklim diantaranya adalah kejadian kekeringan dan banjir yang dapat mempengaruhi terhadap produktivitas tanaman, terutama pada tanaman semusim, seperti pada tanaman pangan dan hortikultura. Tulisan ini menyajikan mengenai kebutuhan air

tanaman ditinjau dari fungsi air, sumber air untuk tanaman dari hujan dan irigasi, irigasi otomatis, serta evapotranspirasi dan perhitungan.

Definisi Kebutuhan Air Tanaman

Kebutuhan air tanaman dapat didefinisikan sebagai besar/jumlah air yang dibutuhkan tanaman untuk berlangsungnya metabolisme di dalam tubuh tanaman dari awal pertumbuhan hingga tanaman siap panen, yang berbeda-beda pada setiap tanaman tergantung pada karakteristik tanaman dan kondisi lingkungan. Menurut Murdiyarso (1991) dan (Djufry 2006), kebutuhan air tanaman atau disebut konsumsi air oleh tanaman memiliki pengertian sebagai banyaknya air yang hilang dari areal bervegetasi per satuan luas per satuan waktu yang digunakan untuk transpirasi dan untuk evaporasi dari permukaan vegetasi dan tanah. Kurnia (2004) menyatakan bahwa jumlah air yang dibutuhkan tanaman dipengaruhi oleh umur dan jenis tanaman, periode pertanaman, teknik pemberian air, sifat fisik tanah, jarak sumber air ke lahan pertanian, serta luas areal pertanian yang harus diairi. Hedi (2010) menyatakan bahwa "Kebutuhan air suatu tanaman dapat didefinisikan sebagai jumlah air yang diperlukan untuk memenuhi kehilangan air melalui evapotranspirasi tanaman yang sehat, pada sebidang lahan yang luas dengan kondisi tanah yang tidak mempunyai kendala (kendala lengas tanah dan kesuburan tanah) dan mencapai potensi produksi penuh pada kondisi lingkungan tumbuh tertentu" ..

Fungsi Air untuk Tanaman dan Faktor-faktor yang Mempengaruhi

Air adalah komponen utama tanaman hijau, yaitu sekitar 70-90% dari berat segar kebanyakan spesies tanaman tak berkayu. Sebagian

besar air dikandung dalam isi sel (85-90%), yang merupakan media yang baik untuk banyak proses fotokimia. Gerakan air dalam sistem tanaman-tanah dan atmosfir adalah karena perbedaan kandungan energi bebas dari air dalam bagian sistem yang berbeda. Pada tanaman yang bertranspirasi dan mendapat cukup air, kandungan energi bebas dari air menurun dengan cepat sementara bergerak dari tanah, melalui xylem dan daun ke atmosfir bebas. Konsekuensinya air mengalir dari tanah masuk ke tanaman terus ke udara sebagai respons terhadap gradien energi bebas tersebut (Fitter and Hay, 1991).

Air sebagai sistem pelarut dari sel merupakan suatu medium untuk pengangkutan di dalam tanah. Air dapat mempertahankan turgor dalam rumitnya proses transpirasi dan pertumbuhan tanaman. Air juga diperlukan sebagai hara untuk pembentukan persenyawaan baru. Kehilangan air yang terus menerus menyebabkan perubahan-perubahan dalam tanaman yang tidak dapat balik dan mengakibatkan kematian. Kehilangan air secara transpirasi oleh tanaman dapat dipandang sebagai pertukaran dengan karbon dan dalam hal ini transpirasi sangatlah penting untuk pertumbuhan (Harjadi, 2002). Air berperan penting dalam proses-proses dalam tubuh tanaman seperti proses fotosintesis. Air tersedia bagi tanaman adalah kondisi atau kadar air antara kapasitas lapang dengan titik layu permanen. Kondisi pada kapasitas lapang adalah kondisi air dalam pori-pori tanah yang tidak dipengaruhi oleh gaya gravitasi, sedangkan kondisi berlawanan disebut kadar air pada kondisi titik layu permanen. Jumlah air yang tersedia bagi tanaman dipengaruhi oleh karakteristik tanah (tekstur, struktur) serta bahan organik tanah.

Faktor penting yang mempengaruhi potensi pertumbuhan tanaman diantaranya adalah karakteristik tanaman dan lingkungan. Air merupakan salah satu faktor pembatas kehidupan tanaman, mengingat air merupakan salah satu faktor lingkungan yang mempengaruhi terjadinya faktor-faktor fisiologis di dalam tubuh tanaman yang dikendalikan oleh reaksi-reaksi biokimia yang terjadi. Serapan air oleh tanaman untuk memenuhi proses pertumbuhan dan evapotranspirasi mengikuti siklus diurnal. Air bergerak dari zona

perakaran secara berulang dan periodik menuju tanaman dan kemudian dikeluarkan oleh tanaman ke atmosfer.

Kebutuhan air untuk tanaman dipengaruhi oleh faktor iklim dan tanah. Faktor iklim seperti radiasi surya, suhu, kecepatan angin, dan kelembaban udara mempengaruhi proses evaporasi (Djufry 2006). Semakin besar intensitas radiasi surya dan kecepatan angin yang berada pada lingkungan tumbuh tanaman, maka proses evapotranspirasi atau kebutuhan air tanaman akan bertambah pula. Selain kecepatan angin dan radiasi surya, kelembaban juga mempengaruhi proses evapotranspirasi. Ketika kondisi lingkungan tumbuh tanaman lembab, maka proses evapotranspirasi menjadi terhambat. Adanya angin dapat memindahkan udara jenuh dari lingkungan tumbuh tanaman dan mengantikannya dengan udara kering. Udara kering mampu meningkatkan laju evapotranspirasi.

Faktor tanah yang berpengaruh terhadap proses evaporasi seperti tekstur, kedalaman air tanah, pengolahan tanah dan struktur topografi dapat menentukan besarnya infiltrasi, perkolasai, dan limpasan air. Selain itu karakteristik tanaman seperti jenis, pertumbuhan dan fase perkembangan tanaman juga berpengaruh terhadap jumlah air yang dibutuhkan tanaman (Djufry, 2006).

Selain faktor-faktor yang telah disebutkan di atas, kebutuhan air untuk tanaman di lahan dipengaruhi oleh beberapa faktor lainnya sebagai berikut: pengolahan lahan, penggunaan konsumtif, perkolasai, penggantian lapis air, dan sumbangan hujan efektif (Suroso, 2007). Proses utama yang melibatkan nasib air dan kebutuhan tanaman terhadap air adalah evapotranspirasi, sebuah proses yang didorong oleh arus masuk konstan energi. Necara air erat dan saling berkaitan. Proses evapotranspirasi ini jelas tergantung kedua rezim cuaca luar dan keadaan internal sistem atau tanah tanaman itu sendiri (Baille, 2005).

Efisiensi Penggunaan Air dan Kebutuhan Air Tanaman Semusim

Efisiensi penggunaan air tergantung pada jenis tanaman, apakah tanaman tersebut termasuk C4, C3 atau CAM. Stomata pada tanaman CAM tidak biasa membuka pada malam hari (bila kebutuhan transpirasi rendah) untuk memungkinkan CO₂ yang diikat disimpan di vakuola daun sebagai malat dan asam organik lainnya. Selama hampir seluruh siang hari stomata tetap tertutup, sehingga mengurangi kehilangan air untuk transpirasi yang hanya terjadi di kutikula. Tanaman C4 dapat tumbuh optimum pada suhu yang tinggi untuk pertumbuhan dan fotosintesis (30-45°C) dan toleransi terhadap stress air (Fitter and Hay 1991). Yang termasuk ke dalam tanaman C3 diantaranya adalah padi, gandum, tembakau, kapas dll. Yang termasuk ke dalam tanaman C4 diantaranya adalah jagung, tebu, sorgum dll.

Efisiensi penggunaan air merupakan aspek yang sangat penting, terutama pada lahan yang beririgasi. Penggunaan irigasi macam-macam atau irigasi intermitten dapat meningkatkan efisiensi irigasi atau efisiensi penggunaan air oleh tanaman. Kebutuhan air tanaman berbeda-beda pada setiap tanaman. sehingga penyesuaian ketersediaan air dengan kebutuhan air tanaman merupakan hal yang mendukung efisiensi. Subagyono *et al.* (2004) menyatakan bahwa kebutuhan air tanaman padi berkisar antara 350-700 mm/musim. Kisaran kebutuhan air tanaman jagung dan kacang tanah antara 500-700 mm/musim. Pada kedelai, kisaran air yang dibutuhkan antara 450-700 mm/musim.

Kehilangan Air Tanaman

Pada tanaman, kehilangan air melalui bagian daun, dan hilang ke udara melalui pori stomata (Goldsworthy and Fisher, 1996). Bagian air yang menguap dari tempat-tempat berlainan pada suatu daun mempunyai pengaruh besar terhadap gradien potensial air di dalam daun.

Air yang hilang dari suatu tanaman melalui evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi dari daun. Perubahan-perubahan dalam pembukaan stomata mempunyai pengaruh terhadap

transpirasi tanaman lebih rendah daripada terhadap transpirasi dari suatu daun tunggal. Laju transpirasi nyata ditentukan oleh perubahan dalam tahanan stomata (Goldsworthy and Fisher, 1996)

Kekurangan air terjadi dalam jaringan semua tanaman yang mengalami transpirasi. Pengaruh kekurangan air terhadap hasil pertanaman terutama ditentukan oleh derajat dan waktu berlangsungnya kekurangan tersebut (Goldsworthy and Fisher, 1996).

Metode/Perhitungan Kebutuhan Air Tanaman

Banyak teknik yang telah dikembangkan untuk menaksir jumlah air yang dibutuhkan tanaman. Rahardjo *et al.* (1992), Morris *et al.* (1990) menetapkan total penggunaan air sebagai jumlah air curah hujan ditambah jumlah lengas yang disimpan dalam jeluk tanah, sedangkan Gilley dan Jansen (1983) dalam Rahardjo *et al.* (1992) menggunakan hasil produksi tanaman (kg/petak) dibagi dengan ETa (evapotranspirasi aktual) selama musim tanam (mm/petak). Untuk mengetahui kebutuhan air tanaman, perlu mengetahui atau menghitung evapotranspirasi karena dua hal tersebut tidak dapat dipisahkan, dan merupakan proses yang sangat penting didalam tubuh tanaman. Bagi tanaman, evapotranspirasi berpengaruh langsung terhadap transport hasil metabolisme serta nutrien. Pereira *et al.* (1999) menyatakan bahwa kebutuhan air tanaman dapat ditentukan secara akurat, apabila estimasi evapotranspirasi tanaman (ETc) benar, mengingat ETc menjadi dasar dalam penentuan kebutuhan air tanaman dan ketersediaan air. Menurut Allen *et al.* (1998) ETc adalah laju evapotranspirasi tanaman pada kondisi standar, yaitu kondisi pada saat tidak ditemukan kendala yang mempengaruhi air pada tanaman, seperti tidak ada hama, tidak terjadi stress tanaman, serta kesuburan tanaman yang tidak terganggu.

Evapotranspirasi adalah proses kehilangan air dari suatu lahan bertanaman melalui gabungan dua proses biofisik yaitu evaporasi dan transpirasi. Evaporasi adalah proses dimana air diubah menjadi

uap air dan selanjutnya uap air tersebut dipindahkan dari permukaan bidang penguapan ke atmosfir. Evaporasi terjadi pada berbagai jenis permukaan seperti danau, sungai lahan pertanian, tanah, maupun dari vegetasi yang basah. Transpirasi adalah penguapan di dalam jaringan tanaman dan selanjutnya uap air tersebut dipindahkan dari permukaan tanaman ke atmosfir. Pada transpirasi, penguapan terjadi terutama di ruang antar sel daun dan selanjutnya melalui stomata uap air akan lepas ke atmosfir. Hampir semua air yang diambil tanaman dari media tanam (tanah) akan ditranspirasikan, dan hanya sebagian kecil yang dimanfaatkan tanaman (Allen *et al.*, 1998). Meskipun evaporasi dan transpirasi terjadi melalui jalur yang berbeda, namun keduanya dikategorikan sebagai proses evaporasi. Evapotranspirasi sulit dijelaskan dalam suatu proses, namun dapat dihitung dalam suatu besaran (Murdiyarso, 1991).

Faktor-faktor yang mempengaruhi evapotranspirasi ditinjau dari unsur-unsur cuaca/iklim adalah radiasi matahari, suhu, kelembaban udara dan kecepatan angin (Allen *et al.*, 1998), suhu air, suhu udara (atmosfir), kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara, dan sinar matahari (Sosrodarsono dan Takeda, 1987). Unsur-unsur tersebut saling berhubungan satu sama lain. Laju evaporasi/evapotranspirasi semakin tinggi pada kondisi udara yang panas. Perhitungan evapotranspirasi potensial digunakan sebagai acuan untuk menduga kebutuhan air tanaman, kemudian dikoreksi dengan faktor tanaman sesuai dengan jenis dan pertumbuhan vegetasi. Evapotranspirasi perlu diketahui besarnya supaya penggunaan air irigasi lebih efektif dan efisien.

Menurut Allen *et al.* (1998), penentuan evapotranspirasi dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan *energy balance* dan atau *soil water balance*. Persamaan evapotranspirasi dibangun oleh pertukaran energi di permukaan vegetasi dan dibatasi oleh jumlah energi yang tersedia. Karena pembatasan ini, maka laju evapotranspirasi dapat diprediksi dengan penggunaan prinsip energi konservasi. Energi yang datang di permukaan sama dengan energi yang meninggalkan permukaan pada waktu yang sama. Perhitungan Evaporasi umumnya mengikuti persamaan :

$$ET=Kc \times ETo$$

ETo menggambarkan evapotranspirasi potensial. Penghitungan ET diawali dengan mencari nilai ETo terlebih dahulu. ETo (evaporasi tanaman referensi) yaitu laju evapotranspirasi dari permukaan berumput luas setinggi 8-15 cm, rumput hijau yang tingginya seragam, tumbuh aktif, secara lengkap menaungi permukaan tanah dan tidak kekurangan air. Metode yang dapat digunakan diantaranya adalah Blaney-Criddle dan evaporasi panci. Selanjutnya mencari nilai Kc atau koefisien tanaman yang menyatakan hubungan antara ETo dan ET tanaman. Nilai Kc beragam sesuai dengan jenis tanaman, fase pertumbuhan dan kondisi cuaca yang ada. Nilai Kc pada setiap tanaman dan setiap fasenya berbeda-beda.

Disamping ET, dikenal juga istilah ETP atau Evapotranspirasi Potensial. Evapotranspirasi potensial dapat diartikan sebagai kemampuan atmosfer untuk mengambil air melalui proses evaporasi dan transpirasi dengan asumsi air melimpah. ETP juga dapat diartikan sebagai kondisi maksimum kemungkinan tanaman mengalami proses evapotranspirasi dengan kondisi meteorologi lingkungan dan fisiologi tanaman sebagai parameter. Berdasarkan ETP dapat dijelaskan bahwa satu-satunya faktor pembatas dalam proses evapotranspirasi atau kebutuhan air tanaman adalah kemampuan fisiologi tanaman, bukan kondisi lingkungan dan keberadaan air. Sehingga pemberian air yang berlebihan pada saat pengairan selain kurang berguna juga dapat merusak tanaman karena akan menyebabkan akar dan batang bagian bawah yang tergenang akan menjadi busuk.

Metode untuk perhitungan evapotranspirasi diantaranya dapat digunakan metode empirik dan metode langsung. Metode empirik diantaranya dengan menggunakan metode dari Blaney Criddle, Penman dan Thornwaite. Metode Blaney criddle menggunakan suhu udara, koefisien tanaman dan persentase jam siang bulanan sebagai dasar perhitungan. Dalam Metode Penman untuk menduga evapotranspirasi potensial digunakan data suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin. Ada dua persamaan yang digunakan yaitu; persamaan yang tergantung pada kekuatan pengeringan udara,

estimasi radiasi netto untuk evapotranspirasi dan pemanasan permukaan tanah. Sedangkan Thornwaite menggunakan asumsi kehilangan air oleh tanaman jika tanah dalam kondisi tidak pernah kekurangan air.

Salah satu metode langsung adalah Metode Penman-Monteith. Metode ini cocok untuk semua keadaan air tanah dan perkembangan tanaman. Evapotranspirasi yang digunakan sebagai acuan adalah evapotranspirasi aktual dan tidak perlu menggunakan koefisien tanaman. Metode ini juga tetap memperhatikan proses-proses fisik pemindahan uap air dari permukaan yang mengalami evapotranspirasi, selain itu mempertimbangkan pula aspek-aspek fisiologi yang mengendalikan transpirasi. FAO merekomendasikan metode FAO 56 Penman-Monteith sebagai satu-satunya metode standard dan metode penduga terbaik untuk definisi dan perhitungan evapotranspirasi acuan (*reference evapotranspiration*) (Allen *et al.*, 1998).

Metode FAO Penman-Monteith membutuhkan data radiasi, suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin untuk kalkulasi harian, mingguan, sepuluh harian, atau bulanan. Data suhu udara yang dibutuhkan adalah suhu udara maksimum dan minimum rata-rata harian. Kelembaban yang dibutuhkan adalah rata-rata tekanan uap air aktual harian. Demikian juga data kecepatan angin yang dibutuhkan adalah data rata-rata harian (ms^{-1}) pada ketinggian 2 meter dari permukaan tanah (Allen *et al.*, 1998).

Metode ini memiliki keakuratan yang cukup tinggi dalam memprediksi ETo pada range lokasi dan iklim yang cukup lebar tetapi juga dapat diaplikasikan pada data pendek.

Bentuk kombinasi persamaan Penman-Monteith :

$$ETo = \frac{900 \cdot 0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}$$

dimana :

ETo = reference evapotranspiration (mm hari-1)

- R_n = radiasi netto di permukaan tanaman (MJ m⁻² hari ⁻¹)
 G = soil heat flux density (MJ m⁻² hari ⁻¹)
 T = rata-rata suhu udara harian pada ketinggian 2 m (oC)
 u_2 = kecepatan angin pada ketinggian 2 m (ms ⁻¹)
 es = tekanan uap pada kondisi jenuh (kPa)
 ea = tekanan uap aktual (kPa)
 $es-ea$ = defisit tekanan uap jenuh (kPa)
 Δ = slope kurva tekanan uap (kPa oC⁻¹)
 γ = konstanta psychromatic (kPa oC⁻¹)

Persamaan FAO Penman-Monteith secara sederhana mewakili perkembangan dari faktor-faktor fisik dan fisiologis dari proses evapotranspirasi. Berdasarkan pendugaan evapotranspirasi (ET₀) FAO Penman Monteith tersebut dapat diduga evapotranspirasi pada tanaman dengan menghubungkan ET₀ dengan koefisien tanaman (K_c). K_c dipengaruhi oleh empat hal yang utama yaitu; (1) ketinggian tanaman, ketinggian dipengaruhi oleh *aerodynamic resistance*, (2) albedo dari permukaan tanah dan tanaman (3) tahanan kanopi dan (4) evaporasi tanah.

Sumber Air Tanaman

Hujan

Hujan merupakan suatu bentuk presipitasi yang berasal dari penguapan air ke udara dari permukaan tanah atau laut dan sesudah memasuki beberapa proses berubah menjadi awan dan kemudian jatuh sebagai hujan atau salju. Dalam perjalannya, sebelum tiba di permukaan bumi, sebagian diuapkan kembali. Di permukaan pun, sebagian ditahan oleh tumbuhan, dan sebagian tiba di permukaan bumi (Sosrodarsono dan Takeda, 1987).

Terkait hujan, penting diperhatikan awal musim dan panjang musimnya, mengingat awal musim hujan dapat dijadikan acuan untuk memulainya kegiatan pertanian. Namun ketersediaan air untuk selama masa tumbuh tanaman perlu juga memperhatikan

panjang musim hujannya. Awal musim hujan tidak selalu sama setiap tahunnya, melainkan dapat terjadi maju atau mundur dari kondisi normalnya. Hal tersebut terjadi diantaranya karena pengaruh iklim global seperti ENSO (*El Niño - Southern Oscillation*). Kejadian ENSO tersebut tidak hanya menyebabkan perubahan pada awal musim hujan, namun juga mempengaruhi panjang musim hujan. Hal ini penting diperhatikan dalam penanaman tanaman semusim, terkait kebutuhan airnya.

Musim hujan di Indonesia dipengaruhi ENSO yang sangat kuat pengaruhnya pada bulan September-Desember (Hamada *et al.*, 2002). Sedangkan menurut Giannini *et al.* (2007) pengaruh ENSO semakin berkurang selama bulan Desember – Februari sehingga waktu masuknya musim hujan dan kemarau dapat diramalkan dengan memperhatikan kekuatan pengaruh ENSO.

Irigasi

Irigasi adalah suatu usaha manusia yang dilakukan untuk mencegah kekurangan air tanaman akibat kurangnya pasokan dari air hujan dengan cara menambah kekurangan tersebut, untuk memperoleh pertumbuhan tanaman yang optimum. Irigasi dapat mengurangi risiko gagal panen, karena pasokan hujan yang tidak menentu. Kondisi sebaliknya, ketika air berlebihan dari yang diperlukan tanaman, sehingga air tersebut harus dibuang karena bersifat merugikan tanaman, disebut drainase.

Irigasi diperlukan untuk meminimalkan kehilangan hasil tanaman akibat curah hujan yang kurang yang dapat menyebabkan kekeringan pada tubuh tanaman. Kekeringan biasanya melanda pada musim tanam kedua atau ketiga, atau pada musim kemarau. Dengan penggunaan irigasi dapat menyelamatkan tanaman dari deraan kekeringan akibat penurunan curah hujan sedangkan tanaman berada pada fase yang masih membutuhkan banyak air, akibatnya proses-proses fisiologis di dalam tubuh tanaman menjadi tidak sempurna, sehingga pengisian biji atau pembuahan kurang optimal dan pada akhirnya dapat menyebabkan produksi menurun. Menurut

Vergara (1976) dalam Subagyono *et al.* (2004), ketersediaan air sangat penting terutama pada saat pembentukan anakan dan awal fase pemasakan.

Irigasi pada tanaman pangan seperti padi dilakukan biasanya pada irigasi teknis, setengah teknis, sederhana dan tada hujan. Kebutuhan air pada daerah yang memiliki irigasi terutama irigasi teknis, biasanya tercukupi, namun tidak demikian halnya pada lahan tada hujan. Pada kondisi tada hujan, yaitu lahan sawah yang mengandalkan hujan untuk penyiramannya umumnya hanya dapat menanam padi satu kali setahun. Kondisi yang sama ditemukan pada tegalan, yang biasanya juga melakukan penanaman hanya pada musim hujan, terkecuali kalau mempunyai sumber daya air lainnya seperti sumur atau penampung air.

Pengaturan Air dengan Irigasi Otomatis

Melakukan irigasi, pemberian, menyiram air ke tanaman budidaya sudah dilakukan umat manusia, sejak manusia mengenal pertanian dan merupakan pekerjaan utama dari manusia dalam mempertahankan hidup. Untuk daerah dengan tanaman budidaya yang luas mengairi tanaman merupakan pekerjaan besar dan berat. Dalam mengatasi masalah ini banyak teknik penjadwalan irigasi telah dikembangkan terutama didasarkan pada pemantauan tanah, tanaman dan kondisi cuaca. Penjadwalan irigasi dilakukan untuk mengairi dan menghitung banyak air yang akan diberikan ke lahan tanaman budidaya. Saat ini sebagian besar sistem penjadwalan irigasi menggunakan hardware dan software otomatis sesuai dengan kemajuan jaman. Variabel irigasi menjadi sangat penting tidak hanya untuk peningkatan sistem irigasi tetapi juga untuk mengurangi biaya irigasi dan meningkatkan hasil panen.

Sistem Irigasi Otomatis

Pelaksanaan program efisiensi penggunaan air terus dilakukan untuk mencapai penghematan air kuantitatif dan dapat diandalkan.

Penghematan melalui sistem penjadwalan irigasi telah banyak dilakukan untuk peningkatan efisiensi irigasi dalam pemberian air. Pentingnya mengurangi stres air pada tanaman selama pertumbuhan, perkembangan hingga produktivitasnya telah menyebabkan munculnya berbagai sistem teknologi kontrol irigasi.

Sistem-sistem teknologi kontrol irigasi yang dikembangkan berusaha memberi perlindungan bagi tanaman, dapat mencegah dan mengurangi penggunaan air yang berlebihan. Produktivitas dan efisiensi dapat tercapai dalam penggunaan air sebagai usaha dalam melindungi tanaman akan kebutuhan air. Tanaman dengan akar dalam tanah lembab sering dapat menjaga kandungan udara dalam air tanah di lingkungan hidupnya. Hal ini juga dapat mengurangi kebutuhan air tanaman dan salah satu faktor yang meningkatkan kelangsungan hidup dan pertumbuhan tanaman.

Faktor utama dari sistem irigasi otomatis adalah penggunaan parameter sebagai penentu nilai yang dikendalikan oleh unit kontrol untuk mengontrol waktu irigasi dan aliran air. Unit kontrol yang mengatur irigasi untuk memaksimalkan efisiensi dan produksi. Teknologi yang berkembang bervariasi dari sistem waktu, neraca air atau sistem berbasis sensor canggih.

Sebagian besar sistem irigasi menggunakan pengendali Mati/Hidup (ON/OFF) saklar/switch untuk menjalankan irigasi. Cara ini masih dianggap efektif dan efisien dilakukan saat ini. Parameter input seperti suhu udara, kelembaban tanah, radiasi dan kelembaban udara sering dijadikan parameter penentu dalam pemberian air irigasi.

Kemudian menggunakan metode simulasi yang tepat seperti kondisi ekologi, evapotranspirasi dan jenis tanaman yang dibudidayakan sehingga dapat dengan cepat ditentukan jumlah air yang dibutuhkan untuk irigasi terkait hasil simulasi.

Sistem Irigasi otomatik dengan Sensor

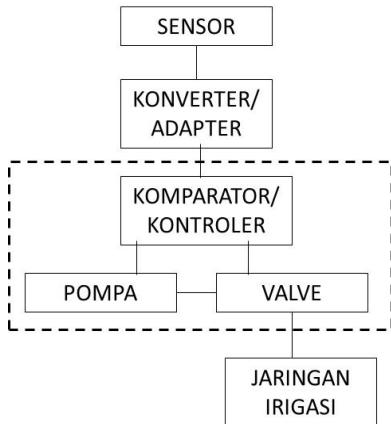
Untuk memantau kelembaban tanah dan mengontrol sistem irigasi otomatis, peralatan yang diperlukan adalah beberapa sensor

yang akan membandingkan setiap output sensor ke tingkat ambang batas yang ditetapkan, dan akan menghitung output sehingga mampu mengendalikan sistem irigasi. Komputer desktop dan mikroprosesor telah digunakan dengan sukses.

Selain itu, peralatan komersial tersedia untuk mengukur potensial matrik tanah dan untuk mengontrol sistem irigasi otomatis. Komputer menghitung pembacaan rata-rata dari output sensor potensial matrik tanah, membandingkan rata-rata potensial matrik tanah yang diukur dengan nilai ambang di mana setiap irigasi diterapkan, dan pada sistem irigasi untuk jangka waktu yang terpilih jika diperlukan.

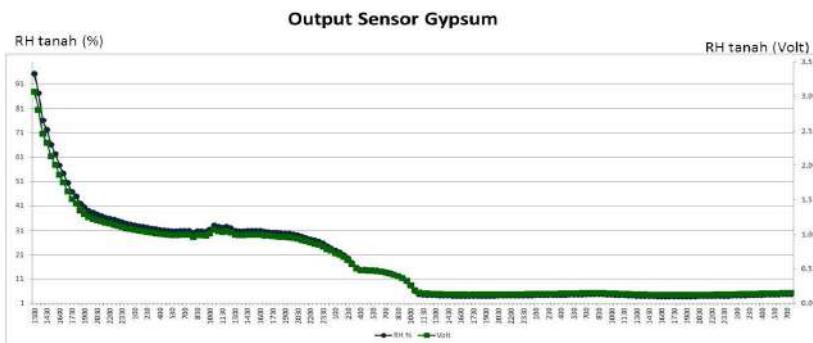
Contoh pada suatu kegiatan penelitian, kadar air pada kapasitas lapang sebagai perlakuan dikontrol menggunakan sensor gypsum. Sensor gypsum untuk mengontrol kelembaban tanah pada rangkaian ini mempunyai keluaran resistensi (tahanan) dalam perubahan tingkat kelembaban tanah. Sensor gypsum untuk kelembaban tanah dengan keluaran resistensi kemudian dihubungan dengan rangkaian pengubah sinyal resistensi (komparator/adapter) menjadi tegangan (Voltase) ketingkat tegangan DC yang merupakan pembacaan langsung dari kelembaban tanah.

Keluaran yang sudah menjadi sinyal tegangan DC dimasukkan ke komparator (*controller*) dengan panel meter yang dapat membandingkan dan menampilkan angka sebagai nilai tingkat kelembaban tanah yang dapat ditetapkan atau diatur sesuai dengan tingkat perlakuan air yang diperlukan untuk kebutuhan tanaman.



Gambar 26. Diagram alir sistem irigasi berdasarkan sensor gypsum.

Output dari komparator akan mengaktifkan relay yang terhubung ke keran listrik (*solenoid valve*), memungkinkan air untuk mengairi tanaman sampai sensor mencapai tingkat yang ditetapkan. Sebuah diagram blok skematis dari sistem irigasi otomatis diilustrasikan dalam diagram di bawah ini (Gambar 1).



19 Juli – 23 Juli 2012
(rekam data 30 menitan)

Gambar 27. Pola output sensor gypsum dalam % dan volt.

Sensor gypsum sebelum digunakan diuji outputnya dengan data logger yang direkam dengan interval 30 menitan perekaman selama 5 hari dari tanggal 19 sampai dengan 23 juli dengan output (keluaran sensor) yang disajikan pada Gambar 2.

Sistem Irigasi Otomatis di Kawasan Rumah Pangan Lestari (KRPL)

Sistem Irigasi otomatik di KRPL Balitklimat merupakan sistem irigasi dalam pot. Untuk usaha tanaman menggunakan sistem bertanam dalam pot tantangan utama adalah irigasi. Teknik untuk menjaga agar tanaman dalam pot selalu sehat adalah dengan mengairi secara otomatis.



Gambar 28. Water torn sebagai sistem penampung air (kiri), b) sistem pengatur waktu (kanan)

Pemberian irigasi dalam pot harus melihat jenis tanah, tanaman dan pot yang digunakan sehingga air dapat diberikan secara

efisien dan tetap memenuhi kebutuhan tanaman. Pada sistem bertanam dalam pot yang dikelola oleh KRPL Balitklimat menggunakan sistem timer. Timer diatur menjadi 4 (empat) kali penyiraman dengan lama penyiraman selama 5 menit, penyiraman dilakukan pada jam 08.00, jam 12.00, jam 15.00 dan jam 20.00. Air yang keluar dari regulating stick dan waktu yang diatur oleh sistem irigasi timer dikalibrasi dan kemudian diatur dalam penggunaannya, hasilnya setiap pemberian air selama 5 menit volume air yang keluar dari regulating stick adalah 100 ml, dengan demikian sehari tanaman dalam pot menerima air sebanyak 400 ml.

Media yang digunakan merupakan media buatan sendiri dengan komposisi satu bagian tanah gunung, tiga bagian kotoran sapi, dua bagian sekam padi dan satu bagian arang sekam. Pembuatan media dilakukan dengan teknik pelapisan untuk mencapai dekomposisi. Lapisan pertama setebal 20 cm adalah tanah gunung kemudian dilapisi kotoran sapi setebal 40 cm dan disiram dengan pupuk organik yang mengandung bakteri composer mencapai 3 lapisan tanah. Tanah ditutup oleh terpal dan diperam selama 21 hari. Setelah 21 hari tanah di masukkan dalam pot dan di biarkan selama 3 (tiga) hari. Setelah tiga hari pot yang sudah berisi media di siram dengan air kemudian ditanami tanaman hortikultura serta diberi irigasi tetes otomatik.

Penutup

Pemenuhan kebutuhan air pada fase-fase tanaman semusim merupakan hal yang sangat penting, karena apabila terjadi kekurangan dapat mengakibatkan cekaman air pada tanaman. Dalam pengelolaannya, air harus digunakan secara bijaksana. Hingga saat ini masih ditemukan penggunaan air yang masih kurang efisien, kerusakan di hulu DAS, sedimentasi di sungai,

disamping itu pertanian masih banyak menerapkan air yang berlimpah (boros air) serta dampak kejadian perubahan iklim juga dapat menyebabkan perubahan ketersediaan air pada lokasi yang sama, yang dapat menyebabkan kegagalan panen.

Kebutuhan air tanaman berbeda-beda pada setiap tanaman, sehingga penyesuaian ketersediaan air dengan kebutuhan air tanaman merupakan hal yang mendukung efisiensi. Pilihan irigasi tanaman semusim yang optimal dengan menggunakan perhitungan ekonomi minimal dan memberikan produksi terbaik merupakan pilihan yang terbaik.

DAFTAR BACAAN

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Pendugaan Evapotranspirasi dengan Metode FAO Penman-Monteith. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Baille A. 2005. Principles and method for predicting crop water requirement in green house environment. Caniers Options Mediterranemes 31: 177-180.
- Djuffy, R. 2006. Respons tanaman jarak (*Richinus communis L.*) pada kondisi cekaman air. Jurnal Agrivigor 5: 98-107.
- Fitter AH, Hay RKM. 1991. Fisiologi Lingkungan Tanaman. (terj : Andani dan Purbayanti). Yogyakarta:Gadjah Mada University Press.
- Giannini, A., A.W. Robertson, dan J.H. Qian. 2007. A role for tropical tropospheric temperature adjustment to ENSO in the seasonality of monsoonal Indonesia precipitation predictability. J. Geophys. Res. (Atmosphere). 112: D16110.
- Gilley JR, Jansen M. 1983. Irrigation Management Contribution to Agriculture Productivity dalam Water Recsourse Reseach Problm and Potensial For Agriculture and Boul Community (Napier, T. L., scott, D., Ewster, K. W and Supala, Reads). Soil Conservation Society of Amerika. New York.
- Goldsworthy PR, Fisher NM. 1996. Fisiologi Tanaman Budidaya Tropik (terj : Tohari). Yogyakarta:Gadjah Mada University Press.

- Hamada, J.I., M.D. Yamanaka, J. Matsumoto, S. Fukao, P.A. Winarso, dan T. Sribimawati. 2002. Spatial and temporal variations of the rainy season over Indonesia and their link to ENSO. *J. Meteo. Soc. of Japan.* 80 : 285-310.
- Harjadi, M. 2002. *Pengantar Agronomi*. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Murtilaksono, K dan E.B.Wahyuni. 2004. Hubungan ketersediaan air tanah dan sifat-sifat dasar fisika tanah. *Jurnal Tanah dan Lingkungan* 6: 46-50.
- Hedi,Y.K. 2010. Kebutuhan Air untuk Tanaman. <http://yanessipil.wordpress.com> .Diakses tanggal 15 Maret 2013.
- Kurnia U. 2004. Prospek pengairan pertanian tanaman semusim lahan kering. *Jurnal Litbang Pertanian* 23(4) : 130-138.
- Morris, R.A., A. A. Villegas, AQ, Poltonee, dan H. S. Centeno. 1990. Water Use by Monocropped and Intercropped Cocopea and Sorghum Grown After Rice. *Agrun.*
- Murdiyarsa D. 1991. *Kapita Selekta Agrometeorologi*. IPB.
- Pereira LS, Perrier A, Allen RG, Alves I. 1999. Evapotranspiration: concepts and future trends. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125: 45-51.
- Rahardjo CS, Yasin I, Mahrup, Sukartono, Sutriono, R. 1992. Efisiensi Penggunaan Air pada Tumpang Sari Jagung Kedelai di Tanah Entisol Lombok. *Laporan Hasil Penelitian Fakultas Pertanian Universitas Mataram*. Mataram.
- Subagyono K, Dariah A, Surmaini E, Kurnia U. 2004. Pengelolaan Air pada Tanah Sawah (Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya Eds: Agus F). *Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian*.

Sosrodarsono S, Takeda. K. 1987. Hidrologi untuk Pengairan. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

Suroso P.S, Nugroho, Pamuji P. 2007. Evaluasi kinerja jaringan irigasi banjaran untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi pengelolaan air irigasi. Dinamika Teknik Sipil 7: 55-56.

BAB 4.

NERACA AIR BERBASIS DAS

Budi Kartiwa, Haris Syahbuddin dan M. Noor

Pendahuluan

Neraca air (*water balance*) adalah prosedur untuk mempelajari kesetimbangan antara air yang masuk dan air yang keluar dari suatu sistem (Dingman, 2002). Sistem dimaksud dapat berupa kolom tanah dalam suatu agroekosistem (lahan sawah ataupun lahan kering), ekosistem perairan (danau, rawa) ataupun pada suatu kawasan tertutup yang memiliki batas alami seperti Daerah Aliran Sungai (DAS) ataupun yang memiliki batas artifisial seperti Daerah Irigasi (D.I).

Menurut Nasir (2002) berdasarkan cakupan ruang dan manfaat untuk perencanaan pertanian, disusun neraca air agroklimat dengan tiga model analisis sebagai berikut :

1. Neraca air umum, untuk mengetahui kondisi agroklimatik terutama air secara umum.
2. Neraca air lahan, untuk mengetahui kondisi agroklimatik terutama dinamika kadar air tanah untuk perencanaan pola tanam secara umum.
3. Neraca air tanaman, untuk mengetahui kondisi agroklimatik terutama dinamika kadar air tanah dan penggunaan air tanaman untuk perencanaan tanaman tiap kultivar.

Secara umum persamaan neraca air dapat di sajikan sebagai berikut:

$$P = R + E + \Delta S$$

di mana

P : presipitasi

R : aliran permukaan (*runoff*)

E : evapotranspirasi

ΔS : perubahan cadangan air dalam tanah

Neraca air dapat digunakan dalam mengelola pasokan air dan prediksi ketersediaan air di suatu daerah. Neraca air juga digunakan dalam menyusun jadwal irigasi, estimasi volume aliran permukaan (seperti melalui model *Runoff*), serta pengendalian banjir dan polusi. Lebih jauh, neraca air digunakan pula dalam mendesain sistem drainase bawah permukaan yang didesain secara horizontal (drainase menggunakan pipa atau gulungan) atau secara vertikal (drainase menggunakan sumur). Dalam analisis dan desain drainase diperlukan modul neraca air hidrogeologi dan model air bawah tanah (*groundwater model*).

Data dan informasi neraca air dapat disajikan dalam bentuk grafik neraca air yang memplot besaran curah hujan dan evapotranspirasi umumnya dalam interval waktu bulanan. Beberapa model neraca air bulanan telah dikembangkan untuk berbagai kondisi dan kebutuhan. Model neraca air bulanan telah dikaji sejak tahun 1940 an.

Neraca Air Lahan

Menurut Hillel (1972) neraca air lahan sebagai rincian tentang masukan (*input*), keluaran (*output*) dan perubahan simpanan air yang terdapat pada suatu lingkungan tertentu selama periode waktu tertentu.

Thornthwaite dan Mather (1957) membuat modul perhitungan neraca air dengan metode yang dikenal sebagai Sistem Tatabuku (*bookkeeping*). Komponen neraca air dalam metode Tatabuku terdiri dari : curah hujan (*CH*), evapotranspirasi potensial (*ETP*),

evapotranspirasi aktual (ETA), akumulasi kehilangan air potensial (*accumulated potential water loss, APWL*), kadar lengas tanah dalam zona perakaran (KAT) yang dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas simpan air (*water holding capacity, WHC*), kadar lengas tanah dalam zona perakaran pada kapasitas lapang (KL), perubahan kadar lengas dalam zona perakaran (DKAT), defisit lengas tanah (D), serta surplus lengas tanah (S).

Untuk menghitung evapotranspirasi potensial dan kadar lengas tanah dalam Thornthwaite dan Mather (1957) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$ETP = \left[16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \right]$$

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$KAT = KL * e^{\left(\frac{+APWL}{-KL} \right)}$$

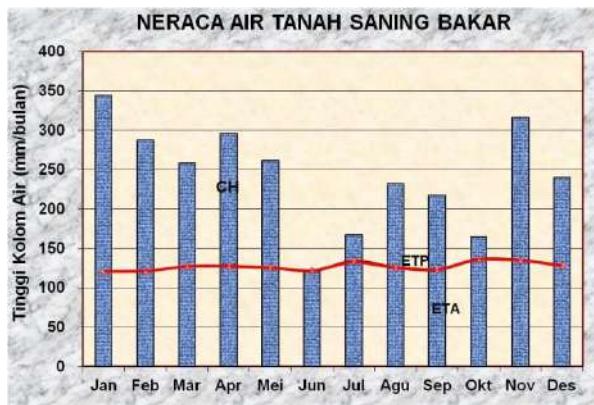
dimana

- ETP : Evapotranspirasi Potensial (mm/hari)
- T : suhu rata-rata harian (oC)
- I : indeks panas selama satu tahun
- A : $6.75 \times (10.7 I_3) - (7.7 \times 10.5 I_2) + (1.792 I) + 0.49239$
- C : faktor koreksi
- KAT : Kadar lengas tanah dalam zona perakaran (mm)
- KL : Kadar lengas tanah dalam zona perakaran pada kapasitas lapang (mm)
- APWL : Akumulasi kehilangan air potensial

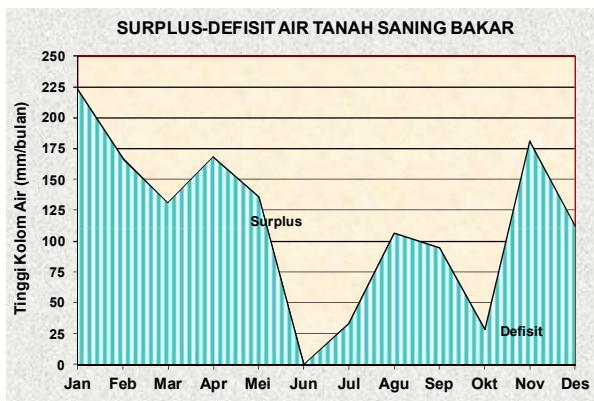
Tabel 1 menyajikan teladan hasil perhitungan neraca air bulanan di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok, Sumatera Barat. Sedangkan Gambar 1 menunjukkan. Grafik Neraca Air Bulanan dan Grafik Surplus-Defisit Air Tanah di lokasi tersebut.

Tabel 8. Perhitungan Neraca Air Lahan di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singka

Parameter	Satuan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt
Curah Hujan	mm	344	288	259	296	262	122	167	232	218	164
ETP	mm	121	121	127	127	126	122	134	126	123	136
CH-ETP	mm	223	167	131	168	136	1	34	107	95	28
APWL	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KAT	mm	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
DKAT	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETA	mm	121	121	127	127	126	122	134	126	123	136
Defisit	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Surplus	mm	223	167	131	168	136	1	34	107	95	28
Kedalaman efektif tanah =			30	cm							
WHC		=	15	%	45	mm.					



(a)



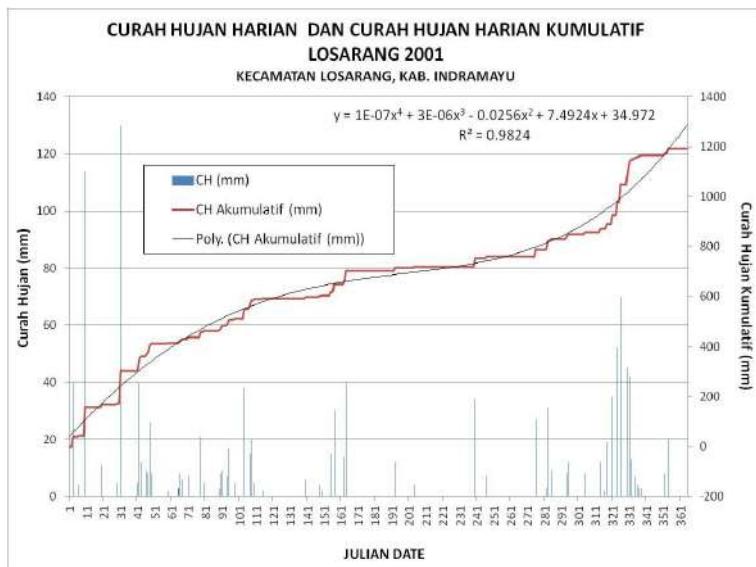
(b)

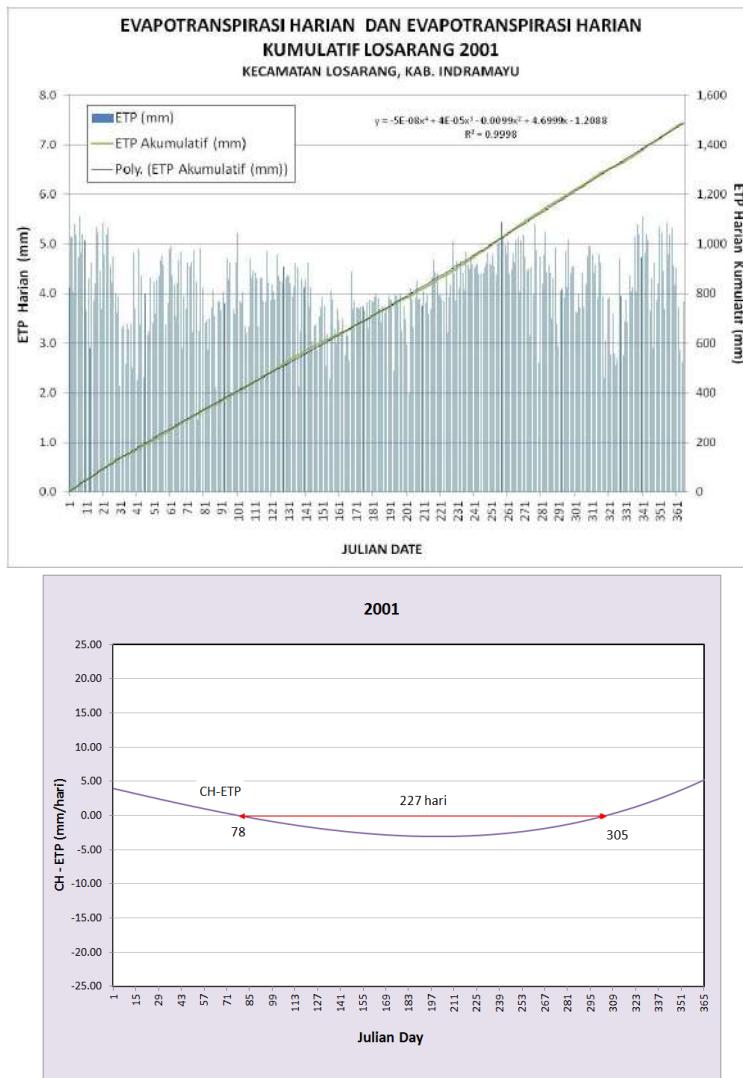
Gambar 29. Neraca Air Bulanan (a) dan Surplus-Defisit Air Bulanan (b) di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok.

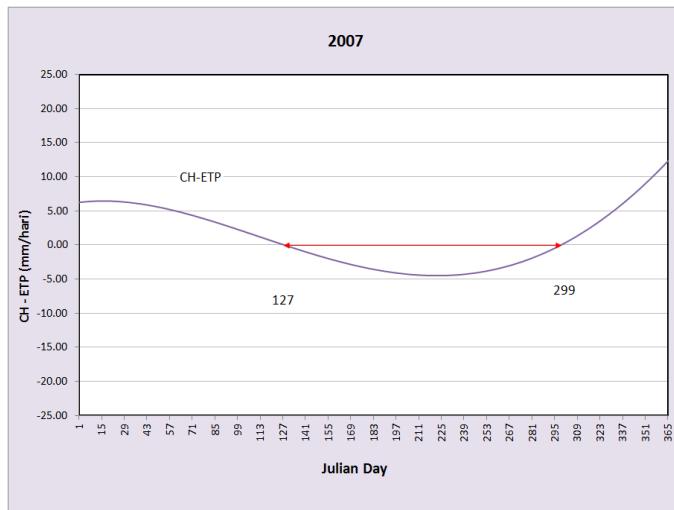
Tabel 1 dan Grafik 1 menunjukkan bahwa berdasarkan analisis neraca air lahan, terjadi kondisi surplus ketersediaan air sepanjang tahun. Total surplus neraca air tahunan di selama 12 bulan mencapai 1.383 mm, tertinggi pada bulan Desember sebesar 223 mm.

Alternatif analisis neraca air lahan untuk penetapan awal tanam di ajukan oleh Setiawan (2015), yang menghitung neraca air berbasis data akumulasi curah hujan dan ETP dari seri data iklim multi tahun. Untuk periode tahun yang sama, perbandingan antara data curah hujan harian kumulatif dan ETP harian kumulatif dapat mengindikasikan awal dan akhir periode defisit, sehingga skenario awal dan lama kemarau dapat ditetapkan berdasarkan pertimbangan variasi tahunan kondisi iklim di lokasi kajian (Setiawan et al., 2015).

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi perhitungan curah hujan dan ETP harian kumulatif serta penetapan periode defisit lahan sawah di Losarang, Kecamatan Losarang, Kabupaten Indramayu, Jabar.







Gambar 30. Grafik Curah hujan dan ETP harian kumulatif serta periode defisit lahan sawah di Losarang, Kecamatan Losarang, Kabupaten Indramayu, Jabar.

Tabel 2 menunjukkan variasi variabel neraca air di Losarang, Kec. Losarang Kab. Indramayu periode 2001-2007 yang dihitung berdasarkan konsep neraca curah hujan dan ETP harian kumulatif.

Tabel tersebut memberikan informasi bahwa selama periode 2001 - 2007, awal musim kemarau paling cepat di Losarang, Kec. Losarang, Kab. Indramayu adalah hari Julian ke-57 atau bertepatan dengan tanggal 26 Februari, sedangkan akhir kemarau paling lambat adalah pada hari Julian ke 350 atau bertepatan dengan tanggal 16 Desember. Dengan demikian masa tanam efektif di Kecamatan Losarang berlangsung antara pertengahan Desember hingga akhir Februari.

Tabel 9. Variabel Neraca air lahan multi tahun di Losarang, Kabupaten Indramayu, berdasarkan perhitungan berbasis curah hujan dan ETP harian kumulatif

Variabel Neraca Air	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
CH (mm)	1,194.0	1,743.0	1,281.0	1,549.0	830.0	1,363.0	1,692.0
ETP (mm)	1,485.8	1,473.6	1,431.4	1,394.9	1,336.9	1,469.6	1,416.5
Musim Kemarau							
Awal (Julian day)	78	124	119	106	57	128	127
Akhir (Julian day)	305	342	313	343	350	273	299
Panjang (hari)	227	218	194	237	293	145	172
Laju Irigasi (mm/hari)	-8.0	-10.5	-9.1	-9.3	-9.2	-7.47	-9.5
Laju Drainase (mm/hari)	0.2	11.2	3.9	10.1	2.7	8.70	7.3
Debit Irigasi (l/s) per ha	-0.9	-1.2	-1.1	-1.1	-1.1	-0.9	-1.1
Debit Drainase (l/s) per ha	0.0	1.3	0.5	1.2	0.3	1.0	0.8

Neraca Air DAS

Persamaan neraca air menggambarkan prinsip bahwa selama selang waktu tertentu, masukan air total pada suatu ruang tertentu harus sama dengan keluaran total ditambah perubahan cadangan neto (Xu and Singh, 1998). Dengan menganggap daerah aliran

drainase yang tidak menerima atau kehilangan air ke daerah aliran sekitarnya, kecuali dari pintu utamanya (outlet), maka neraca air DAS dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P = E_a + R + \Delta S$$

dimana

- P : Presipitasi
Ea : Evapotranspirasi
R : Aliran permukaan
 ΔS : Cadangan permukaan dan bawah permukaan

Menurut Van Dam (1972), apabila neraca air tersebut diterapkan untuk periode rerata tahunan, dan dengan asumsi bahwa kondisi fisik DAS tetap atau tidak berubah sepanjang tahun, maka ΔS dianggap tetap/tidak berubah. Kondisi fisik DAS tersebut adalah kemiringan lereng, geologi, kerapatan aliran, bentuk lahan serta parameter fisik lahannya.

Menurut Van Dam (1972), evapotranspirasi aktual tahunan dalam suatu DAS dapat dihitung menggunakan rumus Turc-Langbein, yaitu:

$$Ea = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{Eo^2}}}$$

dimana

- Ea : Evapotranspirasi aktual (mm/tahun)
Eo : Evapotranspirasi permukaan air bebas (mm/tahun)
P : Presipitasi (mm)

Berdasarkan rumus Turc-Langbein, besar evaporasi permukaan air bebas tahunan (Eo), dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$Eo = 325 + 21t + 0.9t^2$$

dimana

- Eo : Evaporasi permukaan air bebas (mm/tahun)
t : suhu rerata tahunan ($^{\circ}$ C)

Hujan yang sudah dikurangi *water losses* (evapotranspirasi) akan menjadi aliran permukaan (R) dan simpanan air permukaan dan bawah permukaan (S). Aliran permukaan akan mengalir menuju ke laut/sungai. Sedangkan simpanan air permukaan dan bawah permukaan akan keluar dari pori-pori tanah dan mengalir secara perlahan dalam bentuk aliran mantap.

Menurut Notodihardjo (1982) bagian air yang tidak bisa dimanfaatkan dari siklus hidrologi skala DAS diperkirakan sebesar 65% - 75% dari jumlah air tersedia dalam angka rerata setahun, sedangkan yang dapat dimanfaatkan sebesar 25% - 35% berupa aliran mantap (*low-water runoff*). Aliran mantap adalah aliran yang selalu tersedia di setiap waktu pada tahun rerata. Penentuan besarnya aliran mantap tersebut bersifat konstan/tetap untuk semua DAS tanpa memperhatikan karakteristik fisik DAS.

Proses hujan menjadi aliran mantap dipengaruhi oleh karakteristik fisik DAS sebagai sistem, atau dengan kata lain kondisi fisik suatu DAS tersebut dapat menahan/menunda dan memperlambat keberadaan air di permukaan bumi. Adapun karakteristik fisik DAS tersebut adalah lithologi, tanah, topografi dan vegetasi penutup. Karakteristik fisik DAS sebagai faktor penunda keberadaan air di permukaan bumi/aliran permukaan dapat diketahui secara kuantitatif yaitu dengan menentukan nilai koefisien *run off*. Berdasarkan hal tersebut, rumus aliran permukaan (R) adalah:

$$R = (P - Ea)C$$

Berdasarkan rumus tersebut di atas, maka ΔS dapat dihitung dengan mensubstitusikan rumus kedalam dalam persamaan awal menjadi:

$$\Delta S = (P - E_a) - (P - E_a)C$$

Selain dengan cara substitusi rumus *run off*, penentuan ΔS dapat diketahui dengan menurunkan rumus dari persamaan kehilangan air. Kehilangan air dari air hujan dapat diperhitungkan dengan berdasarkan selisih hujan yang jatuh di suatu DAS dan aliran permukaan yang dihasilkan dari hujan tersebut. Kehilangan air hujan dapat dihitung dengan cara pendekatan koefisien aliran, *Phi-indeks* dan infiltrasi. Dari ketiga pendekatan tersebut koefisien aliran merupakan pendekatan yang mencakup semua kehilangan dan beragam dari hujan yang satu ke hujan yang lain. Kehilangan hujan tersebut meliputi defisiensi lengas tanah, intersepsi, cadangan depresi dan evapotranspirasi (Seyhan, 1977).

Untuk mengetahui besarnya kehilangan air dari hujan dapat dihitung dengan persamaan :

$$P1 = (1 - C) \times P$$

Dimana :

P1 : kehilangan air dari hujan (mm)

C : koefisien aliran

P : tebal hujan (mm) (Griend, 1979)

Berdasarkan rumus Turc-Langbein yang dapat menghitung evapotranspirasi aktual, maka kehilangan air yang terjadi berupa air yang berada dalam tanah. Dalam perhitungan menggunakan jangka waktu tahunan, maka kehilangan air tersebut merupakan cadangan air permukaan maupun dibawah permukaan yang akan menjadi aliran mantap. Menurut Notodihardjo (1982), aliran mantap adalah aliran yang reratanya konstan, bukan hanya fluktuatif. Secara teoritis, tidak terdapat data yang cukup untuk memberikan rata-rata debit yang secara statististik 100% nyata.

Secara praktis, pada banyak tempat, data sangat sedikit untuk menentukan harga rata-rata yang nyata. Rata-rata dari kebanyakan sungai dapat ditaksir cukup baik dari catatan selama 15 tahun (Seyhan, 1977). Oleh karena itu rumus kehilangan air (P₁) yang nantinya akan menjadi ketersediaan air berupa aliran mantap (ΔS) adalah :

$$\Delta S = (1 - C) P - E_a$$
$$\Delta S = (P - E_a) - (P - E_a) C$$

dimana :

ΔS : Ketersediaan air

P : curah hujan

E_a : evapotranspirasi aktual

C : koefisien aliran permukaan (menurut metode Cook, 1940, dalam Chow, 1964)

Parameter yang dianalisis dalam Neraca Air DAS Tahunan meliputi : curah hujan tahunan, suhu rata-rata tahunan, evaporasi permukaan tahunan, evapotranspirasi aktual serta koefisien permukaan.

Teladan analisis neraca air DAS tahunan untuk menghitung ketersediaan air dilakukan pada Daerah Tangkapan Air (DTA) Danau Singkarak. Curah hujan di DTA Singkarak dianalisis untuk setiap kecamatan berdasarkan data rata-rata 5 tahunan dari stasiun curah hujan terdekat. Suhu rata-rata tahunan untuk setiap kecamatan diprediksi berdasarkan asumsi trend penurunan suhu sebesar 0.6 °C untuk setiap kenaikan ketinggian 100 m, mengacu pada suhu yang telah diketahui pada suatu tempat dengan ketinggian tertentu. Evaporasi permukaan dan Evapotranspirasi aktual tahunan dihitung dengan menggunakan persamaan Turc Langbein, sedangkan koefisien aliran permukaan dihitung dengan Metode Cook (1940) dalam Chow (1964).

Koefisien Aliran permukaan menurut metode Cook dihitung berdasarkan penjumlahan skor kemiringan lereng, laju infiltrasi

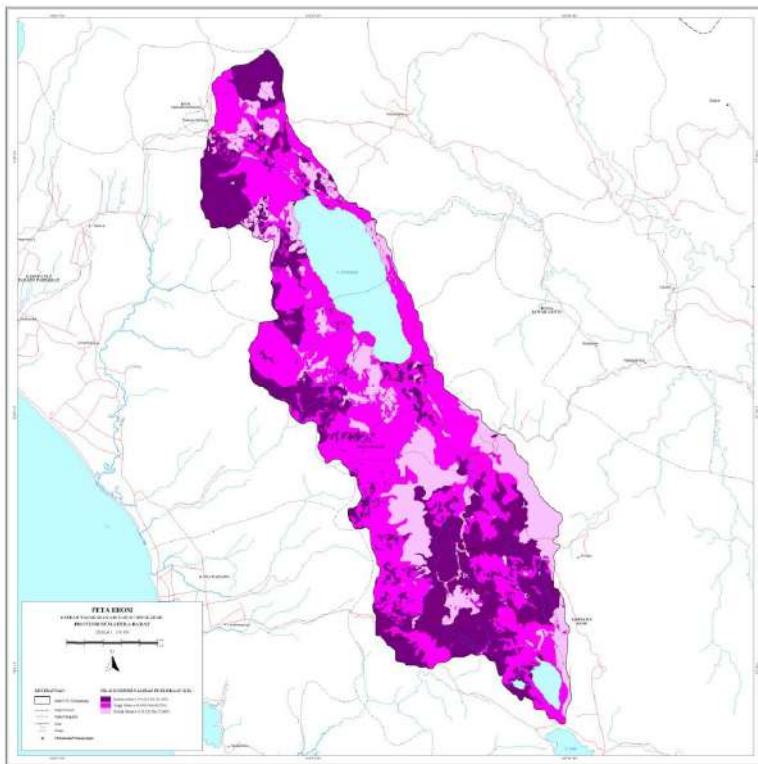
tanah, tutupan vegetasi, kerapatan drainase serta kerapatan drainase.

Hasil analisis koefisien aliran permukaan (Kr) di wilayah DTA Danau Singkarak menunjukkan bahwa rata-rata nilai Kr adalah sebesar 0.67, nilai maksimum 0.95 dan nilai minimum 0.30. Berdasarkan kriteria kelas Kr, lokasi penelitian didominasi oleh nilai Kr tinggi (0.51-0.75) seluas 60.7 % dari DTA Danau Singkarak, ekstrim (0.76-1.00) seluas 24.2% serta normal (0.26-0.50) seluas 15.1%.

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai Kr Ekstrim tersebar di Hulu DAS Batang Sumpur bagian utara dan barat, bagian hulu DAS Batang Sabarang dan DAS Muara Pingai, bagian tengah DAS Batang Sumani, sedangkan nilai Kr Normal tersebar secara luas di bagian barat DAS Batang Sumani. Berdasarkan perhitungan untuk setiap kecamatan, maka nilai rata-rata Kr dapat disajikan seperti pada Tabel 3.

Tabel 10. Nilai Kr rata-rata untuk setiap kecamatan di DTA Danau Singkarak

Kabupaten \s Kecamatan	Kr	Kabupaten	Kecamatan	Kr
Tanah Datar		Solok		
- Batipuh	0,64	- Junjung Sirih		0,70
- X Koto	0,65	- 10 Koto Singkarak		0,67
- Batipuh Selatan	0,67	- Lembang Jaya		0,68
- Rambatan	0,65	- Kubung		0,67
Padang Panjang		- Gunung Talang		0,67
- Padang Panjang Timur	0,59	- Bukit Sundi		0,65
- Padang Panjang Barat	0,62	- Danau Kembar		0,66
Kota Solok				
- Lubuk Sikarah	0,66			
- Tanjung Harapan	0,62			



Gambar 31. Peta Sebaran Nilai Koefisien Aliran Permukaan (KR) Pada Daerah Tangkapan Air Danau Singkarak Berdasarkan Analisis Metode Cook

Ketersediaan air tahunan DTA Danau Singkarak menurut aplikasi neraca air tahunan selanjutnya dapat dianalisis berdasarkan hasil perhitungan curah hujan tahunan, suhu rata-rata tahunan, evaporasi permukaan air tahunan, evapotranspirasi aktual tahunan serta koefisien aliran permukaan untuk setiap kecamatan di DTA Danau Singkarak.

Berdasarkan Neraca Air Tahunan, potensi ketersediaan air DTA Danau Singkarak adalah sebesar 581.4 MCM (*Million Cubic*

Meter). Tabel 4 menunjukkan ketersediaan air tahunan tertinggi dimiliki oleh Kecamatan Gunung Talang, Kabupaten Solok yaitu sebesar 93.2 MCM, sedangkan ketersediaan air terendah dimiliki Kecamatan Tanjung Harapan, Kota Solok sebesar 6.5 MCM.

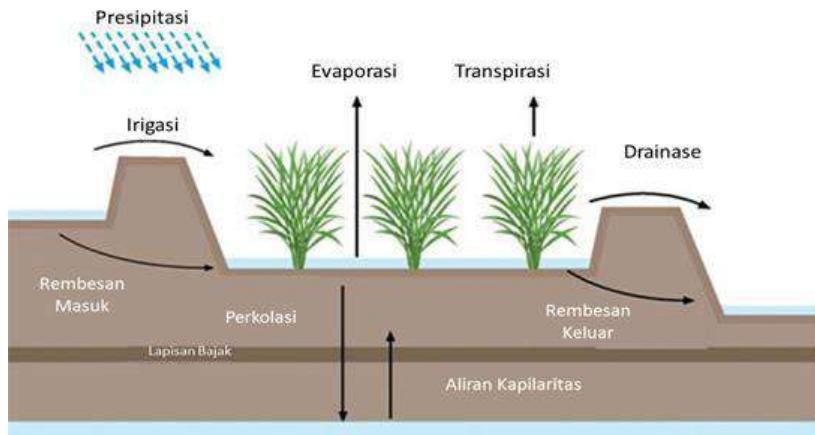
Tabel 11. Ketersediaan Air DTA Danau Singkarak pada Tingkat Kecamatan berdasarkan Analisi Neraca Air DAS Tahunan.

Kabupaten	Kecamatan	Luas (ha)	Elevasi Rata-rata	Curah Hujan Rata-rata Tahunan	Suhu Rata-rata Tahunan	Evaporasi Permukaan Air	Evapo-transpirasi Aktual	Koefisien Aliran Permukaan (Metode Cook)	Total Ketersediaan Air
		m dpl	mm/thn	oC	mm/thn	mm/thn	mm/thn	-	m ³ /tahun
Tanah Datar									
- Batipuh	8,680	742	2,908	23.2	1,299.6	1,196.5	0.64	53,480,061.8	
- X Koto	4,950	876	2,908	22.4	1,249.7	1,157.2	0.65	30,332,445.4	
- Batipuh Selatan	10,388	585	2,908	24.2	1,359.6	1,242.9	0.67	57,081,807.7	
- Rambatan	3,478	644	2,908	23.8	1,336.9	1,225.4	0.65	20,482,065.1	
Padang Panjang									
- Padang Panjang Timur	2,958	900	2,908	22.3	1,240.9	1,150.2	0.59	21,318,327.2	
- Padang Panjang Barat	1,879	807	2,908	22.9	1,275.3	1,177.4	0.62	12,355,640.3	
Kota Solok									
- Lubuk Sikarah	7,519	926	2,428	22.1	1,231.3	1,109.6	0.66	33,622,654.0	
- Tanjung Harapan	1,877	400	2,120	25.3	1,432.4	1,205.9	0.62	6,519,787.6	
Solok									
- Junjung Sirih	7,129	810	2,908	22.8	1,274.1	1,176.5	0.70	37,030,601.7	
- 10 Koto Singkarak	14,448	699	2,514	23.5	1,315.9	1,178.6	0.67	63,670,037.7	
- Lembang Ilaya	6,039	860	2,799	22.5	1,255.6	1,155.3	0.68	31,766,798.6	
- Kubung	17,777	842	2,426	22.6	1,262.2	1,131.9	0.67	75,925,592.1	
- Gunung Telang	17,846	865	2,732	22.5	1,253.7	1,149.5	0.67	93,288,545.9	
- Bukit Sundi	5,985	519	2,735	24.6	1,385.3	1,248.7	0.65	31,135,303.2	
- Danau Kembar	2,315	944	2,831	22.0	1,224.8	1,133.1	0.66	13,366,332.2	
Ketersediaan Air DTA Danau Singkarak									581,387,000.4

Neraca Air Daerah Irigasi

Neraca air Daerah Irigasi pada dasarnya merupakanimbangan antara ketersediaan air yang berasal dari pasokan air pada saluran irigasi dengan serta kebutuhan air untuk agroekosistem lahan sawah dalam layanan daerah irigasi.

Kesetimbangan air pada suatu agroekosistem lahan sawah terdiri dari kebutuhan irigasi (IR), curah hujan (CH), evapotranspirasi (ET) serta perkolasikan (P) dan rembesan (S). Berdasarkan neraca air, kebutuhan air agroekosistem sawah dapat dihitung dengan mempertimbangkan parameter IR, CH, ET, dan P (Allen et al., 1998).



Gambar 32. Neraca air agroekosistem lahan sawah

Kebutuhan irigasi lahan sawah terdiri kebutuhan air tanaman, kebutuhan air untuk pengolahan tanah serta kebutuhan air untuk penggenangan.

Kebutuhan air tanaman dianalisis berdasarkan estimasi kebutuhan air tanaman menurut Metode FAO (Doorenbos. J. dan A.H. Kassam, 1979).

Kebutuhan irigasi terdiri dari kebutuhan tanaman, kebutuhan air untuk pengolahan tanah dan kehilangan air karena perkolasai (Linsley et al., 1975). Analisis kebutuhan tanaman dilakukan berdasarkan estimasi kebutuhan air tanaman menurut Metode FAO (Doorenbos. J. dan A.H. Kassam, 1979). Kebutuhan air tanaman dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$ET_{tan} = K_c \times ET_o$$

dimana :

ET_{tan} : evapotranspirasi tanaman

ET_o : evapotranspirasi referensi

K_c : koefisien tanaman

- Untuk menghitung evapotranspirasi tanaman, dilakukan beberapa tahapan :
- mengidentifikasi tahap pertumbuhan tanaman, menentukan lama setiap periode pertumbuhan dan memilih K_c yang sesuai dengan periode pertumbuhan.
- Menghitung K_c pada pertengahan periode pertumbuhan berdasarkan kondisi iklim harian dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$K_{cmid} = K_{cmid(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3}$$

$K_{c mid (Tab)}$: nilai K_c pada pertengahan periode pertumbuhan berdasarkan tabel

U_2 : rata-rata harian kecepatan angin selama pertengahan periode pertumbuhan tanaman (m/s)

RH_{min} : rata-rata harian kelembaban relatif minimum

h : tinggi tanaman selama pertengahan periode pertumbuhan tanaman (m)

Menentukan kurva koefisen tanaman yang dapat menentukan nilai K_c untuk setiap periode pertumbuhan.

Kebutuhan air untuk pengolahan dan penggenangan lahan dihitung berdasarkan rekomendasi PU sedangkan perkolasi ditetapkan berdasarkan survei lapang.

Untuk menghitung kebutuhan irigasi lahan sawah dihitung berdasarkan ketetapan sebagai berikut:

Irigasi diberikan apabila tinggi genangan pada lahan sawah lebih rendah dari batas ketinggian genangan terendah yang diperkenankan :

$$G_i > G_{\min}$$

$$G_i = G_{i-1} - \mathbf{Perc}_i - \mathbf{ETc}_i + \mathbf{CH}_i$$

dimana

G_i : tinggi genangan air lahan sawah pada hari ke- i (mm)

G_{\min} : tinggi genangan air lahan sawah minimum (mm)

Irigasi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{ri} = G_{\max} - (G_{i-1} - \mathbf{Perc}_i - \mathbf{ETc}_i + \mathbf{CH}_i)$$

dimana,

I_{ri} : kebutuhan irigasi pada hari ke- i (mm)

G_{\max} : tinggi genangan air lahan sawah maksimum (mm)

G_{i-1} : tinggi genangan air lahan sawah pada hari ke- $(i-1)$ (mm)

\mathbf{Perc} : perkolasi (mm)

\mathbf{ETc}_i : evapotranspirasi tanaman pada hari ke- i (mm),

\mathbf{CH}_i : curah hujan pada hari ke- i (mm)

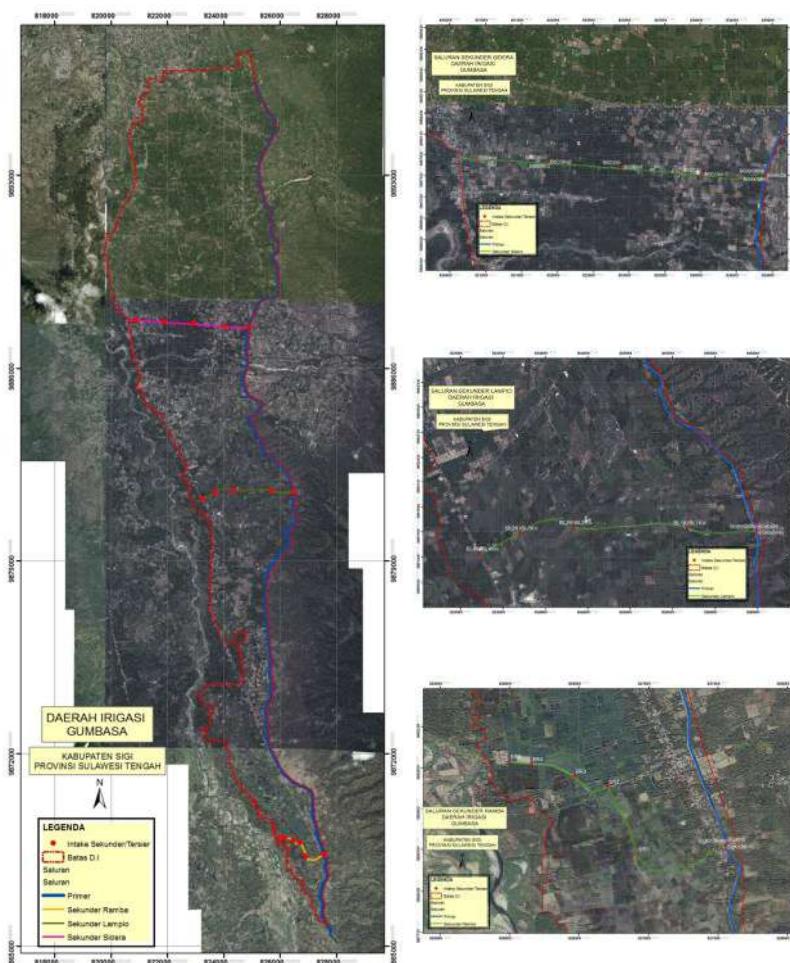
Data masukan yang diperlukan dalam perhitungan analisis neraca ketersediaan kebutuhan air lahan sawah meliputi:

(1) peta dan luas daerah irigasi (DI),

- (2) debit irigasi dari bendung irigasi (harian atau 15 harian),
- (3) pola tanam tahunan,
- (4) data hujan dan evapotranspirasi (ETP) harian.

Teladan analisis neraca air daerah irigasi adalah analisis yang telah dilakukan pada D.I Gumbasa, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah.

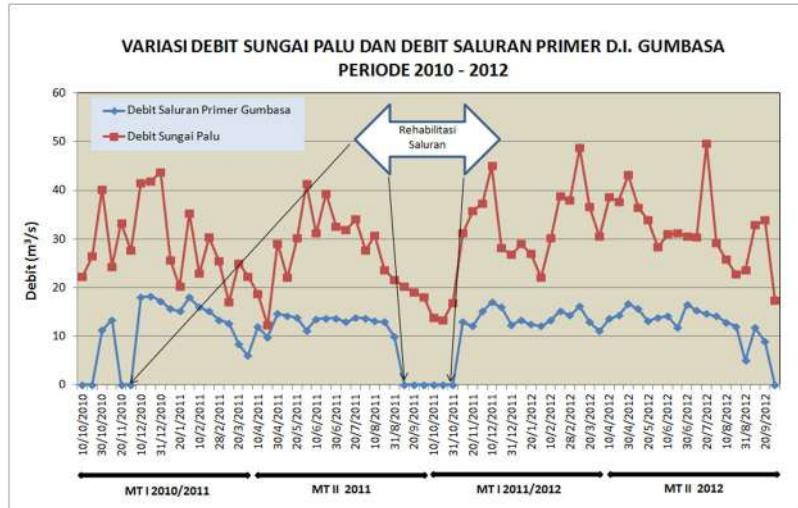
Daerah Irigasi (D.I.) Gumbasa dengan luas potensial 10,500 Ha dan luas fungsional 7,922 Ha berada di Wilayah Kabupaten Sigi mengairi sawah di 5 Kecamatan, 26 Desa dan 1 Kelurahan. Sumber irigasi D.I. Gumbasa berasal dari Sungai Palu yang merupakan jenis sungai kontinyu dengan karakteristik mampu mengalirkan air sepanjang tahun sehingga tingkat penggunaan lahan pada daerah aliran Sungai Palu merupakan areal pertanian yang sebagian besar didominasi oleh usahatani pertanian lahan basah.



Gambar 33. Daerah Irigasi Gumbasa (7,922 Ha)

Sumber air irigasi D.I Gumbasa berasal dari Sungai Palu yang dibendung dan dialirkan Bendung Gumbasa melalui saluran primer dan sekunder. Bendung Gumbasa berlokasi di Desa Pandere, Kecamatan Gumbasa, Kabupaten Sigi-Biromaru, Provinsi Sulawesi Tengah.

Gambar 2 menyajikan fluktuasi debit harian Sungai Palu dan Debit Saluran Primer D.I Gumbasa periode 2010-2012.



Gambar 34. Variasi Debit Sungai Palu dan Debit Saluran Primer D.I. Gumbasa Periode 2010-2012.

Berdasarkan data yang tersedia di Balai Wilayah Sungai Sulawesi III, debit harian rata-rata Sungai Palu periode 2010-2012 mencapai $29.64 \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan debit rata-rata saluran primer mencapai $13.48 \text{ m}^3/\text{s}$ atau mencapai proporsi 45.47% terhadap potensi debit Sungai Palu. Debit maksimum Sungai Palu terjadi pada tanggal 20 Juli 2012 mencapai $49.58 \text{ m}^3/\text{s}$, debit minimum terjadi pada tanggal 20 April 2011 sebesar $12.24 \text{ m}^3/\text{s}$. Sedangkan debit maksimum saluran primer terjadi pada tanggal 20 Desember

2010 mencapai $18.26 \text{ m}^3/\text{s}$, debit minimum terjadi pada tanggal 31 Agustus 2012 sebesar $5.00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Selama periode 10 September 2011 hingga 31 Oktober 2011, karena alasan perawatan sarana dan prasarana bendung dan saluran, dilakukan penutupan pintu intake aluran primer sehingga air irigasi tidak tersedia selama periode tersebut, walaupun aliran Sungai Palu menyediakan potensi irigasi antara 13 hingga $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Potensi debit yang tersedia di saluran Primer didistribusikan ke petak tersier melalui intake saluran sekunder. Teladan distribusi air pada saluran Sekunder disajikan pada Tabel 7.

Tabel 12. Potensi ketersediaan air irigasi pada Saluran Sekunder Ramba (Intake BGKn3)

Kode Bangunan	Luas Lahan Irigasi Fungsional (Ha)	Debit Tengah bulanan MT 1 2011/2012 (l/s)						Debit Irigasi Teredia Total Tengah Bulanan (l/s)				
		Nop1	Nop2	Des1	Des2	Jan1	Jan2	Feb1	Feb2	Mar1	Mar2	
BGKn3Tg	145	100.5	304.0	273.6	181.0	181.0	181.0	181.0	181.0	181.0	181.0	1.776.1
BGKn3Kkr	19	18.5	39.6	39.6	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	246.7
BGKn3KKkn	14	10.0	29.0	29.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	175.0
BR1	20	13.9	41.9	37.7	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	245.0
BR2	14	9.7	29.4	26.4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	171.5
BR3	14	9.7	29.4	26.4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	171.5
BR4	41	28.4	86.0	77.4	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2	502.2
BR5	56	38.8	117.4	105.7	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	685.9

Tabel tersebut menunjukkan bahwa ketersediaan air irigasi pada Saluran Sekunder Ramba (Intake BGKn3) selama MT I 2011/2012 adalah berkisar antara 12.0 l/s hingga 304.0 l/s, dapat digunakan untuk mengairi petak sekunder seluas 145 ha yang terbagi menjadi 5 petak tersier (BR 1 – BR 5) dengan luas antara 9.7 ha hingga 38.8 ha.

Saat ini IP aktual D.I Gumbasa adalah 2 kali musim tanam (IP 200) yaitu MT I antara Nopember I hingga Maret III, MT II antara April I hingga September II, sedangkan antara September III hingga Oktober III adalah Bera.

Memperhatikan pola temporal ketersediaan air di saluran primer dan sekunder, dapat disimpulkan bahwa musim tanam yang hanya 2 kali di D.I Gumbasa saat ini memungkinkan untuk dapat ditingkatkan karena ketersediaan air di sungai Palu dan di saluran primer yang tersedia sepanjang tahun dengan debit lebih tinggi dari debit kebutuhan irigasi saat ini. Dengan demikian IP aktual D.I Gumbasa memungkinkan untuk dapat ditingkatkan dari IP 200 menjadi IP 300.

Tabel 8 menyajikan distribusi temporal ketersediaan dan kebutuhan air irigasi menurut Skenario IP 200 (aktual) dan IP 300 (rekomenadasi) pada D.I. Gumbasa.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa untuk skenario IP 300, MT I berlangsung selama Nopember I – hingga Februari III, MT II antara Maret I hingga Juni III, MT III antara Juli I hingga Oktober III.

Tabel 13. Analisis neraca air D.I. Gumbasa menurut Skenario IP 200 (aktual) dan IP 300 (rekomendasi)

KONDISI AKTUAL IP 200				REKOMENDASI IP 300			
Periode	Ketersediaan Air Salur dan Gumbasa (l/s)	Fase Pertumbuhan	Kebutuhan Irrigasi (l/s)	Periode	Fase Pertumbuhan	Kebutuhan Irrigasi (l/s)	Keterangan
NOV I	1.2.981.0	Pengolahan Lahan (30 hr)	9.506	NOV I	Pengolahan Lahan (20 hr)	12.675.2	Perlu Waktu Pengolahan cepat dan Serempak
NOV II	1.5.084.0	■	9.506	NOV II	■	6.337.6	
DES I	1.5.144.0	■	9.506	DES I	■	6.337.6	
DES II	1.6.022.0	■	6.338	DES II	■	9.506.4	Penggunaan Varietas
DES III	1.2.365.0	■	9.506	DES III	■	9.506.4	Genjah dan/atau Teknik Tabelia
JAN I	1.3.288.0	■	9.506	JAN I	■	9.506.4	
JAN II	1.2.168.0	■	9.506	JAN II	■	9.506.4	
FEB I	1.3.318.0	■	9.506	FEB I	■	9.506.4	
FEB II	1.5.245.0	■	9.506	FEB II	■	9.506.4	
FEB III	1.4.314.0	■	9.506	FEB III	■	0.0	Panen Serentak
MAR I	16.122.0	Pemeliharaan (30 hr)	9.506	MAR I	Pengolahan Lahan (20 hr)	12.675.2	
MAR II	12.969.0	■	0	MAR II	■	6.337.6	
MAR III	11.060.0	■	0	MAR III	■	6.337.6	
APR I	13.587.0	■	0	APR I	■	9.506.4	
APR II	14.267.0	■	9.506	APR II	■	9.506.4	
APR III	16.681.0	■	9.506	APR III	■	9.506.4	Idem
MEI I	15.640.0	■	9.506	MEL I	■	9.506.4	
MEI II	13.086.0	■	9.506	MEL II	■	9.506.4	
MEL III	13.880.0	■	9.506	MEL III	■	9.506.4	
JUN I	1.4.098.0	■	9.506	JUN I	■	9.506.4	
JUN II	1.1.730.0	■	9.506	JUN II	■	0.0	
JUN III	16.590.0	■	9.506	JUN III	■	0.0	
JUL I	15.305.0	■	9.506	JUL I	■	0.0	
JUL II	14.631.0	■	9.506	JUL II	■	12.675.2	
JUL III	14.028.0	■	9.506	JUL III	■	6.337.6	
AGS I	1.2.850.0	■	9.506	AGS I	■	9.506.4	
AGS II	1.1.628.0	■	9.506	AGS II	■	9.506.4	Saat Ketersediaan Air
SEP I	1.2.728.0	■	0	SEP I	■	9.506.4	di bandingkan kebutuhan irigasi pada koordinasi
SEP II	8.881.0	■	0	SEP II	■	9.506.4	dengan Pulterkait
OCT I	0.0	■	0	OCT I	■	0.0	
OCT II	1.2.932.0	Bera	0	OCT II	■	0.0	
OCT III	10.071.0	■	0	OCT III	■	0.0	

DAFTAR BACAAN

- Allen. G Richard. Luis S. Pereira. Dirk Raes and Martin Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56.FAO.Rome. 301 p.
- Chow, V.T. 1964. Handbook of Applied Hydrology. A compendium of Water-Resources Technology. McGraw-Hill Book. Company.
- Dingman SL. 2002. Physical Hydrology. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Doorenbos. J. and A.H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper no 33. 193p
- Hillel, D. 1972. The Field Water Balanced and Water Use Efesiensi. In: D hillel (ed) Optimizing the soil physical Enviroment Toward Greater Crop Yields. Academic Press. New York.
- Linsley, R.K, M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus. 1975. Hydrology for Engineers. McGraw Hill/Kogakusha Ltd. Tokyo
- Nasir, A.2002. Neraca Air Agroklimatik. Makalah Pelatihan Bimbingan Pengamanan Tanaman Pangan dan Bencana Alam.Bogor
- Notodihardjo, M. 1982. Pengelolaan Sumberdaya Air untuk Pengembangan Lingkungan Hidup. Buletin Asosiasi Sumberdaya Air Indonesia. CV. Sarajaya. Jakarta.

Setiawan, B.I., 2015. Analisa ketersediaan dan kebutuhan air tanaman kasus di BB Padi Sukamandi. Seminar Perubahan Iklim dan Isu Kekeringan terhadap Pencapaian Swasembada Pangan. Bogor, 7 Juli 2015.

Setiawan, B.I., Sutoyo, I W. Budiasa, H. Kato, J. Kubota, M. Mizoguchi. 2015. Seasonal Variability of Rainfall in Saba Watershed of Bali Saba Watershed of Bali Island. The Fourth International Workshop on CAAM-GRENE, Hanoi 10-12 March 2015

Seyhan E. 1977. Fundamentals of Hydrology. Terjemahan. S. Subagyo. 1993. Dasar Dasar Hidrologi. Cetakan kedua. Gajah Mada Univ. Press. Yogyakarta. 380 pp.

Thornthwaite, C.W. dan Matter, J.P. (1957). Instruction and tables for computing potensial evapotranspiration and te water balance. Drexel Institute of Climatology. New Jersey. 401p.

Van Dam, J.C., W.R. Raaff, A. Volker. 1972. Climatology, Veldbook, Vo. D., ILRI, Wageningen, The Netherlands.

Xu, C.-Y.; and V.P. Singh. 1998. "A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations". *Water Resources Management* 12 (1): 31–50

BAB 5.

IKLIM ESKTRIM

Yeli Sarvina

Pendahuluan

Dalam dasawarsa belakangan ini telah banyak kerugian ekonomi maupun nyawa manusia melayang akibat berbagai kejadian iklim ekstrim. Kejadian-kejadian ini diasosikan sebagai bencana hidrometeorologi. Berdasarkan data emergency events database (EM-DAT) yang dikelola oleh *The centre for research on the epidemiology of disaster* (CRED) dari tahun 1994- 2013 tercatat 6.873 bencana alam terjadi di seluruh dunia. Secara keseluruhan 218 juta penduduk dunia terkena dampak dari bencana ini dan jumlah korban meninggal dunia tercatat 1, 35 juta orang atau sekitar 68.000 orang per tahun.

EM DAT mengklasifikasikan 4 macam bencana yaitu :

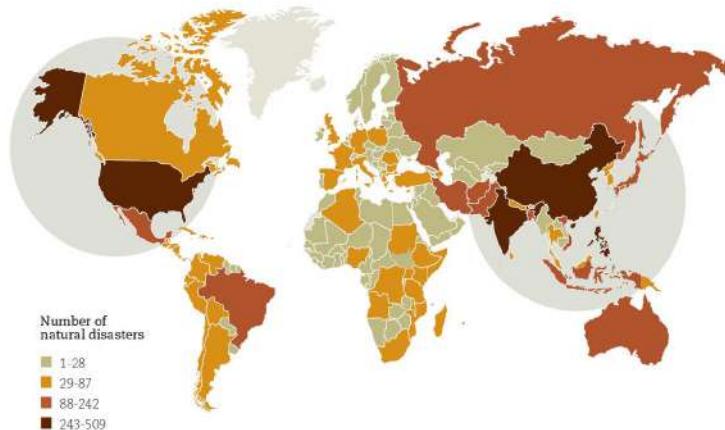
1. Geophysics contoh gempa bumi, aktivitas gunung berapi
2. Hidrologi contoh Banjir, tanah longsor, gelombang laut
3. Meteorologi, contoh badai, suhu ekstrim, kabut asap
4. Klimatologi contoh kekeringan, kebakaran hutan,
5. Biologi contoh bencana karena penyakit
6. Ektraterrestrial contoh jatuhnya meteor

Bencana hidrologi, meteorologi dan klimatologi dikenal sebagai bencana hidrometeorologi. Hampir 91% bencana yang terjadi di dunia pada periode 1994-2013 adalah bencana hidrometeorologi. Gambar 1 menunjukkan persentase dan jumlah

kejadian bencana di dunia selama periode 1994-2013. Banjir dan badai adalah dua bencana dengan tingkat kejadian tertinggi di dunia.



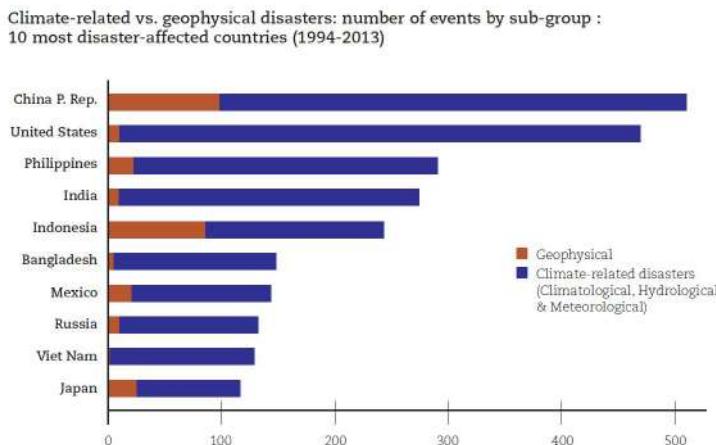
Gambar 35. Jumlah dan persentase kejadian bencana alam di dunia dalam kurun waktu 1994-2013 (sumber: CRED, 2015)



Gambar 36. Jumlah kejadian bencana alam per negara dalam kurun waktu 1994-2013 (sumber : CRED, 2015)

Gambar 2 menunjukkan jumlah bencana per negara pada periode 1994-2013. Bencana alam di Cina, Amerika Serikat dan

Philipina adalah yang tertinggi di dunia. Sedangkan Indonesia mengalami rata-rata 88-242 kejadian bencana alam. Sedangkan gambar 3 menunjukkan perbandingan kejadian bencana hidrometeorologi dan bencana geofisik di 10 negara dengan tingkat kejadian bencana tertinggi di dunia.



Gambar 37. Perbandingan bencana hidrometeorologi dan bencana geofisik di 10 negara dengan jumlah tingkat kejadian terbesar di dunia (sumber : CRED, 2015)

Data historis kejadian bencana untuk wilayah Indonesia menunjukkan adanya peningkatan bencana dari waktu ke waktu. Tercatat ada 13 jenis bencana yang terjadi di Indonesia. Maka tak heran Indonesia pun dijuluki sebagai laboratorium bencana.

Rekapitulasi kejadian bencana berdasarkan Data dan Informasi Bencana Indonesia (DIBI) - Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) selama periode 2005-2015 menunjukkan sekitar 80% kejadian bencana di Indonesia adalah bencana terkait iklim. Dari 80% kejadian bencana iklim tersebut, bencana banjir memiliki

proporsi terbanyak atau 40% dari total kejadian. Diikuti bencana puting beliung (26%), tanah longsor (20%), kekeringan (9%), banjir dan tanah longsor (3%), dan gelombang pasang atau abrasi (2%) Dua kejadian iklim ekstrim yang sangat mempengaruhi produksi pertanian indonesia adalah banjir dan kekeringan. Data menyebutkan bahwa luas lahan sawah yang terkena dampak kekeringan meningkat pada saat El-Nino sedangkan luas sawah terkena dampak banjir meningkat pada saat La-Nina.

Berbagai penelitian pun melaporkan bahwa peningkatan intensitas dan frekuensi iklim ekstrim belakangan ini dipicu oleh perubahan iklim. Salah satunya adalah hasil kajian Scott *et al.* (2013) yang menjelaskan bahwa iklim berubah oleh adanya peningkatan emisi gas rumah kaca akibat perbuatan dan ulah manusia. Secara keseluruhan kejadian iklim ekstrim pun berubah. Perubahan variabilitas iklim dan iklim ekstrim telah mengambil perhatian besar para peneliti dan meteorologis belakangan ini.

Berdasarkan data-data kejadian bencana tersebut diatas maka jelas bahwa kejadian dan analisis tren dan proyeksi iklim ke depan perlu terus diteliti. Integrasi upaya adaptasi perubahan iklim dengan pengurangan risiko bencana pun perlu dikaji.

Definisi iklim ekstrim

World meteorology organization (WMO) mendefinisikan kejadian iklim ekstrim sebagai fenomena meteorologi yang jarang terjadi dan melewati nilai ambang (*threshold value*) yang telah didefinisikan. Tingkat kekuatan bencana dan dampak yang dirasakan oleh masyarakat tergantung pada kerawanan lingkungan dan komunitas masyarakat. Ini artinya nilai ekstrim di suatu wilayah akan berbeda dengan wilayah lain, sangat bergantung pada kondisi wilayah dan masyarakatnya.

Sementara itu kejadian ekstrim pada meteorologi pertanian didefinisikan sebagai interaksi antara kerawanan sistem pertanian

dan kondisi cuaca ekstrim. Beberapa kejadian iklim ekstrim yang penting dalam meteorologi pertanian adalah :

Badai (ciclon, tifón, dan hurricanes) yang berhubungan dengan angin, dan banjir

Banjir, ini berkaitan dengan kejadian curah hujan ekstrim
Petir dan tornado

Kekeringan dan gelombang panas

Badai pasir

Kebakaran

Cuaca yang mendukung penyebaran hama dan penyakit pada tanaman dan ternak

Kajian dan analisis kejadian iklim ekstrim harus dilakukan secara tepat. Mengingat kejadian iklim ekstrim membawa kerugian yang signifikan pada umat manusia. Klein Tank *et al.* (2009), Zhang *et al.* (2011) dan *Assessment report (AR5) International Governmental Panel on Climate Change (IPCC)* merangkum beberapa karakteristik data iklim yang dibutuhkan untuk melihat perubahan dan tren nilai ekstrim, yaitu :

1. Ketersediaan , kualitas, dan konsistensi data sangat penting. Karena semua nilai ini dapat mempengaruhi statistik nilai ekstrim. Praktek pengukuran di lapangan harus konsisten dan tidak berubah seiring berjalananya waktu.
2. Untuk analisis statistik, perhitungan nilai ambang terlewati (baik frekuensi maupun durasi) dan nilai periode ulang (intensitas, kekuatan) adalah sangat sensitif terhadap perubahan nilai parameter distribusi statistik dan lokasi geografi.
3. Metode yang konsisten harus digunakan untuk membuat data set. Penggunaan set data dengan metode yang berbeda akan menjadi kendala dalam analisis perbandingan dengan wilayah kajian yang lain.

4. Periode data juga harus konsisten. Perbedaan periode data antar wilayah dan antar stasiun akan mempengaruhi nilai perbandingan spasial. Periode data yang panjang sangat dibutuhkan untuk mendapatkan nilai statistik dan tren yang memadai.
5. Keseragaman dan kekonsistenan definisi indek nilai ekstrim diperlukan. Disamping itu kekonsistenan periode referensi juga harus konsisten. Karakteristik fundamental ini adalah dasar yang sangat penting, tidak hanya untuk perbandingan indeks antar wilayah tapi juga akan mempengaruhi hasil analisis statistik itu sendiri.
6. Sebaran spasial stasiun pengamatan cuaca/iklim harus mencukupi sehingga bisa mewakili dan menggambarkan keragaman indeks nilai ekstrim secara spasial.

Heim jr (2015) menjelaskan isu-isu lain yang relevan dengan iklim ekstrim, yaitu :

Diperlukannya komunikasi yang lebih baik antara semua pihak yang terkait dengan pemantauan iklim ekstrim, pengambil kebijakan dan pihak-pihak lain yang menggunakan informasi iklim ekstrim. Perlu adanya koordinasi jaringan pengamatan antar wilayah.

Pengamatan parameter iklim dan cuaca saja tidaklah cukup. Perlu adanya pemantauan dampak dari kejadian iklim dan cuaca secara sistematis dengan data dan sistem pengamatan. Sebagai contoh metrik tanaman (produksi, gizi, qualitas, kandungan protein dll), transportasi, keragaman makanan, pengolahan pasca panen, kemudahan akses dan indikator sosial ekonomi.

Analisis Nilai Iklim Ekstrim

Nilai ekstrim didefinisikan sebagai sebuah kejadian dengan nilai tidak biasa pada suatu wilayah pada periode waktu tertentu atau bisa juga didefinisikan sebagai sebuah kejadian dengan nilai melampaui nilai ambang yang telah ditetapkan.

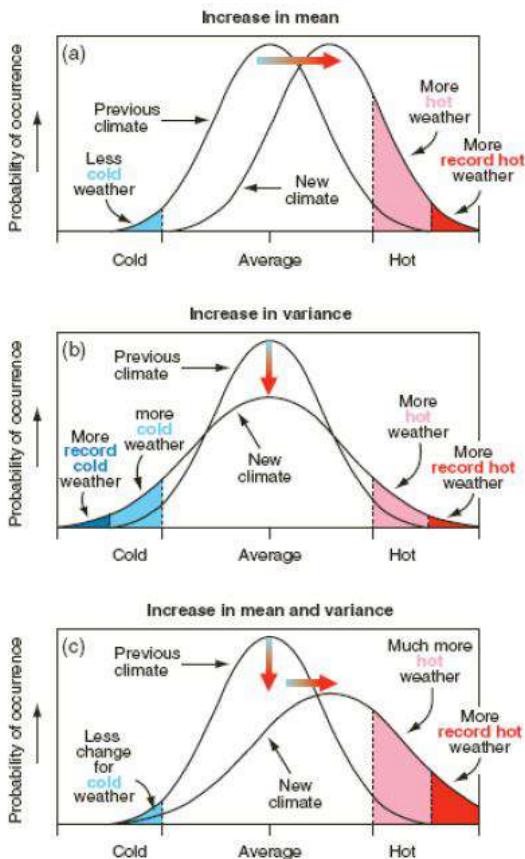
Ada dua pendekatan yang sering digunakan dalam analisis nilai ekstrim yaitu metode klasik atau *block máxima* dan *peak over threshold value* (POT). Metode *block máxima* mengambil nilai maksimum dalam kurun waktu tertentu. Sebagai contoh nilai maksimum dalam satu tahun atau satu bulan periode waktu. Sedangkan metode POT mendefinisikan nilai ekstrim apabila nilai curah hujan telah melewati nilai ambang yang telah ditetapkan. Penetapan nilai ambang adalah bagian yang paling penting dan krusial dalam metode POT.

Metode *Block máxima* sering digunakan karena analisisnya lebih mudah dan sederhana. Tapi dengan metode ini, pengambilan nilai *máximo* pada periode waktu secara acak memungkinkan hilangnya informasi statistik yang penting. Metode POT dapat digunakan untuk melihat jumlah dan kekuatan kejadian iklim ekstrim per periode analisis. Tahap yang paling penting dan krusial dalam metode POT adalah penetapan nilai ambang yang tepat. Nilai ambang yang sering digunakan adalah dalam bentuk percentil. Berbagai studi telah banyak dilakukan untuk mencari nilai ambang yang tepat. Kunkel *et al.* (1999) mendefinisikan nilai ambang curah hujan yaitu 90 dan 99 persen percentil. Sedangkan Klein Tank dan Konnen (2009) menetapkan nilai 95 dan 90 percen percentile sebagai nilai ambang untuk curah hujan ekstrim.

Beberapa tipe distribusi yang sering digunakan dalam analisis nilai curah hujan ekstrim diantaranya distribusi Gumbel, Generalized extreme value (GEV), log normal, log normal tipe 3, distribusi gamma dan generalized Pareto distribution (GPD). Distribusi GEV sering diaplikaskan pada analisis curah hujan

maksimum tahunan. Distribusi ini memiliki parameter estimasi yang sederhana dan ini sangat cocok untuk mengestimasi nilai curah hujan ekstrim. Sedangkan untuk analisis suhu ekstrim, pendekatan distribusi yang sering digunakan adalah distribusi normal.

Sedangkan untuk analisis perubahan tren nilai ekstrim, hal mendasar yang harus dipahami adalah perbedaan perubahan nilai mean dan variance. Konsep dasar analisis perubahan tren ini dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 38. Analisis perubahan nilai mean dan varian pada suhu ekstrim.
 (a) ketika nilai rata-rata meningkat, (b) ketika nilai varian (ragam) meningkat dan (c) ketika kedua nilai baik rata-rata dan varian meningkat untuk distribusi normal (After IPCC, 2001).

Integrasi Adaptasi Perubahan Iklim dan Upaya Pengurangan Resiko Bencana Iklim Ekstrim

Seperi yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan resiko bencana yang terkait iklim. Hal ini pun diperparah dengan kerentanan-kerentanan sosial. Upaya adaptasi perubahan iklim memiliki kesamaan tujuan dengan pengurangan resiko bencana yaitu mengurangi kerentanan masyarakat dan menciptakan pembangunan yang berkelanjutan. Secara global sudah bisa diterima secara baik bahwa pengurangan resiko bencana dan adaptasi perubahan iklim harus diintegrasikan.

Kesiapsiagaan penanganan dampak kemanusiaan dari perubahan iklim sangat dibutuhkan. Salah satu upaya yang sering dikembangkan adalah sistem peringatan dini (*early warning system*) dan upaya-upaya adaptasi spesifik lokasi. Sistem peringatan dini diharapkan menjadi solusi dalam mengurangi dampak dari bencana.

Upaya integrasi adaptasi perubahan iklim dan pengurangan risiko bencana harus memperhatikan sekurangnya tiga aspek yaitu adaptasi, pengurangan risiko bencana dan pengentasan kemiskinan (Maarif, 2002). Selanjutnya adalah adanya upaya yang dilakukan untuk mengharmonisasikan dan mengaitkan berbagai kerangka kerja dan kebijakan untuk pengurangan risiko bencana dan adaptasi perubahan iklim. Hal ini menuntut adanya kerja sama banyak pihak. Pihak-pihak yang terkait adalah Badan Penanggulangan Bencana Nasional, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Bappenas, Kementerian Pertanian, Kementerian Lingkungan Hidup dll.

DAFTAR BACAAN

- Centre for research on the Epidemiology of Disaster (CRED). Human Cost of Natural Disaster 2015, a global perspektive.
- Heim jr, Richard R. 2015. An Overview of weather dan climate extreme- product and trend. Journal weather dn climate extreme 10 (2015) 1-9.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. Climate Change 2001; The Scientific Basis. IPCC Third Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Maarif, Saiful. 2012. Penanggulangan bencana di Indonesia. Jakarta. Badan Nasional Penanggulangan bencana. Jakarta
- Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W., Zhang, X., 2009. Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. Geneva, switzerland. 55. (WCDMP-72, WMO-TD/No. 1500).
- Kunkel, K. E., Pielke, R. a., & Changnon, S. a. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. Bulletin of the American Meteorological Society, 80(6): 1077–1098.
- Scott, S. B., Sliwinski, M. J., & Blanchard-Fields, F. 2013. Age differences in emotional responses to daily stress: The role of timing, severity, and global perceived stress. Psychology and Aging, 28, 1076 –1087. <http://dx.doi.org/10.1037/a0034000>

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B., Zwiers, F.W., 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Clim. Chang.* 2: 851–870.

BAGIAN III. STRATEGI

BAB 1.

ANTISIPASI DAN PERBAIKAN

TANAMAN UNTUK ADAPTASI

Didy Sopandie, Trikoesoemaningtyas, dan Nani Heryani

Antisipasi dan Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Pemanasan global merupakan ancaman serius terhadap keberlanjutan produksi pertanian dan ketahanan pangan nasional. Oleh karena itu diperlukan usaha mitigasi dan adaptasi untuk mengatasi dampak perubahan iklim. Upaya mitigasi difokuskan pada sub sektor perkebunan, terutama melalui pengendalian pembakaran lahan, dan pengelolaan lahan gambut berkelanjutan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Upaya adaptasi lebih difokuskan pada sektor tanaman pangan karena paling rentan terhadap ancaman perubahan iklim. Salah satu teknologi yang dibutuhkan untuk tanaman pangan adalah untuk mengurangi emisi GRK dan menghadapi efek pemanasan global melalui perakitan varietas unggul yang toleran terhadap suhu tinggi, beremisi rendah, tahan kekeringan dan salinitas, serta tahan genangan. Berbagai varietas unggul tanaman pangan, terutama padi, yang toleran kekeringan, genangan, salinitas dan umur genjah telah dilepas sebagai upaya untuk mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim, namun varietas toleran suhu tinggi belum dihasilkan. Di masa yang akan datang, ketersediaan varietas unggul padi toleran suhu tinggi menjadi keharusan, terutama untuk lahan sawah yang ada di dataran rendah karena

peningkatan suhu di dataran rendah akan lebih dirasakan dibandingkan dengan dataran sedang atau tinggi. Perakitan varietas membutuhkan informasi tentang kendali genetik terhadap karakter yang diperbaiki sehingga dapat ditentukan karakter seleksi dan metode seleksi yang efisien. Pemuliaan padi untuk suhu tinggi dan cekaman lainnya akibat perubahan iklim akan lebih berarti jika menggunakan varietas-varietas padi yang diterima oleh masyarakat sebagai materi pemuliaan.

IRRI menempatkan prioritas tinggi dalam penelitian terkait dengan peningkatan toleransi terhadap cekaman abiotik akibat perubahan iklim (*Climate change ready rice*), seperti pengembangan teknologi berbasis DNA untuk pemuliaan yang tepat dan cepat tanaman padi yang adaptif terhadap perubahan iklim (Wassmann *et al.*, 2009). Ketahanan sistem produksi padi harus ditingkatkan melalui dua pendekatan, (i) meningkatkan toleransi terhadap cekaman secara tunggal, dan pada saat yang sama, (ii) memiliki toleransi terhadap cekaman ganda akibat perubahan iklim. Sementara ini kita tidak melihat teknologi tanaman sebagai solusi akhir untuk semua ancaman yang ditimbulkan oleh perubahan iklim, ada keyakinan bahwa pengembangan plasma nutfah dan praktek agronomi yang lebih baik harus menjadi fokus untuk upaya adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim. Pendekatan ini telah terbukti memiliki ketahanan yang tinggi terhadap variabilitas iklim yang ekstrim. Di bawah ini diuraikan tentang mekanisme adaptasi tanaman terhadap cekaman abiotik sebagai dasar pemahaman dalam perbaikan tanaman, serta sebagai pengetahuan untuk menyusun agenda riset ke depan.

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Abiotik Akibat Perubahan Iklim

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Suhu Tinggi

Strategi penghindaran panas melalui perubahan waktu pembungaan pada tanaman padi. Pada tanaman padi, memajukan waktu pembungaan lebih awal pada dini hari atau pagi hari (Prasad *et al.*, 2006), merupakan strategi yang efisien untuk meloloskan diri (*escape*) dari cekaman suhutinggi yang akan terjadi menjelang siang hari. Variasi genotipe yang besar untuk bunga mekar pagi hari terdapat pada plasma nutfah padi *O.glaberrima* (CG14), yang memiliki kemampuan berbunga segera setelah fajar. Karakter berbunga pada awal pagi bahkan dini hari merupakan sifat yang menguntungkan dari *O.glaberrima* yang telah dimanfaatkan dalam persilangan interspesifik antara *O.glaberrima* dan *O.sativa*, yaitu untuk memajukan waktu berbunga 1 jam lebih awal (Yoshida *et al.*, 1981).

Tanaman padi memiliki kemampuan untuk mengendalikan laju berbunga sebagai strategi meloloskan diri (*escape*) dari suhu tinggi. Ketika terkena suhu tinggi selama fase kritis padi dapat menghindari panas dengan mempertahankan suhu iklim mikro dibawah titik kritis dengan transpirasi yang efisien untuk pendinginan. Jagadish *et al.* (2008) mencatat suhu jaringan spikelet 0,4, 1,3, dan 1,8°C dibawah suhu udara ambien pada kondisi 30, 35, dan 38°C. Berdasarkan interaksi antara suhu tinggi dan RH, pertanaman padi di tropika dan sub-tropika dapat diklasifikasikan kedalam panas/kering dan panas/lembab.

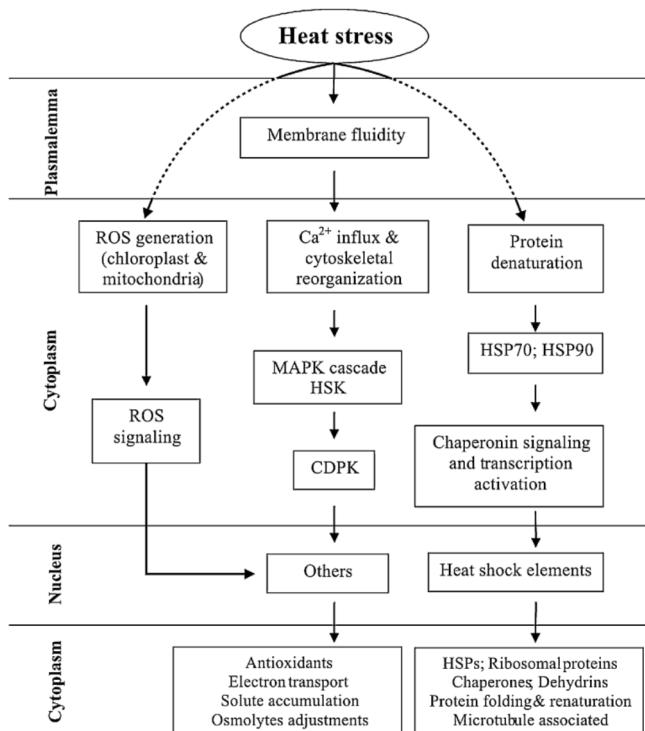
Varietas padi N22 (*aus*) konsisten toleran terhadap suhu tinggi, dan juga toleran terhadap kekeringan dengan mensintesis enzim-enzim yang menghilangkan ROS (*reactive oxygen species*), seperti ditunjukkan oleh kandungan H₂O₂ yang rendah pada malainya dibandingkan varietas peka N118. Varietas N22 terbukti sangat konsisten toleran terhadap suhu tinggi pada berbagai pengujian, maka bisa diduga bahwa strategi yang sama telah dilakukan pada cekaman suhu tinggi, yaitu dengan menghilangkan ROS, walaupun masih harus dibuktikan dengan penelitian lebih lanjut.

Manajemen ROS. Tanaman menunjukkan berbagai mekanisme untuk bertahan hidup dalam kondisi suhu tinggi yang

meliputi: evolusi adaptasi jangka panjang fenologi dan morfologi, dan mekanisme jangka pendek penghindaran (*avoidance*) seperti merubah orientasi daun, penurunan suhu melalui transpirasi, atau perubahan komposisi lipida membran. Kematangan dini pada kebanyakan tanaman berkorelasi dengan kehilangan hasil yang lebih kecil pada kondisi cekaman suhu tinggi, yang dapat dihubungkan dengan mekanisme *escape* (Wahid *et al.*, 2007). Sinyal awal terhadap cekaman (contohnya cekaman osmotik, ionik, perubahan suhu, perubahan fluiditas membran) akan memicu proses *downstream signaling* dan kontrol transkripsi, yang akan mengaktifkan tanggap mekanisme untuk membangun kembali kondisi homeostatis, perlindungan dan perbaikan terhadap kerusakan protein dan membran. Beberapa mekanisme toleransi termasuk *ion transporters*, *osmoprotectants*, penghilangan radikal bebas, LEA protein, beberapa faktor yang terlibat dalam alur pensinyalan (*signaling cascades*) dan kontrol transkripsi sangat esensial untuk menanggulangi pengaruh cekaman (Wang *et al.* 2004). Urutan dari perubahan dan mekanisme dimulai dari tanggap (*perception*) terhadap suhu tinggi, pensinyalan/isyarat (*signaling*) dan produksi metabolit yang menyebabkan tanaman mampu mengatasi kerusakan akibat cekaman suhu tinggi (**Gambar 1**).

Pengaruh cekaman suhu tinggi dapat dilihat pada berbagai tingkat, termasuk bekerjanya membran plasma dan lintasan biokimia pada sitoplasma atau organel sitoplasma. Pengaruh awal dari cekaman suhu tinggi adalah pada plasmamembran, yang menunjukkan lebih cairnya lapisan lipida (*lipid bilayer*). Hal ini menyebabkan induksi *influx Ca²⁺* dan reorganisasi cytoskeletal, yang menghasilkan upregulasi *mitogen activated protein kinases (MAPK)* dan *calcium dependent protein kinase (CDPK)*. Proses signaling dari alur signal tersebut pada tingkat *nuclear* menyebabkan peningkatan produksi *antioxidants* dan *compatible osmolytes* untuk keseimbangan air pada sel dan penyesuaian osmotik (*osmotic adjustment*). Produksi ROS (*reactive oxygen species*)

pada organel seperti kloroplas dan mitokondria merupakan fenomena yang penting seperti halnya produksi antioksidan (Bohnert *et al.*, 2006).



Gambar 39. Mekanisme hipotetik toleransi terhadap cekaman suhu tinggi pada tanaman. MAPK, mitogen activated protein kinases; ROS, reactive oxygen species; HAMK, heat shock activated MAPK; HSE, heat shock element; HSPs, heat shock proteins; CDPK, calcium dependent protein kinase; HSK, histidine kinase (Sung *et al.*, 2003)

Peran *Heat Shock Protein*. Setelah mengalami penderaan suhu tinggi dan terjadinya persepsi sinyal, seketika terjadi perubahan pada tingkat molekuler yang mendorong terjadinya ekspresi gen dan akumulasi transkrip, maka terjadilah sintesis protein (*stress-*

related proteins) sebagai strategi toleransi terhadap cekaman suhu tinggi. Ekspresi HSPs (*heat shock proteins*) diketahui sebagai strategi penting untuk adaptasi terhadap cekaman suhu tinggi. Ukuran HSPs berkisar antara 10-200 kDa, memiliki fungsi seperti *chaperon* dan berperan dalam sinyal transduksi selama cekaman suhu tinggi terjadi. Toleransi yang dimediasi oleh HSPs menghasilkan perbaikan proses fisiologi seperti fotosintesis, *assimilate partitioning*, WUE, NUE, dan stabilitas membran (Ahn dan Zimmerman 2006; Momcilovic dan Ristic, 2007).

Beberapa studi menegaskan bahwa HSPs adalah molekul *chaperones* yang melindungi konfigurasi asli (*native configuration*) dan fungsi protein sel dalam kondisi cekaman suhu tinggi. Telah banyak dibuktikan bahwa perolehan toleransi suhu tinggi secara langsung dihubungkan dengan sintesis dan akumulasi HSPs (Bowen *et al.*, 2002). Sebagai contoh, HSPs menyediakan protein baru atau protein yang terdistorsi untuk melipat (*protein folding*) dan menjadikannya berfungsi normal kembali. HSPs membantu untuk mengangkut protein dari satu kompartemen ke lainnya, dan mengangkut protein tua menuju tempat pembuangan di dalam sel. Salah satunya, HSP70, telah diteliti secara ekstensif dan telah diajukan memiliki berbagai fungsi penting, seperti translasi, translokasi, proteolisis, *protein folding* atau *chaperoning*, menekan agregasi, dan reaktivasi protein terdenaturasi (Zhang *et al.*, 2005). Protein stres yang lain meliputi ekspresi *ubiquitin*, LEA (*Late embryogenesis abundant proteins*), dan *dehydrins* juga telah ditunjukkan memiliki peran yang penting pada kondisi cekaman suhu tinggi. Fungsi utama dari protein stres ini tampaknya terkait dengan proteksi struktur sel atau sub-selular terhadap kerusakan akibat cekaman oksidatif dan dehidrasi.

Temperatur untuk sensing dan pensinyalan. Tanggapan terhadap stres (*perception*) dan penyampaian sinyal untuk menghidupkan respon mekanisme adaptasi merupakan tahapan penting untuk toleransi terhadap cekaman lingkungan. Terdapat beberapa tanggapan terhadap stres dan lintasan sinyal, di

antaranya sangat spesifik dan lainnya mungkin terlibat dalam *cross-talk* pada beberapa step. Tanggap secara umum terhadap cekaman melibatkan pensinyalan terhadap cekaman melalui sistem redox. Sinyal-sinyal kimia seperti ROS, Ca^{2+} dan hormon tanaman akan mengaktifkan '*genomic re-programing*' melalui alur signal (*signal cascade*). Bermacam-macam ion dan molekul pensinyalan terlibat dalam 'sensing dan signaling' suhu. Sebagai respon signal terhadap cekaman suhu tinggi, Ca^{2+} pada sitoplasma meningkat dengan tajam, tampaknya dihubungkan dengan toleransi melalui sinyal transduksi menuju MAPK yang diinduksi oleh suhu tinggi. Aliran MAPK (*MAPK cascade*) merupakan bagian penting dari lintasan sinyal transduksi pada tanaman dan diduga berfungsi dimana saja dalam tanggap terhadap sinyal eksternal. MAPK yang diaktivasi oleh heat-shock telah diidentifikasi, aktivasi tersebut dipicu oleh perubahan balik yang nyata pada fluiditas membran bergandengan dengan renovasi cytoskeletal. Influx Ca^{2+} dan kerja *Ca-dependent protein kinases* (CDPK) sangat dekat berkorelasi dengan ekspresi HSPs. Cekaman suhu tinggi menginduksi uptake Ca^{2+} dan gen-gen terkait calmodulin (Gong *et al.*, 1997).

Sebagai mediator sinyal Ca^{2+} , calmodulin (CaM) diaktivasi dengan mengikat Ca^{2+} , yang menginduksi aliran regulator dan regulasi beberapa gen HSP (Liu *et al.*, 2003). Beberapa studi menunjukkan bahwa Ca^{2+} terlibat dalam regulasi tanggap tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan, termasuk cekaman suhu tinggi. Peningkatan Ca^{2+} pada sitoplasma pada kondisi suhu tinggi diduga mengurangi kerusakan akibat panas, seperti meningkatnya aktivitas antioksidan, pemeliharaan turgor pada sel jaga yang menyebabkan sel tanaman memiliki daya tahan hidup lebih baik. Namun demikian, kelebihan Ca^{2+} yang dilepas ke sitoplasma yang menyebabkan tingginya Ca^{2+} di sitoplasma dalam waktu lama akan menjadi toksik.

Mekanisme Adaptasi terhadap Cekaman Kekeringan

Terdapat empat mekanisme umum agar tanaman dapat beradaptasi pada cekaman kekeringan, yaitu *drought escape*, *dehydration avoidance*, *dehydration tolerance*, dan *drought recovery* (Fukai dan Cooper 1995). Walaupun demikian sering kali tanaman menggunakan lebih dari satu mekanisme untuk tahan kekeringan (Mitra 2001). *Drought escape* merupakan kemampuan tanaman untuk menyelesaikan siklus hidupnya sebelum adanya kekeringan yang cukup serius. Mekanisme ini meliputi perkembangan fenologi yang cepat (umur berbunga dan umur panen lebih awal), perkembangan plastisitas (variasi dalam periode pertumbuhan bergantung defisit air), dan remobilisasi asimilat pre-anthesis ke biji (Fukai dan Cooper 1995; Mitra, 2001).

Dehydration avoidance merupakan kemampuan tanaman untuk memelihara potensial air jaringan tetap tinggi meskipun pada kondisi kurang air, dengan cara memperbaiki serapan air, menyimpannya dalam sel tanaman, dan mengurangi hilangnya air. *Drought avoidance* terjadi melalui pemeliharaan turgor sel dengan cara meningkatkan kedalaman akar, sistem perakaran yang efisien, serta meningkatkan laju dan jumlah pengangkutan air ke tajuk dan dengan mengurangi kehilangan air melalui lapisan epidermis (seperti stomata dan lentikular), mengurangi jeraian panas radiasi melalui penggulungan atau pelipatan daun (*leaf rolling atau folding*) dan mengurangi penguapan melalui permukaan daun (*leaf area*). Tanaman pada kondisi kekeringan akan bertahan hidup dengan cara menjaga sel tetap turgor dan mengurangi kehilangan air (Fukai dan Cooper 1995; Mitra 2001). Fukai dan Cooper (1995) menjelaskan bahwa sebagian besar galur padi yang mempunyai kemampuan untuk tumbuh dan berkembang relatif baik selama kekeringan adalah yang mampu memelihara potensial air daun tetap tinggi.

Dehydration tolerance merupakan kemampuan tanaman menjaga proses metabolisme tetap berlangsung normal meskipun

pada kondisi kurang air dan potensial air jaringan rendah. Respons tanaman terhadap rendahnya potensial air jaringan menentukan tingkat toleransi tanaman terhadap kekeringan. Mekanisme ini menjaga turgor melalui pengaturan osmotik (*osmotic adjustment*, proses induksi akumulasi *solute* dalam sel), meningkatkan elastisitas sel, dan mengurangi ukuran sel, serta resistensi protoplasma (Fukai and Cooper 1995; Mitra 2001). *Drought recovery* merupakan mekanisme penyembuhan di mana proses metabolisme berjalan normal kembali setelah mengalami stres kekeringan. Mekanisme ini penting manakala stres kekeringan terjadi pada awal perkembangan tanaman. Beberapa genotipe padi mampu menghasilkan beberapa anakan meskipun dalam kondisi kekeringan, anakan tersebut masih tetap produktif. Kepulihan dari stres kekeringan terkait dengan kemampuannya mempertahankan daun tetap hijau selama periode kering (Fukai and Cooper 1995). Akan tetapi, mekanisme adaptasi tersebut memiliki beberapa kelemahan. Genotipe genjah dengan umur pendek umumnya berdaya hasil rendah dibandingkan dengan yang berumur panjang. Mekanisme yang menyebabkan ketahanan terhadap kekeringan melalui pengurangan kehilangan air (misalnya dengan cara menutupnya stomata dan mengurangi luas daun) umumnya berimplikasi pada menurunnya fiksasi karbon dioksida (CO₂). *Osmotic adjustment* (OA) meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan dengan pemeliharaan turgor tanaman, tetapi peningkatan konsentrasi solut dalam sel tanaman membutuhkan energi yang cukup banyak dikeluarkan tanaman. Konsekuensinya, adaptasi tanaman harus menunjukkan keseimbangan antara *escape*, *avoidance*, dan *tolerance* dengan menjaga produktivitas yang memadai (Mitra, 2001).

Mekanisme Toleransi Secara Fisiologi. Sloane *et al.* (1990) mendapatkan bahwa suatu genotipe tanaman mempunyai hasil yang lebih baik dari genotipe lain karena mampu menjaga tekanan turgor daun, laju transpirasi dan pertukaran CO₂ bersih. Menurut Tardieu (1997) beberapa faktor yang dapat membantu

mempertahankan turgor adalah (a) penurunan potensial osmotik, (b) kemampuan mengakumulasi zat-zat terlarut, (c) elastisitas sel atau jaringan yang tinggi, dan (d) ukuran sel yang kecil.

Pengaturan Potensial Osmotik. Proses pengaturan tekanan osmotik dalam menghadapi cekaman kekeringan sering dikenal sebagai “*osmotic adjustment, OA*”. OA merupakan suatu proses adaptif di mana terjadi akumulasi solut nontoksik ‘*compatible solute*’ di dalam sel dan menurunkan potensial osmotik selama berlangsungnya defisit air. Senyawa-senyawa terlarut yang diakumulasi selama proses *osmotic adjustment* meliputi senyawa-senyawa *fructan*, *trehalose*, *polyol*, *poliamin*, *prolin*, dan *glisinbetain* (Mitra, 2001).

Akumulasi Asam Amino Prolin. Banyak peneliti yang menyatakan bahwa prolin bebas banyak diakumulasikan sebagai respons terhadap stres air yang dapat diamati pada daun-daun yang masih melekat maupun yang telah gugur pada banyak tanaman budi daya pada kondisi laboratorium (Hamim *et al.*, 1996; Sopandie, *et al.* 1996; Blum ,1997; Mitra 2001; Hapsoh, *et al.* 2005). Fukai dan Cooper (1995) melaporkan bahwa kemampuan mengakumulasi prolin berkorelasi positif dengan hasil tanaman padi pada tanah kering. Dijelaskan bahwa sebagai sumber N bagi pembentukan prolin ini terutama adalah dari hasil degradasi protein daun. Menurut Fukai dan Cooper (1995) serta Mitra (2001), akumulasi prolin diduga berhubungan dengan kemampuan prolin yang bertindak sebagai osmoregulator, agen pelindung bagi enzim-enzim sitoplasma dan enzim-enzim membran atau sebagai bahan simpanan untuk pertumbuhan setelah tanaman mengalami stres.

Akumulasi Asam Absisik (ABA). Chandler dan Robertson (1994) menyatakan bahwa hormon tumbuhan ABA mempunyai hubungan yang erat dengan kontrol proses-proses fisiologi dan molekuler terhadap toleransi kekeringan di dalam benih sebagaimana yang terjadi di dalam jaringan vegetatif. Terdapat hipotesis bahwa ABA yang diproduksi dalam akar tanaman yang

stres berperan sebagai sinyal kimia pada tajuk, sehingga mendorong penutupan stomata sebelum perubahan status air dalam daun terjadi, sehingga tanaman dapat mengoptimalkan penggunaan air pada kondisi stres (Tardieu 1997, Richards 1997).

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Salinitas

Beberapa tanaman yang toleran terhadap salinitas dijelaskan pada **Tabel 1**. Menurut Marschner (1995), mekanisme toleransi terhadap salinitas meliputi mekanisme ekslusi dan inklusi. Mekanisme ekslusi adalah mekanisme untuk mencegah defisit air secara internal dengan cara sintesis solut organik dan meningkatkan sukulensi. Sementara mekanisme inklusi adalah mekanisme untuk mencegah toksitas ion-ion melalui jaringan yang mempunyai toleransi tinggi terhadap peningkatan konsentrasi garam dengan cara kompartementasi garam, sintesis solut kompatibel, dan pertukaran K^+/Na^+ , serta penghindaran dari ion berkonsentrasi tinggi dengan cara retranslokasi garam melalui floem, ekskresi garam, dan menggugurkan daun-daun tua. Tanaman yang memiliki mekanisme ekslusi hanya menyimpan garam dalam konsentrasi yang sangat rendah dalam batang dan pucuk karena tanaman mampu meretranslokasikan garam kembali ke daerah perakaran, sedangkan tanaman dengan mekanisme inklusi akan menyimpan garam dalam konsentrasi tinggi pada batang dan pucuk. Transpor ion sangat berperan dalam adaptasi tanaman terhadap salinitas tanpa memerhatikan mekanisme toleransi yang dimiliki oleh tanaman (Marschner 1995). Ketidakseimbangan ion-ion dalam larutan tanah dapat memengaruhi penyerapan hara, misalnya konsentrasi ion Cl^- , Na^+ yang tinggi dalam larutan tanah dapat menurunkan penyerapan ion K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} (Sopandie, 1990; Sopandie *et al.*, 1995ab; Marschner, 1995). Keseimbangan penyerapan antara K^+ dan Na^+ atau rasio K/Na menjadi salah satu indikasi toleransi

tanaman terhadap salinitas (Sopandie *et al.*, 1993; Marschner, 1995). Tanaman yang memiliki mekanisme ekslusi menyimpan garam dalam konsentrasi yang sangat rendah pada tajuk karena tanaman mampu me-retranslokasikan garam kembali ke daerah perakaran. Tanaman dengan mekanisme inklusi akan menyimpan garam dalam konsentrasi tinggi pada tajuk. Seaman (2004) mengelompokkan toleransi tanaman terhadap salinitas, baik secara ekslusi maupun inklusi menjadi toleransi pada tingkat seluler, jaringan, dan tanaman Tabel 1.

Tabel 14. Tingkat adaptasi tanaman terhadap Na berdasarkan Na yang dapat ditukarkan di lapang.

Sangat Toleran (Nadd>60)	Toleran (Nadd=40–60)	Medium Toleran (Nadd20–40)	Peka (Nadd10–20)	Sangat Peka (Nadd2–10)
<i>wheat grass</i>	gandum	<i>clovers</i>	kedelai	alpukat
<i>Rumput (grass)</i>	kapas	<i>oats</i>	jagung	jeruk
<i>tall wheat grass</i>	alfalfa	padi	kacang tanah	<i>nuts</i>
<i>barley</i>		<i>lentil</i>		
tomat		<i>Wijen (sesame)</i>		
<i>garden beet</i>				

(Ghafoor *et al.*, 2004)

Tabel 15. Respons tanaman terhadap salinitas

Morfologi	Pengurangan jumlah daun, penurunan ukuran daun, pengurangan jumlah stomata per satuan luas, peningkatan sukulentensi, penebalan kutikula dan lapisan lilin, peningkatan <i>tyloses</i> , serta peningkatan lignifikasi akar
Fisiologi	Peningkatan sintesis osmolit kompatibel, penurunan rasio K+/Na+, peningkatan kompartimentasi Na+ ke dalam vakuola, sekresi garam
Biokimia	Peningkatan produksi ABA dan peningkatan aktivitas enzim
Molekuler	Aktivasi gen yang berhubungan dengan selektivitas transpor ion dan integritas membran

(Seaman 2004)

Adaptasi Fisiologi terhadap Cekaman Salinitas. Mekanisme adaptasi fisiologi terjadi melalui penyesuaian osmotik, kompartimentasi garam ke dalam vakuola, dan sekresi garam. Penyesuaian osmotik merupakan kemampuan tanaman untuk menurunkan potensial osmotik tanpa kehilangan turgor. Penyesuaian osmotik dicapai melalui sintesis osmolit kompatibel dan regulasi penyerapan K^+ serta efluks Na^+ . Sintesis osmolit kompatibel merupakan media bagi tanaman untuk melakukan penyesuaian osmotik (*osmotic adjusment*) guna mengatasi penurunan potensial tanpa kehilangan turgor (Hare *et al.*, 1998). Senyawa yang termasuk osmolit kompatibel yang bersifat *osmoprotectant* adalah gula, prolin, *polyiol*, manitol, asam amino, dan *glycine betaine*. Regulasi penyerapan K dan Na untuk penyesuaian osmotik (*osmotic adjustment*) dicapai melalui selektivitas transpor ion-ion. Selektivitas transpor ion-ion merupakan mekanisme yang umum digunakan oleh tanaman untuk mencapai rasio K^+/Na^+ yang diinginkan oleh tanaman dalam sitosol (Chinnusamy *et al.*, 2005). Toleransi terhadap salinitas tidak hanya melibatkan adaptasi untuk mencegah toksitas Na, tetapi juga melibatkan kemampuan melakukan transpor K secara selektif pada saat konsentrasi Na dalam larutan tanah tinggi untuk mempertahankan rasio K^+/Na^+ . Selektivitas transpor antara K atau Na sangat menentukan toleransi tanaman terhadap salinitas karena kedua ion mempunyai muatan yang sama. Selain selektivitas transpor ion-ion, permeabilitas membran sel sangat berperan dalam penyesuaian osmotik sebagai bentuk toleransi terhadap salinitas. Kalsium sangat berperan dalam mempertahankan permeabilitas membran sel. Pada tanaman yang toleran terhadap salinitas ternyata mampu mempertahankan penyerapan kalsium.

Konsentrasi garam dalam sel tanaman dapat mencapai tiga kali lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi dalam larutan tanah. Kemampuan tanaman untuk mempertahankan konsentrasi garam yang rendah dalam sitosol sangat penting sebagai

mekanisme toleransi terhadap salinitas. Mekanisme yang dimiliki tanaman untuk menurunkan konsentrasi garam dalam sitosol adalah meningkatkan efluks garam pada membran plasma dan kompartementasi garam ke dalam vakuola. Kompartementasi NaCl ke dalam vakuola hanya dapat terjadi jika NaCl ditransportasikan secara aktif menuju vakuola dan permeabilitas membran tonoplas terhadap NaCl rendah. Kompartementasi dan eksresi garam merupakan transpor aktif yang sangat ditentukan oleh jumlah energi yang dihasilkan melalui respirasi dalam mitokondria. Transpor ion melalui plasma membran dan tonoplas membutuhkan energi yang disediakan oleh ATP vakuola dan plasma membran (Leigh, 1997). Ion Na masuk ke dalam vakuola memanfaatkan pompa proton melalui membran Na^+/H^+ antiport. Peningkatan aktivitas Na^+/H^+ antiport pada kelompok halofit dan glikolifit sangat berperan sebagai mekanisme toleransi terhadap salinitas. Selain itu kandungan garam dalam tajuk dikendalikan dengan ekresi melalui kelenjar garam, kutikula, gutasi atau ditransportasikan kembali melalui floem. Demiral (2003) menemukan mekanisme adaptasi pada spesies *Olea europaea*, yaitu ekslusi garam yang ditunjukkan dengan peningkatan rasio K^+/Na^+ dalam sel tanaman seiring dengan meningkatnya stres garam yang dialami oleh tanaman. Stres salinitas juga menginduksi peningkatan akumulasi asam absisik (ABA) dalam daun (Zhu, 2004). Kandungan ABA pada varietas padi yang toleran terhadap salinitas ditemukan lebih tinggi dibandingkan dengan varietas yang peka. Peningkatan kandungan ABA dapat memperbaiki rasio K^+/Na^+ karena peningkatan ABA akan memacu eksresi garam melalui pengguguran daun. Peningkatan atau penurunan sintesis dan aktivitas enzim merupakan mekanisme tanaman untuk toleran terhadap salinitas (Hoshida *et al.*, 2000). Hasil penelitian Demiral *et al.* (2005) menunjukkan bahwa pada kondisi salin terjadi peningkatan aktivitas dan konsentrasi enzim *Superoxide dismutase* (SOD) dalam daun pada

beberapa varietas *barley*. Enzim SOD berperan dalam detoksifikasi ROS sehingga permeabilitas membran dapat dipertahankan.

Adaptasi Molekuler terhadap Cekaman Salinitas. Konsentrasi K⁺ dalam sel dapat dipertahankan dengan meningkatkan ekspresi gen yang mengendalikan *potassium-specific cotransporter*. Pada beberapa spesies, enzim mengendalikan transporter K⁺ hanya diinduksi pada kondisi stres salin (Su *et al.* 2002). Homeostasis ion-ion terutama ion K dan Na sangat penting sebagai mekanisme toleransi terhadap salinitas. Regulasi homeostasis antara ion K dan Na terjadi melalui kompartimentasi Na ke dalam vakuola dalam lintasan yang dikendalikan oleh gen SOS1 (*SOS pathway*). Ekspresi SOS1 pada kondisi salinitas akan meningkat karena dipacu oleh SOS3-SOS2 Kinase (Ishitani *et al.* 2000). Stres salinitas akan menginisiasi *signal* kalsium yang mengaktifkan protein kinase komplek SOS2 dan SOS3 yang berperan meningkatkan ekspresi gen SOS1. Di samping itu SOS2 dan SOS3 juga mengatur transkripsi beberapa gen yang mengendalikan homeostasis ion H⁺-ATPase dan H⁺-Ppase. Kedua enzim ini berperan mengatur gradien proton yang berfungsi dalam aktivitas Na⁺/H⁺ antiporter (Chinnusamy *et al.*, 2005).

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Rendaman

Pengaturan hormonal dan dasar fisiologi *toleransi terhadap rendaman* dan *escape* pada padi tahan genangan tinggi telah berhasil diungkap secara baik (Bailey-Serres and Voesenek, 2008). Dua perbedaan penting antara kedua kelompok ini terhadap genangan adalah bahwa: (a) pada padi tahan rendaman tinggi melalui pelolosan diri (*escape*), perpanjangan ruasnya diinduksi oleh cekaman rendaman sehingga menjadi lebih panjang, sedangkan (b) pada padi yang toleran rendaman ialah perpanjangan sel yang ditekan oleh cekaman rendaman dengan tujuan menekan konsumsi energi, sehingga tanaman padi bisa

bertahan lebih lama pada kondisi tergenangi. Hal terpenting dari kedua tipe padi tersebut adalah sistem pengaturan energi untuk mencapai adaptasinya. Pada kondisi terendam, tanaman dihadapkan pada kondisi rendahnya oksigen serta keberadaan elektron aseptor O_2 -akhir pada rantai transpor elektron sangat terbatas. Oleh karena itu tanaman memerlukan proses daur ulang NADH melalui jalur alternatif untuk mengatur proses glikolisis, yang utamanya dicapai melalui fermentasi etanolik yang mengkonversi piruvat ke etanol yang meregenerasi satu molekul NAD^+ . Hal ini didahului dengan konversi piruvat menjadi laktat yang menyebabkan penurunan pH seluler dan regenerasi satu molekul NAD^+ . Etanol dapat berdifusi keluar dari sel, sedangkan pembentukan asetaldehida sebagai perantara sangat beracun. Detoksifikasi asetaldehida mungkin dilakukan oleh enzim *aldehidadehidrogenase* yang dikode oleh gen *OsAdh2* di mitokondria (Nakazono *et al.*, 2000). Oleh karena itu mekanisme ini sangat penting untuk menghindari kematian sel dalam kondisi genangan yang berkepanjangan.

Karena produksi ATP dalam jalur anaerobik sangat sedikit (2-4 mol ATP, bandingkan dengan 30-36 mol ATP pada kondisi aerobik), cadangan pati secara cepat menurun. Studi fisiologi pada padi toleran *near isogenic Sub1 line* (M202-Sub1) menunjukkan bahwa sifat toleransi berhubungan dengan level transkrip yang lebih tinggi dan aktivitas enzim-enzim kunci (PDC dan ADH) yang tetap tinggi dalam jalur fermentasi etanol, yang berkaitan dengan penangguhan degradasi pati dan pengaturan kadar gula terlarut tetap tinggi selama 14 hari dalam kondisi tergenang (Fukao *et al.*, 2006). Pada waktu yang sama, varietas toleran memperlihatkan sedikit perpanjangan batang dalam kondisi tergenang, sehingga memerlukan energi ATP yang lebih kecil. Penekanan perpanjangan ruas dapat dihubungkan dengan ekspresi gen terkait ekspansi pelepasan dinding sel yang rendah pada galur-galur *Sub1 near isogenic*. Sebagai kesimpulan dapat ditunjukkan bahwa *Sub 1* memberikan toleransi melalui

pengaturan metabolisme yang dioptimalkan dan penekanan konsumsi energi untuk ketahanan secara *escape*. Hal ini yang menyebabkan tanaman padi bisa hidup selama 14 hari dengan mempertahankan cadangan karbohidrat yang cukup untuk bisa tumbuh lagi ketika cekaman genangan berhenti.

Proses di atas umumnya dikontrol oleh hormon tumbuh etilen, dan oleh keseimbangan yang baik antara GA dan ABA. Etilen dan ABA menstimulasi pembelahan sel dan perpanjangan sel, sementara ABA bertindak dalam jalur antagonistik dan secara cepat terdegradasi dalam kondisi tergenang. Pengurutan lokus *Sub 1* pada kromosom 9 menunjukkan keberadaan 3 faktor transkripsi (FK) etilen responsif (*ERF*) gen (*Sub 1A*, *Sub1B*, dan *Sub 1C*) dan alel *Sub1A-1* yang teridentifikasi sebagai faktor determinan terhadap toleransi (Xu *et al.*, 2006). Gen *Sub 1A* ternyata tidak dimiliki oleh padi varietas *japonica*, termasuk genom referensi Nipponbare, sedangkan pada *indica* letaknya pada kromosom yang tidak dikenal dengan referensi 93-11. Temuan ini menunjukkan adanya keterbatasan genom referensi saat ini dan pentingnya sekuensing QTL utama dalam donor tetua masing-masing, bahkan ketika kandidat gen yang jelas terdapat di *region syntetic* di Nipponbare. Urutan secara rinci dan analisa ekspresi dari tiga gen *ERF* mengungkapkan alel toleran-spesifik dan pola ekspresi untuk *Sub1A* dan *Sub1C*, tetapi tidak untuk *Sub1B*. Secara umum, *Sub1A tinggi* dan ekspresi *Sub1C rendah* dapat diamati pada varietas toleran, sedangkan *Sub1A rendah* dan ekspresi *Sub1C tinggi* terdeteksi pada varietas peka (Xu *et al.*, 2006). Kedua gen tersebut membawa karakteristik SNPs (*single nucleotide polymorphism*) yang menciptakan situs fosforilasi kinase putatif (*putative kinase phosphorylation site*) pada *Sub1A-1* dan situs mutasi fosforilasi putatif di *Sub1C-1*. Saat ini SNPs sedang menjadi target melalui penanda alel spesifik yang digunakan dalam pemuliaan molekuler. Walaupun fungsi alel spesifik *Sub 1C-1* masih perlu diklarifikasi melalui pendekatan transgenik, analisa ekspresi gen dalam kisaran perbedaan varietas toleran dan peka menunjukkan

bahwa bahwa gen ini bukan determinan utama dari toleransi (Septiningsih *et al.*, 2009). Overekspresi dari gen *Sub1A-1* pada varietas padi peka genangan yang secara alamiah tidak memiliki gen *Sub1A* memperlihatkan toleransi melalui penekanan pertumbuhan panjang dalam kondisi tergenang. Selanjutnya ditunjukkan bahwa gen *Sub1A* diinduksi oleh etilen dan bukan oleh perlakuan GA. Data tersebut menunjukkan bahwa *Sub1A* adalah *regulator upstream* yang bertindak sebagai penekan respon *escape* yang diinduksi etilen.

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Suhu Tinggi

Perbaikan tanaman (*crop improvement*) untuk toleransi terhadap cekaman (*stress*) sangat bergantung pada pemahaman mekanisme fisiologi dan dasar genetik toleransi pada level tanaman, seluler, dan molekuler. Informasi yang cukup telah tersedia terkait dengan aspek fisiologi dan metabolit tanaman untuk toleransi terhadap cekaman suhu tinggi. Namun demikian, informasi tentang dasar genetiknya masih belum lengkap, walaupun penggunaan metode pemuliaan konvensional dan teknik kontemporer dengan molekuler biologi telah berkontribusi terhadap pengembangan tanaman yang lebih toleran terhadap cekaman suhu tinggi. Secara khusus penggunaan pemetaan QTL telah berkontribusi terhadap pemahaman hubungan genetik terkait toleransi terhadap cekaman berbeda (Wahid *et al.*, 2007).

Pada tanaman padi, introduksi, penerimaan dan penyebaran sistem pertanaman varietas agak pendek (*semidwarf*) dengan arsitektur kanopi yang lebih baik bisa menjadi pertimbangan dalam perbaikan varietas untuk perubahan suhu dan diprediksi akan memainkan peranan penting untuk adaptasi terhadap suhu

ekstrim. Lebih lanjut, perbaikan varietas dengan malai yang dikelilingi kanopi daun tidak seperti varietas tradisional akan sangat diuntungkan oleh kemampuan pendinginan melalui transpirasi pada fase kritis antesis. Genotipe yang dapat menghindar (*avoidance*) dapat berkembang dengan baik pada areal dengan kondisi panas dan kering, sedangkan untuk areal yang panas dan lembab diperlukan genotipe yang mampu meloloskandiri (*escape*) atau benar-benar toleran agar produktivitas bisa dijaga. Namun demikian, kenaikan suhu bukan hanya pada temperatur maksimum namun juga kenaikan suhu udara pada permukaan. Tanaman padi dapat terpapar pada kenaikan suhu siang dan malam hari, yang menunjukkan bahwa genotipe yang benar-benar toleran sangat diperlukan. Peningkatan toleran suhu tinggi lebih diperlukan untuk *O. Sativa* daripada *O. Glaberrima* spp, karena puncak antesis *O. Sativa* terlambat sampai menjelang pertengahan sore hari. Kondisi ini dapat menyebabkan organ reproduktif yang penting seperti anter terpapar suhu tinggi, sehingga dapat menyebabkan kehampaan gabah yang tinggi.

Genetika Toleransi Suhu Tinggi.

Toleransi terhadap suhu tinggi dikendalikan oleh tidak hanya satu gen mayor namun beberapa gen (Maestri *et al.*, 2002). Mackill and Coffman (1983) melaporkan bahwa kontrol genetik dari kemampuan memancarkan serbuk sari yang tinggi (*high pollen shedding*) pada tanaman padi adalah resesif dan dipengaruhi oleh gen yang berbeda. Sebaliknya, Yoshida *et al.* (1981) mengamati bahwa sebagian besar variasi genetik untuk *high pollen shedding* adalah aditif. Hasil penelitian mereka menunjukkan angka yang tinggi untuk heritabilitas arti luas dan heritabilitas arti sempit, masing-masing 76 dan 71%, dan juga terdapat korelasi yang tinggi antara kesuburan spikelet dan *pollen shedding*.

Analisis QTL, pendekatan korelasi dancos-segregasi, dan penggunaan material genetik adalah yang paling mudah dipakai dalam mempelajari dasar genetik toleransi suhu tinggi pada tanaman sereal (Maestri *et al.*, 2002). Pada tanaman padi, pemetaan QTL untuk toleransi suhu tinggi pada fase pengisian biji menunjukkan bahwa ada tiga QTL yang mengendalikan sifat tersebut (Zhu *et al.*, 2005). QTL tersebut terdeteksi pada kromosom 1, 4, dan 7. QTL dalam kromosom 4 menunjukkan tidak ada interaksi dengan lingkungan dan efek epistatik, menunjukkan ekspresistabil untuk lingkungan yang berbeda dan latar belakang genetiknya. QTL pada kromosom 1 dan 7, disisi lain, memiliki interaksi GxE yang signifikan. Selain itu, delapan pasang QTL dengan efek epistatik juga terdeteksi.

Pemuliaan Konvensional.

Metode pemuliaan konvensional untuk toleransi terhadap suhu tinggi terdiri atas seleksi pedigree dan seleksi bulk berdasarkan penanda morfologi seperti persentase fertilitas spikelet. Pendekatan ini telah berhasil digunakan dalam pemuliaan untuk toleransi suhu tinggi pada tanaman lain (Hall, 1992) sedangkan program pemuliaan IRRI berfokus pada sifat-sifat lain dari toleransi suhu tinggi. Strategi *shuttle-breeding* telah berhasil digunakan dalam mengembangkan varietas padi sawah tada hujan di India Timur, yang juga bisa memfasilitasi pertukaran bahan genetik dari berbagai sumber untuk pemuliaan (Mallik *et al.*, 2002). Program seperti ini dirancang untuk memvalidasi penampilan galur-galur terpilih di lapang pada daerah target dan lingkungan optimum secara bergantian, untuk menghasilkan varietas toleran suhu tinggi yang stabil. Dalam skrining dilapang, efek gangguan dari kelembaban relatif terhadap kehampaan spikelet yang diinduksi cekaman suhu tinggi juga perlu diperhitungkan (Weerakoon *et al.*, 2008). Selain itu,

diperlukan penggabungan antara tujuan pemuliaan untuk toleransi suhu tinggi dengan tujuan pemuliaan ideotipe seperti halnya program pemuliaan antar sub specific heterosis untuk meningkatkan potensi hasil (Peng *et al.*, 2008) dapat diadopsi sebagai strategi untuk meningkatkan produktivitas padi yang menembus batas atas dari hasil tanaman, bahkan dibawah berbagai skenario perubahan iklim.

Sering kali tidak bisa dijamin bahwa cekaman suhu tinggi dapat dipastikan terjadi di lapangan. Oleh karena itu, toleransi terhadap suhu tinggi diregulasi sesuai perkembangan tanaman, fenomena spesifik pada stadia tanaman, di mana toleransi pada stadia tertentu mungkin tidak berkorelasi dengan toleransi pada stadia perkembangan yang lain. Stadia individu selama ontogeni tanaman harus dievaluasi terpisah untuk prakiraan toleransi, dan untuk identifikasi, karakterisasi, dan manipulasi genetik dari komponen toleransi. Selain itu, spesies tanaman mungkin menunjukkan sensitivitas yang berbeda terhadap cekaman suhu pada stadia perkembangan yang berbeda. Seperti pada tomat, walaupun tanaman tomat sensitif pada suhu tinggi selama ontogeni, pembungaan, dan pembentukan buah (*fruit set*) adalah stadia yang paling sensitif. Pembentukan buah mulai dipengaruhi pada suhu siang/malam hari di atas 26/20°C dan sangat dihambat oleh suhu di atas 35/26°C (Wahid *et al.*, 2007). Metode seleksi yang umum untuk toleransi suhu tinggi adalah menanam tanaman pada lingkungan target dan mengidentifikasi potensi hasil setiap individu/galur. Namun demikian, pada kondisi tersebut keberadaan cekaman lain seperti serangan serangga dan lainnya menyebabkan proses seleksi sangat sulit, terutama selama stadia reproduktif. Pendekatan lain adalah menentukan kriteria seleksi selama stadia awal perkembangan tanaman yang berkorelasi dengan toleransi suhu tinggi pada stadia reproduktif. Namun sejauh ini belum ada kriteria yang dapat diandalkan (Wahid *et al.*, 2007).

Pendekatan yang lebih efektif telah dikembangkan di rumah kaca untuk penyaringan tanaman yang toleran terhadap cekaman suhu tinggi. Secara teori persemaian tersebut dapat digunakan untuk penyaringan selama siklus hidup tanaman. Keuntungan dengan penggunaan rumah kaca ialah suhu target dapat dipertahankan selama percobaan berlangsung. Kerugiannya ialah dengan terbatasnya luasan rumah kaca, tidak bisa digunakan untuk seleksi dengan populasi besar. Tantangan terbesar pemuliaan tanaman konvensional adalah upaya identifikasi metode penyaringan yang dapat diandalkan dan kriteria seleksi yang efektif untuk memfasilitasi pencarian tanaman yang toleran terhadap suhu tinggi. Menurut Wahid *et al.* (2007) penggunaan *heat tolerant index* (HTI) yang didasarkan pada pemulihian pertumbuhan (*growth recovery*) setelah penderaan pada suhu tinggi telah menunjukkan efektivitas yang baik untuk sorgum. HTI adalah rasio pertumbuhan panjang koleoptil setelah penderaan terbatas pada suhu tinggi (contoh: 50°C) terhadap pertambahan panjang koleoptil pada kondisi normal. Pendekatan ini memungkinkan pencatatan secara cepat dan dapat diulang, yang memungkinkan penggunaannya untuk penyaringan dalam jumlah besar dalam waktu yang relatif singkat. Walaupun metode ini sangat murah, mudah dilakukan, tetapi korelasi dengan penampilan di lapangan dan keefektifan pada berbagai spesies belum diketahui secara pasti. Pada tomat, diperoleh korelasi yang positif antara penampilan pada stadia pembentukan biji dan hasil di lapangan pada kondisi suhu tinggi. Oleh karena itu, evaluasi plasma nutfah untuk mengidentifikasi sumber untuk toleransi suhu tinggi secara reguler dilakukan melalui penyaringan untuk pembentukan buah (*fruit set*) pada kondisi suhu tinggi. Walaupun pembentukan buah pada suhu tinggi tidak bisa dihubungkan hanya dengan satu faktor, penurunan jumlah polen yang berkecambah dan/atau pertumbuhan batang polen merupakan faktor yang sering digunakan. Viabilitas polen telah digunakan sebagai kriteria seleksi tambahan untuk toleransi suhu tinggi.

Produksi dari benih yang viabel sering kali direduksi oleh suhu tinggi, maka pembentukan biji yang tinggi merupakan indikasi toleran suhu tinggi (Wahid *et al* 2007).

Fase membukanya anter adalah proses paling kritis selama antesis pada kondisi suhu tinggi. Menurut Wassmann *et al.* (2009) suhu tinggi menyebabkan peningkatan defisit tekanan udara yang meningkatkan evaporasi dari anter, sehingga menyebabkan kehilangan kelembaban yang dibutuhkan untuk pengembangan serbuk sari. Perbedaan karakteristik anter antara genotipe toleran dan peka suhu tinggi (Wassmann *et al.* 2009) dijelaskan pada **Tabel 3**. Keberadaan hormon endogen diduga memiliki peran yang penting dalam menentukan fertilitas bunga jantan. Penurunan signifikan IAA, GA₃, prolina bebas dan protein terlarut serta kenaikan yang tajam ABA memiliki keterkaitan dengan fertilitas polen. Rendahnya IAA dan GA₃ serta tingginya ABA akibat cekaman suhu tinggi akan menyebabkan aborsi polen, yang menyebabkan sterilitas bunga jantan. Secara simultan, turunnya prolina bebas dan protein terlarut pada kultivar yang sensitif akan menghasilkan floret yang steril. Lebih lanjut, akumulasi osmolit yang kompatibel seperti gula, gula alkohol, dan glisin betain memegang peranan penting dalam adaptasi terhadap suhu ekstrim melalui penyanggaan potensial redoks pada sel.

Tabel 16. Perbedaan Karakteristik Anter Antara Genotipe Toleran dan Peka Suhu Tinggi.

Karakter anter tanaman padi toleran suhu tinggi	Karakter anter tanaman padi peka suhu tinggi
Anter panjang	Anter relatif lebih pendek
Dua lapis sel (sel tapetum dan endothecium terdegradasi) locule terpisah dari lacuna, yang memudahkan pembukaan/pecahnya anter	Tiga lapis sel (sel tapetum dan endothecium terdegradasi, dan sel parenkima), locule terpisah dari lacuna, menghambat pembukaan/pecahnya anter
Anter mekar/pecah dengan mudah dan homogen	Abnormal atau tidak terdapat anter yang membuka

Anter mekar di antara spikelet dan filamen pendek, sehingga mampu menumpahkan lebih banyak polen pada stigma	Anter tidak mekar atau mekar di luar spikelet pada filamen yang kendur, sehingga lebih sedikit menumpahkan polen pada stigma
<i>Pore bagian basal</i> lebih panjang	Lebih pendek atau tidak ada <i>pore bagian basal</i> yang mekar

(Wassmann *et al.* 2009)

Beberapa karakter lain yang sangat dipengaruhi oleh suhu tinggi, umumnya tergolong proses non-reproduktif, meliputi efisiensi fotosintesis, translokasi asimilat, resistensi mesofil, atau disorganisasi membran sel. Beberapa hal penting terkait pemulian konvensional untuk menciptakan varietas tanaman toleran suhu tinggi adalah sebagai berikut (Wahid *et al.*, 2007):

- Identifikasi sumber daya genetik yang memiliki atribut toleransi terhadap suhu tinggi. Pada tomat dan kedelai variasi genetik sangat sempit, sehingga memerlukan identifikasi dan pencarian sumber genetik dan penggunaan kerabat liarnya.
- Ketika menyaring genotipe yang berbeda (terutama aksesi spesies liar) perbedaan antara toleransi terhadap suhu tinggi dan potensi tumbuh harus dapat dibedakan.
- Ketika merakit tanaman toleran suhu tinggi, diperlukan galur/kultivar yang berpenampilan bagus pada dua kondisi stres dan normal. Pada beberapa spesies, toleransi terhadap suhu tinggi sering dihubungkan dengan karakter yang tidak disukai seperti buah yang kecil pada tomat.

Untuk mempercepat progres pemuliaan, beberapa hal harus dapat ditentukan, yaitu (Wahid *et al.*, 2007): (1) pengembangan prosedur skrining yang akurat, (2) identifikasi dan karakterisasi sumber daya genetik yang memiliki toleransi tinggi, (3) penentuan dasar genetik toleransi suhu tinggi pada setiap stadia perkembangan, dan (4) pembentukan dan seleksi populasi genetik yang besar atau transfer gen toleran suhu tinggi ke dalam kultivar komersial melalui silang balik

Pemuliaan Padi untuk Wilayah Bersuhu Tinggi

Dua cara pemuliaan tanaman dapat dilakukan untuk menanggulangi cekaman suhu tinggi akibat perubahan iklim, yaitu: (i) pemuliaan tanaman yang mempunyai sifat toleran terhadap suhu tinggi, atau (ii) merakit varietas yang mampu *escape* dari suhu tinggi, baik melalui umur yang genjah atau pembungaan yang lebih awal di pagi hari. Pada metode yang terakhir, pendekatan yang paling menjanjikan adalah menggeser waktu berbunga dari pagi hari kira-kira pk 10.00 menjadi sore hari atau awal pagi sekali ketika suhu diprediksi jauh lebih rendah.

Wahid *et al.* (2007) menyatakan bahwa untuk keberhasilan perbaikan produktivitas pertanian padakondisi cekaman lingkungan ditekankan pada pengembangan kultivar yang mampu mentoleransi cekaman lingkungan akibat perubahan iklim dan berproduksi tinggi, serta bernilai ekonomi. Oleh karena itu gen atau QTL yang bertanggungjawab terhadap toleransi suhu tinggi atau mampu melakukan penghindaran (*avoidance*) harus diidentifikasi dan dikombinasikan dengan karakter hasil tinggi, tahan terhadap cekaman ganda, kualitas biji bagus, dan lainnya.

Kriteria Seleksi untuk Toleransi dan Penghindaran Suhu Tinggi pada Padi.

Teknik skrining dan prosedur yang tepat pada kondisi lingkungan target yang benar sangat penting untuk menentukan genotipe yang benar untuk dipergunakan dalam studi genetik atau untuk perbaikan tanaman melalui program pemuliaan. Pilihan lingkungan skrining di lapangan, misalnya, dapat mempengaruhi kehandalan seleksi terhadap karakter morfologi dan agronomi (Hall, 1992). Beberapa parameter telah diusulkan sebagai kriteria seleksi dalam pemuliaan untuk toleransi suhu tinggi. Beberapa kriteria seleksi penting yang digunakan untuk toleransi suhu tinggi dan *escape* adalah (Wassmann *et al.*, 2009):

- a. Kemampuan berbunga pada dini hari untuk meloloskan diri dari kerusakan suhu tinggi dan skrining untuk galur-galur toleran suhu tinggi dapat dilakukan pada 38°C, sementara 35°C dapat digunakan untuk menghilangkan material genetik yang peka terhadap suhu tinggi (Satake dan Yoshida, 1978)
- b. Jumlah polen yang ditumpahkan tinggi (dinyatakan dengan jumlah polen pada stigma, (Mackill dan Coffman 1983, Prasad *et al.* 2006)
- c. Produksi serbuk sari pada anter dan kesuburan spikelet yang tinggi untuk toleransi suhu tinggi selama fase reproduktif (Prasad *et al.*, 2006).
- d. Indeks kepekaan bobot biji terhadap suhu tinggi [GWHSI = (bobot biji pada suhu optimum – bobot biji pada suhu tinggi) / bobot biji pada suhu optimum x 100] untuk mengevaluasi toleransi terhadap suhu tinggi (Zhu *et al.*, 2005)
- e. Enam jam dalam paparan suhu tinggi termasuk periode puncak antesis untuk hari pembungaan bunga untuk mengurangi kemungkinan meloloskan diri (Jagadish *et al.* 2008)
- f. Panjang dari bagian basal yang membuka pada anther (*dehiscencebasal*) dapat digunakan sebagai penanda morfologi untuk memilih genotipe toleran suhu tinggi (Matsui *et al.*, 2005; 2007). Ditunjukkan bahwa panjang bagian basal anter yang membuka berkorelasi tinggi dengan viabilitas penyerbukan dalam kondisi suhu tinggi.

Pendekatan Molekuler dan Bioteknologi

Wahid *et al.* (2007) menyatakan bahwa studi genetik terkini telah menunjukkan bahwa toleransi terhadap suhu tinggi merupakan sifat yang dikontrol oleh banyak gen (*poligenic trait*).

Artinya, komponen toleransi yang berbeda, yang dikontrol oleh sekelompok gen berbeda, merupakan sesuatu yang kritikal untuk toleransi stadia yang berbeda pada perkembangan tanaman atau juga pada jaringan yang berbeda. Oleh karena itu, penggunaan sumber daya genetik dengan derajat toleransi yang berbeda, analisis korelasi dan ko-segregasi, teknik biologi molekuler, serta marka molekuler untuk mengidentifikasi toleransi QTL yang merupakan pendekatan yang lebih menjanjikan untuk mengungkap dasar genetik toleransi terhadap suhu tinggi. Akhir-akhir ini, bioteknologi telah berkontribusi secara signifikan untuk memahami dasar genetik toleransi terhadap suhu tinggi. Sebagai contoh, beberapa gen diketahui bertanggung jawab terhadap induksi sintesis HSPs yang telah diidentifikasi dan diisolasi pada beberapa spesies tanaman seperti tomat dan jagung. Telah diketahui bahwa induksi beberapa gen yang terinduksi oleh panas dihubungkan pada *elemen heat shock* (HSEs) yang *conserved* yang berlokasi pada *TATA box proximal 5 flanking regions* dari gen-gen *heat shock*.

Dua pendekatan bioteknologi yang sudah umum dilakukan untuk memperbaiki toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik meliputi MAS (*marker-assisted selection*) dan transformasi genetik. Penggunaan pendekatan ini memerlukan identifikasi marka genetik yang dihubungkan dengan beberapa gen atau QTL yang memengaruhi toleransi keseluruhan tanaman atau komponen yang memberikan kontribusi. Riset awal manipulasi molekuler untuk memperbaiki toleransi tanaman terhadap suhu tinggi difokuskan kepada produksi enzim yang mendetoksifikasi ROS, seperti SOD. Diketahui bahwa ROS diinduksi oleh hampir semua tipe cekaman. Teknik transformasi untuk perbaikan toleransi tanaman terhadap cekaman suhu tinggi masih merupakan embrio dan keberhasilan yang diperoleh sampai saat ini merupakan pendekatan awal. Perkembangan dalam teknologi marka dan transformasi genetik untuk ke depannya diharapkan mampu

dapat berinteraksi secara aditif dan sinergi untuk meningkatkan toleransi terhadap cekaman abiotik (Wahid *et al.*, 2007).

Perbaikan Toleransi terhadap Suhu Tinggi dengan Pendekatan Lain

Selain dengan pendekatan yang menggunakan pemuliaan tanaman (*genotypic adaptation*), beberapa upaya melalui pendekatan teknik budidaya telah dilakukan untuk meningkatkan aklimatisasi (*phenotypic adaptation*) tanaman terhadap cekaman lingkungan. Teknik pra-kondisi tanaman terhadap cekaman suhu tinggi dan aplikasi osmoprotektan atau ZPT secara *exogenous* pada benih dan seluruh tanaman. Hasil dari aplikasi tersebut cukup menjanjikan dan penelitian lanjut ke depan sangat diperlukan. Walaupun pendekatan dengan pemuliaan konvensional telah menunjukkan kemajuan yang berarti, rekayasa genetik dengan teknik molekuler juga merupakan pendekatan yang perlu dipertimbangkan, yaitu melalui pengumpulan informasi molekuler terhadap mekanisme toleransi dan faktor-faktor yang juga berkontribusi terhadap adaptasi suhu tinggi. Walaupun mekanisme fisiologi toleransi suhu tinggi relatif telah dapat dipahami, riset lanjutan untuk fisiologi partisi asimilat dari *source* ke *sink*, fenotipik dari fleksibilitas tanaman yang mendukung toleransi suhu tinggi, serta faktor-faktor yang mengatur respons tanaman terhadap suhu tinggi masih perlu diteliti. Lebih lanjut, penggunaan pendekatan genomik, proteomik, dan transkriptionik untuk pemahaman lebih baik terhadap dasar molekuler respons tanaman sangat penting untuk terus dikembangkan. Pada kebanyakan cekaman lingkungan, bagian daun merupakan bagian yang pertama terkena penderaan. Namun demikian, pemahaman terhadap respons akar terhadap cekaman suhu tinggi, seperti keterlibatan akar dalam sinyal pucuk-akar merupakan hal yang juga penting untuk dieksplorasi. Pengetahuan molekuler tentang

respons dan mekanisme toleransi suhu tinggi akan membuka jalan untuk merakit tanaman yang dapat mentoleransi suhu tinggi yang akan memberikan hasil ekonomi dalam kondisi cekaman suhu tinggi (Wahid *et al.*, 2007).

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Kekeringan

Strategi penelitian yang terintegrasi untuk perbaikan ketahanan kekeringan dalam skenario perubahan iklim

Kebutuhan karakterisasi yang tepat pada wilayah rawan kekeringan di Asia Selatan dan Asia Tenggara dan Afrika Sub-Sahara harus mempertimbangkan dinamika dan risiko perubahan iklim. Dalam skenario kedepan untuk perubahan iklim, model simulasi dapat berperan baik dalam karakterisasi serta dalam meningkatkan presisi dan integrasi melihat fenotip tanaman untuk perubahan iklim. Peningkatan hasil panen dan produktivitas penggunaan air memerlukan optimalisasi proses fisiologi yang terlibat pada awal fase kritis dalam respon tanaman terhadap kekeringan, yaitu terkait dengan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*, WUE) dan mekanisme penghindaran terhadap cekaman dehidrasi (Serraj *et al.* 2009). Secara keseluruhan, kompleksitas sindrom dari cekaman kekeringan hanya dapat diatasi dengan pendekatan holistik yang mengintegrasikan pemuliaan tanaman, fisiologi sifat-sifat resistensi, genetika molekuler bersama-sama dengan praktek agronomi yang mengarah pada konservasi dan pemanfaatan air tanah yang lebih baik, serta memilih genotipe tanaman yang cocok dengan lingkungan. Beberapa langkah penting yang harus terlibat dalam pendekatan multidisiplin ini dijelaskan sebagai berikut:

- a. Menentukan lingkungan target wilayah rawan kekeringan, dan mengidentifikasi tipe kekeringan dan varietas tanaman

yang disukai petani, terutama untuk tanaman padi. Tentukan sifat fenologi dan morfologi yang berkontribusi secara signifikan dalam adaptasi terhadap cekaman kekeringan. Aspek penelitian penting yang diperlukan adalah menentukan interaksi antara kekeringan, CO₂ dan suhu

- b. Menggunakan simulasi pemodelan dan analisis sistem untuk mengevaluasi respon tanaman terhadap pola kekeringan utama dalam skenario variabel CO₂ dan suhu, dan menentukan nilai dari kandidat sifat fisiologis dalam lingkungan target
- c. Mengembangkan dan memperbaiki metode skrining yang tepat untuk mengkarakterisasi stok genetik yang bisa berfungsi sebagai donor tetua untuk karakter yang diperlukan
- d. Mengidentifikasi stok genetik untuk berbagai sifat-sifat yang masih putatif, konstitutif dan yang diinduksi pada plasma nutfah, serta membangun korelasi genetik antara sifat-sifat yang diinginkan dengan tingkat adaptasi terhadap cekaman kekeringan yang ditargetkan
- e. Memanfaatkan genomik fungsional, transgenik dan pendekatan *reverse genetics* untuk memahami kontrol genetik dari sifat-sifat yang relevan
- f. Menggunakan pemetaan populasi dan atau hubungan pemetaan *disequilibrium* untuk mengidentifikasi penanda genetik dan QTLs untuk sifat yang sangat penting dalam ketahanan terhadap stres lingkungan
- g. Menggabungkan beberapa komponen dari sifat-sifat fisiologis yang relevan kedalam berbagai latar belakang genetik agronomis untuk menyediakan berbagai bahan dengan sifat-sifat tertentu yang diinginkan untuk meningkatkan adaptasi terhadap kekeringan dan cekaman abiotik pada varietas lokal yang adaptif.

Perbaikan genetik resistensi cekaman kekeringan

Pada tanaman padi, meskipun kekeringan mempengaruhi semua tahap pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi, cekaman air selama tahap pembungaan akan menekan pembentukan biji dengan derajat lebih berat dibanding cekaman pada tahap reproduksi lainnya (Boonjung and Fukai, 1996). Oleh karena itu, skrining untuk toleransi kekeringan pada fase mendekati pembungaan dianggap lebih efektif dalam pemuliaan untuk peningkatan ketahanan terhadap kekeringan. Pengaruh kekeringan yang serius terhadap penurunan hasil biji sebagian besar disebabkan oleh penurunan fertilitas spikelet dan eksersi malai. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa perkembangan reproduktif dari meiosis dalam sel spora induk menuju fertilisasi dan awal pembentukan biji sangat sensitif terhadap berbagai cekaman abiotik, termasuk kekeringan. Cekaman tersebut menyebabkan berbagai gangguan struktural dan fungsional dalam organ reproduksi, yang menyebabkan kegagalan pembuahan atau aborsi dini biji. Kekeringan dapat menghambat perkembangan organ reproduksi, seperti ovarium dan serbuk sari pada tahap meiosis (Saini 1997; Saini *et al.*, 1983.); tetapi juga dapat menghambat proses membukanya anter, tumpahnya serbuk sari pada stigma, perkecambahan serbuk sari, dan fertilisasi (Ekanayake *et al.*, 1990; Satake dan Yoshida, 1978).

Penghambatan akibat kekeringan terhadap eksersi malai telah diidentifikasi sebagai konsekuensi dari penurunan perpanjangan batang malai (*peduncle*), yang biasanya dapat mencapai 70-75% kemandulan spikelet dalam kondisi defisit air (O'Toole dan Namuco, 1983). Cekaman kekeringan memperlambat perpanjangan batang malai, dan pemberian air kembali (re-watering) hanya dapat mengembalikan sebagian perpanjangan tersebut. Studi terbaru di IRRI menemukan bahwa kekeringan secara signifikan menunda perpanjangan batang, serta menahan sebagian malai dalam selubung daun bendera, yang disebabkan

adanya penekanan terhadap ekspresi gen invertase pada dinding sel (Ji *et al.*; 2005). Bulir yang tertinggal di dalam selubung daun biasanya steril, menyebabkan penurunan hasil biji secara signifikan, menunjukkan bahwa perpanjangan peduncle diduga memainkan peran yang penting.

Studi pada mutan padi menunjukkan bahwa penyebab kemandulan spikelet bisa disebabkan oleh dua hal: (a) adanya penghambatan akumulasi pati dalam serbuk sari, dan (b) kegagalan membukanya anter dan atau gagalnya sinkronisasi dengan antesis bunga mekar karena degradasi septum dan kerusakan stomium (Zhu *et al.*, 2004). Jika stres kekeringan terjadi selama proses ini, organ reproduksi akan normal dan rusak dan kemudian *grainset* akan steril.

Keberhasilan dalam pemuliaan untuk meningkatkan ketahanan kekeringan pada dasarnya tergantung pada pemilihan tetua, kriteria seleksi dan kehandalan pengelolaan protokol seleksi. Program pemuliaan yang sukses harus memiliki tujuan yang jelas, yaitu untuk menghasilkan kultivar yang unggul varietas petani dalam TPE (*target population environment*) tertentu. Membandingkan beberapa protokol skrining terhadap kekeringan diareal tada hujan atau disawah dataran rendah yang dikeringkan. Lafitte dan Courtois (2002) menemukan bahwa perlakuan cekaman secara intermiten, dengan menahan irigasi selama periode berbunga dan fase pengisian biji, umumnya dapat diandalkan.

Temuan penelitian terbaru di IRRI telah menunjukkan bahwa seleksi langsung terhadap hasil biji dalam kondisi tercekam kekeringan cukup bisa diandalkan (Kumar *et al.* 2008). Karena hasil di bawah cekaman kekeringan adalah fungsi dari potensi hasil, *escape*, dan respon kekeringan, maka penggunaan Indeks Ketahanan Kekeringan (DRI, *drought resistance index*) dapat membantu untuk membedakan ketahanan kekeringan dari *escape* dan potensi hasil (Ouk *et al.*, 2006).

Sementara pemuliaan tanaman untuk daerah lahan kering dan padi aerobik saat ini menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam mengembangkan kultivar padi baru untuk lingkungan yang sedikit air, kemajuan pemuliaan tanaman untuk dataran rendah tada hujan relatif lambat. Sebagian besar kultivar yang ditanam di dataran rendah tada hujan rawan kekeringan awalnya dikembangkan untuk kondisi irigasi dan tidak pernah diseleksi untuk toleransi kekeringan (Kumar *et al.*, 2008). Bentuk adaptasi *escape* telah dieksplorasi di daerah rawan kekeringan di India timur dan Bangladesh, melalui varietas genjah, terutama dari kelompok plasma nutfah *aus*. Tapi kebanyakan dari varietas tersebut belum tentu tahan kekeringan. Kemajuan yang lambat dalam perbaikan genetik hasil gabah untuk sawah tada hujan dataran rendah terkait dengan dua hal, yaitu: adanya genotype x sistem lingkungan yang kompleks dan kekurangan sumber daya genetik yang tersedia untuk program pemuliaan.

Varietas tanaman pangan yang toleran kekeringan

Berdasarkan beberapa informasi dari Pusat Penelitian Tanaman Pangan Balitbang Kementan selama ini telah dilepas beberapa varietas padi toleran kekeringan. Telah dilepas varietas unggulpadi toleran kekeringan Inpago 5 yang mampu berproduksi 6 t/ha. Keunggulan lainnya dari varietas ini adalah tahan terhadap beberapa ras penyakit blas dan agak toleran keracunan Al. Inpari 10 adalah varietas unggul baru padi sawah yang toleran terhadap kekeringan dengan potensi hasil 7 t/ha, tahan rebah dan agak tahan terhadap hama wereng batang coklat (WBC) dan penyakit hawar daun bakteri (HDB) strain III. Selain itu Badan Litbang Pertanian telah melepas empat varietas unggul padi berumur sangat genjah dengan nama Inpari 1, Inpari 11, Inpari 12, dan Inpari 13.

Jagung toleran kekeringan adalah varietas Bima 4 untuk jenis hibrida dan Lamuru untuk jenis komposit, masing-masing dengan potensi hasil 11,7t dan 7,6 t/ha. Kedua varietas ini telah dikembangkan di daerah kering beriklim kering, antara lain di Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Tengah, dan Sulawesi Selatan. Varietas kedelai toleran kekeringan dan umur genjah telah dilepas dengannama Argomulyo dan Grobogan, masing-masing dengan umur 82 dan 76hari, potensi hasil 3,1 t dan 3,4 t/ha dengan rata-rata 2,0 t dan 2,8 t/ha. Pengujian di berbagai lokasi menunjukkan galur SHRW-60 dan Aochi/W-60 toleran kekeringan, umur 73 hari, potensi hasil 3,3 t/ha dengan rata-rata 2,5 t/ha.

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Salinitas

Berbagai strategi pemuliaan harus dikembangkan untuk membuat tanaman mampu beradaptasi pada lingkungan salin. Dua komponen penting yang harus tersedia dalam usaha perbaikan toleransi salin, pertama harus tersedia keragaman dalam populasi pemuliaan dan kedua keragaman tersebut harus dikendalikan secara genetik (Khan *et al.*, 2001). Keragaman toleransi salin antarspesies atau di dalam spesies, bahkan antarvarietas telah berhasil diidentifikasi pada berbagai tanaman. Sebagai contoh pada tanaman tomat, padi, dan *barley* (Sopandie 1990; Sopandie *et al.*, 1993), kedelai, *triticale*, *oat*, *millet*, sorgum (Khan *et al.*, 2001). Pemahaman mengenai mekanisme fisiologi toleransi stres salin sangat penting untuk efektivitas dan efisiensi seleksi. Misalnya untuk padi tahan salin, Flowers dan Yeo (1995) melakukan *pyramiding gen* tahan menggunakan marka fisiologi. Larcher (1995) menggunakan mekanisme fisiologi non spesifik seperti akumulasi solute organik seperti asam amino bebas, prolin, dan karbohidrat pada kondisi tercekam. Prolin dan glycine-betain dapat mengurangi pengaruh keracunan NaCl

terhadap destabilisasi helikal pada proses replikasi DNA (Rajendrakumar *et al.*, 1997). Ashraf *et al.*, (2008) berhasil mengembangkan marka biokimia sebagai kriteria seleksi toleransi salin seperti gula terlarut, protein terlarut, asam amino, dan amida (alanine, arginine, glycine, serine, leucine, valine, proline, dan beberapa asam amino nonprotein, citrulline dan ornithine, amida seperti glutamine dan asparagine), poliamin, piliol, anti-oksidan, ATPase.

Selain itu, Analisis molekuler genom pada tingkat DNA merupakan salah satu alat untuk transfer dan kombinasi gen-gen penting (*desirable genes*) yang mengendalikan sifat toleransi salin (Khan *et al.* 2001). MAS (*Marker-assisted selection*) menggunakan analisis pemetaan RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*), RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*), dan QTL (*Quantitative Trait Loci*) telah berhasil digunakan untuk menggabungkan beberapa gen major (*gene pyramiding*) untuk toleransi salinitas. Haiyuan *et al.*, (1998) menggunakan teknik RAPD mendapatkan satu gen tunggal major mengendalikan toleransi salinitas pada tanaman padi.

Toleransi terhadap salinitas merupakan mekanisme yang sangat kompleks. Marka molekuler terkait dengan toleransi garam cukup banyak yang telah ditemukan, namun marka-marka tersebut memiliki efek yang kecil. QTL yang memiliki efek relatif kuat terhadap toleransi tanaman padi pada kondisi garam tinggi adalah QTL *Saltol* yang berada pada kromosom 1. Menurut Bonilla *et al.* (2002), QTL tersebut menjelaskan 43% variasi rasio Na^+/K^+ di batang padi pada stadia bibit. QTL tersebut ditemukan dalam populasi *Recombinant Inbred Lines* (RIL) hasil persilangan varietas Pokkali (toleran) dengan IR 29 (peka). Menurut Ismail *et al.* (2007) bahwa *fine mapping* telah berhasil hingga resolusi 1,2 Mb dan penggunaan MAS untuk mengintrogresikan QTL tersebut telah berhasil diaplikasikan pada beberapa varietas padi yang umum digunakan petani.

Terdapat lanras (*landraces*) yang sangat toleran garam tinggi dan bisa menjadi kandidat untuk daerah dengan suhu tinggi dan kadar garam tinggi, namun produktivitasnya rendah. Meskipun genotipe toleran salinitas cukup banyak, namun toleransinya masih harus ditingkatkan. Hal ini dapat dicapai dengan mekanisme *pyramiding* komponen-komponen untuk toleransi seperti pengembangan sifat *excluder* dengan toleransi jaringan yang lebih baik. Misalnya, masuknya Na^+ dalam sitosol dibatasi atau diminimalkan melalui sel-sel akar, itu akan mengurangi transportasi ion beracun ke daun. Toleransi jaringan mencerminkan kapasitas genotipe untuk menahan garam dan mempertahankan aktivitas fotosintesis yang tinggi. Mengembangkan genotipe dengan transporter sodium yang berbeda, yang bisa memberikan homeostasis yang diperlukan selama stres garam akan membuka peluang merekayasa tanaman dengan toleransi garam yang lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan dengan meningkatkan H^+ -*pumping* untuk memberikan kekuatan pendorong tambahan agar Na^+ bisa diakumulasi di vakuola melalui Na^+/H^+ *antiporter*. Hal ini telah dibuktikan pada tanaman tomat transgenik dengan mengekspresikan *AtNHX1*, *A.thaliana**vacuolar* Na^+/H^+ *antiporter* (Zhang *et al.*, 2005.) Dalam tanaman padi menggunakan *OsNHX1* homolog (Fukuda *et al.*, 2004).

Pengembangan varietas toleran salinitas belum banyak dilakukan. Varietas unggul padi Banyuasin toleran terhadap lahan berkadar garam tinggi, dan telah berkembang di beberapa daerah pasang surut. Varietas Lambur yang dilepas berikutnya untuk lahan salin juga memiliki ketahanan terhadap blas dan toleran terhadap keracunan Fe dan Al.

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Rendaman

Pemuliaan Molekuler Tanaman Padi Toleran Cekaman Genangan. *Sub1* adalah QTL sangat kuat yang menunjukkan efek yang besar pada latar belakang genetik dan lingkungan yang beragam. Hal ini menunjukkan bahwa *Sub1* bertindak jauh ke hulu pada jalur respon stres dan berinteraksi dengan *Sub1* sangat kuat dalam semua varietas target. Xu dan Mackill (1996) menjelaskan bahwa *Sub1* merupakan major QTL pengendali karakter toleran genangan, yang memberikan kontribusi sekitar 70% terhadap fenotipe toleran genangan. QTL *Sub1* berada pada kromosom 9 pada padi varietas FR13 yang diketahui memiliki toleransi terhadap geangan selama 14 hari. Diketahui terdapat 3 gen pengendali toleran genangan pada lokus *Sub1*, yaitu *Sub1A*, *Sub1B* dan *Sub1C*. Alel *Sub1A-1* diketahui sebagai alel major yang berperan terhadap toleran genangan tersebut. Telah diketahui bahwa aplikasi teknik MAS terhadap QTL *Sub1* telah berhasil dilakukan (Xu *et al.* 2006). Penelitian tentang penggunaan marka molekuler terus berlangsung. Xu *et al.* (2004) melaporkan bahwa marka SSR RM219 dan RM264A dapat digunakan sebagai penanda karakter toleransi terhadap genangan, dimana keduanya berada pada 3,4 dan 0,7 cM dari QTL *Sub1*. Telah dilaporkan bahwa RM219 dapat digunakan sebagai marka seleksi untuk padi *Indika*, dan RM464A digunakan untuk *Japonika*.

Badan Litbang Pertanian melalui Balai Besar Penelitian Tanaman Padi bekerjasama dengan IRRI telah merakit varietas dengan memasukkan gen *Sub1* (*submergence 1*) ke dalam varietas padi yang sudah berkembang di Indonesia. Seperti diketahui bahwa Gen *Sub1* adalah *ethylene-response-factor*, gen yang memberi sifat toleran rendaman melalui pengurangan sensitivitas tanaman padi terhadap etilen. Mekanisme terkait hal ini telah diuraikan di depan. Introduksi gen *Sub1* memungkinkan tanaman bertahan dalam kondisi tergenang selama 10-14 hari. Dalam perkembangannya, galur *Swarna-Sub1* (IR05F102) dilepas dengan nama *Inpara 4* dan galur *IR64-Sub1* (IR07F102) dilepas dengan nama *Inpara 5*, keduanya toleran terhadap genangan. Gen *Sub1*

juga telah disisipkan ke dalam varietas Ciherang untuk ditingkatkan toleransinya terhadap genangan, dimana saat ini sudah dalam tahap pengujian daya hasil. Pada tanaman jagung telah dilakukan penyaringan terhadap beberapa galur, dimana saat ini terdapat lima galur yang toleran terhadap genangan, yaitu GM 226, GM 228, GM 291, GM 327, dan GM 338, yang memiliki potensi hasil 8-9 t/ha. Varietas kedelai yang toleran terhadap genangan diantarnya Grobogan dan Kawi. Pengembangan varietas yang lebih banyak masih sangat diperlukan untuk upaya antisipasi terjadinya perubahan iklim.

Tinjauan dan Prospek ke Depan

Salah satu faktor kunci untuk keberhasilan antisipasi perubahan iklim adalah menciptakan sinergisme antara teknologi tanaman yang tepat, cepat dan akurat dengan *tools* klimatologi. Meskipun perubahan iklim merupakan fenomena global, manifestasi dari perubahan iklim tersebut akan berdampak secara lokal yang juga bervariasi. Pendekatan yang lebih spesifik untuk adaptasi perubahan iklim akan bergantung pada ketersediaan dan akurasi data yang baik, yang akan menunjukkan tingkat cekaman lingkungan di suatu wilayah. IRRI telah memulai mengintegrasikan GIS yang canggih dengan pendekatan klimatologi untuk penelitian dan program penyuluhan, terutama untuk memperbaiki sistem pertanaman padi.

Suatu konsorsium perubahan iklim untuk pengembangan produksi komoditi tanaman tertentu mungkin diperlukan untuk menghimpun berbagai disiplin ilmu, yang berkaitan dengan penilaian dampak, adaptasi terhadap dampak perubahan iklim serta upaya mitigasi GRK. Dalam kaitan ini bidang ilmu fisiologi dan bidang ilmu terkait lainnya akan memiliki peran yang sangat penting, seperti diuraikan di depan, yaitu terutama untuk memberikan pemahaman dalam perbaikan tanaman. Sebagai

contoh, studi fisiologis dapat membantu memprediksi dampak perubahan iklim melalui penentuan spesies yang mana yang paling dekat dengan batas toleransi termal mereka, dimana sistem fisiologis akan menentukan batas-batas tersebut, dan bisa menjelaskan bagaimana spesies tertentu berbeda dalam kapasitas aklimatisasi untuk memodifikasi toleransi termal mereka. Karakterisasi yang tepat terhadap cekaman lingkungan di wilayah rawan terkena dampak perubahan iklim sangat diperlukan. Dalam skenario kedepan, model simulasi dapat berperan baik dalam meningkatkan presisi dan integrasi untuk melihat fenotipe tanaman akibat perubahan iklim.

Perbaikan plasma nutfah dan pengelolaan sumber daya alam sangat penting untuk mempertahankan produksi tanaman dari tekanan lingkungan akibat perubahan iklim yang sangat progresif. Selain itu perlu dipikirkan bahwa resiko perubahan iklim tidak hanya mencakup dampak langsung pada produksi tanaman, tetapi juga akan menyangkut masalah degradasi dan konservasi ekosistem untuk jangka panjang bagi tanah, air, dan keanekaragaman hayati.

Perbaikan manajemen strategi yang inovatif perlu dipercepat terutama di daerah-daerah di mana kemiskinan akan berkontribusi besar terhadap gangguan ketahanan pangan akibat dampak perubahan iklim. Dalam sistem produksi pangan kedepan, pemahaman dasar cekaman fisiologi dan agronomi untuk produksi tanaman memegang peran yang penting. Seperti telah diuraikan di depan bahwa pemahaman terhadap proses fisiologi cekaman abiotik akan memberikan dukungan yang besar terhadap perbaikan tanaman dan produksi tanaman dalam rangka adaptasi terhadap perubahan iklim. Kedepan, pengembangan tanaman yang memiliki ketahanan ganda terhadap cekaman yang diakibatkan perubahan iklim akan menjadi suatu keniscayaan. Untuk tanaman padi sangat dimungkinkan untuk dikembangkan varietas yang memiliki toleransi yang tinggi terhadap cekaman ganda salinitas dan

genangan. Bahkan perlu dipikirkan untuk mengembangkan varietas padi yang ideal. Sebagai contoh untuk lingkungan salin, varietas padi harus memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, salinitas, dan genangan, agar dicapai toleransi yang berkelanjutan pada kondisi perubahan iklim di masa depan yang diprediksi akan lebih dramatis. Tentunya hal ini bukan suatu hal yang mudah karena adaptasi terhadap multi-cekaman akan melibatkan proses-proses biologi yang kompleks dan rumit.

DAFTAR BACAAN

- Ahn YJ, Zimmerman JL. 2006. Introduction of the carrot HSP17.7 into potato (*Solanum tuberosum* L.) enhances cellular membrane stability and tuberization in vitro. *Plant Cell Environ.* 29: 95–104.
- Ashraf MJ, HR Athar, PJC Harris, TR Kwon. 2008. Some prospective strategies for improving crop salt tolerance. *Adv.Agron.* 97:45–110.
- Bailey-Serres J, Voesenek L. 2008. Flooding stress: Acclimations and genetic diversity. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 313–339.
- Blum A. 1997. Crop responses to drought and interpretation of adaptation. In Belhassen (ed). *Drought Tolerance in Higher Plants. Genetical, physiological and molecular biology analysis.* Kluwer Academic Publishers. 104p.
- Bohnert HJ, Gong Q, Li P, Ma S. 2006. Unraveling abiotic stress tolerance mechanisms-getting genomics going. *Curr. Opin. Plant Biol.* 9: 180–188.
- Bonilla PS, Dvorak J, Mackill D, Deal K, Gregorio G. 2002. RFLP and SSLP mapping of salinity tolerance genes in chromosome 1 of rice (*Oryza sativa* L.) using recombinant inbred lines. *Philipp Agric Sci* 85:64–74.
- Boonjung H, Fukai S. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions.2. Phenology, biomass production and yield. *Field Crops Res.* 48:47–55.

- Bowen J, Michael L-Y, Plummer KIM, Ferguson IAN. 2002. The heat shock response is involved in thermo-tolerance in suspension-cultured apple fruit cells. *J. Plant Physiol.* 159:599–606.
- Chandler PM, Robertson M. 1994. Gene expression regulated by abscisic acid and its relation to stress tolerance. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 45:113–141.
- Chinnusamy V, Jagendorf A, Zhu JK. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Sci.* 45:437–448.
- Demiral MA, Aydin M, Yorulmaz A. 2005. Effect of salinity on growth chemical composition and antioxidative enzyme activity of two malting barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars Turk. *J. Biol.* 29:117–123.
- Demiral MA. 2003. Comparative response of two olive (*Olea europaea* L.) cultivars to salinity. *Turk. J. Agric. For.* 29:267–274.
- Ekanayake IJ, Steponkus PL, Dedatta SK. 1990. Sensitivity of pollination to water deficits at anthesis in upland rice. *Crop Sci.* 30:310–315.
- Flowers TJ, Yeo AR. 1995. Breeding for salinity resistance in crop plants: where next? *Aust J Plant Physiol.* 22: 875–884.
- Fukai S, Cooper M. 1995. Development of drought resistant cultivars using physio-morphological traits in rice. *Field Crops Res.* 40:67–86.
- Fukao T, Xu KN, Ronald PC, Bailey-Serres J. 2006. A variable cluster of ethylene response factor-like genes regulates metabolic and developmental acclimation responses to submergence in rice (W). *Plant Cell* 18, 2021–2034.

- Fukuda A, Nakamura A, Tagiri A, Tanaka H, Miyao A, Hirochika H, Tanaka Y. 2004. Function, intracellular localization and the importance in salt tolerance of a vacuolar Na^+/H^+ antiporter from rice. *Plant Cell Physiol.* 45, 146–159.
- Ghafoor A, Qadir M, Murtaza G. 2004. *Salt-Affected Soils: Principles of Management*. 1ed. Allied Book Centre. Lahore. p304.
- Gong M, Chen, SN, Song YQ, Li ZG. 1997. Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant systems in maize seedlings. *Aust. J. Plant Physiol.* 24: 371–379.
- Haiyuan D, Gengyun Z, Yan G, Shaolin C, Shouyi C. 1998. RAPD tagging of salt tolerant genes in rice. *Chinese Sci., Bull.* 43: 330–32.
- Hall AE. 1992. Breeding for heat tolerance. *Plant Breed Rev.* 10:129–169.
- Hamim, Sopandie D, Jusuf M. 1996. Beberapa karakteristik morfologi dan fisiologi kedelai toleran dan peka terhadap cekaman kekeringan. *Hayati.* 3(1):30–34.
- Hapsoh, Yahya S, Sopandie D, Purwoko BS. 2005. Respon morfologi beberapa genotipe kedelai terhadap inokulasi MVA pada beberapa tingkat cekaman kekeringan. *Jurnal Penelitian Pertanian.* 24(2):111–117.
- Hare PD, Cress WA, Van-Staden J. 1998. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant Cell Environ.* 21:535–554.
- Hoshida H, Tanaka Y, Hibono T, Hayashi Y, Tanaka A. 2000. Enhances tolerance to salt stress in transgenic rice that over expresses chloroplast glutamine synthetase. *Plant Mol. Biol.* 43:103–111.

- Ishitani M, Liu J, Halfler U, Kim CS, Shi W, Zhu JK. 2000. SOS3 function in Plant salt tolerance requires N-myristoylation and calcium-binding. *Plant Cell*. 12: 1667–1677.
- Ismail AM, Heueur S, Thomson MJ, Wissuwa M. 2007. Genetic and genomic approach to develop rice germplasm from problem soils. *Plant Mol Bio* 65:547-570
- Jagadish SVK, Craufurd PQ, Wheeler TR. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 58:1627–1635.
- Jagadish SVK, Craufurd PQ, Wheeler TR. 2008. Phenotyping parents of mapping populations of rice (*Oryza sativa* L.) for heat tolerance during anthesis. *Crop Sci.* 48: 1140–1146.
- Ji XM, Raveendran M, Oane R, Ismail A, Lafitte R, Bruskiewich R, Cheng SH, Bennett J. 2005. Tissue-specific expression and drought responsiveness of cell-wall invertase genes of rice at flowering. *Plant Mol. Biol.* 59:945–964.
- Khan AA, Mcneilly T, Azhar FM. 2001. Stress Tolerance In Crop Plants. *International Journal of Agriculture & Biology*. 1560(8530): 250–255.
- Khan AA, Mcneilly T, Azhar FM. 2001. Stress Tolerance In Crop Plants. *International Journal of Agriculture & Biology*. 1560 (8530): 250–255.
- Kumar A, Bernier J, Verulkar S, Lafitte HR, Atlin GN. 2008. Breeding for drought tolerance: Direct selection for yield, response to selection and use of droughttolerant donors in upland and lowland-adapted populations. *Field Crop Res.* 107:221–231.
- Lafitte HR, Courtois B. 2002. Interpreting cultivar x environment interactions for yield in upland rice: Assigning value to drought-adaptive traits. *Crop Sci.* 42: 1409–1420.

- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. III ed. Springer-Verlag, Berlin.
- Leigh R. 1997. The Solute composition of the vacuoles. *Ad. Bot. Res.* 25:253–295.
- Liu H-T, Li B, Shang Z-L, Li X-Z, Mu R-L, Sun D-Y, Zhou R-G. 2003. Calmodulin is involved in heat shock signal transduction in wheat. *Plant Physiol.* 132: 1186–1195.
- Mackill DJ, and Coffman WR. 1983. Inheritance of high temperature tolerance and pollen shedding in a rice cross. *Z Pflanzesuchtg* 91, 61–69.
- Maestri E, Klueva N, Perrotta C, Gulli M, Nguyen HT, Marmiroli N. 2002. Molecular genetics of heat tolerance and heat shock proteins in cereals. *Plant Mol. Biol.* 48: 667–681.
- Mallik S, Mandal BK, Sen SN, Sarkarung S. 2002. Shuttle-breeding: An effective tool for rice varietal improvement in rainfed lowland ecosystem in eastern India. *Curr. Sci.* 83, 1097–1102.
- Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd. New York: Academic Press.
- Matsui T, Kobayashi K, Kagata H, Horie T. 2005. Correlation between variability of pollination and length of basal dehiscence of the theca in rice and a hot-and-humid condition. *Plant. Prod. Sci.* 8, 109–114.
- Matsui T, Kobayashi K, Yoshimoto M, Hasegawa T. 2007. Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina region of New South Wales, Australia. *Plant Prod. Sci.* 10, 57–63.
- Mitra J. 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crops plants. *Current Scie.* 80:758–762.

- Momcilovic I, Ristic Z. 2007. Expression of chloroplast protein synthesis elongation factor, EF-Tu, in two lines of maize with contrasting tolerance to heat stress during early stages of plant development. *J. Plant Physiol.* 164: 90–99.
- Nakazono M, Tsuji, H, Li Y. H, Saisho D, Arimura S, Tsutsumi N, Hirai A. 2000. Expression of a gene encoding mitochondrial aldehyde dehydrogenase in rice increases under submerged conditions. *Plant Physiol.* 124, 587–598.
- O'Toole JC, Namuco OS. 1983. Role of panicle exsertion in water stress induced sterility. *Crop Sci.* 23:1093–1097.
- Ouk M, Basnayake J, Tsubo M, Fukai S, Fischer KS, Cooper M, Nesbitt H. 2006. Use of drought response index for identification of drought tolerant genotypes in rainfed lowland rice. *Field Crops Res.* 99:48–58.
- Peng SB, Khush GS, Virk P, Tang QY, Zou YB. 2008. Progress in ideotypebreeding to increase rice yield potential. *Field Crops Res.* 108, 32–38.
- Prasad PVV, Boote KJ, Allen LH, Sheehy JE, Thomas JMG. 2006. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Res.* 95: 398–411.
- Rajendrakumar CSV, Suryanarayana T, Reddy AR. 1997. DNA helix destabilization by proline and betaine: possible role in the salinity tolerance process. *FEBS Letters*, 410: 201–5.
- Richards RA. 1997. Defining selection criteria to improve yield under drought. In Belhassen (ed). *Drought Tolerance in Higher Plants. Genetical, physiological and molecular biology analysis.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 104p. pp 79–88

- Saini HS, Sedgley M, Aspinall D. 1983. Effect of heat-stress during floral development on pollen-tube growth and ovary anatomy in wheat (*Triticum aestivum* L). *Aust. J. Plant Physiol.* 10:137–144.
- Saini HS. 1997. Effects of water stress on male gametophyte development in plants. *Sexual Plant Reprod.* 10: 67–73.
- Satake T, Yoshida S. 1978. High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.* 47, 6–17.
- Seaman J. 2004. Mechanisms of salt tolerance in halophytes: can crop plants resistance to salinity be improved? (www.google.com. 8 Agustus 2006).
- Septiningsih EM, Pamplona A M, Sanchez DL, Neeraja CN, Vergara GV, Heuer S, Ismail AM, Mackill DJ. 2009. Development of submergence tolerant rice cultivars: The Sub1 locus and beyond. *Ann. Bot.* 103:151-160.
- Serraj R, Dimayuga G, Gowda V, Guan Y, He Hong, Impa S, Liu DC, MabesaR C, Sellamuthu R, Torres R. 2009. Drought-resistant rice: Physiologicalframework for an integrated research strategy. In “*Drought frontiers in rice – Cropimprovement for increased rainfed production*” (R. Serraj, J. Bennett, and B. Hardy,Eds.), World Scientific Publishingpp 139–170.
- Sloane RJ, Patterson RP, Carter TRJr. 1990. Field drought tolerance of a soybean plant introduction. *Crop Sci.* 30:118–123
- Sopandie D, Hamim, Jusuf M, Heryani N. 1996. Toleransi kedelai terhadap cekaman kekeringan: Akumulasi prolin dan asam absisik dan hubungannya dengan potensial osmotik daun dan penyesuaian osmotik. *Bul. Agron.* 24(1):9–14.

- Sopandie D, Kawasaki T, Moritsugu M. 1995b. Effect of calcium on the growth and ion uptake in NaCl-stressed plants. *Bul. Agron.* 23(1):42–55.
- Sopandie D, Moritsugu M, Kawasaki T. 1995a. Effect of calcium on the growth and ion uptake in NaCl-stressed plants. *Bul Agron.* 23:42–55.
- Sopandie D, Takeda K, Moritsugu M, Kawasaki T. 1993. Selection for high salt tolerant cultivars in barley. *Bull. Res. Bioresour. Okayama Univ.* 1:113–129.
- Sopandie D. 1990. Studies on Plant Responses to Salt Stress [PhD Thesis]. The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan.
- Su HD, Zhao GC, Bohnet HJ. 2002. The expression of HAK-type K transporter is regulated in response to salinity stress in common ice plant. *Plant Physiol.* 129: 1482–1493.
- Sung D-Y, Kaflan F, Lee K-J, Guy CL. 2003. Acquired tolerance to temperature extreme. *Trends Plant Sci.* 8(4):179–187.
- Tardieu F. 1997. Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress? In Belhassen (ed). *Drought Tolerance in Higher Plants. Genetical, physiological and molecular biology analysis.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. pp 15–26
- Wahid A, Gelani S, Ashraf M, Foolad MR. 2007. Heat tolerance in plants: An Overview. *Env. Exp Bot.* 61(3):199–223.
- Wang WX, Vinocur B, Shoseyov O, Altman A. 2004. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends Plant Sci.* 9: 244–252.

- Wassmann R, Jagadish SVK, Heuer S, Ismail A, Redona E, Serraj R, Singh RK, Howell G, Pathak H, Sumfleth K. 2009. *Climate Change Affecting Rice Production: The Physiological and Agronomic Basis for Possible Adaptation Strategies*. In Donald LS (ed.), *Advances in Agronomy*, Vol 101. Burlington: Academic Press, pp.59-122.
- Weerakoon WMW, Maruyama A, Ohba K. 2008. Impact of humidity on temperature-induced grain sterility in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 194, 135–140.
- Xu K, Mackill DJ. 1996. A major locus for submergence tolerance mapped on rice chromosome 9. *Mol. Breed.* 2: 219–224.
- Xu KN, Deb R, Mackill DJ. 2004. A microsatellite marker and a codominant PCR-based marker for marker-assisted selection of submergence tolerance in rice. *Crop Sci* 44:248-253.
- Xu S, Li J, Zhang X, Wei H, Cui L. 2006. Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress. *Environ. Exp. Bot.* 56: 274–285.
- Yoshida S, Satake T, Mackill D. 1981. High temperature Stress. *IRRI Res. Pap.* 67:1–15.
- Zhang J-H, Huang W-D, Liu Y-P, Pan Q-H. 2005. Effects of temperature acclimation pretreatment on the ultrastructure of mesophyll cells in young grape plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) under cross-temperature stresses. *J. Integr. Plant Biol.* 47: 959–970.
- Zhu C, Xiao Y, Wang C, Jiang L, Zhai H, and Wan J. 2005. Mapping QTL for heat-tolerance at grain filling stage in rice. *Rice Sci.* 12:33–38.

Zhu QH, Ramm K, Shivakkumar R, Dennis ES, Upadhyaya NM. 2004. The Anther Indehiscence1 gene encoding a single MYB domain protein is involved in anther development in rice. *Plant Physiol.* 135:1514–1525.

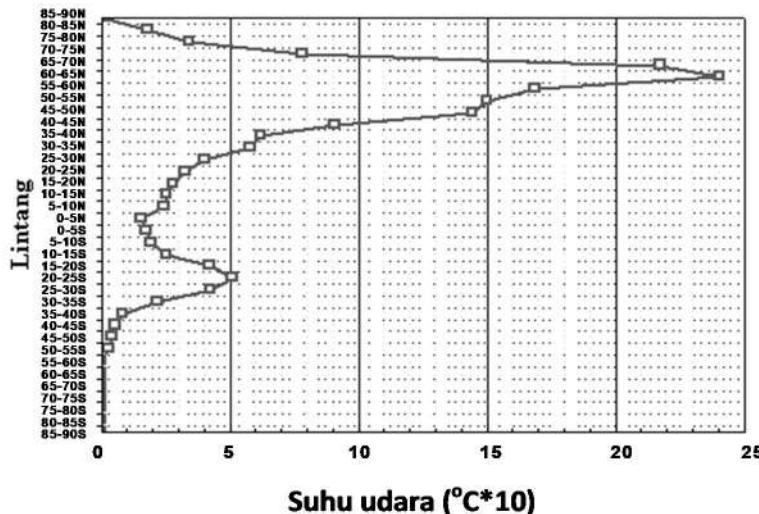
BAB 2.

TEKNOLOGI INOVASI SISTEM INFORMASI KALENDER TANAM TERPADU SEBAGAI UPAYA ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM

Haris Syahbuddin, Yayan Apriyana dan Eleonora Runtunuwu

Pendahuluan

Dalam dua dasawarsa terakhir, isu perubahan iklim terus menguat dan menjadi titik penting dalam menyusun perencanaan pengembangan pertanian. Perubahan iklim yang ditandai oleh perubahan pola dan distribusi curah hujan (Surfleet dan Tullos 2013), peningkatan suhu udara (Gunawardhana dan Kazama 2012), dan peningkatan muka air laut (Zecca dan Chiari,2012) berdampak langsung dan tidak langsung terhadap wilayah pertanian (Kang *et al.* 2009). Runtunuwu dan Kondoh (2008) membandingkan suhu udara rata-rata global periode 1900-1920 dengan 1990-1995 untuk menggambarkan peningkatan suhu udara (Gambar 1). Rata-rata peningkatan suhu global selama 95 tahun adalah $0,57^{\circ}\text{C}$. Perubahan suhu udara tertinggi terjadi di $60\text{-}70^{\circ}\text{LU}$ yang mencapai lebih dari $2,0^{\circ}\text{C}$. Daerah tropis dimana Indonesia termasuk di dalamnya, rata-rata peningkatan yang terjadi sekitar $0,3^{\circ}\text{C}$.



Gambar 40. Perubahan suhu udara global tahunan ($^{\circ}\text{C} \times 10$) periode 1901-1920 dibandingkan dengan 1990-1995 (Runtunuwu dan Kondoh 2008).

Tanaman pangan merupakan subsektor yang paling rentan terhadap perubahan iklim. Naylor *et al.* (2007) secara spesifik menyatakan bahwa produksi pertanian di Indonesia sangat dipengaruhi oleh curah hujan baik variasi antar musim maupun antar tahun, akibat dari monsoon Australia-Asia dan *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) yang dinamik. Di sisi lain, kedaulatan pangan sejak era otonomi daerah seakan telah beralih ke pemerintah provinsi/kabupaten. Untuk itu diperlukan berbagai kebijakan adaptasi dan mitigasi perubahan iklim sektor pertanian baik sumberdaya, infrastruktur, maupun terhadap sistem usaha tani/agribisnis dan ketahanan pangan nasional.

Dinamika iklim yang tercermin dalam bentuk variabilitas iklim menurut ruang (antar daerah/wilayah, perbedaan topografi) dan waktu (musim, antar musim, tahun dan antar tahun) merupakan salah satu tantangan dalam sistem produksi pertanian nasional. Tantangan ini akan semakin berat kalau suhu udara secara global

terus meningkat, karena merupakan penyebab utama perubahan iklim global. Perubahan iklim global ditandai antara lain oleh peningkatan intensitas kejadian anomali iklim, baik iklim ekstrim basah, terutama fenomena La Nina, maupun iklim kering seperti fenomena El Nino. Ketidakpastian curah hujan yang seiring dengan terjadinya perubahan iklim, tidak hanya menyebabkan perubahan jumlah curah hujan, tetapi juga menyebabkan pergeseran awal musim hujan dan awal musim kemarau.

Budidaya pertanian, di lahan kering dan di lahan beririgasi, tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah, intensitas, dan distribusi hujan, tetapi juga ditentukan oleh awal musim hujan (*onset season*) dan akhir musim hujan (*withdrawal season*). Perkiraan awal musim hujan menjadi faktor penting dalam menetapkan awal musim tanam, pelaksanaan tanam, penentuan pola tanam, dan perkiraan luas areal tanam, terutama untuk tanaman pangan pada lahan sawah tada hujan dan kering.

Secara tradisional, petani merencanakan budidaya pertanian menggunakan tanda-tanda alam sebagai kearifan lokal (*indigenous knowledge*), yang telah diwariskan secara turun-temurun. Masyarakat Jawa dan Bali menyebutnya Pranata Mangsa (Sunda), Pranoto Mongso (Jawa) dan Kerta Masa (Bali). Pranata Mangsa (Gambar 2) dibutuhkan sebagai penentuan atau patokan untuk bercocok tanam. Selama ribuan tahun masyarakat Indonesia telah menghafalkan pola musim, iklim dan fenomena alam lainnya, dan akhirnya nenek moyang kita mampu membuat kalender tahunan bukan berdasarkan kalender Syamsiah (Masehi) atau kalender Komariah (Hijrah/Islam) tetapi berdasarkan kejadian-kejadian alam seperti musim penghujan, kemarau, musim berbunga, dan letak bintang di jagat raya, serta pengaruh bulan purnama terhadap pasang surutnya air laut.

Perubahan iklim dan perubahan penutupan ataupun penggunaan lahan telah terjadi, baik secara global (Runtuunuw dan Kondoh, 2008), regional ataupun lokal (Syahbuddin *et al.* 2004). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengkajian ulang terhadap

ketetapan kalender tanam yang ada saat ini setelah terjadi perubahan iklim.

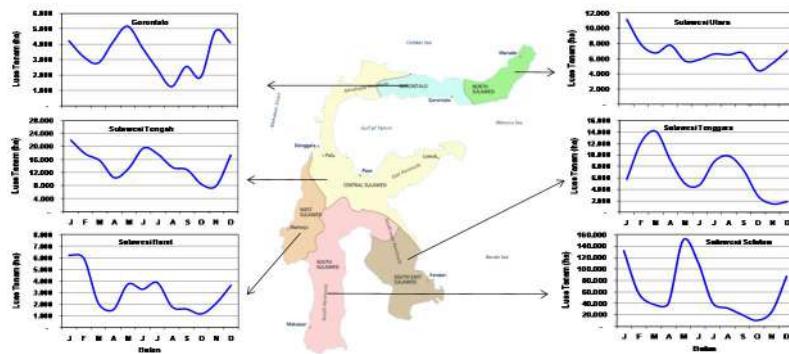


Gambar 41. Kalender pertanian Jawa (<http://senijawakuno.blogspot.com/2012/12/tanda-dan-ciri-pranata-mangsa-arisan.html>)

Wiliamson (2001) melaporkan kalender tanam di Kosovo yang dikembangkan oleh *Food and Agricultural Organization* (FAO). Kalender ini memberikan informasi mengenai jenis tanaman yang tumbuh dan periode tanah diberakan (*bare soil*), persiapan lahan, masa vegetatif, masa generatif, serta panen selama setahun. Selain di Kosovo, FAO juga telah mengembangkan kalender tanam di Iraq, dengan komoditas yang biasa tumbuh di daerah tersebut, seperti padi, jagung, kapas, buah-buahan dan sayuran (Edirisinghe, 2004). Dengan kalender tanam tersebut terlihat bahwa tanaman yang tergantung air hujan (*rained crops*) akan tumbuh terutama selama bulan basah dari November sampai April tahun berikutnya. FAO (1996) juga telah mengembangkan

pola tanam seluruh Afrika dengan beberapa komoditas, yang mencakup kalender tanam, intensitas pertanaman (IP), dan rotasi tanam.

Gambar 15 menggambarkan kondisi eksisting realisasi tanam tanaman padi di salah satu pulau di Indonesia, yaitu pulau Sulawesi sepuluh tahun terakhir (Runtunuwu *et al.* 2012). Terlihat distribusi tanam yang sangat berbeda antar provinsi. Perbedaan utama kondisi tersebut diduga karena pola curah hujan yang berbeda apakah ekuatorial, monsoonal atau lokal, dan juga karena dukungan sumber daya lain seperti air tanah, waduk dan tipologi lahan yang memungkinkan kegiatan pertanaman.



Gambar 42. Distribusi luas tanam tanaman padi rata-rata bulanan per provinsi di Sulawesi.

Bertitik tolak dari hipotesa adanya perubahan awal musim hujan, yang berakibat pergeseran awal waktu tanam perlu adanya panduan penyesuaian pola tanam yang lebih adaptif dengan variabilitas dan perubahan iklim. Panduan tersebut perlu dijabarkan dalam bentuk peta/atlas kalender tanam yang memuat

pola waktu tanam selama siklus setahun agar lebih mudah dipahami.

Atlas Kalender Tanam

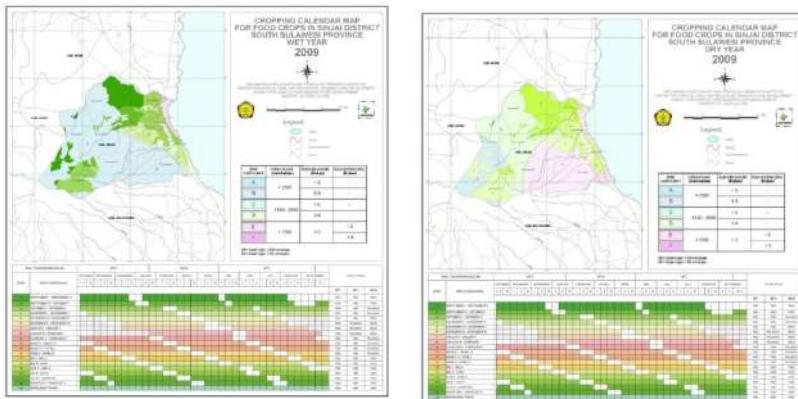
Balitbangtan sejak tahun 2007, menyusun informasi kalender tanam tanaman padi setiap kecamatan untuk seluruh Indonesia dalam bentuk atlas. Atlas Kalender Tanam Tanaman Pangan Skala 1:250.000 yang telah dibuat adalah pulau Jawa (Las *et al.*, 2007; Runtunuwu *et al.* 2011a), Sumatera (Las *et al.* 2008; Runtunuwu *et al.* 2011b), Kalimantan (Las *et al.*, 2009a; Runtunuwu *et al.*, 2012b), Sulawesi (Las *et al.*, 2009b; Runtunuwu *et al.* 2012c), dan Bali, Maluku, Nusa Tenggara, dan Papua (Las *et al.*, 2010; Runtunuwu *et al.*, 2013b).

Setiap atlas kalender tanam berisi informasi estimasi awal waktu tanam dan potensi luas tanam tanaman padi setiap musim tanam (Runtunuwu *et al.*, 2011a). Estimasi dilakukan berdasarkan kondisi curah hujan pada saat berlebih (basah), normal, ataupun kurang (kering). Pengelompokan curah hujan ini mengikuti kriteria sifat hujan yang dirumuskan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG, 2013).

Sebagai contoh, Peta kalender tanam Sulawesi telah disusun sampai level kecamatan berdasarkan kondisi periode tanam yang dilakukan oleh petani saat ini, dan berdasarkan tiga kejadian iklim yaitu tahun basah, tahun normal, dan tahun kering. Setiap peta memuat informasi kapan waktu tanam, estimasi luas dan indeks pertanaman baik pada MT I, MT II, dan MT III. Awal waktu tanam rata-rata yang dilakukan petani di Sulawesi saat ini untuk MT I umumnya terjadi pada September I/II. Intensitas tersebut menurun dan kemudian meningkat kembali pada November III/Desember I sampai Januari I/II. Pada kondisi tahun basah, estimasi waktu tanam hampir sama dengan yang dilakukan petani, yaitu pada September I/II dan November I/II tetapi dengan

intensitas yang lebih tinggi. Pada kondisi tahun normal, kegiatan tanam pada MT I tetap terfokus pada September I/II dan Januari I/II yang sama dengan kondisi basah tetapi dengan intensitas yang rendah. Kalau pada tahun basah dan tahun normal potensi tanamnya kebanyakan dimulai Sep I/II, sedangkan pada tahun kering terjadi sampai dengan Januari I/II. Pemahaman ini menjadi dasar dalam penentuan awal waktu tanam di setiap wilayah, agar dapat menyesuaikan dengan kondisi iklim yang ada. Untuk musim tanam ke depan, penentuan awal waktu tanam dilakukan dengan menggunakan informasi iklim hasil prediksi (Runtuunuw et al. 2013b).

Gambar 16 menunjukkan contoh kalender tanam di Kabupaten Sinjai, Propinsi Sulawesi Selatan (Runtuunuw et al. 2012a). Setiap peta kalender tanam memuat informasi kapan waktu tanam, estimasi luas dan indeks pertanaman baik pada musim tanam pertama (MT I), musim tanam kedua (MT II), dan musim tanam ke tiga (MT III).



Gambar 43. Peta Kalender Tanam Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan pada kondisi tahun basah (kiri) dan tahun kering (kanan).

Adanya variasi warna pada setiap kecamatan pada di atas menunjukkan ada perbedaan estimasi awal waktu tanam dan

potensi luas tanam, yang dapat diterapkan petani untuk menyiapkan adanya perubahan kondisi air setiap tahunnya. Dengan diketahuinya estimasi awal waktu tanam dan potensi luas tanam, informasi kalender tanam dapat dijadikan sebagai dasar peningkatan indeks pertanaman padi. Program pemerintah untuk meningkatkan stok beras, dapat ditingkatkan dengan memperhatikan indeks pertanaman (IP) eksisting, karena belum semua lahan dimanfaatkan secara optimal. Lahan sawah di Jawa memiliki IP padi yang paling tinggi yaitu 1,5, Sumatera sekitar 1,0, dan Kalimantan sekitar 0,6 dan semuanya cenderung menurun setiap tahun (Amien, 2011).

Manfaat dari informasi atlas kalender tanam adalah tersedianya informasi anjuran pola tanam yang dapat diterapkan di setiap kecamatan berdasarkan kondisi iklim. Kondisi air yang tidak memungkinkan untuk penanaman padi irigasi dapat dirotasi dengan tanaman palawija (*secondary crops*). Wilayah yang memiliki periode waktu tanam yang pendek, selain dengan menerapkan rotasi tanam, juga dapat memilih varietas yang sesuai. Keberhasilan dalam mengembangkan varitas umur genjah secara langsung dapat meningkatkan indeks pertanaman padi yang tentunya berpeluang meningkatkan produksi padi.

Selain itu, persiapan penanaman yang meliputi benih, pupuk dan saprodi lainnya dapat disiapkan sesuai kebutuhan spesifik lokasi. Manfaat lain adalah bahwa sebaran waktu penanaman padi yang dilakukan petani di seluruh Indonesia dapat dipahami secara spasial maupun temporal, sehingga perencanaan pemenuhan kebutuhan beras nasional sepanjang tahun di seluruh Indonesia dapat lebih akurat.

BMKG secara rutin melakukan prediksi untuk seluruh Indonesia. Oleh karena itu, Balitbangtan berpeluang menggabungkan informasi kalender tanam ini secara otomatis dengan prediksi BMKG agar pengguna dapat langsung mengetahui kapan waktu tanam terbaik musim tanam selanjutnya di wilayahnya masing-masing. Hasil penelitian ini dapat

dimanfaatkan terutama di dalam perencanaan penentuan waktu tanam sebelum musim tanam tiba untuk mengurangi peluang kegagalan panen.

Pengembangan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu

Menurut Runtunuwu *et al.* (2013a) syarat utama menggunakan atlas kalender tanam adalah pengguna perlu mengetahui musim tanam (MT) ke depan (MT I atau MT II atau MT III), dan sifat hujan musim tersebut (basah atau normal atau kering). Kelompok musim tanam kedepan dapat ditetapkan dengan menggunakan periode waktu. MT I mulai September III/Okttober I sampai dengan Januari III/Februari I, MT II mulai Februari II/III sampai dengan Mei III/Juni I, dan mulai Juni II/III sampai September I/II. Di sisi lain, sifat hujan diperoleh dari BMKG yang mengeluarkan prakiraan sifat hujan bulanan dan musiman secara reguler setiap tahun (BMKG, 2013). Atlas kalender tanam belum memuat informasi prakiraan sifat hujan ini sehingga pengguna belum dapat secara langsung menentukan awal waktu tanam musim tanam kedepan.

Balitbangtan menjawab permasalahan tersebut dengan cara menggabungkan informasi kalender tanam dari Balitbangtan dengan prakiraan hujan dari BMKG. Penggabungan kedua informasi ini selanjutnya disebut sebagai kalender tanam dinamik (Pramudia, *et al.* 2013), yang bertujuan untuk menentukan estimasi awal waktu tanam padi untuk musim tanam yang akan datang.

Dalam perkembangan selanjutnya, kalender tanam dinamik berubah menjadi kalender tanam terpadu (Runtunuwu *et al.*, 2012b). Selain membutuhkan informasi awal waktu tanam pada setiap level kecamatan, pengguna membutuhkan informasi mengenai wilayah rawan terkena bencana kekeringan, banjir dan serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), dan informasi rekomendasi teknologi berupa pupuk, varietas, dan kebutuhan

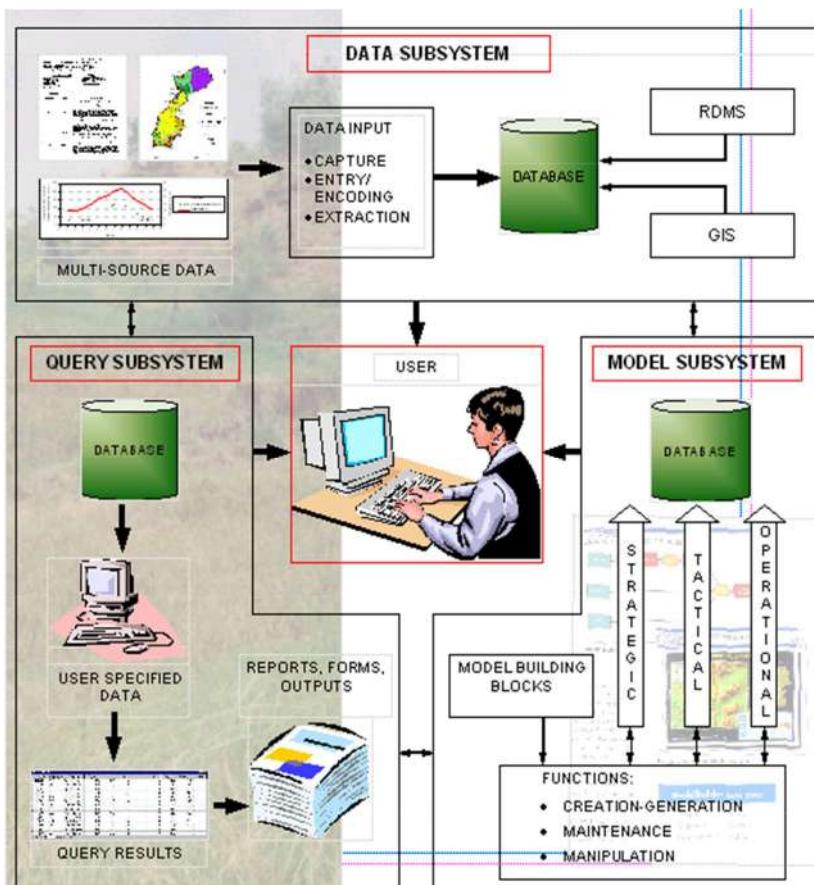
benih yang perlu disiapkan pengguna sebelum masuk periode musim tanam berikutnya.

Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 45/2011 tentang Tata Hubungan Kerja Antara Kelembagaan Teknis, Penelitian dan Pengembangan, dan Penyuluhan Pertanian dalam Mendukung Peningkatan Produksi Beras Nasional (P2BN) menjelaskan bahwa Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Balitbangtan) bertanggung jawab antara lain dalam pengembangan dan penerapan kalender tanam, baik dalam penyusunan, sosialisasi, validasi lapang, maupun upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim.

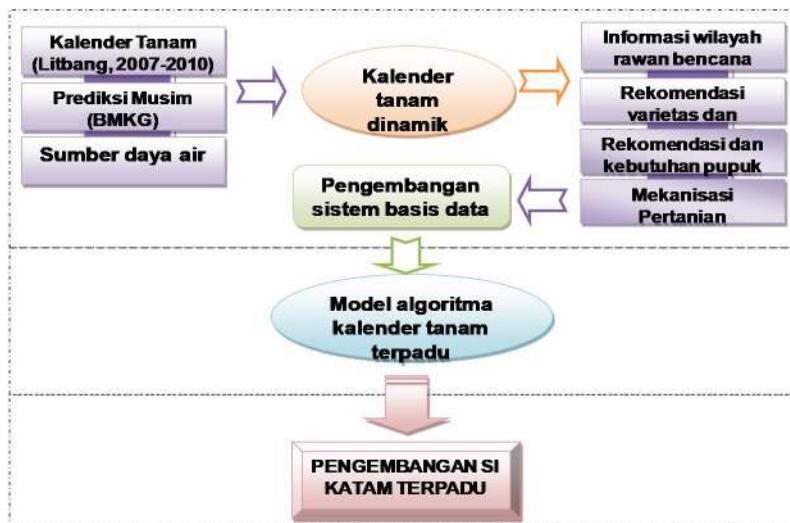
Sejalan dengan Permentan No 45/2011, Badan Litbang Pertanian mengembangkan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (selanjutnya disingkat SI Katam Terpadu) yang menjadi rujukan bagi pengambil kebijakan dalam penyusunan rencana pengelolaan pertanian tanaman pangan skala kecamatan (Ramadhani et. al. 2012, Runtunuwu et. al. 2012a). SI Katam Terpadu diakses melalui alamat web katam.litbang.deptan.go.id.

Konsep pengembangan sistem

Pengembangan sistem kalender tanam terpadu pada dasarnya mengikuti konsep dasar pengembangan sistem informasi. Setiap sistem informasi meliputi tiga sub-sistem utama, yaitu a) basis data, b) model, dan c) pencarian (query), (Gambar 5 dan Gambar 6).



Gambar 44. Tiga subsistem pengelolaan informasi



Gambar 45. Alur pengembangan SI Katam Terpadu

Subsistem basis data memuat semua jenis data yang dibutuhkan, baik dalam bentuk tabular maupun spasial. Sumber data bisa merupakan data hasil pengamatan lapang, data sekunder, ataupun citra satelit seperti yang digunakan Asadov dan Ismaylov (2011) dan Peng et al. (2011). Proses input data ini sangat penting untuk menjamin adanya keterkaitan antar data. Yang et al. (2011) mencantohkan pengembangan sistem pengelolaan data tanah dan tanaman agar secara otomatis dapat diintegrasikan dengan aplikasi model tanaman yang lebih luas. Korelasi antar data sangat penting untuk memudahkan pada subsistem model dan query (Gambar 7). Teknologi Geographic Information System (GIS) dan pemrograman komputer (computer programming) sangat memudahkan proses integrasi antara data tabular, textual dengan spasial.

Subsistem model penting untuk menganalisis data dalam data storage internal agar dapat menjadi informasi yang bermanfaat bagi pengguna atau obyek lain di luar sistem (eksternal). Informasi tersebut berguna terutama untuk pengambilan keputusan operasional, teknis, maupun penyusunan strategi. Sub-sistem model memuat algoritma analisis yang menghubungkan data dalam storage.

Subsistem pencarian sangat penting dalam pengembangan sistem informasi, karena pengguna diharapkan mampu melakukan pencarian data ke subsistem data dan informasi ke subsistem model tanpa menggunakan jasa operator. Harapan ini dapat terpenuhi apabila sistem dibangun secara sederhana sehingga pengguna mudah menggunakannya. Selain itu, pengguna diberi kebebasan untuk memilih informasi sesuai kebutuhan, serta dilengkapi dengan beberapa pilihan bentuk penyajian, baik berupa file ataupun tampilan (display) di monitor komputer yang dapat dicetak (printout). Keakuratan informasi data yang diperoleh pengguna, sangat tergantung pada kebenaran data dan ketepatan pemilihan model di atas.



Gambar 46. Bagan Alir sistem Katam Terpadu

Beberapa perangkat lunak yang digunakan dalam pengembangan SI Katam Terpadu adalah: (i) *ArcGIS Desktop 10*

untuk penyiapan data vektor seperti peta rupa bumi, dan peta sawah digital, (ii) *Visual Basic Studio.NET* 2010 untuk aplikasi perangkat lunak berbasis ASP.NET, (iii) *ArcGIS Server* 10, merupakan komponen server pendukung untuk keperluan publikasi peta digital melalui media internet atau berbasis web, (iv) *Microsoft Server* 2010 digunakan sebagai sistem operasi tingkat server sekaligus *Web Server* aplikasi sistem berbasis web, (v) *Microsoft SQL Server* 2010 digunakan sebagai server penyimpan data, dan (vi) *DXperience Enterprise* yang digunakan sebagai komponen pendukung untuk menampilkan data tabular secara dinamis dan ramah pengguna.

Balitbangtan memperbarui informasi ini minimal tiga kali setahun pada setiap awal musim tanam untuk seluruh kecamatan. Walaupun sangat beragam sesuai dengan pola curah hujan, secara umum dapat dikelompokkan sebagai berikut: Periode MT I, September III/Okttober I - Januari III/Februari I, periode MT II, Februari II/III - Mei III/Juni I, dan periode MT III, Juni II/III - September I/II. Untuk itu, peluncuran (*launching*) SI Katam Terpadu MT I dilakukan pada bulan Agustus, MT II pada bulan Februari dan MT III paling lambat pada bulan Mei (Runtunuwu *et al.* 2013a).

Data dan informasi

Umum

Data spasial batas administrasi yang digunakan adalah peta digital administrasi skala 1:250.000 (Bakosurtanal,2000). Kementerian Pertanian memutakhirkan peta spasial administrasi seluruh Indonesia dengan mengikuti indeks desa yang dipublikasikan Badan Pusat Statistik (BPS). Data terbaru yang digunakan adalah 34 provinsi, 505 kabupaten, dan 6911 kecamatan lengkap dengan indeksnya masing-masing (BPS, 2013). Sebaran

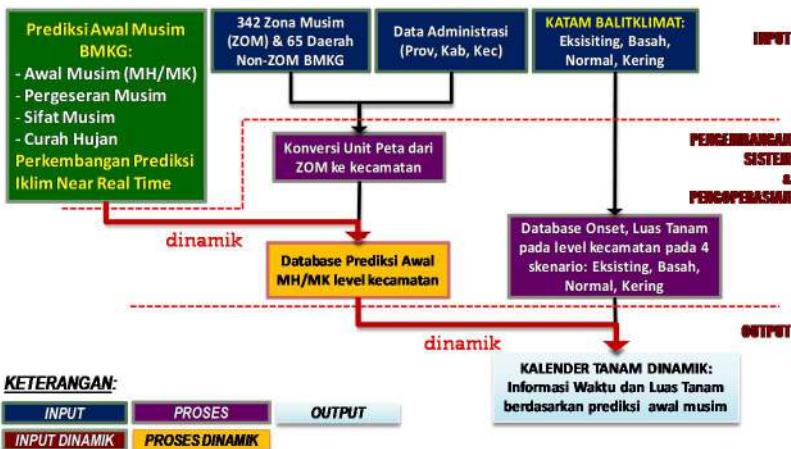
lahan sawah skala 1:250.000 yang digunakan merupakan peta digital yang dibuat BBSDLP (BBSDLP, 2000). Data luas baku sawah dari Kabupaten Dalam Angka seluruh Indonesia yang diterbitkan oleh BPS kabupaten/kota menjadi bahan rujukan.

Estimasi Kalender Tanam dan Luas Tanam

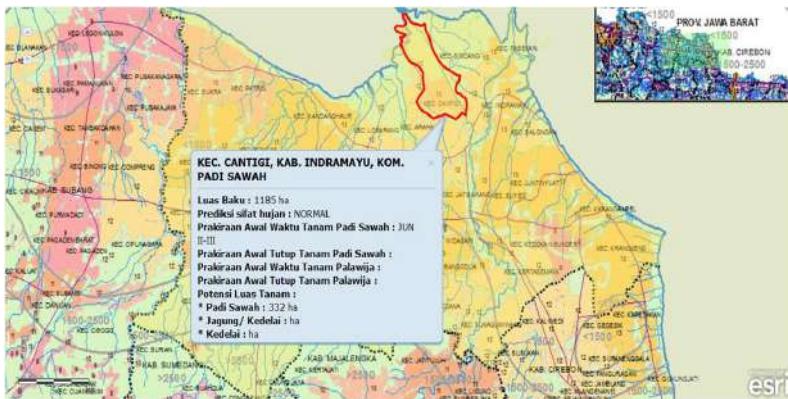
Data dasar prediksi iklim yang tersedia dalam sistem basis data katam terpadu yaitu sifat musim dan jumlah curah hujan bulanan setiap kecamatan untuk musim tanam ke depan. Sifat musim yang dimaksud adalah atas normal (AN), normal (N) dan bawah normal (BN), BMKG (2013). Data ini diperoleh dari BMKG dalam bentuk peta yang kemudian ditumpang-susunkan dengan peta administrasi dengan teknologi GIS, untuk memperoleh data sifat musim yang dominan di setiap kecamatan. Setiap tahun, BMKG menerbitkan dua jenis prakiraan musim, yaitu prakiraan musim hujan yang diterbitkan setiap bulan Agustus untuk kebutuhan MT I dan prakiraan musim kemarau diterbitkan setiap bulan Maret untuk kebutuhan MT III. Untuk kebutuhan MT II, Balitbangtan menggunakan prediksi sifat hujan bulanan periode Januari, Februari, Maret yang dominan. Apabila BMKG melakukan pembaruan (*updating*) sifat musim, SI Katam Terpadu langsung melakukan penyesuaian (Pramudia *et al.* 2013).

Data estimasi kalender tanam dan luas tanam diperoleh dari atlas kalender tanam (Las *et al.* 2007, 2008, 2009a, 2009b, 2010). Setiap kecamatan memiliki informasi estimasi waktu tanam dan estimasi luas tanam setiap musim tanam (MT) selama setahun (MT I, II, dan III). Pilihan yang disiapkan juga tersedia dalam empat skenario yaitu pada kondisi aktual yang dilakukan petani, serta pada kondisi curah hujan berlebih (basah), normal dan kering. Estimasi waktu tanam MT kedepan merupakan hasil keterkaitan antara data prediksi yang diperoleh dari BMKG dengan data atlas kalender tanam (Gambar 9). Pertimbangan lain penentuan

estimasi waktu tanam adalah realisasi waktu tanam musim tanam sebelumnya. Pertimbangan ini diperlukan untuk menghindari rekomendasi waktu tanam yang terlalu dini. Selain informasi estimasi waktu tanam, informasi potensi luas tanam dapat diperoleh dari basis data kalender tanam. Hasil analisis sumberdaya air semakin meningkatkan akurasi penentuan waktu dan luas tanam (Kartiwa *et al.* 2013). Gambar 10 merupakan contoh penyajian informasi estimasi waktu dan awal waktu tanam di dalam SI Katam Terpadu.



Gambar 47. Algoritma model integrasi dinamik (Sumber: Pramudia *et al.* 2013)



Gambar 48. Informasi estimasi awal waktu tanam

Luas Wilayah Terkena Banjir, Kekeringan dan Serangan OPT

Data runut waktu luas wilayah lahan sawah Indonesia yang terkena bencana (banjir, kekeringan, dan serangan OPT) diperoleh dari Direktorat Jenderal Tanaman Pangan. Data tersedia dalam bentuk bulanan tingkat kabupaten yang diperbarui setiap tahun. Setiap kabupaten memiliki data luas tambah puso dan terkena untuk banjir, kekeringan dan serangan OPT untuk tanaman padi, jagung dan kedelai. Dalam SI Katam Terpadu, enam jenis OPT tanaman padi yang tersedia datanya adalah wereng batang coklat, tikus sawah, penggerek batang padi, tungro, blast, dan kresek atau hawar daun bakteri (HDB). Data runut waktu OPT jagung meliputi ulat grayak, penggerek tongkol, lalat bibit, tikus, penggerek batang, dan bulai jagung. Data OPT kedelai yang tersimpan dalam SI Katam Terpadu adalah data ulat jengkal, tikus, penggerek polong, ulat grayak, penggulung daun, dan lalat kacang kedelai.

Status tingkat kerawanan banjir dan kekeringan ditentukan dengan menggunakan indeks banjir (IDB), dan indeks kekeringan (IDK) per kabupaten. Apabila akumulatif IDB dan IDK selama

setahun nilainya > 75% dikelompokkan sangat berat, 50-75% dikelompokkan berat, 25-50% dikelompokkan sedang, dan < 25% dikelompokkan ringan. Status wilayah setiap kabupaten yang terkena OPT dianalisis secara terpisah untuk 6 jenis OPT, yaitu wereng batang coklat, tikus sawah, penggerek batang padi, tungro, blast, dan kresek atau hawar daun bakteri (HDB). Untuk analisis penentuan daerah endemis OPT parameter yang digunakan adalah klasifikasi dari rata-rata terkena, rata-rata puso, ratio puso/terkena, dan frekuensi serangan. Daerah endemis ditentukan dengan menggunakan metode klasifikasi kisaran sama (equal range), dan diperoleh empat batasan kisaran kelompok data yaitu kelas yang tidak terkena (aman), rendah, menengah dan tinggi (Susanti et al. 2013).

Status wilayah setiap kabupaten yang terkena OPT dianalisis secara terpisah untuk 6 jenis OPT, yaitu wereng batang coklat, tikus sawah, penggerek batang padi, tungro, blast, dan kresek atau hawar daun bakteri (HDB). Untuk analisis penentuan daerah endemis OPT parameter yang digunakan adalah klasifikasi dari rata-rata terkena, rata-rata puso, ratio puso/terkena, dan frekuensi serangan. Daerah endemis ditentukan dengan menggunakan metode klasifikasi kisaran sama (equal range), dan diperoleh empat batasan kisaran kelompok data yaitu kelas yang tidak terkena (aman), rendah, menengah dan tinggi (Susanti et al. 2013). Gambar 11 merupakan contoh penyajian informasi tingkat kerawanan banjir dan Gambar 12 menyajikan contoh status OPT dalam SI Katam Terpadu.



Gambar 49. Informasi spasial tingkat kerawanan banjir

#	Kabupaten	Status Banjir	Status Kekeringan	Status OPT Wereng Batang Coklat	Status OPT Tikus Sawah	Status OPT Bantang Padi	Status OPT Tungro	Status OPT Blant
- JAWA BARAT								
	BANDUNG	RAWAN		SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	BANDUNG		SANGAT RAWAN	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	BANDUNG BARAT		SANGAT RAWAN	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	BANDUNG BARAT	RAWAN	SEDANG	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	BEKASI	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RINGAN	RAWAN
	BEKASI			SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN		RAWAN
	BOGOR	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	BOGOR	SEDANG	RINGAN	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	CIAMIS	SANGAT RAWAN	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	CIAMIS	RAWAN		SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	CIANJUR	SEDANG	SANGAT RAWAN	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	CIANJUR	RAWAN	RAWAN	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	CIREBON	RAWAN	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RINGAN	SANGAT RAWAN
	CIREBON	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RAWAN	RAWAN
	GARUT	RINGAN	SANGAT RAWAN	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RAWAN
	GARUT	SEDANG	SEDANG	RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN
	INDRAMAYU	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN		SANGAT RAWAN
	INDRAMAYU	SEDANG	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	RAWAN	SANGAT RAWAN
	KARAWANG		SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN	SANGAT RAWAN

Gambar 50. Informasi tabular tingkat kerawanan serangan OPT

Rekomendasi Varietas dan Kebutuhan Benih

Data varietas padi sawah tersedia pada tingkat kecamatan, tetapi ada yang hanya sampai tingkat kabupaten. Jenis data terdiri atas jenis dan luas sebaran varietas eksisting, serta rekomendasi varietas padi. Rekomendasi varietas padi disesuaikan dengan tingkat kerentanan (ringan, sedang, rawan, sangat rawan), baik bencana banjir, kekeringan maupun OPT. Pada tanaman padi, tersedia rekomendasi varietas untuk jenis OPT tungro, WBC, blast, dan kresek/HDB. Tersedia juga rekomendasi varietas jagung untuk OPT bulai, penggerek batang, ulat grayak, busk tongkol, karat daun, bercak daun, hawar daun, dan busuk pelelah daun. Rekomendasi varietas kedelai untuk OPT lalat kacang, penggiling daun, ulat gerayak, dan ulat jengkal. Data sebaran dan rekomendasi varietas padi sawah, jagung dan kedelai diperoleh dari berbagai sumber, seperti Balai Besar Penelitian Padi (BB Padi), Balai Penelitian Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian (Balitkabi), Balai Penelitian Serealia (Balit Sereal), Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP), Balai Pengawasan dan Sertifikasi Benih (BPSB), dan Dinas Pertanian Tanaman Pangan (Diperta).

Rekomendasi sebaran varietas dan kebutuhan benih disusun berdasarkan kondisi agroekologi setempat dengan faktor pembatas tingkat serangan hama dan penyakit dominan serta tingkat kekeringan dan banjir pada suatu wilayah (Heryani *et al.* 2013). Kebutuhan benih merupakan hasil pengalihan kebutuhan per hektar dengan estimasi luas tanam musim ke depan. Gambar 13 merupakan contoh penyajian informasi rekomendasi varietas dalam SI Katam Terpadu.

#	Kabupaten	Kerentenan	Status Kerentenan	Rekomendasi Varietas	Perkiraaan Luas Arealan Bencana (%)
	INDRAMAYU	BANIR	SANGAT RAWAN	INPARA 4, INPARA 5, KAPUAS, BATANGCHARI, BANYUASIN, TAPUS	11,1
	INDRAMAYU	KEKEINGAN	SANGAT RAWAN	INPARA 10, SITUBAGENIT, SILUGONGGO DAN INPAGO 5	3,2
	INDRAMAYU	WERENG BATANG COKLAT	SANGAT RAWAN	INPARA 13, MEKONGGA	4,1
	INDRAMAYU	TIKUS SAWAH	SANGAT RAWAN		3,7
	INDRAMAYU	PENGGEREK BATANG PADI	SANGAT RAWAN		1,6
	INDRAMAYU	TINGRO			
	INDRAMAYU	BLAST	SANGAT RAWAN	BATANG PIAMAN, SITU PATENGANG, LIMBOTO, DANAU GAUNG, BATUTUGIK	0,8
	INDRAMAYU	KRESEK (BLB)	SANGAT RAWAN	INPARI 1, INPARI 6, INPARI 17, CONDE, ANGKE	3,7
	INDRAMAYU	REKOMENDASI UMUM	SEDANG	MEKONGGA, INPARI 3, INPARI 7, CIMERANG, CONDE, WAY AYO BURU, CIGEULIS, INPARI 10	
	INDRAMAYU	BANIR	SANGAT RAWAN	INPARI 29, INPARI 30, INPARI 1, INPARI 2, INPARI 3, INPARI 4, INPARI 5	5,7
	INDRAMAYU	KEKEINGAN	SANGAT RAWAN	INPARI 10, SITUBAGENIT, SILUGONGGO DAN INPAGO 5	100,0
	INDRAMAYU	WERENG BATANG COKLAT	SANGAT RAWAN	INPARI 13, MEKONGGA	100,0
	INDRAMAYU	TIKUS SAWAH	SANGAT RAWAN		100,0
	INDRAMAYU	PENGGEREK BATANG PADI	SANGAT RAWAN		100,0
	INDRAMAYU	TINGRO	RAWAN	TUKAD UNDA, BONDOWUJO, TUKAD PETANU, TUKAD BALIAN	3,4
	INDRAMAYU	BLAST	SANGAT RAWAN	BATANG PIAMAN, SITU PATENGANG, LIMBOTO, DANAU GAUNG, BATUTUGIK	5,4
	INDRAMAYU	KRESEK (BLB)	SANGAT RAWAN	INPARI 1, INPARI 6, INPARI 17, CONDE, ANGKE	100,0
	INDRAMAYU	REKOMENDASI UMUM		MEKONGGA, INPARI 3, INPARI 7, CIMERANG, CONDE, WAY AYO BURU, CIGEULIS, INPARI 10	

Gambar 51. Informasi tabular rekomendasi varietas

Rekomendasi dan kebutuhan pupuk

Dalam basis data SI Katam Terpadu tersedia dosis dan kebutuhan pupuk, baik tanaman padi, jagung maupun kedelai. Rekomendasi pemupukan padi sawah dalam SI Katam Terpadu merupakan penyempurnaan dari rekomendasi pemupukan NPK padi sawah spesifik lokasi dalam Permentan No.40/Permentan/2007. Dalam Permentan terebut, masih menggunakan pupuk tunggal (urea, SP-36, KCL) dan pupuk organik berbahan baku jerami dan pupuk kandang. Dalam SI Katam Terpadu, dosis anjuran pupuk tunggal telah diperbaiki menjadi dosis pupuk majemuk NPK dengan empat formula, yaitu NPK 15-15-15 (Phonska), NPK 20-10-10 (Pelangi), NPK 30-6-8 (Kujang) dan NPK 15-10-10. Jagung? Kedelai? Kebutuhan pupuk padi, jagung dan kedelai dihitung berdasarkan data potensi luas tanam di setiap kecamatan dikalikan dengan dosis pupuk dimasing-masing jenis pupuk.

Data rekomendasi pupuk yang tersedia pada SI Katam Terpadu telah tersedia sampai pada level kecamatan dan

bervariasi antar musim tanam. Oleh karena itu, selalu dilakukan perbaikan dosis kebutuhan pupuk setiap MT baik padi, jagung, maupun kedelai. Kebutuhan pupuk merupakan hasil pengalian dosis per hektar dengan estimasi luas tanam musim ke depan (Setyorini dan Kasno, 2013). Gambar 14 merupakan contoh penyajian informasi rekomendasi pupuk dalam SI Katam Terpadu.

Mekanisasi Pertanian

SI Katam Terpadu memuat data ketersediaan dan kecukupan traktor dan thresher pada tingkat kecamatan dan secara bertahap dilengkapi untuk seluruh Indonesia. Berdasarkan data ketersediaan dan kecukupan traktor dan *thresher* dilakukan perhitungan optimalisasi dengan menghitung jumlah kebutuhan, kekurangan, dan peluang pemindahan atau peminjaman sementara dari kecamatan tetangga (BBP Mektan, 2012). Gambar 15 merupakan contoh penyajian informasi rekomendasi mekanisasi pertanian dalam SI Katam Terpadu.

REKOMENDASI PUPUK TUNGGAL PADI SAWAH DAN PALAWIJA					
Komoditas	Sumber Bahan Organik	Rekomendasi Pupuk (kg/ha)			
		Urea	SP-36	KCI	
Padi Sawah	Tanpa bahan organik	300	50	50	
Padi Sawah	Kompos Jerami 2 ton/ha	280	50	0	
Padi Sawah	Pupuk Organik 2 ton/ha	275	0	30	
Jagung	-	400	100	75	
Kedelai	Perlu diberikan Rhizobium sp	50	50	75	

REKOMENDASI PUPUK MAJEMUK PADI SAWAH						
Pupuk Majemuk	Paket Pemupukan					
	NPK		NPK+Jerami 2 ton/ha		NPK+Pupuk Organik 2 ton/ha	
	NPK	Urea	NPK	Urea	NPK	Urea
NPK Phonska 15-15-15 (kg/ha)	225	225	200	200	150	250
NPK Pelangi 20-10-10 (kg/ha)	300	225	200	225	175	225
NPK Kujang 30-6-8 (kg/ha)	350	50	300	150	275	150
NPK 15-10-10 (kg/ha)	250	200	200	200	150	250

1. Urea dan KCI diberikan 2 kali (7-10 HST dan 42-50 HST) dan SP-36 diberikan sekaligus pada 7-10 HST.
2. Pupuk majemuk diberikan sekaligus pada 7-10 HST, urea diberikan sesuai dengan kebutuhan (gunakan Bagan Warna Daun -BWD)

Gambar 52. Informasi tabular rekomendasi pupuk

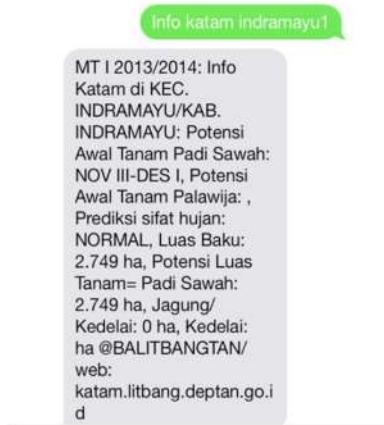
KALENDER TANAM TERPADU
DATA ALAT DAN SARANA PERTANIAN (ALSINTAN)
KECAMATAN : PONJONG (3403070)
KAB/KOTA : GUNUNG KIDUL (3403), PROVINSI : YOGYAKARTA (34)

KOMODITAS : PADI SAWAH				AGROEKOSISTEM : LAHAN SAWAH	
NO	NAMA ALAT DAN SARANA PERTANIAN	KEBUTUHAN (UNIT)	KETERSEDIAAN (UNIT)	KECUKUPAN (%)	LOKASI REKOMENDASI PEMENUHAN
1	TRAKTOR	38	31	82,00	Karangmojo, Wonosari, Playen, Nglipar, Ngawen, Semin

Gambar 53. Informasi tabular rekomendasi traktor

Aplikasi SMS dan Android

Telah dikembangkan sistem deliveri informasi Katam Terpadu melalui sms dan aplikasi berbasis android. Kelebihan sistem delivery dengan sms dapat dilakukan melalui personal handphone masing-masing pengguna yang dihubungkan dengan SMS Center Katam terpadu (08-123-565-1111). Gambar 16 menampilkan contoh jawaban SMS untuk mengetahui informasi kalender tanam.



Gambar 54. Informasi SI Katam Terpadu melalui SMS

Untuk aplikasi android sebagai aplikasi katam terpadu versi ringan yang dapat digunakan melalui tablet atau telpon pintar (smartphone) yang bersistem operasi android. Alamat yang dapat diakses adalah

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.litbang.katam.terpadu> (Gambar 17).



Gambar 55. Informasi SI Katam Terpadu melalui smartphone

Penguatan Kelembagaan

Untuk memudahkan dan mengoptimalkan implementasi Permentan 45/2011 telah dibentuk Tim Katam Pusat dan Gugus Tugas BPTP berdasarkan SK Kepala Balitbangtan. Petunjuk Teknis Gugus Tugas Kalender Tanam Terpadu dan Perubahan Iklim dan Petunjuk Teknis Pengelolaan Stasiun Iklim memuat tugas masing-masing tim memiliki kerangka kerja yang jelas, baik dalam pelaksanaan teknis kegiatan maupun koordinasi dan komunikasi. Setiap kepala BPTP mengeluarkan Surat Tugas untuk masing-masing provinsi.

Tim Katam Pusat bertugas menyiapkan prediksi iklim untuk musim tanam pertama (MT I), musim tanam kedua (MT II) dan musim tanam ketiga (MT III) yang berkoordinasi dengan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Hasil prediksi iklim selanjutnya dikorelasikan dengan informasi kalender tanam setiap kecamatan untuk menentukan waktu tanam, ancaman bencana di lapang, serta rekomendasi teknologi berupa varietas dan pemupukan. Tim Katam Pusat bertanggung jawab penuh dengan pemutahiran dan launching SI Katam Terpadu setiap awal musim tanam (Runtuwu *et al.* 2013).

Gugus Tugas BPTP berfungsi terutama untuk (1) mendukung secara aktif dalam proses penyusunan dan pemutahiran SI Katam Terpadu hingga siap launching, yang dikoordinasi oleh Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSSDLP), (2) melaksanakan sosialisasi, validasi dan verifikasi lapang dalam rangka meningkatkan akurasi informasi SI Katam Terpadu, (3) memantau dan mengevaluasi kejadian dan ancaman kekeringan, banjir, serta eksplorasi OPT, (4) mengidentifikasi sumber daya air, pola tanam, penggunaan varietas, pupuk, dan mekanisasi pertanian, (5) melakukan pengkajian, identifikasi gejala, dan dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian, (6) melakukan prediksi iklim lokal dan identifikasi teknologi adaptif spesifik lokasi (*local wisdom*) di sektor pertanian terhadap

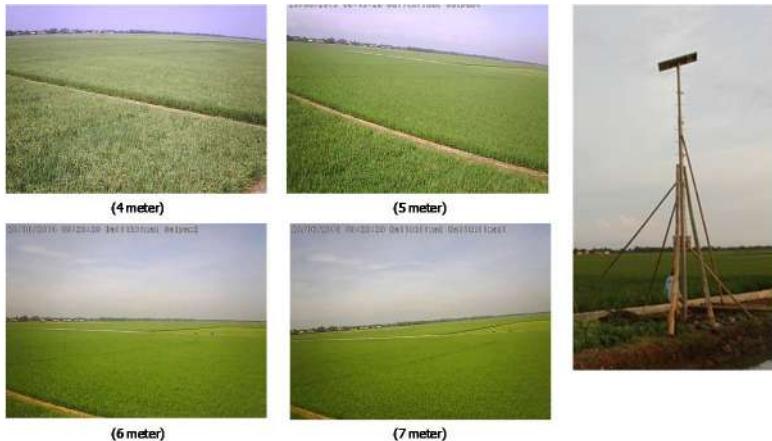
perubahan iklim, serta (7) mengelola stasiun klimatologi Balitbang Pertanian di wilayah kerja BPTP.

Pengembangan Sistem Monitoring *Online*

Telah dilakukan pemasangan sistem monitoring katam terpadu menggunakan *Closed circuit television* (CCTV) di tujuh provinsi dengan jumlah titik pemasangan sebagai berikut: Lampung (4), Banten (6), Jawa Barat (11), Jawa Tengah (11), D.I. Yogyakarta (6), Jawa Timur (10), dan Bali (6), Gambar 18. Pengamatan tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan informasi secara near real time waktu tanam, rotasi tanam, bencana (banjir, kekeringan) dan tindakan budidaya tanaman lainnya. Informasi ini diharakan dapat menjadi masukan untuk peningkatan akurasi informasi katam terpadu. Gambar 19 menunjukkan contoh hasil ujicoba monitoring kondisi tanam dengan menggunakan CCTV pada ketinggian 4, 5, 6, dan 7 meter di Sukamandi. Berdasarkan uji coba ini ditetapkan ketinggian letak kamera CCTV paling ideal adalah 5 meter di atas permukaan tanah (Ramadhani *et al.* 2013).



Gambar 56. Informasi SI Katam Terpadu melalui *smartphone*



Gambar 57. Perbandingan hasil pengamatan pada ketinggian 4, 5, 6, dan 7 meter di BB Padi

Penutup

SI Katam Terpadu merupakan pedoman atau alat bantu yang memberikan informasi spasial dan tabular mengenai prediksi musim, awal tanam, pola tanam, luas tanam potensial, wilayah rawan banjir dan kekeringan, potensi serangan OPT, rekomendasi varietas dan kebutuhan benih, rekomendasi dosis dan kebutuhan pupuk padi, jagung, dan kedelai pada level kecamatan seluruh Indonesia. Katam terpadu dapat diakses melalui www.katam.litbang.deptan.go.id, dan di-update tiga kali setahun yaitu pada bulan Agustus untuk musim tanam pertama, Februari untuk musim tanam kedua, dan April untuk musim tanam ketiga. Deliveri informasi melalui handphone dan *smartphone* serta pengembangan monitoring kalender tanam terpadu merupakan upaya peningkatan inovasi teknologi SI Katam Terpadu.

DAFTAR BACAAN

- Amien, I., 2011. Menuju pertanian tangguh melalui pendekatan Agroekologi. Materi Orasi Pengukuhan Profesor Riset. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 7 April 2011.
- Asadov, H. H., and K. Kh. Ismaylov. 2011. Information method for synthesis of optimal data subsystems designated for positioning, location and remote sensing systems. *Positioning* 2:61-64.
- Bakosurtanal. 2000. Peta digital batas administrasi Indonesia Skala 1:250.000. Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional. Bogor.
- BBSDLP. 2000. Peta digital sebaran sawah Indonesia. Skala 1:250.000. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- BPS. 2013. Peta indeks desa Indonesia. Badan Pusat Statistik. Jakarta. Tidak dipublikasikan.
- BMKG. 2013. Prakiraan Musim Hujan 2013/2014 di Indonesia. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- BBP Mektan. 2012. Pengembangan Model Pemetaan Mekanisasi Produksi Padi di Lahan Sawah. Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian. Laporan Akhir Penelitian. Banten.
- Edirisinghe N. 2004. A Study of Food Grain Market in Iraq. Document of the World Bank & United Nations World Food Program. Reconstructing Iraq. Working Paper No. 3. June 2004. 72p.

FAO. 1996. Guidelines: Agro-ecological Zoning. FAO Soils Bulletin 73. FAO, Rome.

Gunawardhana, L. N., and S. Kazama. 2012. Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes Global and Planetary Change 86–87:66–78.

Kartiwa B., H. Sosiawan, H. Heryani. 2013. Rekomendasi Pengelolaan Sumberdaya Air secara Spasial dan Temporal untuk Mendukung Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.

<http://senijawakuno.blogspot.com/2012/12/tanda-dan-ciri-pranata-mangsa-warisan.html>. Akses tanggal 12 Agustus 2013.

Heryani N., Apriyana, Y., I. Las, W. Estiningtyas, Haryono. 2013. Model rekomendasi varietas dan kebutuhan benih untuk mendukung sistem informasi kalender tanam terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.

Kang, Y., S. Khan, and X. Ma. 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. Progress in Natural Science. Vol. 19(12): 1665-1674.

Las, I., A. Unadi, K. Subagyono, H. Syahbuddin., E. Runtunuwu. 2007. Atlas Kalender Tanam Pulau Jawa. Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.

Las, I., A. Unadi, H. Syahbuddin, E. Runtunuwu. 2008. Atlas Kalender Tanam Pulau Sumatera. Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.

- Las, I., A. Unadi, H. Syahbuddin, E. Runtunuwu. 2009a. Atlas Kalender Tanam Pulau Kalimantan. Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Las, I., A. Unadi, H. Syahbuddin, E. Runtunuwu. 2009b. Atlas Kalender Tanam Pulau Sulawesi. Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Las, I., A. Unadi, H. Syahbuddin, E. Runtunuwu. 2010. Atlas Kalender Tanam Wilayah Indonesia Bagian Timur Skala 1:1.000.000 dan 1:250.000. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Naylor R.L., D. S.Battisti, D.J. Vimont, W.P. Falcon, M.B. Burke. 2007. Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. PNAS 104(19):7752-7757.
- Pramudia, A., I. Las, H. Syahbuddin, E. Susanti, K. S. Hariyanti, Haryono. 2013. Model Integrasi Prediksi Iklim dan Awal Tanam untuk Mendukung Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Peng, D, A. R., Huete, J. Huang, F. Wang, and H. Sun. 2011. Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13(1):13-23.
- Ramadhani, F., E. Runtunuwu, H. Syahbuddin. 2012. Pengembangan sistem teknologi informasi kalender tanam terpadu berbasis Web. Disampaikan kepada Jurnal Informatika Pertanian pada November 2012.

Ramadhani, F., E. Runtunuwu, H. Syahbuddin. 2013. Pengembangan Sistem Kalender Tanam Terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.

Runtunuwu E., A. Kondoh. 2008. Assessing global climate variability and change under coldest and warmest periods at different latitudinal regions. *Indonesian Journal of Agricultural Science* 9(1), 7-18.

Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani, dan W.T. Nugroho. 2012a. Dinamika kalender tanam Padi di Sulawesi. *Majalah Pangan* 21(2)113-124.

Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani. 2012b. Dinamika waktu tanam tanaman padi Pulau Kalimantan. *Jurnal Agronomi* 40(1):8-14.

Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani, A. Pramudia, D. Setyorini, K. Sari, Y. Apriyana, E. Susanti, Haryono, P. Setyanto., I. Las, M. Sarwani. 2012c. Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu: Status Terkini dan Tantangan Kedepan. *Jurnal Sumber Daya Lahan* 6(2):67-78.

Runtunuwu E., Syahbuddin H., I. Amien, I. Las. 2011a. New cropping calendar map development for paddy rice field in Java Island. *Ecolab* 5(1):1-14.

Runtunuwu E., H. Syahbuddin, W. T. Nugroho. 2011b. Deliniasi kalender tanam tanaman padi sawah untuk antisipasi anomali iklim mendukung program peningkatan produksi beras nasional. *Majalah Pangan* 20(4):341-356.

- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani, A. Pramudia, D. Setyorini, K. Sari, Y. Apriyana, E. Susanti, Haryono. 2013a. Inovasi Kelembagaan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu Mendukung Adaptasi Perubahan Iklim untuk Ketahanan Pangan Nasional. *Jurnal Pengembangan Inovasi Pertanian* 6(1):44-52.
- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani. 2013b. Kalender tanam sebagai instrumen adaptasi perubahan iklim. Dalam Kajian strategi kebijakan sektor pertanian menghadapi perubahan iklim. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Setyorini, D., A. Kasno. 2013. Model Rekomendasi dan Kebutuhan Pupuk untuk Mendukung Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Surfleet, Ch. G., and D. Tullos. 2013. Variability in effect of climate change on rain-on-snow peak flow events in a temperate climate. *Journal of Hydrology* 479:24-34.
- Susanti, E., I. Las, H. Syahbuddin, Y. Apriyana, B. Kartiwa, Sucantini. 2013. Model peringatan dini bencana banjir, kekeringan dan OPT untuk mendukung sistem informasi kalender tanam terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Syahbuddin H., M.D. Yamanaka, E. Runtunuwu. 2004. Impact of Climate Change to Dry Land Water Budget in Indonesia: Observation during 1980-2002 and Simulation for 2010-2039. Presented in Asia Oceania Geosciences Society. 2nd Annual Meeting (AOGS 2005). Singapore. June 2005.

- Wiliamson, D. 2001. Using remotely sensed data for humanitarian relief. *Geography Bulletin* 33(1):15-18
- Yang, Y., L. T. Wilson, J. Wang, and X. Li. 2011. Development of an integrated cropland and soil data management system for cropping system applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 76(1):105-118.
- Zecca, A., and L. Chiari. 2012. Lower bounds to future sea-level rise. *Global and Planetary Change* 98–99:1-5.

BAB 3. PEMANFAATAN PREDIKSI MUSIM UNTUK PENGELOLAAN RISIKO PERTANIAN

Elza Surmaini

Pendahuluan

Pertanian merupakan salah sektor yang paling rentan terhadap variabilitas dan perubahan iklim. Sedikit saja terjadi gangguan iklim akan berdampak besar terhadap produksi pertanian. Pertanian juga masih menjadi mata pencarian sebagian besar penduduk Indonesia, terutama di daerah pedesaan dan pesisir pantai. Petani Indonesia sebagian besar masih hidup di bawah garis kemiskinan, karena kepemilikan lahan yang sempit, atau tidak mempunyai lahan sehingga menjadi penggarap dan buruh tani. Gangguan iklim tidak saja mengakibatkan kerugian karena gagal panen, tetapi juga mengancam kehidupan petani.

Bagi petani, pada setiap musim tanam berbagai pertanyaan bergulat dalam pikiran mereka. Kapankah musim hujan akan datang? Apakah akan cukup hujan selama musim tanam? Apakah akan ada ledakan hama dan penyakit? Bagaimana dengan harga pada panen yang akan datang? dan lain sebagainya (Naylor dan Mastrandrea, 2009). Bagi pengambil kebijakan pertanyaan yang muncul adalah strategi apa yang harus disiapkan? Berapa dana

yang harus alokasi jika terjadi kerusakan atau puso akibat iklim ekstrim?, Daerah mana yang berisiko tinggi dan harus diprioritaskan?. Berbagai pertanyaan tersebut dapat dijawab apabila tersedia informasi prediksi musim (*seasonal prediction*) yang akurat 6 sampai 9 bulan ke depan.

Dari sudut pandang dampak keragaman dan perubahan iklim terhadap pertanian, prediksi musim juga merupakan kunci dari perencanaan adaptasi secara otonomi tanpa perlu melakukan perubahan mendasar pada praktik budidaya. Misalnya, pemilihan komoditas dan pola tanam, penentuan waktu tanam, pengaturan irigasi dan pemupukan. Dalam praktik budidaya pertanian proses pengambilan keputusan memerlukan prediksi iklim yang handal.

Tulisan ini menguraikan tentang: (i) Status terkini perkembangan prediksi musim berbasis *Global Circulation Model* (GCM), (ii) Potensi dan kendala pemanfaatan prediksi berbasis GCM, (iii) Pemanfaatan prediksi musim untuk menentukan waktu tanam, (iv), Prediksi probabilistik : interpretasi dan pengambilan keputusan, dan (v) Penutup.

Status Terkini Perkembangan Prediksi Musim Berbasis GCM

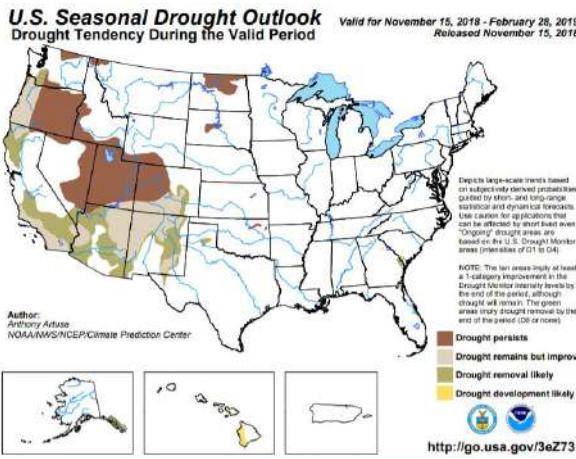
Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan prediksi cuaca dan iklim dalam skala ruang dan waktu telah meningkat pesat. Revolusi dalam prediksi cuaca dan iklim, disebabkan oleh perkembangan pesat teori dan pemahaman mengenai prediktabilitas cuaca dan iklim di satu sisi dan perkembangan luar biasa teknologi super-komputer di sisi lain. Menurut Lewis (2005) prediksi cuaca dan iklim memasuki era baru dengan berkembangnya prediksi yang probabilistik dan kuantitatif sehingga dapat dimanfaatkan dalam sektor komersil dan kemanusiaan.

Perkembangan pesat teori prediksi cuaca dan iklim merupakan kombinasi dari pemanfaatan satelit resolusi tinggi dan

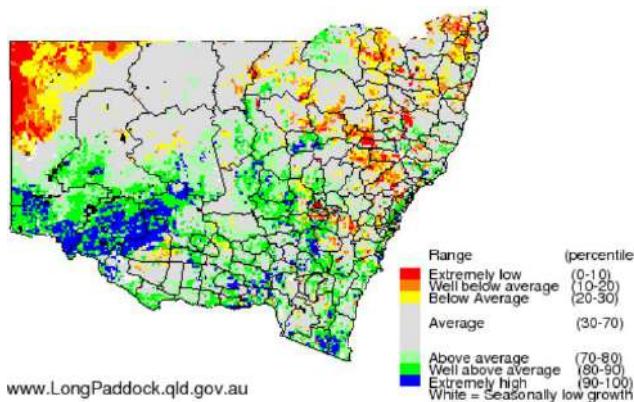
perkembangan teori *Numerical Weather Prediction* (NWP) atau prediksi cuaca numerik. Model NWP dapat mengeksplorasi komputer untuk menggambarkan kondisi atmosfer secara lebih realistik. Bersamaan dengan itu, sektor utama ekonomi dunia (termasuk pertanian, energi, transportasi, dan pasokan air) telah meningkatkan penggunaan prakiraan cuaca dengan mengintegrasikan prediksi iklim dalam pengambilan keputusan yang operasional.

Prediksi musim berbasis harian dengan *lead time* 6-9 bulan menggunakan model iklim global saat ini sudah banyak dikembangkan dan digunakan untuk prediksi operasional. Sejumlah Pusat Prediksi Iklim Global menghasilkan prediksi musiman operasional skala global yang dapat diakses dan *downscale* untuk penggunaan lokal (Palmer et al., 2004), diantaranya adalah *National Centers for Environment Prediction* (NCEP) dengan *Climate Forecast System version 2* (CFSv2) dan *European Center for Medium- Range Weather Forecast* (ECMWF) dengan *Development of European Multimodel Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction* (DEMENTER).

Keluaran prediksi musim telah dimanfaatkan oleh beberapa negara untuk prediksi operasional, misalnya prediksi kekeringan untuk wilayah Amerika Serikat (Gambar 2), prediksi potensi hijauan untuk ternak di Australia (Gambar 3), prediksi banjir di Swedia dan prediksi awal musim di Australia, India dan beberapa negara di Eropa.



Gambar 58. Prediksi kekeringan operasional di Amerika yang secara rutin dikeluarkan oleh NOAA. Diakses dari <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/> tanggal 18 November 2018.



Gambar 59. Prediksi operasional produksi hijauan ternak di New South Wales, Australia. Diakses dari <https://www.longpaddock.qld.gov.au/aussiegrass/> tanggal 18 November 2018.

Di Indonesia prediksi yang operasional adalah prakiraan musim yang dikeluarkan oleh Badan Geofisika, Klimatologi dan Meteorologi (BMKG). Prakiraan tersebut masih bersifat deterministik dalam agregat satu musim (bulan) sehingga sulit digunakan untuk kebijakan operasional yang lebih spesifik. Selain itu, prediksi deterministik dapat lebih mudah dipahami pengguna namun jika prediksi tersebut salah akan menimbulkan kerugian yang tidak sedikit.

Prediksi musim seharusnya disampaikan dalam bentuk yang probabilistik, karena ketidakpastian yang melekat dalam prediksi iklim. Selain itu, prediksi musim untuk sektor pertanian memerlukan *lead time* yang lebih panjang sekitar 2-4 bulan, sehingga cukup waktu tersedia bagi pengambil kebijakan sampai petani untuk menyusun strategi budidaya dan mempersiapkan sarana dan prasarana pertanian untuk musim tanam yang akan datang (Surmaini *et al.*, 2015). Prediksi probabilistik dengan *lead time* yang memadai untuk sektor pertanian dapat dilakukan dengan memanfaatkan prediksi iklim berbasis GCM.

Perlu upaya yang intensif untuk dapat memanfaatkan prediksi iklim yang pada tingkat global saat ini sudah sangat maju di Indonesia. Di lain pihak, diperlukan upaya untuk meningkatkan pemahaman pengguna mengenai konsep ketidakpastian dalam prediksi. Dengan ketidakpastian yang dapat dikuantifikasi, maka pengambilan keputusan dapat dilakukan dengan lebih baik.

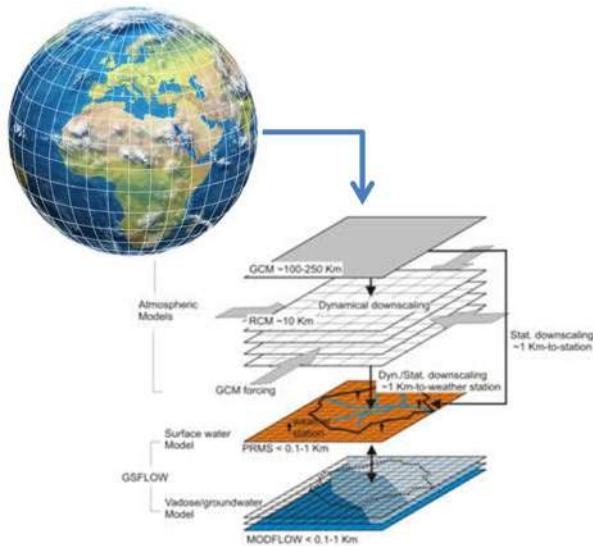
Potensi dan Kendala Pemanfaatan Prediksi Musim Berbasis GCM

Model iklim GCM didasarkan pada prinsip-prinsip fisika dan kimia dan diselesaikan secara numerik untuk menghasilkan fenomena-fenomena yang teramat dalam iklim bumi di masa sekarang maupun masa lalu. Terdapat keyakinan yang cukup besar bahwa GCM juga mampu menyediakan estimasi kuantitatif

yang kredibel bagi iklim di masa yang akan datang, terutama pada skala benua atau yang lebih luas (Randall, 2007).

Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan GCM adalah terkait dengan resolusi, akurasi dan ketidakpastian. Keluaran GCM memiliki resolusi yang rendah dan tidak mampu merepresentasikan proses-proses yang skalanya lebih kecil (Smith and Costa, 2018). Untuk memperoleh informasi skala regional dan lokal dari keluaran GCM, dibutuhkan teknik *downscaling* (Rummukainen, 2010). Akurasi atau keandalan prediksi sangat diperlukan untuk menyakinkan pengguna. Berbagai teknik statistik dapat digunakan untuk mengetahui akurasi prediksi. Adapun ketidakpastian tidak dapat dikurangi, tetapi dapat dikuantifikasi dengan menggunakan teknik ansambel.

Untuk memperoleh informasi skala regional dan lokal dari keluaran GCM, dibutuhkan proses *downscaling* menangkap perubahan variabel iklim lokal yang tidak dapat diestimasi dari prediksi GCM, karena dampak tersebut secara spasial bervariasi dalam orde kurang dari 10 km (Hidalgo *et al.*, 2008). Dua pendekatan utama dalam teknik *downscaling* adalah *dynamical downscaling* (DD) dan *statistical downscaling* (SD). DD *Dynamical downscaling* menggunakan model regional (*Regional Climate Model*, RCM) dengan resolusi yang lebih tinggi. Namun metode ini membutuhkan sumber daya komputasi besar dan waktu yang lama. SD menggunakan metode statistik untuk memperoleh hubungan empiris antara keluaran GCM dan data pengamatan yang digunakan untuk mendapatkan kondisi iklim skala lokal. Metode SD lebih banyak digunakan karena memerlukan sumber daya komputasi yang lebih rendah dan waktu kalkulasi yang jauh lebih pendek. Ilustrasi proses *downscaling* GCM disajikan pada Gambar 4.

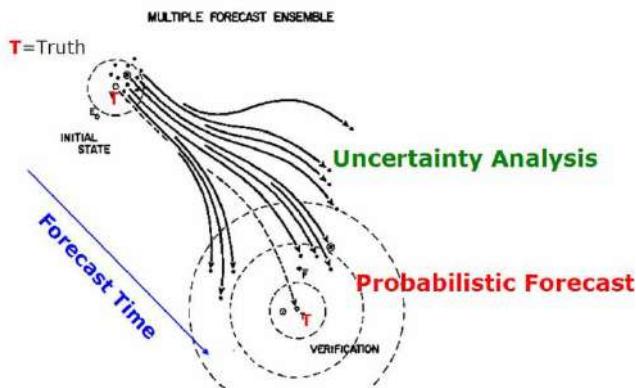


Gambar 60. Proses *downscaling* keluaran model GCM
 (sumber:<http://epscorspo.nevada.edu/>)

Akurasi prediksi perlu disampaikan karena terkait dengan tingkat kepercayaan pengguna. Akurasi prediksi dapat diuji dengan melakukan validasi dengan menggunakan prediksi *hindcast*. Berbagai metode statistik telah dikembangkan untuk menguji akurasi prediksi seperti koefisien korelasi, *root mean square error* untuk prediksi kontinu dan *metode Relative Operating Characteristics* (ROC), *Heidke Skill Score* (HSS) untuk prediksi dikotomi.

Ketidakpastian prediksi dapat dikuantifikasi jika menggunakan teknik ansambel. Prediksi ansambel terdiri dari beberapa (biasanya 5 sampai 100) hasil model prediksi cuaca numerik, yang berbeda kondisi awalnya dan/atau representasi numerik dari atmosfir yang merupakan dua sumber utama dari ketidakpastian prediksi (Gneiting and Raftery, 2005; Panagoulia

and Lourmas 2006). Dengan pengolahan secara statisitik, teknik ansambel akan menghasilkan prediksi probabilistik (Toth et al., 2001; Kharin dan Zwiers, 2001) sehingga dapat digunakan dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait risiko iklim. Ilustrasi prediksi probabilistik disajikan pada Gambar 5.



Gambar 61. Ilustasi prediksi probabilistik (sumber: www.chrs.web.uci.edu)

Pemanfaatkan Prediksi Musim Untuk Menentukan Waktu Tanam Berdasarkan Potensi Hasil

Ketidakpastian iklim 1-2 musim ke depan sangat berisiko dalam pertanian, karena dapat menyebabkan kegagalan panen apabila tidak diantisipasi dengan baik. Apabila prediksi iklim 6-9 bulan ke depan yang akurat tersedia, maka penyesuaian strategi usahatani dapat dilakukan melalui perencanaan waktu tanam dan intervensi teknologi budidaya untuk mendapatkan hasil yang optimal (Meinke and Stone, 2005; Cabrera et al., 2009).

Menurut Laux et al. (2010) penyesuaian waktu tanam merupakan cara yang paling murah dan efisien untuk meningkatkan produktivitas tanaman, menstabilkan atau bahkan memperkuat ketahanan pangan. Prediksi waktu tanam dan hasil

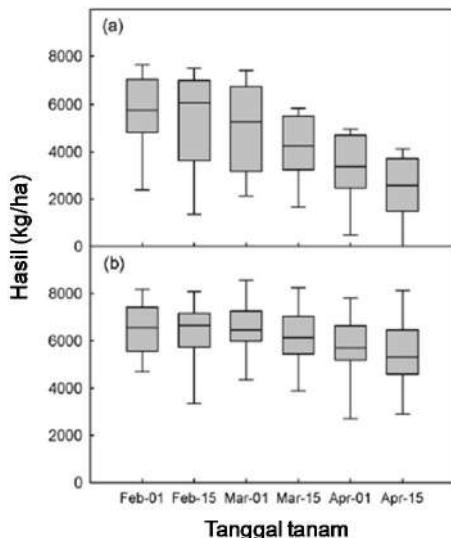
sangat penting bagi petani untuk merencanakan praktik budidaya seperti pemilihan komoditas, varietas, perencanaan irigasi, pupuk, dan sarana pertanian lainnya. Bagi pengambil kebijakan, prediksi waktu tanam diperlukan menyusun strategi distribusi benih dan pupuk. Prediksi hasil diperlukan untuk mengetahui daerah yang mengalami surplus atau defisit, sehingga dapat digunakan untuk menyusun strategi distribusi dan stok padi. Menurut Hansen dan Indeje (2004), informasi prediksi iklim seharusnya diterjemahkan dalam bentuk informasi hasil dan alternatif teknologi budidaya yang tepat pada musim tanam yang akan datang.

Lebih lanjut Hansen *et al.* (2006) menyatakan bahwa produksi pertanian merupakan fungsi dinamik, interaksi non-linier antara cuaca, tanah, dinamika transpor makanan dan fisiologi tanaman hari per hari. Model simulasi tanaman dinamik dapat mengintegrasikan semua parameter tersebut dalam interval harian. Model simulasi tanaman sebagai alat pengambil keputusan secara luas telah digunakan oleh para pakar dan telah divalidasi di berbagai wilayah dunia (contohnya; Jones *et al.*, 2003; Balkovič *et al.*, 2013; Kuntjoro *et al.* 2015). Model simulasi tanaman juga telah digunakan oleh para pakar pertanian untuk mengevaluasi dampak variabilitas iklim dan perubahan iklim terhadap produksi pertanian (Baigorria *et al.*, 2007; Challinor dan Wheeler, 2008; Weber *et al.*, 2014; Coorbels *et al.*, 2018).

Untuk perencanaan waktu tanam yang operasional, berbagai penelitian telah dikembangkan dengan mengintegrasikan keluaran prediksi musiman dengan model simulasi tanaman (Ines dan Hansen, 2006; Shin *et al*, 2009; Surmaini *et al.*, 2018). Sivakumar dan Motha (2007) menekankan perlu upaya lebih aktif dari para ahli agrometeorologi untuk menggunakan prediksi musiman dalam perencanaan dan operasional pertanian.

Salah satu contoh aplikasi penentuan waktu tanam berdasarkan estimasi hasil adalah memprediksi produksi gandum di Eropa dengan mengintegrasikan keluaran prediksi multi-model ansambel DEMETER dan ERA-40 dengan model simulasi tanaman

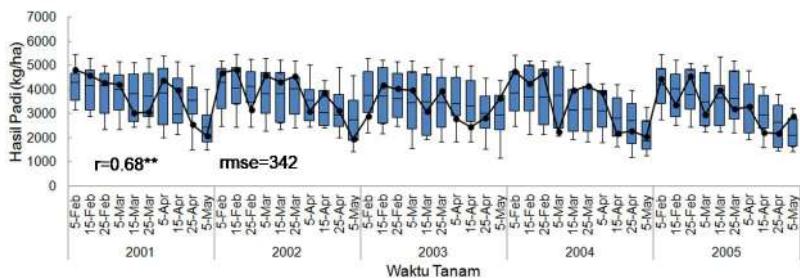
WOFOST. Hasil prediksi probabilistik hasil gandum ini cukup akurat dan telah dipertimbangkan untuk dijadikan salah satu *output* prediksi yang operasional (Palmer *et al.*, 2004; Lizumi *et al.* 2018). Salah satu contoh aplikasi penentuan waktu tanam berdasarkan prediksi hasil di Brazil disajikan pada Gambar 6 (Soler *et al.*, 2007).



Gambar 62. Hasil simulasi tanaman jagung dengan berbagai tanggal tanam pada a) lahan tada hujan dan b) lahan irigasi di Piracicaba, Brazil (sumber: Soler *et al.*, 2007).

Di Indonesia penentuan waktu tanam operasional berdasarkan prediksi hasil belum banyak dikembangkan. Penelitian yang mengintegrasikan data *reforecast* prediksi musiman ansambel dengan model simulasi tanaman dikembangkan oleh Surmaini *et al.* (2018). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Integrasi prediksi curah hujan musiman dengan basis data simulasi produktivitas padi, menggunakan metode analog, menghasilkan informasi probabilistik yang dapat digunakan untuk pengambilan

keputusan yang lebih baik dalam menentukan waktu tanam. Contoh prediksi hasil padi sawah tada hujan di Kabupaten Indramayu disajikan pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan secara konsisten bahwa mundurnya tanggal tanam MK1 sampai dasarian 3 bulan Maret menyebabkan penurunan hasil yang signifikan



Gambar 63. *Box plot* ansambel prediksi dan observasi hasil padi pada beberapa tanggal tanam periode 2001-2005 pada MK1 tada hujan di Kecamatan Arahan, Kabupaten Indramayu (sumber : Surmaini *et al*, 2018)

Prediksi Probabilistik : Interpretasi dan Pengambilan Keputusan

Dalam penggunaan prediksi probabilistik, informasi yang penting perlu diketahui dan dimengerti oleh pengguna adalah ketidapastian prediksi. Kesalahan pengguna dalam menginterpretasikan prediksi dapat berakibat buruk dalam pengambilan keputusan. Gigerenzer et al (2005) melakukan wawancara terhadap pengguna informasi dengan berbagai latar belakang. Contohnya, diprediksi akan terjadi hujan di Boston besok dengan peluang 30%. Dari survei tersebut diketahui bahwa pemahaman pengguna sangat beragam seperti a) akan turun hujan pada 30% wilayah Boston besok, b) Akan terjadi hujan selama 30% dari waktu besok di Boston, 3) Terdapat 30% persen peluang akan terjadi hujan di suatu tempat di Boston besok, dan

d) pada semua lokasi di Boston akan terjadi hujan besok dengan peluang 30%. Dan jawaban yang benar adalah d).

Berbagai studi yang dilakukan di berbagai negara yang telah menggunakan prediksi probabilistik seperti Amerika, Afrika Selatan, dan Australia, dan beberapa negara Eropa menunjukkan bahwa terdapat kesenjangan dalam pemahaman yang diberikan oleh lembaga pelayanan jasa meteorologi (Blench, 1999). Berbagai permasalahan diantaranya adalah kegagalan dalam menterjemahkan *output* prediksi GCM ke dalam bentuk prediksi musiman, selain itu juga bentuk informasi yang diperlukan oleh pengguna.

Penggunaan prediksi iklim ansambel mempunyai beberapa keuntungan dibanding prediksi iklim tunggal. Pertama, prediksi ansambel memberikan pilihan tingkat probabilitas sesuai kebutuhan pengguna, dan dengan akurasi prediksi yang lebih baik. Dengan prediksi ansembel, pengguna dapat menentukan sendiri tingkat probabilitas yang akan menjadi keputusan untuk menggunakan atau tidak menggunakan prediksi tersebut. Sebagai contoh, peluang akan terjadi hujan adalah 80%, maka pengguna dengan cost-lost ratio 0.8 atau lebih rendah akan memutuskan untuk menggunakan prediksi, sedangkan pengguna dengan cost-lost ratio diatas 0.8 akan mengambil keputusan tidak akan menggunakan prediksi tersebut.

Penutup

Di tingkat global, informasi prediksi iklim berkembang cukup pesat selama dekade terakhir dan memberikan layanan yang dapat memenuhi kebutuhan sektor pertanian. Berbagai pusat prediksi iklim mengeluarkan prediksi iklim musiman yang dapat dengan mudah diakses oleh pengguna. Namun untuk penggunaan dalam skala lokal perlu dilakukan proses downscaling terlebih dahulu.

Di Indonesia pemanfaatan prediksi musiman berbasis GCM yang bersifat probabilistik masih sangat terbatas dan belum

digunakan dalam prediksi operasional. Berbagai kendala yang menyebabkan hal ini terjadi antara lain 1) keterbatasan sumberdaya manusia yang mampu mengolah data tersebut menjadi lebih informatif, 2) sistem komputasi dan kapasitas penyimpanan data yang masih rendah, 3) masih rendahnya pemahaman pengguna mengenai konsep prediksi probabilistik. Padahal informasi prediksi ansembel ini sangat bermanfaat bagi sektor pertanian karena berbagai prediksi tersedia dalam bentuk data harian sampai 9 bulan ke depan.

Pada tingkat nasional perlu suatu *interface* untuk menterjemahkan prediksi musiman iklim tersebut sesuai kebutuhan sektor pertanian. Berbagai upaya dapat dilakukan untuk mendapatkan prediksi dengan skala lokal yang andal, dan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Upaya tersebut dapat dilakukan tahap sebagai berikut : a) melakukan *downscaling* untuk mendapatkan resolusi yang lebih tinggi, b) mengolah informasi tersebut menjadi lebih mudah diaplikasi oleh petani misalnya menjadi prediksi kejadian kekeringan atau banjir, prediksi produksi, dan prediksi waktu tanam, c) menterjemahkan informasi tersebut dalam bahasa yang mudah dipahami oleh pengguna, dan e) meningkatkan aksesibilitas pengguna untuk mendapatkan informasi tersebut misalnya membuat pusat layanan informasi iklim di setiap kabupaten, memberikan prediksi iklim melalui radio dan layanan sms.

Informasi prediksi iklim perlu dilengkapi dengan informasi peluang agar dapat menggambarkan ketidakpastian prediksi. Pada tahap awal interpretasi dan pengambilan keputusan perlu diterjemahkan oleh *forecaster* untuk memberikan informasi yang lebih sesuai dengan kebutuhan pengguna. Oleh karena itu, perlu dibangun satu lembaga yang dapat menterjemahkan prediksi sesuai dengan kebutuhan sektor.

DAFTAR BACAAN

- Baigorria, G.A. 2007. Assessing the use of seasonal climate forecasts to support farmers in the Andean Highlands. In: Sivakumar, M.V.K. and Hansen, J. (Eds.), Climate prediction and Agriculture: Advances and challenges. (pp. 99–110). Springer, Berlin/Heidelberg.
- Balkovič, J., van der Velde, M., Schmid, E., Skalský, R., Khabarov, N., Obersteiner, M., Stürmer, B., Wei, X. 2013. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, upscaling and regional crop yield validation," Agricultural Systems, 120(C): 61-75.
- Blench R. 1999. Seasonal climate forecasting: Who can use it and how should it be disseminated? Nat Resour Perspect 47:1–8. Overseas Development Institute, London. Available at: www.odi.org.uk/nrp/47.html
- Cabrera, V. E., Solis, D., Baigorria, G.A. dan Letson, D. 2009. Managing climate variability in agricultural analysis. In: Long, J. A. and Wells, D. S. (Eds). Ocean Circulation and El Niño: New Research. Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY.
- Challinor A. J., and T. R. Wheeler, 2008: Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. Agric. Forest Meteorol., 148, 343-356.

- Corbeels, M., Berre, D. Rusinamhodzi, L., Ridaura, S.L. 2018. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257 : 46-52
- Gigerenzer, G., Hertwig, R., van de Broek, E., Fasolo, B. and Katsikopoulos, k. 2005. A 30% chance of rain tomorrow. How does the public understanding probabilistic weather forecast. *Risk Analysis* 25:1-7.
- Gneiting, T. dan Raftery, A.E. (2005): Weather forecasting with ensembles methods. *Science*, 310, 248-249.
- Hansen, J.W., Indeje, M., 2004. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 143–157.
- Hansen, J.W., A. Challinor, A. Ines, T. Wheeler, V. Moron. 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Clim Res.* 33: 27–41
- Hidalgo, H. G., Dettinger, M. D., and Cayan, D. R. 2008. Downscaling with constructed analogues: daily precipitation and temperature fields over the United States, California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, CEC-500-2007123.
- Ines, A.V.M., Hansen, J.W. 2006. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 138 (2006) 44–53
- Jones, J.W. , Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, A U., Gijsman, J. dan Ritchie. J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7

- Kharin, V. V. dan Zwiers, F.W. 2001. Skill as function of time scale in ensemble of seasonal hindcast. *Climate Dyn.*, 17, 127–141.
- Koentjoro, B.S. , Sitanggang, I.S, Makarim, A.K. 2015. Model Simulasi dan Visualisasi Prediksi Potensi Hasil dan Produksi Kedelai di Jawa Timur. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 34 (3): 195-201
- Laux, P., Jäckel, G., Tingem, R.M., Kunstmann, H. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon: A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:1258–1271
- Lewis, J. M. 2005. Roots of ensemble forecasting. *Mon. Weather Rev.* 133:1865–85.
- Iizumi, T., Shin, Y., Kim, W., Kim, M., Choi, J. 2018. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Climate Services*, 11: 13–23
- Meinke, H., and Stone, R.C. 2005. Seasonal and interannual climate forecasting: New tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic Change*, 70, 221–253
- Naylor RL, Mastrandrea MD (2009) Coping with Climate Risks in Indonesia Rice Agriculture: A Policy Perspective. In Uncertainty and Environmental Decision Making A Handbook of Research and Best Practice (Filar dan Haure, Eds). Springer.
- Palmer, T.N., A. Alexandri and 23 others. 2004. Development of European Multimodel ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMIETER). *Bulletin of American Meteorological Society* June 2004 : 853-872

- Randal, D. R. (2007). Climate Models and Their Evaluation. In S. D. Solomon, *Change 2007: The Physical Science Basis*Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Rummukainen, M. 2010. State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1), 82–96.
- Shin, D.W., Baigorria, G.A., Lim, Y.-K. , Cocke1, S., LaRow, T. E., O'Brien, J. J. dan W. Jones, J.W. 2009. Assessing Crop Yield Simulations with Various Seasonal Climate Data. *Science and Technology Infusion Climate Bulletin*. 7th NOAA Annual Climate Prediction Application Science Workshop Norman, OK, 24-27 October
- Smid, M., Costa, A.C. 2018. Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban systems, *International Journal of Urban Sciences*, 22:3, 277-307, DOI: 10.1080/12265934.2017.1409132
- Sivakumar, M.V.K., dan Motha R.P. 2007. *Managing Wheather and Climate Risk Management in Agriculture*. Springer. 503p
- Soler, C.M.T, Sentelhas, P., dan Hoogenboom, G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27,165-177.
- Surmaini, E., Hadi, T.W., Subagyono, K. dan Puspito, N.T. 2015. Prediction of drought impact on rice paddies in west Java using analogue downscaling method. *Indones. J. Agric. Sci.* 16 (1): 21-30

- Surmaini, E., Hadi, T.W. Subagyono, K., Syahputra, M.R. 2018. Integrasi Prediksi Musim dengan Model Simulasi Tanaman untuk Penentuan Waktu Tanam Padi. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42 (2): 99-110
- Toth Z, Zhu Y. dan Marchok T. 2001. On the ability of ensembles to distinguish between forecasts with small and large uncertainty. *Wea. Forecasting*, 16: 436–477.
- Webber, H.Gaiser, T. , Ewert F. 2014. What role can crop models play in supporting climate change adaptation decisions to enhance food security in Sub-Saharan Africa?. *Agricultural Systems* 127:161-177
- Weigel A.P., M.A. Liniger and C. Appenzeller 2008: Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts? *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 134, 241-260

BAB 4.

PREDIKSI IKLIM UNTUK PERTANIAN

Woro Estiningtyas dan Aris Pramudia

Pendahuluan

Dalam bidang pertanian, mendapatkan gambaran kondisi curah hujan beberapa periode ke depan merupakan suatu hal yang sangat penting. Hal ini dapat mengantarkan para praktisi melakukan adaptasi dan antisipasi terhadap berbagai kemungkinan resiko yang akan dihadapinya. Dengan demikian keberhasilan pertanian dapat menjadi tergantung pada seberapa bagus model prediksi curah hujan yang digunakan (Allison and Stuart, 1990).

Berbagai teknik pemodelan sudah banyak diterapkan dalam upaya menghasilkan *output* prediksi curah hujan yang baik. Secara garis besar ada dua teknik pendekatan dalam pemodelan prediksi curah hujan, yaitu melalui pendekatan analisis keterkaitan antar waktu, seperti *fourier regression*, *fractal analysis*, *autoregresive, moving average*, dan sebagainya, atau melalui pendekatan analisis keterkaitan ruang atau keterkaitan antara parameter. Beberapa peneliti seperti Dupe (1999), Haryanto (1999), atau Boer, Notodiputro dan Las (1999) pernah melakukan prediksi curah hujan melalui pendekatan analisis keterkaitan waktu, juga Tim Puslittanak (1996) mengembangkan model curah hujan melalui pendekatan analisis keterkaitan ruang atau keterkaitan antara

parameter, seperti hubungan antara curah hujan dengan anomali suhu muka laut di Nino-3,4.

Model-model yang pernah disusun oleh berbagai peneliti umumnya menggambarkan adanya ketidakseimbangan antara analisis deret waktu (*time series analysis*) dengan aspek analisis ruang (*spatial analysis*). Model-model peramalan deret waktu umumnya dilakukan hanya pada satu atau beberapa stasiun yang analisisnya dilakukan di satu-dua titik stasiun, sehingga keterkaitan ruang antara stasiun cenderung tidak dibahas. Sebaliknya pada model-model prediksi yang menggunakan analisis keterkaitan ruang antar stasiun atau analisis hubungan antar parameter umumnya diterapkan pada satu periode tertentu atau terhadap nilai rata-rata dari satu periode yang dibatasi, sehingga keterkaitan deret waktu menjadi terabaikan. Dengan demikian selalu terbuka kesempatan untuk mengembangkan model peramalan curah hujan terutama model peramalan curah hujan yang mampu menerapkan keterkaitan deret waktu sekaligus dengan keterkaitan ruang antar stasiun atau dengan keterkaitan parameter iklim dan parameter fisik lainnya.

Analisis Jaringan Syaraf Tiruan sebagai Alternatif

Konsep Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf (*neural network*, NN) adalah suatu paradigma pengetahuan baru. Hal ini meniru otak manusia dalam proses penyelesaian dan penyimpanan memori. Suatu jaringan syaraf buatan (*artificial neural network*, ANN), sering disebut juga jaringan syaraf tersimulasi (*simulated neural network*, SNN) atau hanya jaringan syaraf (*neural network*, NN), adalah suatu gabungan dari berbagai interkoneksi syaraf buatan yang menggunakan suatu model matematika atau model komputasi untuk memproses informasi yang didasarkan pada pendekatan koneksi terhadap

perhitungan. Inspirasi awal terhadap teknik ini adalah berasal dari pengujian jaringan bioelektrik di dalam otak manusia yang dibentuk oleh neurons dan synapses. Dalam suatu model jaringan syaraf, node sederhana (disebut juga 'neuron', 'neurode', 'PE' atau unsur-unsur pengolahan, atau 'satuan') yang terhubungkan secara bersama membentuk suatu jaringan node yang disebut jaringan syaraf (neural network).

Analisis jaringan syaraf atau NNA sudah banyak diterapkan untuk melakukan prediksi dalam bidang klimatologi dan hidrologi. Lee, Cho dan Wong (1998) melakukan interpolasi spasial untuk menduga curah hujan harian di 367 titik berdasarkan data curah hujan dari 100 stasiun yang terdekat di Swiss. Lee et al. (1998) membagi wilayah studi menjadi empat bagian dan pada setiap bagian disusun model dengan metode yang berbeda. Dua bagian terbesar menggunakan analisis jaringan syaraf dengan teknik perceptron multi-lapisan yang didasarkan hanya pada informasi lokasi, dua bagian yang terkecil menggunakan model linear yang didasarkan pada ketinggian dengan asumsi bahwa wilayah tersebut dipengaruhi oleh kondisi orografik. Hasilnya menunjukkan bahwa model non-linier menggunakan analisis jaringan syaraf menghasilkan prediksi yang sangat baik, sedangkan model linear di daerah yang kecil memberikan hasil prediksi yang jelek.

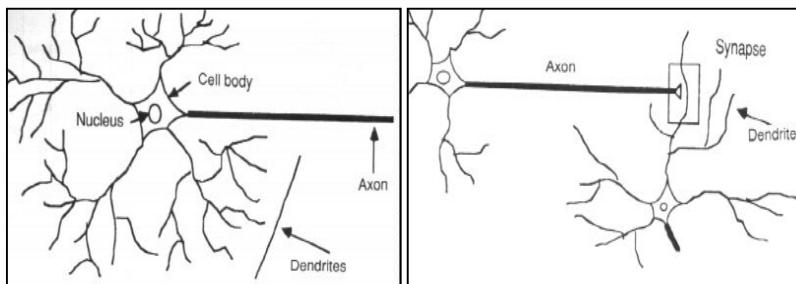
Apriyanti (2005) melakukan studi tentang penggunaan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*) dalam peramalan curah hujan di DAS Saguling Bandung. Teknik pembelajaran yang digunakan adalah jaringan syaraf tiruan propagasi balik standar dengan arsitektur banyak lapis, yaitu satu lapisan input, satu lapisan tersembunyi, dan satu lapisan output. Teknik ini kemudian dibandingkan dengan model yang dibentuk menggunakan metode regresi komponen utama (*principial component regression*, PCR). Hasil studi Apriyanti (2005) menunjukkan bahwa model jaringan syaraf tiruan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan propagasi balik

memperlihatkan hasil terbaik pada jumlah neuron 9 dan laju pembelajaran 0,02. Hasil pembelajaran dengan jaringan syaraf tiruan ini juga menunjukkan hasil validasi yang lebih baik ($R^2 = 74\%$) dibandingkan menggunakan PCR ($R^2 = 63\%$). Setelah dioptimasi hasil validasi model jaringan syaraf tiruan meningkat menjadi $R^2 = 87\%$.

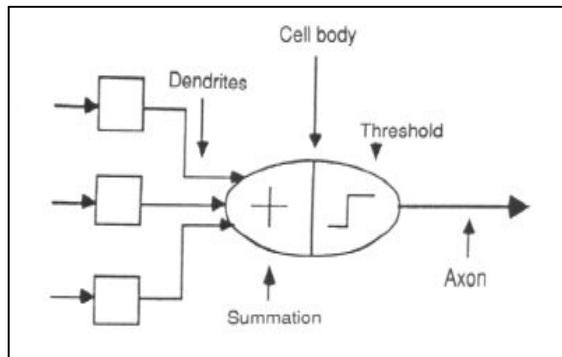
Penerapan Konsep Jaringan Syaraf Tiruan pada Pemodelan

Suatu jaringan syaraf langkah maju (*feedforward*), yaitu suatu jenis jaringan syaraf yang umum, tersusun dari rangkaian simpul-simpul (*nodes*) dan koneksi-koneksi. Simpul ini tersusun dalam suatu lapisan (*layer*). Koneksi berbentuk khas dimana dari setiap simpul dalam lapisan tertentu berkoneksi dengan semua syaraf pada lapisan berikutnya. Dengan cara ini setiap simpul pada lapisan tertentu terhubung dengan semua simpul pada lapisan berikutnya.

Biasanya terdapat paling tidak tiga lapisan pada suatu jaringan langkah maju, terdiri dari lapisan input (*input layer*), suatu lapisan tersembunyi (*hidden layer*), dan suatu lapisan output (*output layer*). Lapisan input memberi umpan kepada lapisan tersembunyi, kemudian lapisan tersembunyi memberi umpan kepada lapisan output. Pengolahan aktual dalam suatu jaringan terjadi didalam simpul pada lapisan tersembunyi dan lapisan output (Gambar 1).

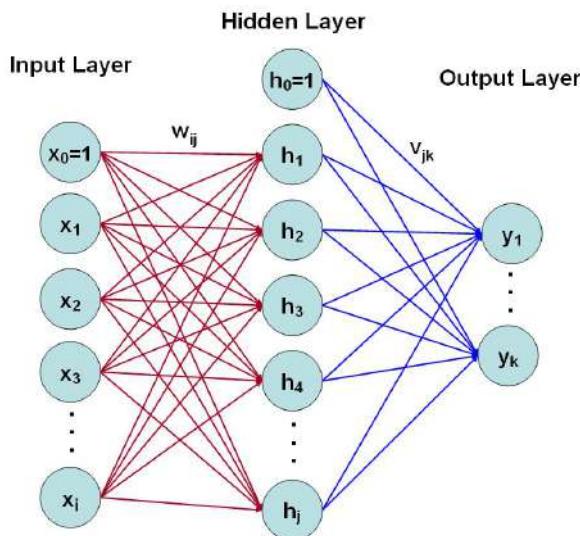


(a) komponen-komponen syaraf (neuron) (b) gambaran mengenai synapses



(c) model jaringan syaraf

Gambar 64. Konsep jaringan syaraf manusia dan model jaringan syaraf tiruan



Gambar 65. Skema neural network

Setiap koneksi antara syaraf memiliki bobot numerik. Apabila jaringan ini bekerja, suatu nilai akan diberikan pada setiap simpul – nilai tersebut akan diberikan oleh operator manusia, dari sensor

lingkungan, ataupun dari beberapa program eksternal. Setiap simpul kemudian memberikan nilai tertentu pada suatu koneksi yang membawanya keluar, kemudian setiap koneksi mengalikannya dengan suatu pembobot. Setiap simpul pada lapisan berikutnya kemudian menerima nilai yang merupakan penjumlahan dari nilai yang dihasilkan dari setiap koneksi, dan dalam setiap simpul dilakukan perhitungan sederhana terhadap nilai tersebut. Secara khas fungsi ini merupakan fungsi sigmoid. Proses ini kemudian berulang, dengan hasil yang dilewatkan pada lapisan sub-sekuensi dari simpul-simpul hingga mencapai simpul pada lapisan *output*.

Kurva *sigmoid* sering digunakan sebagai fungsi transfer karena memperkenalkan non-linearitas ke dalam perhitungan jaringan dengan 'memainkan' aktivitas syaraf dalam kisaran [0,1]. Fungsi sigmoid memiliki kelebihan yaitu memiliki fungsi turunan yang sangat sederhana. Fungsi lain dengan penampilan yang sama yang dapat digunakan adalah fungsi tangen hiperbolik, tanh, yang memainkan aktivasi di dalam kisaran [-1,1]. Jika tidak terdapat non-linearitas dalam pengolahan, jaringan kehilangan banyak daya kemampuan perhitungan, menghasilkan operasi matrik perkalian sederhana dari aljabar linear.

Recurrent network (RNs) adalah model yang memiliki aliran data dua arah. Apabila dalam feed-forward network mengolah data secara linear dari input ke output, maka dalam RNs juga mengolah data dari tahap pengolahan yang lebih akhir ke tahap sebelumnya. Suatu RNs yang sederhana (*simple recurrent network*, SRN) menggunakan suatu jaringan tiga-lapisan, yang ditambahkan satu set 'context units' di dalam lapisan input. Terdapat koneksi dari lapisan tengah (hidden layer) terhadap satuan konteks ini dengan bobot satu. Pada setiap tahap, input dikembangkan dalam dalam suatu cara feed-forward standar, dan kemudian dilakukan aturan latihan (umumnya digunakan *back-propagation*). Koneksi balik yang dihasilkan pada satuan kontek selalu memiliki salinan nilai satuan *hidden* sebelumnya. Dengan

demikian jaringan ini dapat membuat status yang singkat, memungkinkan penyelesaian tugas sebagai pendugaan yang berada di bawah tekanan *multi-layer perceptron* baku.

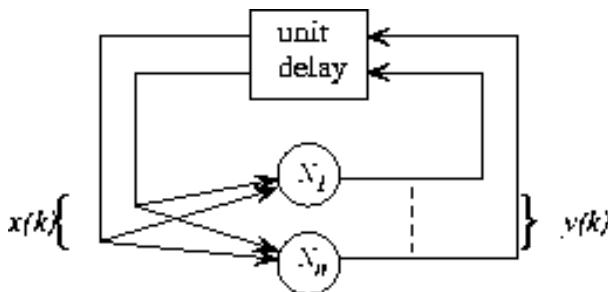
Aturan penyelesaian dalam penetapan bobot pada recurrent neural network sama dengan struktur pada perceptron. Pengolahan sejumlah q perceptron dapat didefinisikan sebagai:

$$Y_q(k) = \sum_{p=1}^n w_q X_p(k) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

dimana output perceptron pada saat bolak-balik adalah $y_q(k)$ dihitung menggunakan n input $x_p(k)$, $1 < p < n$. Fungsi non-linear f didefinisikan sebagai:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{jika } x > 0, \text{ dan} \\ 0, & \text{untuk selainnya} \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

sehingga fungsi menyederhanakan 'cut off' nilai-nilai negatif. Pembalik-balikan dalam jaringan perseptron berarti bahwa perseptron dapat dikombinasikan dengan cara yang kompleks. Bentuk umum struktur *recurrent network* disajikan pada Gambar 3.



Gambar 66. Struktur umum *recurrent network*.

Persamaan umum dalam *recurrent neural network* adalah sebagai berikut:

$$x_i(t+1) = G_i(w, i, x(t)), \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

dimana $x_i(t+1)$ adalah *output* dari satuan ke- i pada waktu $(t+1)$, x adalah vektor status, w adalah matrik penghubung sinoptik, i adalah vektor input eksternal, dan G adalah fungsi non-linear yang dapat diturunkan. *Recurrent neural network* merupakan analisis jaringan syaraf yang menggunakan fungsi waktu. Sehingga dapat dimanfaatkan atau diterapkan pada peubah yang memiliki fungsi waktu, misalnya untuk prediksi curah hujan.

Analisis jaringan syaraf atau NNA sudah banyak diterapkan untuk melakukan prediksi dalam bidang klimatologi dan hidrologi. Lee, Cho dan Wong (1998) melakukan interpolasi spasial untuk menduga curah hujan harian di 367 titik berdasarkan data curah hujan dari 100 stasiun yang terdekat di Swiss. Lee et al. (1998) membagi wilayah studi menjadi empat bagian dan pada setiap bagian disusun model dengan metode yang berbeda. Dua bagian terbesar menggunakan analisis jaringan syaraf dengan teknik *perceptron* multi-lapisan yang didasarkan hanya pada informasi lokasi, dua bagian yang terkecil menggunakan model linear yang didasarkan pada ketinggian dengan asumsi bahwa wilayah tersebut dipengaruhi oleh kondisi orografik. Hasilnya menunjukkan bahwa model non-linier menggunakan analisis jaringan syaraf menghasilkan prediksi yang sangat baik, sedangkan model linear di daerah yang kecil memberikan hasil prediksi yang jelek.

Apriyanti (2005) melakukan studi tentang penggunaan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*) dalam peramalan curah hujan di DAS Saguling Bandung. Teknik pembelajaran yang digunakan adalah jaringan syaraf tiruan propagasi balik standar dengan arsitektur banyak lapis, yaitu satu lapisan input, satu

lapisan tersembunyi, dan satu lapisan output. Teknik ini kemudian dibandingkan dengan model yang dibentuk menggunakan metode regresi komponen utama (*principal component regression*, PCR). Hasil studi Apriyanti (2005) menunjukkan bahwa model jaringan syaraf tiruan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan propagasi balik memperlihatkan hasil terbaik pada jumlah neuron 9 dan laju pembelajaran 0,02. Hasil pembelajaran dengan jaringan syaraf tiruan ini juga menunjukkan hasil validasi yang lebih baik ($R^2 = 74\%$) dibandingkan menggunakan PCR ($R^2 = 63\%$). Setelah dioptimasi hasil validasi model jaringan syaraf tiruan meningkat menjadi $R^2 = 87\%$.

Penyusunan Model Prediksi Curah Hujan dengan Analisis Jaringan Syaraf Tiruan

Bahan Penelitian

Bahan-bahan dan peralatan yang dibutuhkan untuk melaksanakan kegiatan-kegiatan penelitian ini, antara lain:

Data curah hujan bulanan dari tujuh stasiun curah hujan yang mewakili wilayah curah hujan dominan di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut, yaitu Stasiun Baros Serang, Stasiun Kalenpetung Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang, Stasiun Kasomalang Subang, Stasiun Tarogong Garut dan Stasiun Bungbulang Garut, hasil pencatatan periode 1990-2007.

Data indikator anomali iklim, yaitu data anomali suhu muka laut pada zone NINO-3,4 dan data indeks oksilasi selatan hasil pencatatan tahun 1990-2007.

Data curah hujan bulanan, dan data indikator anomali iklim digunakan untuk analisis dan penyusunan model prediksi curah

hujan, dan untuk memprediksi kondisi curah hujan selama periode 2008.

Penyusunan Model

Model prediksi curah hujan adalah model untuk memprediksi data curah hujan bulanan. Keluaran model (Y) adalah nilai curah hujan pada waktu ($t+3$), sedangkan data masukan yang digunakan adalah:

X_1 = kode bulan, bernilai 1 untuk bulan Januari, 2 untuk bulan Februari, dan seterusnya, bernilai 12 untuk bulan Desember,

X_2 = nilai-nilai curah hujan pada waktu (t),

X_3 = nilai-nilai curah hujan pada waktu ($t+1$),

X_4 = nilai-nilai curah hujan pada waktu ($t+2$),

X_5 = nilai-nilai rata-rata anomali suhu muka laut zone Nino-3,4 pada waktu t , dan

X_6 = nilai-nilai indeks ossilasi selatan (SOI) pada waktu t .

Dalam penyusunan model dilakukan coba-coba (*trial and error*) untuk mendapatkan model terbaik yang melibatkan kombinasi antara peubah-peubah X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 .

Langkah-langkah training analisis jaringan syaraf dalam penetapan bobot atau koefisien persamaan adalah sebagai berikut:

Langkah 1. Inisialisasi:

1a. Normalisasi data input x_i dan target t_k kedalam kisaran [0 ... 1]

1b. Penetapan nilai awal untuk semua pembobot w_{ij} untuk matriks X dan v_{jk} untuk matriks H , yaitu matriks antara yang tidak dimunculkan.

Langkah 2. Tahap langkah maju ke depan; Pendugaan Y dugaan (y_k) dan Y aktual (t_k):

2a. Menentukan training set untuk x_i dan t_k .

2b. Menghitung h_j dan y_k melalui persamaan berikut:

$$h_j = \frac{1}{1 + e^{-\beta \sum w_{ij} x_i}}$$

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-\beta \sum v_{jk} h_j}}$$

dimana:

$$\sum w_{ij} x_i = w_{0j} + w_{1j} * x_1 + w_{2j} * x_2 + w_{3j} * x_3 + w_{4j} * x_4 + w_{5j} * x_5 + w_{6j} * x_6$$

$$Y_k = CH_{t+3}$$

subskrip j akan merujuk pada urutan dalam matrik H.

Langkah 3. Penentuan nilai galat E per tahun, sebagai berikut:

$$\forall E = \Sigma p 0.5 (tkp - ykp)^2$$

dimana tkp = nilai target data ke-p dari training node k, dan ykp = nilai dugaan data ke-p dari training node k.

Langkah 4. Proses learning atau training untuk menentukan nilai bobot vjk dan wij dilakukan melalui iterasi menggunakan modul Solver pada piranti lunak MS Excel. Target dari proses iterasi adalah menentukan nilai Y dugaan sedekat mungkin dengan nilai Y aktual sehingga menghasilkan galat yang mendekati nol.

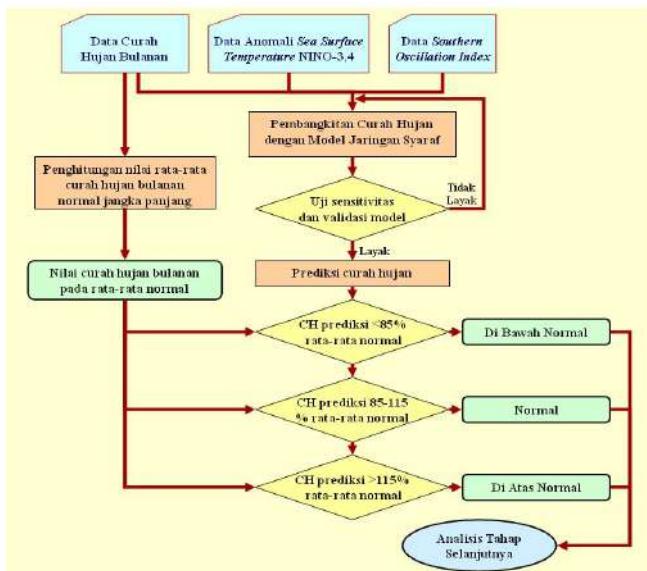
Ketersediaan panjang data curah hujan pada stasiun-stasiun yang dianalisis berbeda satu dengan yang lain, sehingga panjang set data yang digunakan untuk pembentukan model pun menjadi berbeda. Untuk pembentukan model di Stasiun Baros Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang dan Stasiun Kasomalang Subang digunakan data tahun 1990-2002, untuk Stasiun Kalenpetung Serang dan Stasiun Tarogong Garut digunakan data tahun 1992-2002, sedangkan untuk Stasiun Bungbulang digunakan data tahun 1992-1998.

Validasi Model

Validasi model adalah memanfaatkan model yang sudah terbentuk pada tahap pembentukan untuk memprediksi data curah hujan pada periode data yang berbeda dengan periode data pembentukan model. Hasil prediksi tersebut kemudian dibandingkan dengan data aktualnya. Periode data untuk validasi model adalah periode 2003-2007 untuk Stasiun Baros Serang, Stasiun Kalenpetung Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang, Stasiun Kasomalang Subang, dan Stasiun Tarogong Garut, serta periode 2000-2004 untuk Stasiun Bungbulang Garut.

Prediksi

Setelah melalui uji validasi, dan model dianggap layak untuk digunakan, maka model tersebut akan digunakan untuk prediksi curah hujan tahun 2008. Karena tidak terdapat nilai anomali suhu muka laut pada zone NINO-3,4 dan data SOI untuk tahun 2008, maka untuk melakukan prediksi curah hujan 2008 digunakan data anomali SST dan data SOI tahun 2007, dengan asumsi bahwa kondisi curah hujan nilai-nilai indikator penyimpangan iklim tersebut tidak berubah. Hasil prediksi curah hujan kemudian dibandingkan dengan nilai rata-rata normalnya, sehingga dapat diprediksi apakah kondisi curah hujan pada periode 2008 berada pada kondisi rata-rata normal, di bawah rata-rata normal atau di atas rata-rata normal. Batasan kisaran rata-rata normal menggunakan kriteria yang digunakan oleh Badan Meteorologi dan Geofisika, yaitu pada kisaran antara 85-115% dari nilai rata-ratanya (Gambar 4). Nilai-nilai prediksi curah hujan tersebut selanjutnya akan digunakan untuk memprediksi potensi produksi padi.



Gambar 67. Analisis dan pemodelan prediksi curah hujan.

Model Prediksi Curah Hujan di Banten

Model disusun untuk menduga curah hujan tiga bulan ke depan ($Y=CHt+3$). Proses coba-coba (*trial and error*) melibatkan berbagai kombinasi peubah masukan X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 . Pada bagian ini dikemukakan penampilan model-model prediksi curah hujan yang dibentuk dari beberapa peubah masukan sebagai peubah tunggal ataupun kombinasi beberapa peubah, antara lain (1) peubah X_1 , (2) kombinasi peubah X_2, X_3 dan X_4 , (3) peubah X_5 , (4) peubah X_6 , (5) kombinasi peubah X_1, X_2, X_3 dan X_4 dan (6) kombinasi peubah X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 .

Tabel 1 dan Gambar 5 menyajikan rangkuman dan hasil pendugaan curah hujan dari model prediksi curah hujan di Stasiun Baros Serang, yang merupakan stasiun pewakil bagi Wilayah IIA Pantura Banten, menggunakan beberapa kombinasi peubah masukan X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 serta perbandingannya

dengan nilai aktual periode 1990-2002. Ketika model menggunakan data masukan kode bulan atau peubah X1, terlihat bahwa model hanya membentuk hasil prediksi yang sifatnya siklik atau berulang secara periodik dengan nilai yang sama untuk setiap siklusnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,306 mulai dari 0,196 hingga 0,502, ketepatan model 79% dengan kesalahan maksimum sekitar 8,6 mm/bulan.

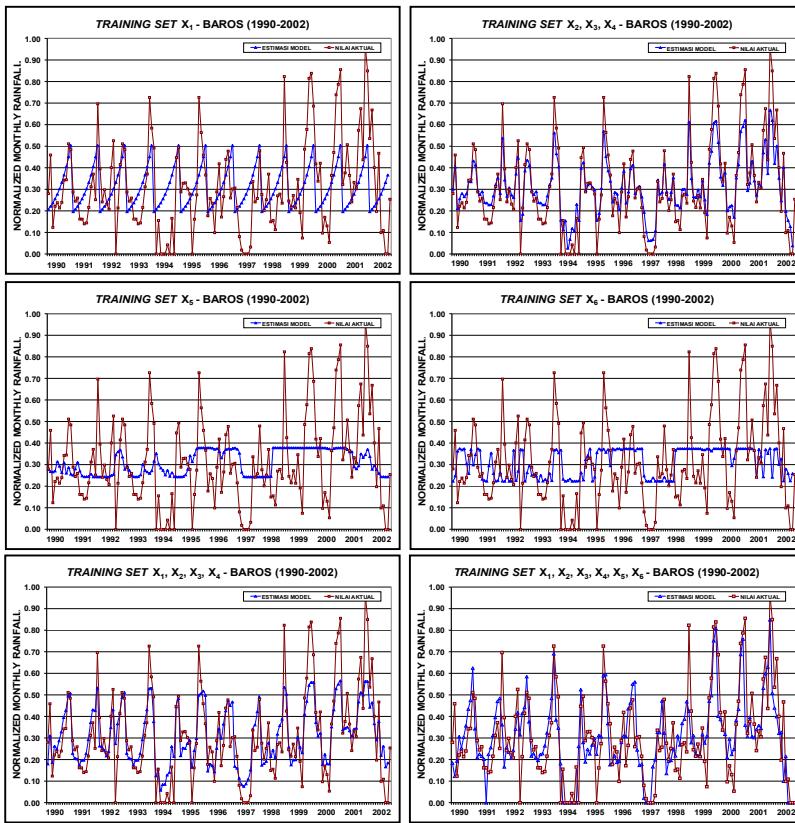
Ketika model menggunakan data masukan peubah X2, X3 dan X4, yaitu nilai-nilai curah hujan pada bulan lalu, dua bulan dan tiga bulan sebelumnya, terlihat bahwa model mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan dengan fluktuasi acak yang seirama dengan nilai aktualnya. Namun pada beberapa nilai-nilai ekstrim hasil prediksi terlihat tidak sebesar nilai aktualnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,638 mulai dari 0,027 hingga 0,665, ketepatan model 84% dengan kesalahan maksimum sekitar 8,0 mm/bulan.

Tabel 17. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan pada beberapa kombinasi peubah masukan di Stasiun Baros Serang (Wilayah II A Pantura Banten).

No	Peubah Masukan	Jumlah Iterasi	Kisaran Prediksi	Ketepatan Model (%)	MSE per Tahun	Kesalahan Maksimum (mm/bulan)
1.	X1	80	0,196 - 0,502 (0,306)	79	0,208	8,6
2.	X2, X3, X4	343	0,027 - 0,665 (0,638)	84	0,164	8,0
3.	X5	32	0,244 - 0,379 (0,135)	76	0,240	9,9
4.	X6	29	0,223 - 0,374 (0,151)	77	0,234	9,7
5.	X1, X2, X3, X4	50	0,058 - 0,566 (0,508)	85	0,150	6,2
6.	X1, X2, X3, X4, X5, X6	332	0,035 - 0,741 (0,706)	90	0,098	4,1

Catatan: Kisaran data aktual 0,000 – 0,848

Ketika model menggunakan data masukan peubah X5 atau X6, yaitu nilai anomali SST tiga bulan sebelumnya atau nilai indeks ossilasi selatan, terlihat bahwa model hanya menghasilkan nilai prediksi dibatasi oleh nilai minimum dan nilai maksimum tertentu. Sehingga meskipun berfluktuasi mengikuti fluktuasi acak curah hujan, namun hasil prediksinya terlihat tidak lentur karena terbatas pada kisaran tertentu. Kisaran nilai prediksi untuk peubah X5 adalah 0,135 mulai dari 0,244 hingga 0,379, sedangkan untuk peubah X6 kisaran nilai prediksi adalah 0,151 mulai dari 0,223 hingga 0,374. Ketepatan prediksi model menggunakan peubah X5 adalah 76% dengan kesalahan maksimum 9,9 mm/bulan, sedangkan menggunakan peubah X6 ketepatan model adalah 77% dengan kesalahan maksimum sekitar 9,7 mm/bulan.



Gambar 68. Hasil pembentukan model dengan kombinasi beberapa peubah X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 di Stasiun Baros Serang (Wilayah IIA Pantura Banten).

Ketika model menggunakan data masukan kombinasi peubah X_1, X_2, X_3 dan X_4 , terlihat bahwa model mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan dengan fluktuasi acak yang lebih dekat dengan nilai aktualnya. Pada nilai-nilai ekstrim, hasil prediksi terlihat lebih mendekati nilai aktualnya dibandingkan kombinasi peubah X_2, X_3 dan X_4 . Kisaran nilai prediksi adalah 0,508 mulai

dari 0,058 hingga 0,566, ketepatan model 85% dengan kesalahan maksimum sekitar 6,2 mm/bulan.

Ketika model menggunakan masukan semua peubah X1, X2, X3, X4, X5 dan X6, terlihat bahwa model memprediksi nilai-nilai curah hujan yang hampir berimpit dengan nilai aktualnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,706 mulai dari 0,035 hingga 0,741, ketepatan model 90% dengan kesalahan maksimum sekitar 4,1 mm/bulan.

Hal tersebut di atas menggambarkan bahwa dengan data masukan curah hujan berturut-turut tiga bulan sebelumnya, model yang dibentuk dengan teknik analisis jaringan syaraf mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan yang berfluktuasi seirama dengan nilai-nilai aktualnya, kecuali pada saat terjadi nilai ekstrim. Dengan memasukan peubah-peubah nilai anomali SST dan nilai indeks ossilasi selatan model mampu memprediksi nilai-nilai yang lebih dekat dengan nilai-nilai ekstrim tersebut. Pada akhirnya model yang mengkombinasikan keenam peubah masukan menghasilkan nilai prediksi terbaik dengan kisaran nilai prediksi paling lebar, nilai ketepatan paling tinggi dan nilai kesalahan paling kecil.

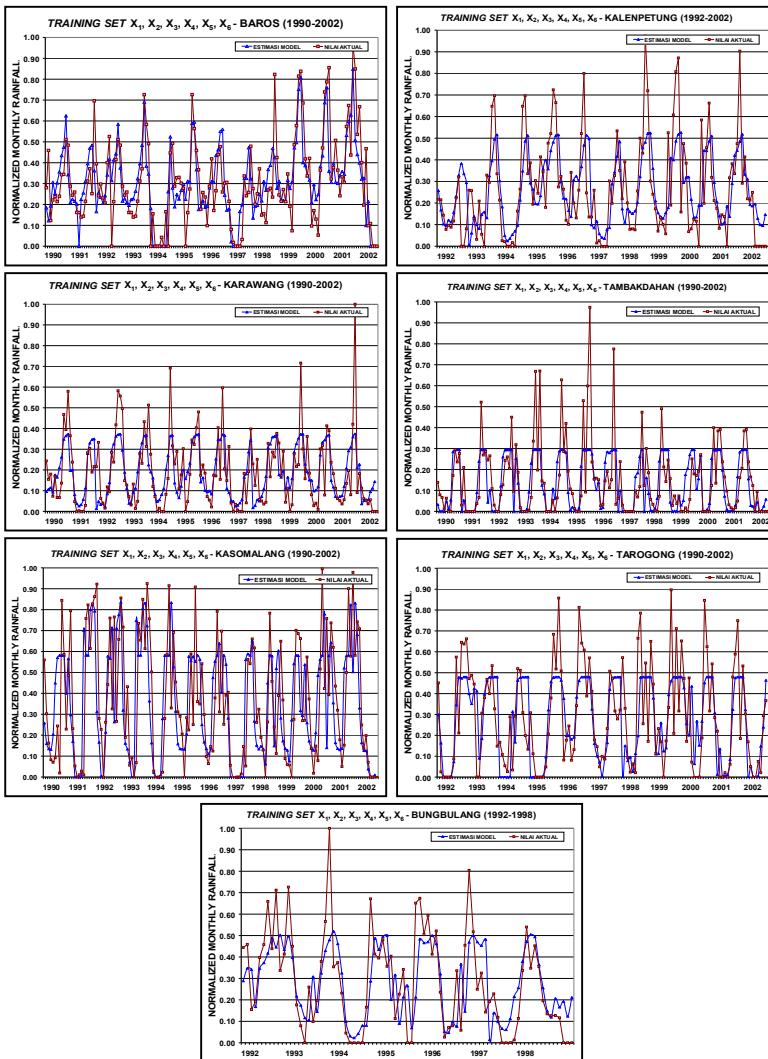
Perbandingan Model Prediksi Curah Hujan Antar Stasiun

Tabel 2 dan Gambar 6 menyajikan rangkuman dan hasil pendugaan curah hujan dari model prediksi curah hujan menggunakan peubah masukan X1, X2, X3, X4, X5 dan X6 di tujuh stasiun curah hujan yang mewakili beberapa wilayah curah hujan di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut, serta perbandingannya dengan nilai aktual pada periode yang sama. Terdapat beberapa kriteria yang ditelaah untuk membandingkan kualitas model Antar stasiun tersebut, antara lain kisaran prediksi model yang dilihat dari selisih minimum dan maksimum nilai prediksi, tingkat ketepatan

prediksi model terhadap nilai aktual, serta besarnya kesalahan maksimum prediksi.

Tabel 18. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan terbaik dari stasiun-stasiun pewakil di sentra produksi padi.

No	Stasiun/Lokasi	Jumlah Iterasi	Kisaran Prediksi	Ketepatan Model (%)	MSE per Tahun	Kesalahan Maksimum (mm/bulan)
1.	Baros Serang Banten	332	0,035 - 0,741 (0,706)	90	0,098	4,1
2.	Kalenpetung Serang Banten	59	0,089 - 0,518 (0,429)	84	0,163	6,3
3.	Karawang	81	0,006 - 0,385 (0,379)	90	0,101	6,0
4.	Tambakdahan Subang	85	0,000 - 0,295 (0,295)	89	0,111	5,0
5.	Kasomalang Subang	450	0,000 - 0,835 (0,835)	88	0,121	7,2
6.	Tarogong Garut	50	0,000 - 0,480 (0,480)	82	0,179	7,1
7.	Bungbulang Garut	81	0,015 - 0,519 (0,504)	91	0,086	7,2



Gambar 69. Hasil training atau pembentukan model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

Dilihat dari kisaran prediksi model, maka model yang memiliki kisaran terlebar adalah model untuk Stasiun Kasomalang Subang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,835 antara 0,000 hingga 0,835 dan Stasiun Baros Serang Banten dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,706 antara 0,035 hingga 0,741. Sementara itu, stasiun-stasiun yang memiliki kisaran prediksi yang paling sempit adalah Stasiun Tambakdahan Subang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,295 antara 0,000 hingga 0,295 dan Stasiun Karawang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,379 antara 0,006 hingga 0,385. Namun dilihat dari besarnya ketepatan

(akurasi) dan kecilnya galat maka model yang paling memiliki ketepatan tinggi antara nilai prediksi dengan nilai aktual dan memiliki galat terkecil adalah Stasiun Bungbulang Garut dengan ketepatan 91% dan galat 0,086, Stasiun Baros Serang Banten dengan ketepatan 90% dan galat 0,098, serta Stasiun Karawang dengan ketepatan 90% dan galat 0,101. Sementara itu, stasiun-stasiun yang memiliki tingkat ketepatan paling rendah dan galat terbesar adalah Stasiun Tarogong Garut dengan ketepatan 82% dan galat 0,179, serta Stasiun Kalenpetung Serang Banten dengan ketepatan 84% dan galat 0,163.

Validasi Model Prediksi Curah Hujan

Validasi dilakukan terhadap model terbaik yang dihasilkan pada proses training. Gambar 7 menyajikan fluktuasi prediksi curah hujan bulanan pada tahap validasi model (garis biru) dan perbandingannya terhadap nilai aktual (garis coklat) pada periode yang sama, sedangkan Tabel 14 menyajikan tingkat ketelitian dan kisaran rata-rata kesalahan pendugaan data curah hujan pada tahap validasi model. Pada Gambar 28 terlihat bahwa nilai prediksi curah hujan pada periode curah hujan tinggi di Stasiun Baros, Stasiun Karawang dan Stasiun Kasomalang beberapa terjadi lebih tinggi dari nilai aktualnya dan pada beberapa

kejadian ekstrim nilai prediksi terlihat jauh lebih rendah daripada nilai aktualnya. Sementara itu, di Stasiun Kalenpetung, Stasiun Tambakdahan, Stasiun Tarogong dan Stasiun Bungbulang, pada puncak periode basah nilai prediksi umumnya lebih rendah dari nilai aktualnya. Terlihat bahwa nilai-nilai prediksi model di keempat stasiun dibatasi oleh nilai maksimum tertentu yang nilainya lebih rendah dari beberapa kejadian ekstrim yang ada.

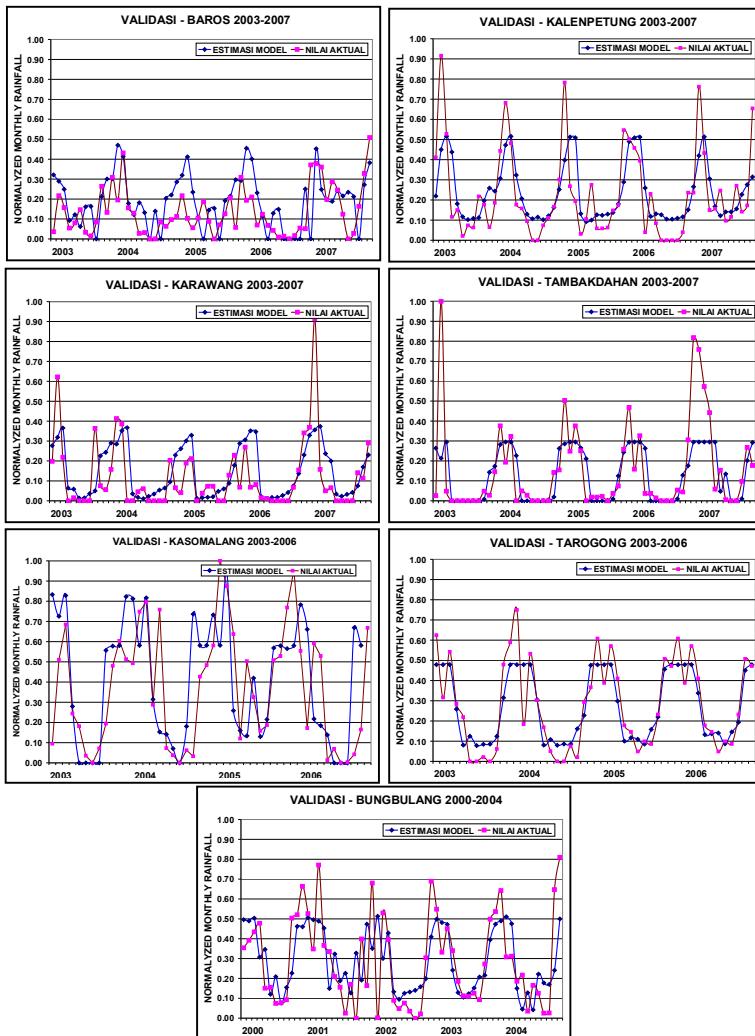
Di Stasiun Baros Serang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 85-91% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 3,8-6,4 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2003, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2007. Di Stasiun Kalenpetung Serang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 79-94% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 2,2-2,8 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2004, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2005.

Di Stasiun Karawang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 79-93% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 3,9-11,8 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2005, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2007. Di Stasiun Tambakdahan Subang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 89-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 2,1-15,6 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2004, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2003. Di Stasiun Kasomalang Subang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 54-69% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 20,2-30,2 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2005, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2006.

Tabel 19. Tingkat ketepatan dan kisaran kesalahan pendugaan data curah hujan pada proses validasi model di beberapa stasiun pewakil di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut.

No.	Stasiun/Lokasi	Tingkat Ketepatan (%)	Tahun dgn Rata2 Bias Terkecil	Tahun dgn Rata2 Bias Terbesar	Kisaran Kesalahan (mm/bulan)
1.	Baros – Serang	85 – 91%	2003	2007	3,8 – 6,4
2.	Kalenpetung – Serang	79 – 94%	2004	2005	2,2 – 2,8
3.	Karawang	79 – 93%	2005	2007	3,9 – 11,8
4.	Tambakdahan – Subang	89 – 97%	2004	2003	2,1 – 15,6
5.	Kasomalang – Subang	54 – 69%	2005	2006	20,2 – 30,2
6.	Tarogong – Garut	89 – 97%	2006	2004	1,1 – 4,4
7.	Bungbulang – Garut	72 – 97%	2003	2002	1,4 – 11,7

Di Stasiun Tarogong Garut tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 89-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 1,1-4,4 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2006, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2004. Di Stasiun Bungbulang Garut tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 72-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 1,4-11,7 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2003, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2002.

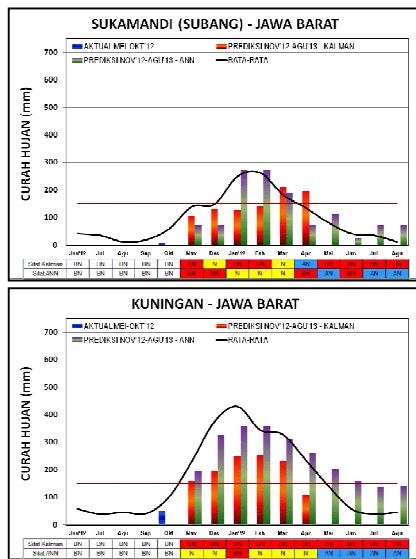


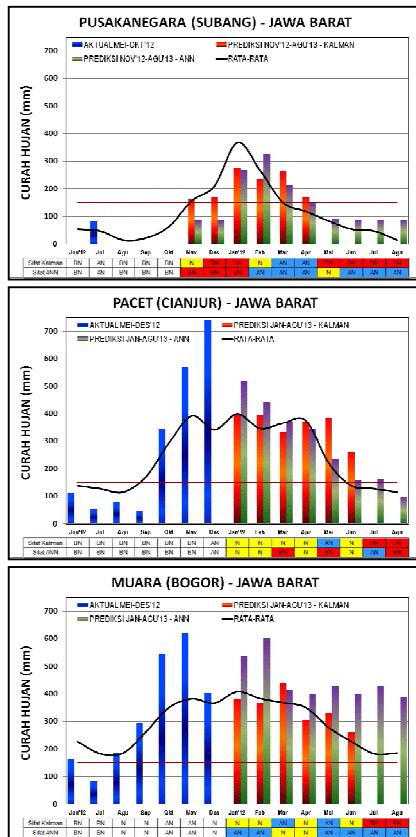
Gambar 70. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

Model Prediksi Curah Hujan untuk Prediksi Musim

Komposisi Variabel Input Model

Model disusun untuk menduga curah hujan tiga bulan ke depan ($Y=CHt+3$). Proses coba-coba (trial and error) melibatkan berbagai kombinasi peubah masukan X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 . Pada bagian ini dikemukakan penampilan model-model prediksi curah hujan yang dibentuk dari beberapa peubah masukan sebagai peubah tunggal ataupun kombinasi beberapa peubah, antara lain (1) peubah X_1 , (2) kombinasi peubah X_2, X_3 dan X_4 , (3) peubah X_5 , (4) peubah X_6 , (5) kombinasi peubah X_1, X_2, X_3 dan X_4 dan (6) kombinasi peubah X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 dan X_6 .





Gambar 71. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

DAFTAR BACAAN

- Allison H, Dais GB, and Stuart R. 1990. Long-term analysis and prediction of rainfall using a geostatistical method. In. Muchoc RC, and Bellamy JA. (eds). Climatic Analysis in crop production: Models and Management in the semi-rid and tropics and sub-tropics.
- Apriyanti N. 2005. Optimasi Jaringan Syaraf Tiruan dengan Algoritma Genetika untuk Peramalan Curah Hujan [skripsi]. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.
- Boer R, Notodipuro KA, dan Las I. 1999. Prediction of daily rainfall characteristic from monthly climate indicate. Paper pesented at the second international conference on science and technology for the Assesment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.
- Dupe ZL. 1999. Prediction Nino 3.4 SST anomaly using simple harmonic model. Paper presented at the second international conference on science and technology for the Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.

- Haryanto U. 1999. Response to climate change: Simple rainfall prediction based on Southern Oscillation Index. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for the Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.
- Lee S, Cho S, and Wong PM. 1998. Rainfall Prediction Using Artificial Neural Networks. *J. of Geographic Information and Decision Analysis*, vol.2 (no.2), 233-242.
- Panagoulia D, Bardossy A, and Lourmas G. 2006. Diagnostic statistics of daily rainfall variability in an evolving climate. *Advances in Geosciences*, 7:349-354.
- Tim Puslittanak. 1996. Laporan Penelitian Agroklimat dan Pengembangan Database Iklim untuk Peningkatan Hasil Pertanian di Sulawesi Utara dan Sulawesi Tengah. Bogor. Puslittanak

BAB 5.

DINAMIKA PERTUMBUHAN

TANAMAN PADI DAN CURAH

HUJAN DI PULAU JAWA PERIODE

TAHUN 2007-2009

BERDASARKAN DATA MODIS DAN

TRMM

Dede Dirgahayu dan Parwati

Pendahuluan

Dalam rangka mencapai swasembada pangan, pemerintah terus berupaya untuk meningkatkan produksi tanaman pangan, khususnya padi. Produksi padi setiap tahunnya mengalami fluktuasi akibat adanya bencana kekeringan dan kebanjiran di lahan sawah terutama di Pulau Jawa. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mencapai swasembada pangan adalah dengan melakukan pemantauan terhadap kondisi pertanaman padi di Pulau Jawa sehingga pemerintah dapat segera mengambil tindakan yang diperlukan dalam menjaga dan meningkatkan produksi padi nasional.

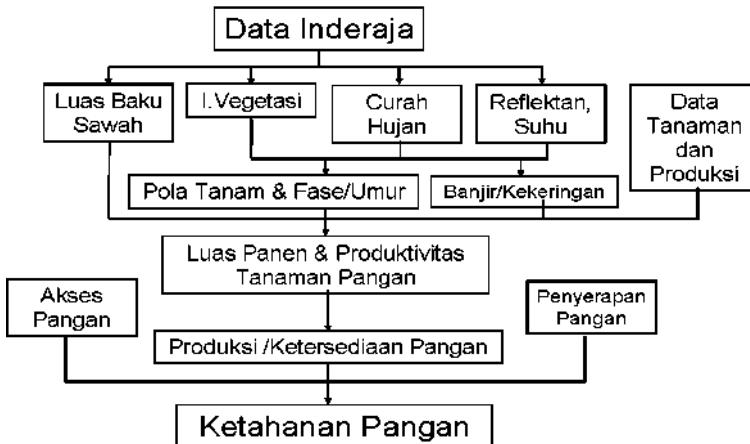
Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dipengaruhi oleh faktor internal (genetik) dan faktor eksternal (seperti iklim, tanah, dan topografi). Curah hujan sebagai sumber air bagi tanaman padi

mutlak diperlukan dalam pertumbuhan dan perkembangannya. Oleh karenanya, informasi curah hujan sangat diperlukan guna mengoptimalkan penggunaan air pada setiap fase pertumbuhan padi untuk dapat mencapai tingkat produksi yang maksimal.

Pemantauan kondisi tanaman padi serta kondisi curah hujan sebagai sumber air untuk pertumbuhan padi dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi satelit penginderaan jauh yaitu melalui satelit Terra/Aqua MODIS dan TRMM. Satelit Terra/Aqua MODIS yang memiliki resolusi temporal tinggi (setiap hari) dapat memantau perubahan-perubahan yang terjadi selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi. Sedangkan satelit TRMM dapat memberikan informasi curah hujan setiap 3 jam. Dengan menggunakan satelit MODIS dan TRMM diharapkan pemantauan pertumbuhan tanaman padi di Pulau Jawa menjadi lebih efisien, baik dari segi biaya dan waktu sehingga dapat membantu para pengambil keputusan dalam menentukan kebijakan secara lebih tepat guna menjaga dan meningkatkan produksi padi secara nasional.

Berdasarkan UU RI No. 7 tahun 1996, ketahanan pangan adalah kondisi terpenuhinya pangan bagi rumah tangga yang tercermin dari tersedianya pangan yang cukup, baik jumlah maupun mutunya, aman, merata, dan terjangkau. Untuk mencapai kondisi tersebut, pemerintah terus berupaya untuk meningkatkan produksi tanaman pangan tanaman padi.

Data satelit penginderaan yang memiliki cakupan luas dan resolusi tinggi dan dapat dimanfaatkan untuk mendukung program ketahanan pangan nasional. Beberapa hal yang dapat dilakukan dengan data satelit penginderaan jauh adalah menghitung luas lahan sawah, fase tanam/Tingkat Kehijauan Vegetasi (TKV), curah hujan, dan prediksi banjir/kekeringan (Gambar 1).



Gambar 72. Peran data penginderaan jauh dalam mendukung informasi yang diperlukan untuk Ketahanan Pangan

Hipotesis

Untuk penelitian ini, hipotesis yang diambil adalah:

- Kondisi pertumbuhan tanaman padi sawah dapat dideteksi menggunakan nilai-nilai EVI. Kurva nilai-nilai EVI selama masa pertumbuhan tanaman padi sawah mengikuti pola kurva normal. Dalam kondisi normal, puncak kurva menggambarkan puncak fase pertumbuhan vegetatif, kemudian kurvanya menurun sejalan dengan fase pertumbuhan generatif, karena tingkat kehijauannya berkurang. Apabila terjadi gangguan terhadap pertumbuhan tanaman padi, maka dapat diketahui berdasarkan perubahan pola kurva nilai EVI-nya.
- Ketersediaan air mempengaruhi pertumbuhan tanaman padi. Pada saat awal tanam dan selama fase pertumbuhan vegetatif kebutuhan air lebih tinggi dibandingkan pada fase pertumbuhan generatif. Dengan demikian terdapat hubungan antara curah hujan dengan awal musim tanam,

- sehingga awal musim tanam dapat diprediksi berdasarkan hasil prediksi curah hujan.
- c. Dalam analisis fase pertumbuhan dan produksi padi, faktor-faktor lain seperti genetik, perlakuan tanaman padi, tanah, dan cuaca (selain curah hujan) diasumsikan dalam kondisi optimum.

Fenomena ENSO dapat diidentifikasi melalui adanya penyimpangan suhu permukaan laut Pasifik Tropik. ENSO terdiri atas komponen El Nino dan Osilasi Selatan (Trenberth, 1997; Naylor, et al., 2001). Kondisi El Nino berkaitan erat dengan menghangatnya suhu permukaan laut di Pasifik Tropik bagian timur, sebaliknya pada kondisi La Nina suhu permukaan laut di Pasifik Tropik bagian timur mendingin. Sedangkan Osilasi Selatan menggambarkan kondisi perbedaan tekanan udara antara Darwin dan Tahiti, dimana pada kondisi El Nino tekanan udara di Tahiti lebih rendah daripada di Darwin, dan sebaliknya yang terjadi pada kondisi La Nina.

Studi variabilitas curah hujan di wilayah Indonesia dan Malaysia berdasarkan fenomena ENSO dari data penginderaan jauh telah dilakukan oleh Nicholls 1989; Haylock and McBride 2001; Hendon 2003; Aldrian and Susanto 2003. Umumnya, kondisi curah hujan yang rendah di wilayah Indonesia dan sekitarnya berkaitan dengan fenomena El Nino. Sebaliknya kondisi curah hujan tinggi di wilayah Indonesia dan sekitarnya berkaitan dengan fenomena La Nina. Berdasarkan adanya hubungan antara suhu permukaan laut di Pasifik Tropik dan curah hujan di wilayah Tropik, maka dilakukan pemodelan untuk prediksi curah hujan di wilayah Tropik, terutama di wilayah Indonesia.

Falcon et al. (2004) menyebutkan pengaruh *El Nino/Southern Oscillation* (ENSO) terhadap penurunan produksi padi di Pulau Jawa rata-rata mencapai 21% untuk kenaikan suhu permukaan laut Pasifik Tropik sebesar 1°C pada bulan Agustus periode tahun 1997/1998 – 2001/2002 (Tabel 1). Penurunan produksi tersebut berlaku jika memasukkan faktor waktu (t) sebagai variabel

prediktor dan tidak ada antisipasi dari pemerintah untuk mengurangi dampak ENSO.

Tabel 20. Pengaruh kenaikan suhu permukaan laut Pasifik Tropik terhadap produksi padi di Indonesia (Falcon et al, 2004).

<i>Significant Provincial Production Effects Caused by a 1°C Increase in the August SSTAs</i>				
Province	Crop-Year Production Effect (September–August) (tmt)	Percentage of National Effect	Significance of Production Effect (t-statistic)	Ratio of Production Effect to Average Yearly Production 1997/98– 2001/02
West Java	-380	28.83	-3.01	-0.037
Central Java	-238	18.06	-3.67	-0.026
East Java	-232	17.60	-4.06	-0.026
South Sulawesi	-102	7.74	-2.02	-0.033
North Sumatra	-54	4.10	-1.57	-0.016
West Sumatra	-46	3.49	-2.18	-0.026
East Kalimantan	-41	3.11	-2.60	-0.118
North Sulawesi	-38	2.88	-3.31	-0.104
West Nusa Tenggara	-30	2.28	-2.63	-0.021
Riau	-17	1.29	-2.14	-0.041
Southeast Sulawesi	-10	0.76	-1.68	-0.033
Bali	-3	0.23	-2.82	-0.003
Subtotal	-1,191	90.36		
Coefficient for all- Indonesia (table 1)	-1,318	100.00		

Beberapa kegiatan pemantauan pertumbuhan tanaman padi dari data satelit telah dilakukan di Pusat Pengembangan Pemanfaatan dan Teknologi Penginderaan Jauh – LAPAN, diantaranya adalah pemantauan tingkat kehijauan vegetasi, fase pertumbuhan, serta profil pertumbuhan tanaman padi dari indeks vegetasi. Sementara untuk mendapatkan model prediksi fase pertumbuhan padi perlu dilakukan analisis hubungan antara indeks vegetasi dengan curah hujan, baik secara temporal maupun spasial. Penelitian Fontana, dkk (2007) menunjukkan korelasi yang tidak nyata antara hujan dengan EVI tanaman pada musim dingin.

Korelasi yang nyata ditunjukkan antara akumulasi hujan selama pertumbuhan vegetatif dengan EVI maksimum yang dapat dicapai.

Pemodelan untuk prediksi curah hujan dengan waktu tunda 5 bulan ke depan berdasarkan data satelit telah dibangun oleh LAPAN sejak tahun 1997. Model prediksi yang digunakan adalah model korelasi statistik spasial yaitu CCA (*Canonical Corellation Analysis*) dan EOF (*Emphirical Orthogonal Function*). Parameter yang digunakan adalah suhu permukaan laut Pasifik Tropik dan data OLR (*Outgoing Longwave Radiation*) di wilayah Tropik dari satelit NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Model prediksi ini dibangun berdasarkan data bulanan selama 22 tahun (1982 – 2003), dengan suhu permukaan laut sebagai input data, dan prediksi OLR sebagai outputnya. Data OLR dikonversi menjadi data curah hujan berdasarkan Data *Global Precipitation Climatological Project* (GPCP) dengan resolusi spasial $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ dari USA *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) untuk seluruh wilayah Indonesia. Hasil prediksi curah hujan dari data OLR mempunyai tingkat akurasi yang bervariasi antara 50 – 80%. Korelasi yang baik diperoleh pada musim kemarau sekitar Juni-Juli-Agustus (JJA), sedangkan korelasi yang rendah diperoleh pada musim hujan sekitar Desember-Januari-Februari (DJF). Namun, kelemahan prediksi curah hujan dari data OLR terletak pada resolusi spasialnya yang rendah yaitu 2.5° atau sekitar 277 km^2 , sehingga kurang sesuai untuk menggambarkan kondisi curah hujan wilayah lokal.

Data TRMM mempunyai keunggulan, antara lain tersedia secara *near real-time* setiap tiga jam sekali, konsisten, daerah cakupan yang luas yaitu wilayah tropik, resolusi spasial yang cukup tinggi ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), dan dapat diakses secara gratis. Berbagai penelitian, validasi, serta aplikasi data TRMM telah banyak dilakukan (Meneghini *et al.* 2004, Mori *et al.* 2004, Wolff *et al.* 2005, Ichikawa dan Yasunari 2006, Shige *et al.* 2007). Oleh

karenanya perlu dikembangkan model prediksi curah hujan bulanan di Indonesia dari data TRMM untuk membantu pengguna dalam memperoleh informasi prediksi curah hujan yang wilayahnya lebih lokal.

Berdasarkan pengalaman penelitian tentang pengairan irigasi yang optimal, maka Ditjen Sumberdaya Air, Dept.PU (2006) secara mendetail menetapkan kebutuhan air tanaman padi (lihat Tabel 2)

Tabel 21. Kebutuhan air pada fase pertumbuhan padi di Pulau Jawa

No	Tahap Pertumbuhan	Varietas Lokal			Varietas Unggul				
		Jeluk mm/hr	Debit Lt/dt/ Ha	Periode (Hari)	Jumlah (mm)	Jeluk mm	Debit Lt/dt /Ha	Periode (Hari)	Jumlah (mm)
0	Pengolahan Tanah	12.7	1.5	-		12.7	1.5	-	
1	Pembibitan	3.0	0.4	20	60	3.0	0.4	20	60
2	Tanam s/d Primordia	7.5	0.9	40	300	6.4	0.8	35	224
3	Primordia s/d Bunga	8.8	1.0	25	220	7.7	0.9	20	154
4	Bunga 10 % s/d Penuh	8.8	1.0	20	176	9.0	1.0	20	180
5	Bunga Penuh s/d Pemasakan	8.4	1.0	20	168	7.8	0.9	20	156
6	Pemasakan s/d Panen	0.0	0.0	15	0	0.0	0.0	15	0
	Total (dari mulai tanam)			120	864			110	714

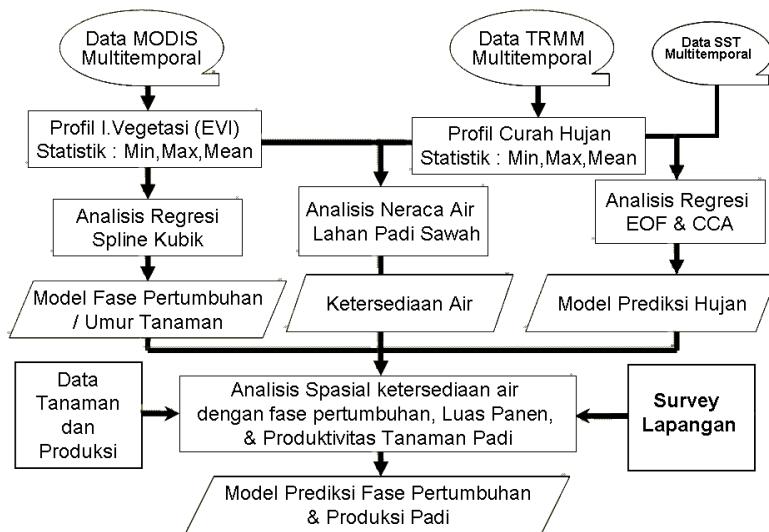
Pengembangan model identifikasi dan prediksi fase pertumbuhan padi sawah di Pulau Jawa berdasarkan data MODIS dari satelit Terra/Aqua dan data satelit TRMM, menggunakan perawatan utama EVI (*Enhanced Vegetation Index*) dari data satelit Terra/Aqua MODIS dan curah hujan dari data TRMM. Hubungan dari kedua parameter ini selanjutnya digunakan untuk membangun model prediksi produksi padi dengan tingkat kepercayaan tertentu. Penggunaan Citra tersebut bertujuan untuk mengetahui hubungan antara ketersediaan air dengan fase pertumbuhan padi, model prediksi fase pertumbuhan padi sawah, dan model prediksi produksi padi di Pulau Jawa.

Kontinuitas penyediaan informasi pemantauan kondisi tanaman padi sawah di Pulau Jawa, pemantauan ketersediaan air bagi tanaman padi sawah di Pulau Jawa, serta model prediksi fase pertumbuhan padi dapat dikembangkan untuk model prediksi produksi padi dengan tingkat ketelitian tertentu.

Pemerintah di tingkat pusat maupun daerah untuk mengantisipasi serta mengambil kebijakan dalam

Metode Penelitian

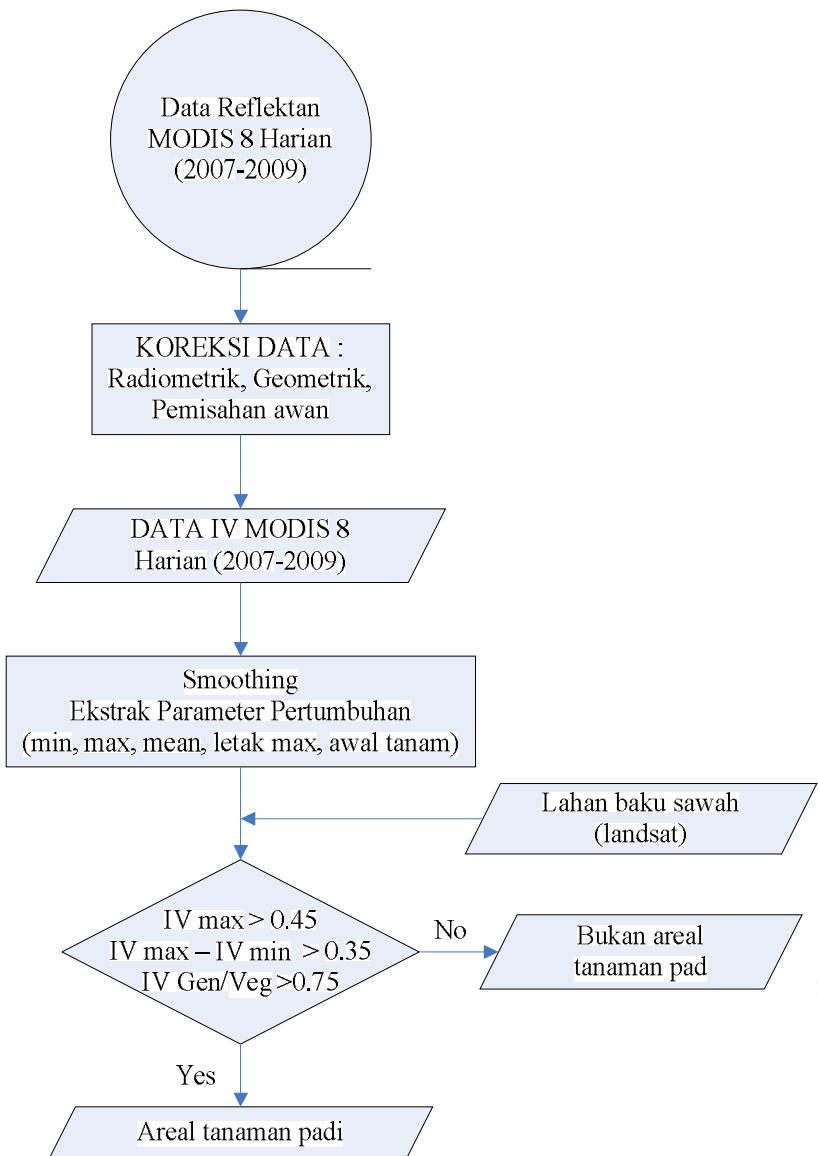
Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini secara garis besar dapat dilihat pada diagram alir Gambar 4-1.



Gambar 73. Diagram alir metode penelitian

Pembuatan Profil Pertumbuhan Tanaman Padi

Pertumbuhan tanaman padi dari mulai tanam (0 HST) hingga panen (120 HST) dapat ditunjukkan dengan perubahan tingkat kehijauan atau indeks vegetasi (EVI) selama pertumbuhan dalam bentuk grafik atau profil EVI terhadap waktu (Kogan, 1990; 1995; 2002). Untuk membuat profil Indeks Vegetasi memerlukan dua tahap kegiatan, yaitu pertama penentuan area tanaman padi dan yang kedua ekstraksi statistik nilai EVI pada area tertentu yang memiliki kesamaan waktu tanam dan klasifikasi lahan sawah padi. Tahapan yang dilakukan untuk menentukan areal tanaman padi dapat dilihat pada Gambar 4-2.



Gambar 74. Diagram alir metode penentuan tanaman padi dan non padi di lahan sawah

Untuk membedakan tanaman padi dan data reflektan MODIS 8 harian dari tahun 2007-2009. Kemudian dilakukan koreksi geomterik dan mozaiking dengan menggunakan software MODIS tool dan Er-Mapper. Setelah itu dilakukan pemisahan awan dengan menggunakan software Er-Mapper. Setelah data MODIS dikoreksi kemudian dilakukan ekstraksi nilai EVI dari data tersebut sehingga diperoleh data raster indeks vegetasi (IV) MODIS 8 harian dari tahun 2007 sampai dengan 2009. Rumus yang digunakan untuk ekstraksi EVI yaitu (Huete, 1997):

$$EVI = \frac{r_{NIR} - r_{Red}}{r_{NIR} + C_1 r_{Red} - C_2 r_{Blue} + L} \times G \quad \dots (1)$$

dimana L=1, C1 = 6, C2 = 7.5, and G (gain factor) = 2.5.

Kemudian data raster tersebut diperhalus (*smoothing*) untuk menghilangkan noise (utama awan) agar diperoleh profil EVI yang halus. Smoothing yang dilakukan adalah dengan menggunakan moving median 3 dan rata-rata. Artinya setiap tiga data dicari nilai mediannya kemudian dirata-ratakan. Kemudian hasil dari smoothing tersebut *diOverlay* dengan lahan baku sawah dari data landsat sehingga diperoleh profil IV per piksel.

Selanjutnya dibuat program untuk menghitung parameter pertumbuhan tanaman padi agar dapat membedakan tanaman padi dengan objek lainnya. Program tersebut menghitung nilai minimum, maksimum, letak minimum, serta letak maksimum dari seri data yang terkumpul. Dari nilai-nilai tersebut dapat dihitung awal tanam, panen dan nilai statistiknya seperti nilai rata-rata, kovarian, *slope* dan *skewness*. Nilai-nilai tersebut dapat dimanfaatkan dalam pengolahan data lebih lanjut untuk menentukan obyek yang diduga tanaman padi. Jika IV dari EVI maksimum > 0.45 , selisih EVI maksimum dan minimum > 0.35 dan rasio dari IV generatif dengan vegetatif > 0.75 maka area tersebut merupakan tanaman padi dan selainnya bukan tanaman padi.

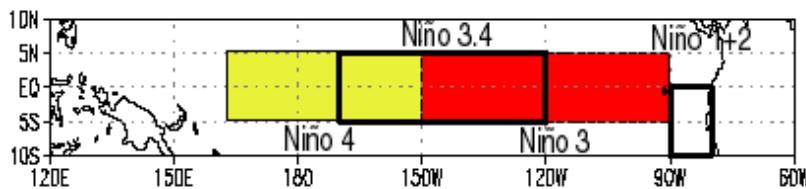
Setelah tahap penentuan areal tanaman padi dilakukan tahap selanjutnya yaitu penurunan model pertumbuhan tanaman padi.

Pada anomali SST Pasifik Tropik dan data TRMM wilayah Indonesia periode tahun 1998 – 2008. Keterangan Data SST dan TRMM yang digunakan secara rinci dapat dilihat pada Tabel 4-1 berikut.

Tabel 22. Data TRMM dan SST Pasifik Tropik yang digunakan

Jenis Data	SST Pasifik Tropik	TRMM Indonesia
Cakupan wilayah	89.5°S – 89.5°N; 0.5°E – 359.5°W (180 x 360)	91.125°E – 154.125°E; 13.875°S – 9.125°N (64 x 24)
Resolusi Spasial	1° x 1°	1° x 1°
Resolusi Temporal	Jan 1998 – Dec 2008 (132 bulan)	Jan 1998 – Dec 2008 (132 bulan)
Sumber	Optimum Interpolation SST (NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA)	TRMM (NASA)

Wilayah analisis SST Pasifik Tropik mencakup 4 wilayah Niño, yaitu: Niño-1+2 (0°-10°S, 90°-80°W), Niño 3 (5°N-5°S, 150°-90°W), Niño-3.4 (5°N-5°S, 170°-120°W), dan Niño-4 (5°N-5°S, 160°E-150°W). Umumnya kondisi ENSO yang berpengaruh terhadap iklim di Indonesia adalah di wilayah Niño-3.4. Pembagian wilayah Niño dapat dilihat pada Gambar 4-4.



Gambar 75. Pembagian wilayah Niño di Samudera Pasifik Tropik (Sumber: Climate Prediction Center /NCEP)

Model Pertumbuhan Tanaman Padi

Time series EVI dari hasil *ploting* setiap training area dianalisis untuk menentukan saat terjadinya *fase vegetatif* maksimum (60 hari), awal tanam, dan akhir tanam (*fase bera*), sehingga dapat diketahui korespondensi antara umur tanaman padi dengan kisaran nilai EVI serta untuk membuat profil pertumbuhan tanaman padi.

Analisis korelasi dan regresi dilakukan untuk memperoleh model persamaan regresi selama pertumbuhan tanaman padi fase vegetatif atau generatif. Bentuk persamaan yang akan dicoba adalah polinom orde 3 atau *Spline Qubic* dengan persamaan umum sebagai berikut :

$$Y = b_0 + b_1 X + b_2 * X^2 + b_3 * X^3 \quad \dots (5)$$

X : waktu/umur tanaman padi (HST)

Y : merupakan parameter pertumbuhan tanaman seperti kehijauan tanaman atau Indeks Vegetasi (IV) yang dapat ditunjukkan dengan EVI, sedangkan t adalah waktu atau HST (hari setelah tanam). Transformasi EVI dapat dilakukan agar skala nilai EVI yang semula berkisar antara -1 s/d +1 menjadi data 8 bit dengan kisaran nilai 0 – 255, sehingga tidak berbeda jauh dengan kisaran umur (X) dari 0 s/d 120 HST (Hari Setelah Tanam). Transformasi EVI menjadi Indeks vegetasi (IV) dalam 8 bit dilakukan dengan formula :

$$IV = 128 + 125 * EVI \quad \dots (6)$$

Dengan menggunakan parameter tanaman padi yang diperoleh pada Tabel 1 kemudian dapat diturunkan model fase pertumbuhan. Sebelumnya terlebih dahulu dilakukan rekode Citra EVI_Maksimum menjadi 6 kelas (Maksimum_Id), rekode Citra Maksimum-Tanam menjadi 3 kelas (Mx-Tn_Id), *overlay* matriks antara Maksimum_Id dengan Mx-Tn_Id untuk membuat citra Klasifikasi Padi sawah sebanyak 18 kelas. Kemudian dihitung nilai atribut klasifikasi sawah (Swh_Id) dengan menggunakan persamaan (2). Hasil Rekode Maksimum_Id dan Mx-Tn_Id serta

kombinasinya (*overlay* matriks) dapat dilihat pada Tabel 1 . Kemudian hasil dari klasifikasi tersebut dikonversi menjadi poligon.

Tabel 23. Rekode EVI_Maksimum dan EVI Maksimum-EVI Tanam serta Hasil Kombinasinya (*Overlay* Matriks)

EVI_Maksimum	Rekode	EVI Maksimum - Tanam		
		< 0.4	0.4-0.5	>0.5
		1	2	3
0.45-0.50	1	1	2	3
0.51-0.55	2	4	5	6
0.56-0.60	3	7	8	9
0.61-0.65	4	10	11	12
0.66-0.70	5	13	14	15
>0.7	6	16	17	18

Ekstraksi informasi awal tanam (AT) padi dilakukan berdasarkan waktu terjadinya EVI Maksimum atau Letak Maksimum (LM) dengan menggunakan persamaan (3). Selanjutnya hasil AT dikonversi menjadi poligon. Kemudian dengan menggunakan piksel-piksel yang memiliki kelas padi (Swh_Id) dan awal tanam (AT) yang relatif homogen dibuat poligon dengan menggunakan *Software ArcView*. Kemudian dihitung nilai atribut padi (Padi_Id) dengan menggunakan persamaan (4). Vektor poligon yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi Region Raster dengan menggunakan *software ErMapper* ke file EVI Multitemporal untuk dihitung nilai statistiknya (Mean dan Standar deviasinya) pada setiap region dengan atribut Padi_Id. Selanjutnya hasil ekstraksi EVI dengan awal tanam yang berbeda-beda dikelompokkan berdasarkan umur padi yang sama (mengacu pada letak EVI maksimum) dalam bentuk Tabel 5-2.

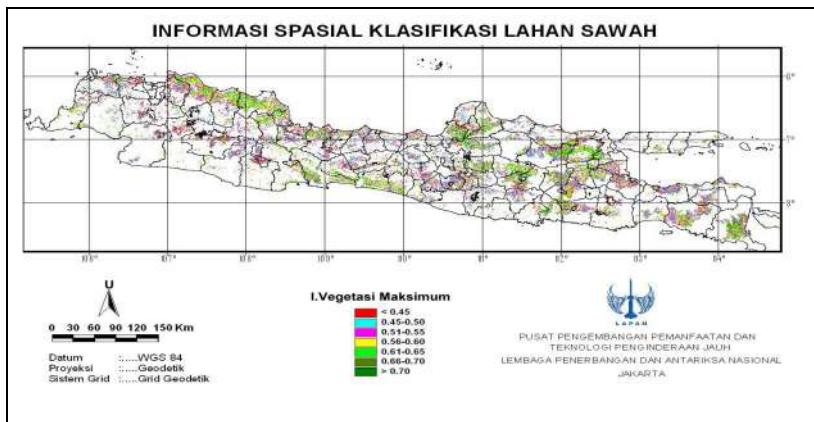
Tabel 24. Contoh Rekapitulasi hasil ekstraksi Mean EVI pada region Padi_Id

No	Umur Padi (HST)	EVI1	EVI2	EVIn	Keterangan
1	-12					Sebelum tanam
2	-4					Sebelum tanam
3	4					Vegetatif, bercampur air
4	12					Vegetatif, bercampur air
5	20					Vegetatif, bercampur air
6	28					Vegetatif
7	36					Vegetatif
8	44					Vegetatif
9	52					Vegetatif
10	60					Vegetatif Maksimum
11	68					Generatif
12	76					Generatif
13	84					Generatif
14	92					Generatif
15	100					Generatif
16	108					Generatif
17	116					Generatif
18	124					Bera

Keterangan :

EVI1, EVI2, ..., EVIn : EVI pada awal tanam ke 1,2,..,n

Contoh Hasil ekstraksi EVI Multitemporal untuk periode tanam Oktober 2008 – Maret 2009 pada lahan sawah di wilayah pantura Jawa Barat (Bekasi, Karawang, Subang, Indramayu, dan Cirebon) dapat dilihat pada Tabel Lampiran 1. Sedangkan distribusi spasial klasifikasi lahan sawah di pulau Jawa dapat dilihat pada Gambar 5-1.

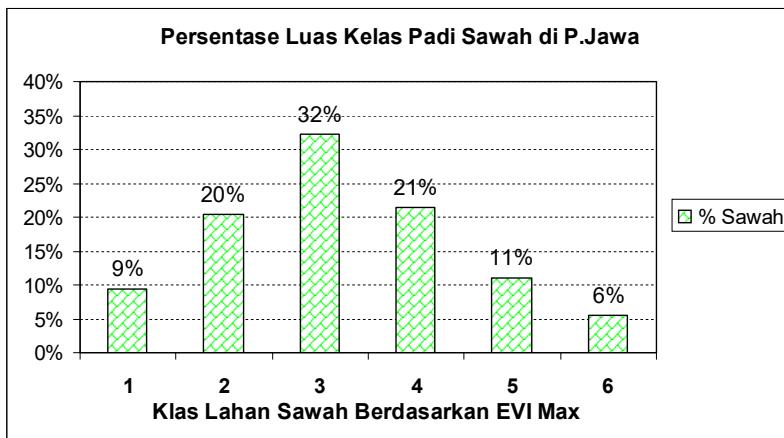


Gambar 76. Citra Klasifikasi Lahan Sawah berdasarkan Indeks Vegetasi (EVI) Maksimum

Dari distribusi spasial tersebut menunjukkan bahwa kelas yang dominan adalah kelas yang memiliki kisaran EVI Maksimum : 0.55-0.60 atau termasuk kelas 7, 8 dan 9 pada Tabel 5-1. Pesentase luas sawah di pulau Jawa berdasarkan kelas EVI maksimum dapat dilihat pada Tabel 5-3 dan grafik pada Gambar 5-2.

Tabel 25. Distribusi Luas Lahan Sawah di P.Jawa Berdasarkan Kelas EVI Maksimum

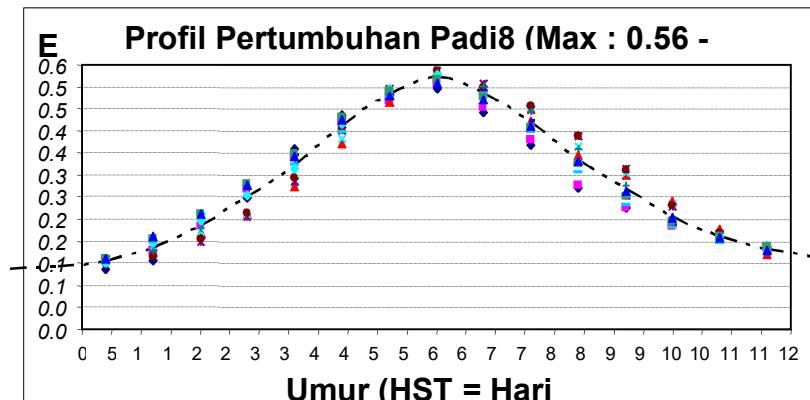
No	EVI_Max	Max_Id	% Luas
1	0.45-0.50	1	9.4%
2	0.51-0.55	2	20.5%
3	0.56-0.60	3	32.2%
4	0.61-0.65	4	21.4%
5	0.66-0.70	5	11.0%
6	> 0.7	6	5.5%



Gambar 77. Distribusi Luas Sawah di P.Jawa berdasarkan EVI Maksimum

Hasil profil dan analisi regresi yang paling dominan di pulau Jawa adalah sebagai berikut:

Nilai EVI maksimum 0.56-0.60 dibuat profil fase pertumbuhan seperti yang terlihat pada Gambar 5-3.



Gambar 78. Profil pertumbuhan tanaman padi kelas 8

Hasil analisis Regresi menghasilkan persamaan sebagai berikut :

Fase vegetatif :

$$Y_{Veg} = 145.151 + 0.2712 X + 0.0249 X^2 - 0.0002 X^3 \dots (11)$$

Fase generatif :

$$Y_{Gen} = 86.63 + 5.3578 X - 0.0754 X^2 + 0.0003 X^3 \dots (12)$$

Aplikasi Model Pertumbuhan Tanaman Padi untuk Menduga Umur Padi

Pendugaan umur tanaman padi dapat dilakukan dengan menggunakan kedua model pertumbuhan tanaman padi tersebut di atas berdasarkan parameter EVI, tetapi diperlukan minimal 2 data multi temporal Data EVI MODIS untuk ditentukan terlebih dahulu kondisi lahan sawah, apakah berada dalam dominasi air atau bera serta fase pertumbuhan tanaman padi vegetatif dan generatif. Pendugaan umur tanaman padi dengan menggunakan kedua model diatas memang cukup rumit, karena ada beberapa tahapan proses yang harus dilakukan serta implementasi model yang berkebalikan. Dalam prakteknya secara teknis untuk

menerapkan model pertumbuhan tersebut harus dibuat citra fase padi sebagai *Masking* untuk menduga umur tanaman padi dalam suatu citra tunggal. Untuk membuat citra fase tersebut diperlukan minimal dua citra EVI pada 2 waktu yang berbeda (t dan $t-1$), misalnya dengan perbedaan waktu 10 hari. Kondisi fase vegetatif (perubahan positif) dan generatif (perubahan negatif) lahan sawah yang didominasi oleh vegetasi dapat dideteksi berdasarkan perubahan nilai EVI atau DEVI dengan kriteria sebagai berikut:

$$\text{DEVI}(t) = \text{EVI}(t) - \text{EVI}(t-1)$$

- (a) Fase dominan air, jika $\text{EVI}(t) \leq 0.19$
- (b) Fase bera, jika $0.19 < \text{EVI}(t) < 0.22$
- (c) Fase vegetatif jika nilai $\text{DEVI} > 0$
- (d) Fase generatif jika nilai $\text{DEVI} < 0$

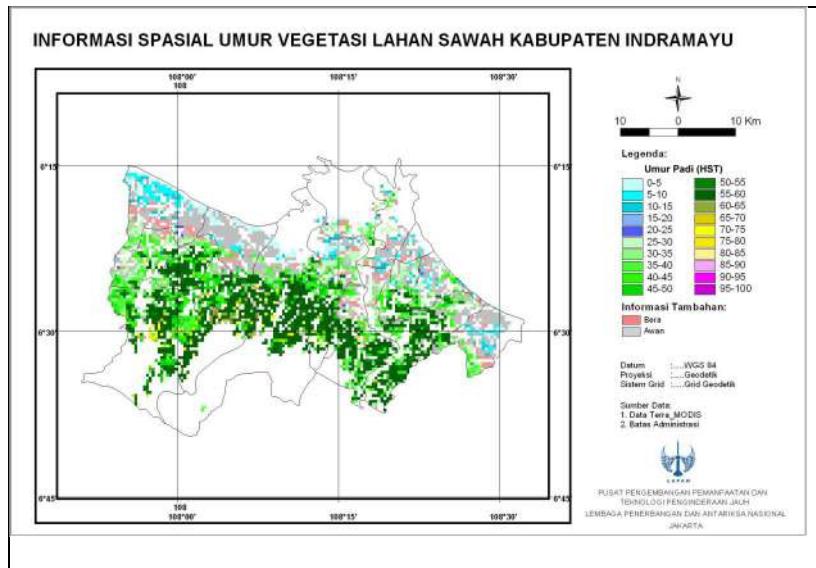
Umur tanaman padi dapat ditentukan berdasarkan kisaran nilai EVI yang diduga berdasarkan persamaan pertama jika memenuhi kriteria a, dan c serta diduga berdasarkan model persamaan kedua jika memenuhi kriteria d. Sebagai contoh jika ingin dibuat citra spasial umur tanaman padi dengan selang 5 hari, maka klasifikasi citra EVI menjadi umur padi dapat dilakukan dengan kriteria seperti yang tercantum pada Tabel 5-4.

Tabel 26. Kisaran EVI untuk menduga Umur Tanaman Padi

No	Umur (HST)	KISARAN EVI		dIV
1	0-10	145	150	+
2	11-20	151	159	+
3	21-30	160	169	+
4	31-40	170	181	+
5	41-50	182	192	+

No	Umur (HST)	KISARAN EVI		dIV
6	51-60	193	200	+
7	61-70	199	193	-
8	71-80	192	182	-
9	81-90	181	171	-
10	91-100	170	161	-
11	101-110	160	153	-
12	111-120	152	149	-

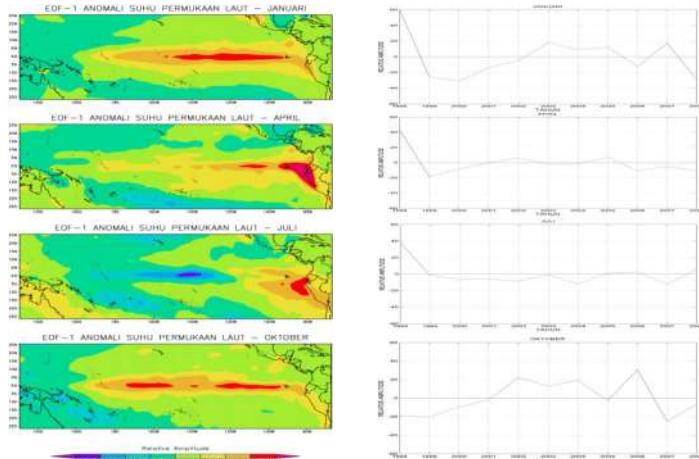
Validasi model pertumbuhan dilakukan melalui hasil pengamatan survey lapangan di daerah Indramayu, Cilacap dan Lamongan (lihat Lampiran)



Gambar 79. Estimasi Umur Tanaman Padi Awal Januari 2009 di Kabupaten Indramayu, Jawa Barat

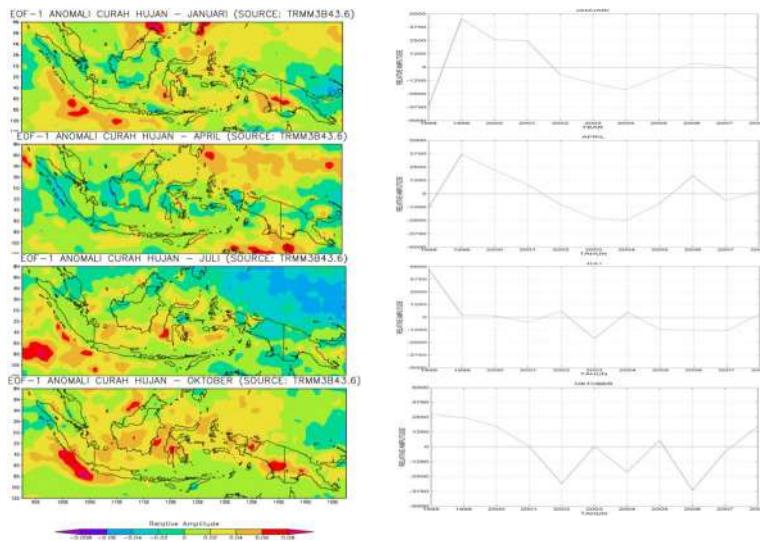
Hasil analisis EOF antara anomali curah hujan (TRMMa) Indonesia dan Anomali SST (SSTa) Pasifik Tropik.

Analisis EOF digunakan untuk memilih data anomali curah hujan TRMM di Indonesia dan anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal pada kondisi El Nino. Analisis ini dilakukan untuk setiap bulan dari Januari – Desember periode tahun 1998-2008. Sebagai contoh, pada Gambar 3 dapat dilihat hasil analisis EOF terhadap anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal masing-masing pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober selama tahun 1998 – 2008. Pada Gambar 3 secara spasial dapat dijelaskan bahwa anomali SST Pasifik Tropik tampak kuat terjadi dari wilayah Niño 3 (5°N - 5°S , 150° - 90°W) hingga ke wilayah Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W) pada bulan Oktober, kemudian kekuatan intensitas ENSO mulai merapat ke wilayah barat pada bulan Januari, April, hingga di wilayah Nino 1+2 pada bulan Juli. Analisis spasial ini kemudian diintegrasikan dengan analisis temporal pada bulan-bulan yang sama periode tahun 1998 – 2008, sehingga dapat diketahui waktu (bulan dan tahun) yang berpotensi menjadi ENSO.



Gambar 80. Hasil Analisis EOF terhadap anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober

Sementara itu, contoh hasil analisis EOF terhadap anomali curah hujan TRMM di Indonesia pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober secara spasial (dari barat hingga timur, serta dari utara hingga selatan) dan temporalnya dari tahun 1998 – 2008 dapat dilihat pada Gambar 4. Secara spasial, umumnya pada bulan Juli dan Oktober sebagian wilayah Indonesia mempunyai anomali curah hujan yang cukup kuat (direpresentasikan oleh warna jingga hingga merah), sedangkan pada bulan Januari dan Juli relatif lebih rendah anomali curah hujannya.

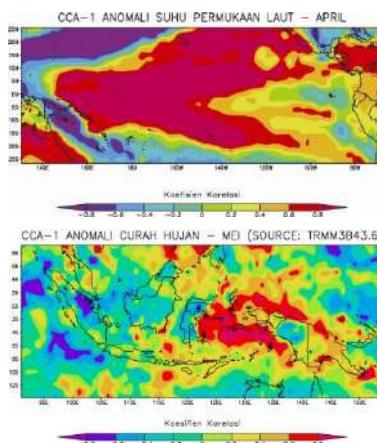


Gambar 81. Hasil Analisis EOF terhadap anomali curah hujan TRMM di Indonesia secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober.

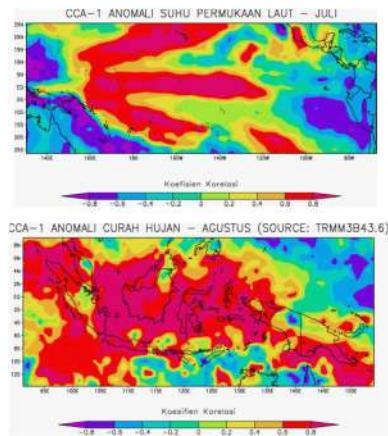
Hasil analisis CCA antara anomali curah hujan (TRMM) Indonesia dan anomali SST Pasifik Tropik. Hasil analisis EOF selanjutnya digunakan sebagai input untuk melakukan analisis korelasi dengan metode CCA antara anomali curah hujan Indonesia terhadap anomali SST Pasifik Tropik. Analisis ini juga dilakukan setiap bulan (Januari – Desember) periode tahun 1998 - 2008. Sebagai contoh pada tulisan ini ditampilkan hasil CCA dari anomali SST Pasifik Tropik bulan April dan anomali curah hujan Indonesia bulan Mei (Gambar 5-12a) untuk merepresentasikan periode MAM, serta hasil CCA dari anomali SST Pasifik Tropik bulan Juli dan anomali curah hujan Indonesia bulan Agustus untuk merepresentasikan periode JJA (Gambar 5-12b). Sedangkan hasil analisis CCA untuk periode SON dan DJF dapat dilihat pada Gambar 5-13a dan 5-13b.

Hasil korelasi yang cukup tinggi antara anomali SST Pasifik Tropik dan anomali curah hujan TRMM Indonesia ditandai dengan warna merah. Pada Gambar 5-12a, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan April yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) lebih dominan berada di wilayah Niño-4 (5°N - 5°S , 160°E - 150°W), sementara di lokasi Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W) korelasinya lemah ($r < 0.6$). Hal ini menyebabkan rendahnya korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan Mei. Pada Gambar 5-12a dapat dilihat bahwa wilayah yang mempunyai korelasi tinggi untuk anomali curah hujan Indonesia pada bulan Mei hanya terdapat di wilayah Maluku dan sebagian Papua.

Pada Gambar 5-12b, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan Juli yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) berada di lokasi Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W). Hal ini menyebabkan tingginya korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan Agustus. Pada Gambar 5-12b dapat dilihat bahwa wilayah yang mempunyai korelasi tinggi untuk anomali curah hujan Indonesia pada bulan Agustus hampir berada di seluruh wilayah Indonesia.

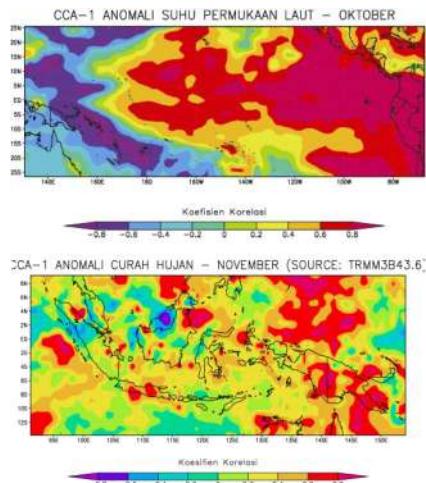


Gambar 82. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari.

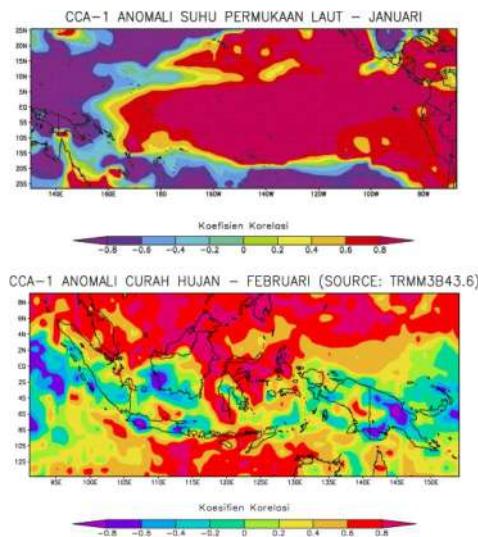


Gambar 83. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Juli dan anomali curah hujan Indonesia bulan Agustus.

Pada periode SON, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan Oktober yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) berada di wilayah Niño-3.4 ($5^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}, 170^{\circ}-120^{\circ}\text{W}$), namun korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan November bervariasi dari rendah hingga tinggi (Gambar 6a). Sementara itu, pada Gambar 6b dapat dilihat bahwa sinyal El Nino di wilayah Nino 3.4 kuat pada bulan Januari, namun curah hujan di wilayah Indonesia yang berkorelasi kuat pada bulan Februari terdapat di wilayah utara Indonesia dan selatan Indonesia. Bervariasi korelasi curah hujan pada periode DJF, kemungkinan disebabkan oleh adanya pengaruh monsun serta suhu permukaan laut lokal di wilayah Indonesia.



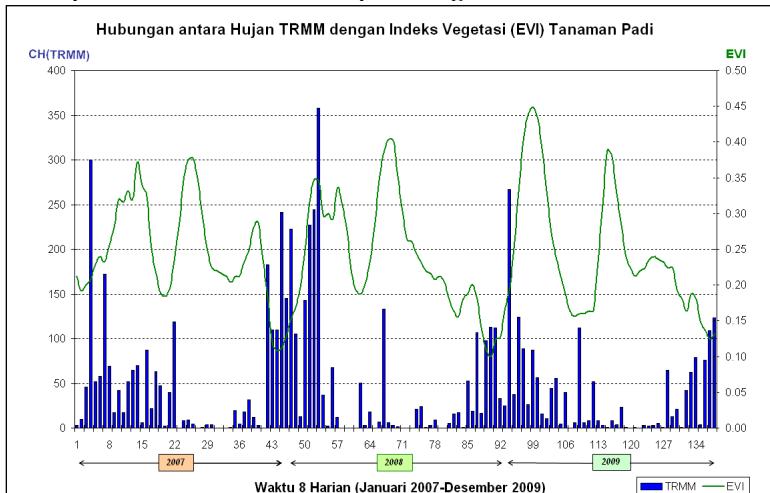
Gambar 84. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Oktober dan anomali curah hujan Indonesia bulan November.



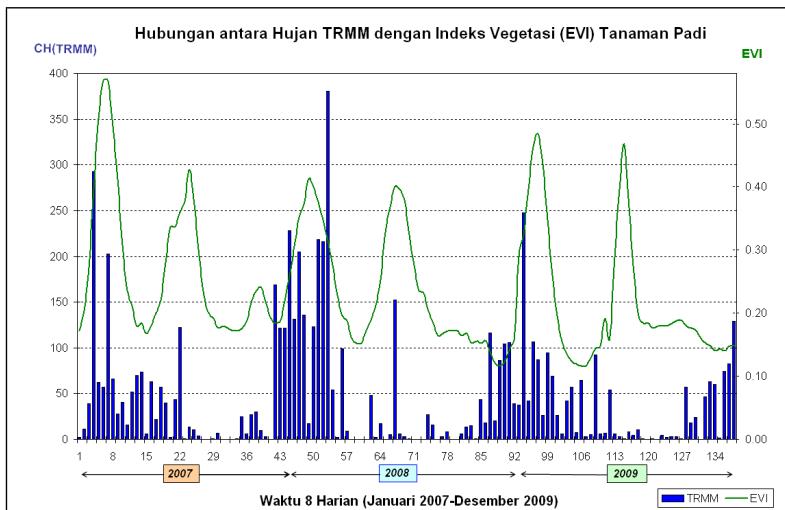
Gambar 85. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari

Hubungan Antara Fase Pertumbuhan dengan Curah Hujan

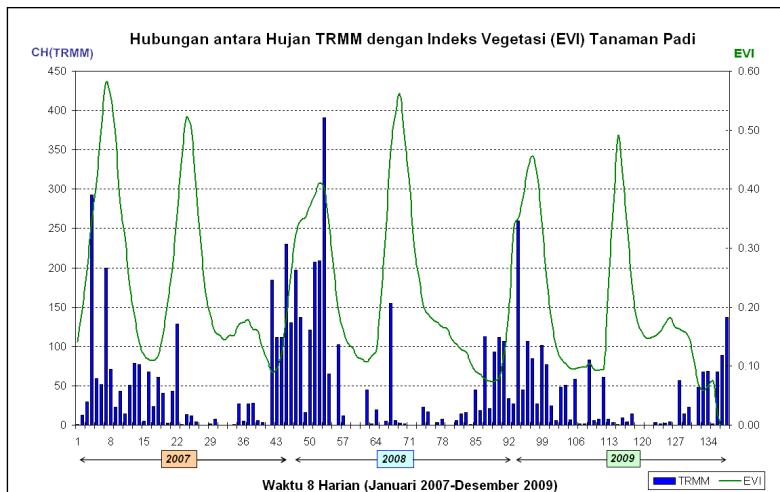
Faktor ketersediaan air menentukan pertumbuhan tanaman. Pada masa awal pertumbuhannya hingga mencapai fase pertumbuhan vegetatif maksimum (sekitar 55 – 60 HST) tanaman padi membutuhkan air. Untuk lahan sawah irigasi dengan kondisi pengairan yang cukup optimal, pasokan air tambahan dari hujan tidak begitu berpengaruh. Faktor curah hujan sangat berpengaruh pada lahan-lahan sawah tada hujan atau lahan sawah irigasi yang mengalami cekaman air pada musim kemarau (umumnya pada periode Mei-Agustus). Untuk melihat hubungan antara curah hujan dengan fase pertumbuhan tanaman padi, maka dapat dilihat berdasarkan plot data hujan TRMM dengan EVI Multitemporal pada lahan sawah irigasi di Kabupaten Indramayu. Hasil ekstraksi data TRMM dan EVI 8 harian, pada setiap kelas sawah di Indramayu, Cilacap, dan Lamongan dapat dilihat pada Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-21.



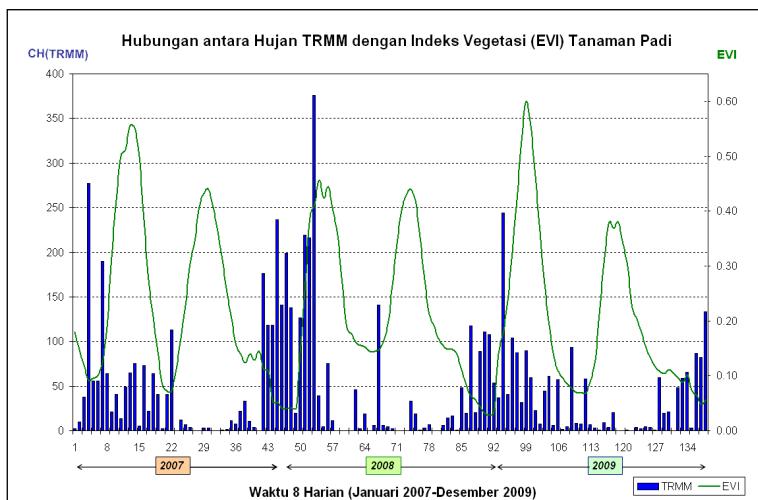
Gambar 86. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.45-0.50



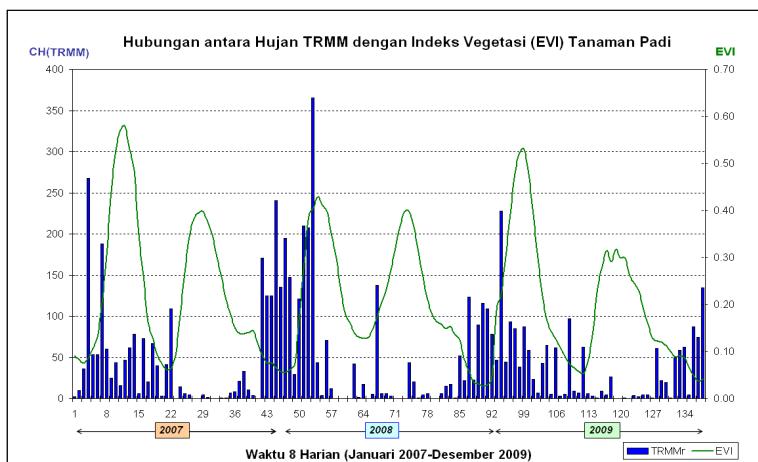
Gambar 87. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.50-0.55



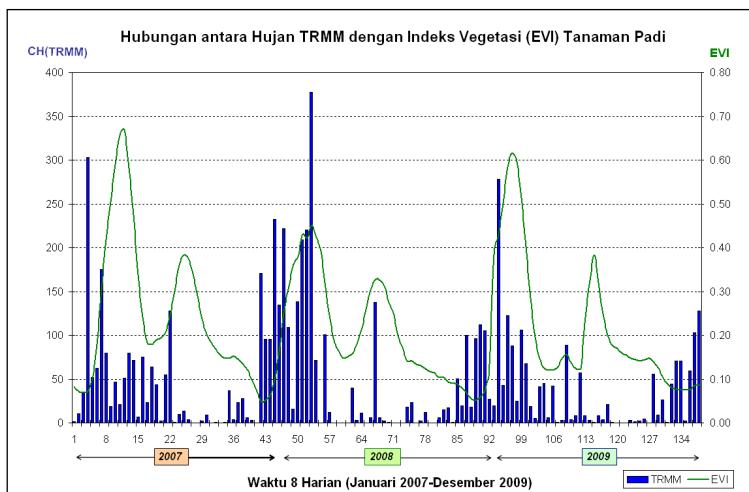
Gambar 88. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.55-0.60



Gambar 89. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.60-0.65



Gambar 90. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.65-0.70



Gambar 91. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max > 0.70

Berdasarkan Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-21 menunjukkan bahwa :

Profil EVI mendahului curah hujan. Artinya fluktuasi curah hujan tampak lebih lambat dari EVI tanaman padi. Kondisi aktual di lapangan menunjukkan terjadinya keterlambatan tanam padi. Pasokan air dari curah hujan tidak dimanfaatkan secara optimal untuk kebutuhan pertumbuhan tanaman padi.

Fluktuasi curah hujan dengan dengan delay hingga 1 bulan mengikuti pertumbuhan padi pada musim tanam pada delapan harian 34 – 62 atau Oktober – Maret. Peningkatan curah hujan diikuti dengan kenaikan EVI, atau sebaliknya.

Fluktuasi curah hujan tidak mengikuti pertumbuhan tanaman padi pada musim tanam pada delapan harian April - September. Walaupun curah hujan menurun, tetapi EVI tetap meningkat. Pertumbuhan tanaman tetap berlangsung karena adanya pasokan air dari pengairan irigasi.

Tanaman padi pada awal pertumbuhan hingga umur 30 hari memerlukan air yang cukup sekitar 50 mm/ minggu, maka untuk menentukan korelasi antara hujan dengan EVI dipilih saat lahan sawah sudah didominasi oleh tanaman padi, yaitu setelah 15 hari.

Penutup

Hasil analisis spasial dan regresi terhadap data di daerah pantura Jawa Barat yang meliputi Karawang-Subang-Indramayu, Cilacap dan Lamongan diperoleh 6 model pertumbuhan untuk tanaman padi yang memiliki nilai kisaran EVI maksimum 0.46-0.50; 0.51-0.55; 0.56-0.60; 0.61-0.65; 0.66-0.70, dan > 0.7 untuk setiap fase vegetatif dan generatif.

Tingkat korelasi (CCA) antara anomali SST Pasifik Tropik dan anomali TRMM Indonesia bervariasi menurut musim, dimana pada periode JJA (Juni, Juli, Agustus) memiliki akurasi yang tinggi ($r > 0.8$), sedangkan pada periode MAM (Maret, April, Mei) memiliki akurasi yang rendah ($r < 0.6$).

Fluktuasi curah hujan dengan delay hingga 1 bulan di pulau Jawa mengikuti pertumbuhan padi pada musim tanam Oktober – Maret. Peningkatan curah hujan diikuti dengan kenaikan EVI, atau sebaliknya. Sebaliknya pada April – September menunjukkan tetap adanya peningkatan nilai EVI, walaupun curah hujan menurun, karena pasokan air diperoleh dari pengairan irigasi.

Saran

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menduga produktivitas tanaman padi dengan menggunakan kombinasi air tersedia dari curah hujan dan air irigasi dan indek vegetasi (EVI).

DAFTAR BACAAN

- Aldrian E, and Susanto RD. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their Relationship to sea surface temperature, *Intl. J. Climatol.*, 23, 1435-1452.
- Ditjen Sumberdaya Air. 2006. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 13 /Prt/M/2006. Tentang Organisasi Dan Tata Kerja Balai Wilayah Sungai.
- Falcon, W. P., R. L. Naylor, W. L. Smith, M. B. Burke, E. B. McCullough, 2004: Using climate models to improve Indonesian food security. *Bull Indonesian Econ Studies*, 40, 357-79.
- Fontana, D.C, et all. 2007. Assessing the Relationship Between shire Winter Crop Yield and Seasonal Variability of the MODIS NDVI and EVI images. *Applied GIS* : an international, refereed, open source journal. Vol 3, No 7, p 1-16. Australia.
- Haylock M, and McBride J. 2001. Spatial coherence and predictability of Indonesian wet season rainfall, *J. Climate*, 14, 3882-3887.
- Hendon HH. 2003. Indonesian rainfall variability: impacts of ENSO and local air-sea interaction, *J. Climate*, 16, 1775-1790.
- Huete AR, Liu HQ, Batchily K dan Van Leeuwen W. 1997. A Comparisons of Vegetation Indices Global Set of TM Images for EOS MODIS. *Remote Sensing of Environtment* 59 : 440 - 451.

- Ichikawa H. and T. Yasunari, 2006: Time–Space Characteristics of Diurnal Rainfall over Borneo and Surrounding Oceans as Observed by TRMM-PR. *Journal of Climate*: Vol. 19, No. 7, pp. 1238–1260.
- Kogan, F.N., 1990: Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int. J. Remote Sens.* 11 (8), 1405–1419.
- Kogan, F.N., 1995: Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15 (11), 91–100.
- Kogan, F.N., 2002: World droughts in the new millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 83 (48), 562–563.
- Meneghini, R., J. A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto and J. Kwiatkowski, 2004: A Hybrid Surface Reference Technique and Its Application to the TRMM Precipitation Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 21, No. 11, pp. 1645–1658.
- Mori S., H. Jun-Ichi, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakurai, H. Hashiguchi, and T. Sribimawati, 2004: Diurnal Land–Sea Rainfall Peak Migration over Sumatera Island, Indonesian Maritime Continent, Observed by TRMM Satellite and Intensive Rawinsonde Soundings. *Monthly Weather Review*: Vol. 132, No. 8, pp. 2021–2039.
- Nicholls, N.: 1989, Sea surface temperatures and Australian winter rainfall. *J. Climate*, 2, 965-973.
- Naylor, R. L., W. P. Falcon, D. Rochberg, and N. Wada, 2001: Using El Niño/Southern Oscillation climate data to predict rice production in Indonesia, *Climatic Change*, 50, 255–65.

- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and C.-L. Shie, 2007: Spectral Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM PR Data. Part II: Algorithm Improvement and Heating Estimates over Tropical Ocean Regions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(7), 1098-1124
- Trenberth, K. E., 1997: The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771-2777.
- Wolff, D. B., D. A. Marks, E. Amitai, D. S. Silberstein, B. L. Fisher, A. Tokay, J. Wang and J. L. Pippitt, 2005: Ground Validation for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 22, No. 4, pp. 365–380.
- Xiao, Xiangming dkk. 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* 95 (2005) 480–492. Science Direct.

BAGIAN IV. TEKNOLOGI

BAB 1.

HUBUNGAN ANOMALI CURAH HUJAN DENGAN ENSO MODOKI INDEKS (EMI) PADA KONDISI EL-NINO DAN LA-NINA UNTUK MENDUKUNG PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI CURAH HUJAN DI INDONESIA

Woro Estiningtyas, Aris Pramudia dan Dariin Firda

Pendahuluan

Mengetahui gambaran kondisi curah hujan beberapa waktu ke depan sangat penting agar dapat dapat dilakukan antisipasi seandainya diketahui bahwa curah hujan sangat kurang ataupun sangat berlebih. Kedua kondisi ini bisa berdampak berupa banjir dan kekeringan. Oleh karena itu hingga saat ini telah banyak dikembangkan berbagai model prediksi curah hujan dengan tujuan dan kepentingan yang berbeda-beda. Semua mengarah pada keinginan untuk meningkatkan akurasi yang lebih baik dan menekan risiko akibat dampak perubahan iklim dan kejadian iklim ekstrim.

Curah hujan merupakan salah satu parameter iklim yang paling erat hubungannya dengan tanaman. Fluktuasi dan besaran

curah hujan serta sebaran dan distribusinya sangat berpengaruh terhadap jenis komoditas pertanian yang dikembangkan. Di wilayah dengan sebaran bulan basah lebih dari 7-9 bulan pada umumnya dapat dilakukan penanaman padi 2 kali dan bisa menjadi 3 kali apabila didukung dengan pengaturan air melalui irigasi. Sebaliknya wilayah dengan curah hujan sangat rendah dan tersebar hanya 3-4 bulan hanya bisa tanam padi 1 kali dengan produksi yang kurang optimal apabila hanya mengandalkan curah hujan. Oleh karena itu gambaran pola dan besaran serta distribusi curah hujan beberapa waktu ke depan sangat diperlukan.

Indeks global yang merepresentasikan kondisi dan proses massa uap air yang terjadi di atmosfer memiliki hubungan yang kuat dengan kejadian hujan di suatu wilayah dengan jeda waktu (time lag) yang berbeda-beda. Hubungan ini dapat diketahui dengan melakukan analisis korelasi dan signifikansinya apakah berkorelasi kuat dan nyata (signifikan) atau tidak. Indeks global yang berkorelasi kuat dan nyata menunjukkan bahwa curah hujan di wilayah tersebut sangat dipengaruhi oleh pola dan besaran indeks global. Artinya indeks global tersebut dapat digunakan sebagai indikator untuk mengetahui pola dan sebaran curah hujan, dengan kata lain indeks global tersebut dapat digunakan sebagai prediktor curah hujan. Adanya hubungan yang erat antara curah hujan dengan indeks global menjadi dasar utama untuk melakukan penelitian dan kajian tentang pola hubungan serta sejauh mana keeratan antara kedua parameter tersebut.

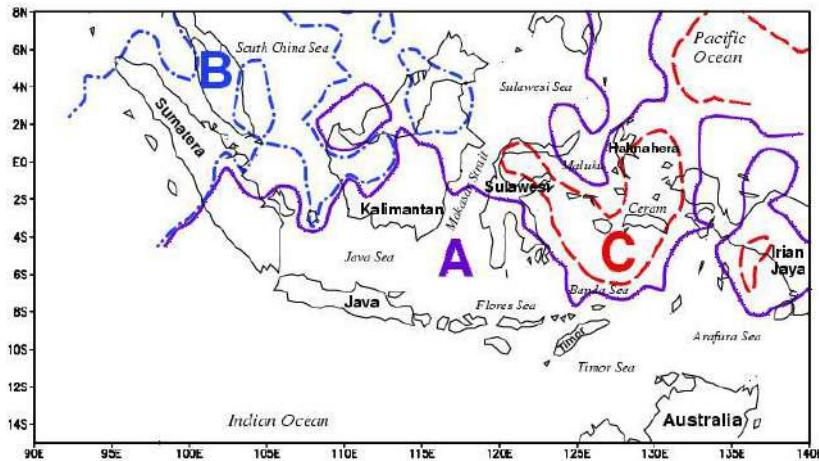
Salah satu indeks global yang berkorelasi kuat dan signifikan terhadap curah hujan di beberapa wilayah di Indonesia adalah ENSO Modoki Indeks (EMI). Berdasarkan hasil penelitian Estiningtyas et al. (2018) indeks EMI paling banyak tersebar (31%) dengan korelasi kuat dan signifikan di wilayah kunci (Key Area) di beberapa lokasi di Indonesia. Tulisan ini membahas tentang hasil korelasi dan signifikansi antara anomali curah hujan dengan indeks EMI dan implikasinya untuk pengembangan model

prediksi curah hujan di Indonesia yang merupakan bagian dari hasil penelitian DIPA Balitklimat tahun 2018.

Karakteristik Curah Hujan di Indonesia

Indonesia terletak di wilayah yang dilewati oleh garis ekuator. Oleh karena itu dalam kondisi normal, wilayah Indonesia mendapatkan curah hujan yang lebih besar dibandingkan dengan wilayah lain yang tidak berada di daerah ekuator. Semakin jauh dari ekuator jumlah curah hujan semakin menurun dan mencapai minimum di daerah kutub. Curah hujan yang melimpah terjadi di sepanjang wilayah konvergensi ekuator atau pita Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ). Curah hujan yang besar terjadi di wilayah udara naik yang merupakan daerah tekanan rendah, sebaliknya di wilayah udara turun seperti di daerah subtropik memiliki curah hujan yang jumlahnya jauh lebih kecil.

Selain dipengaruhi oleh posisi ITCZ, curah hujan di Indonesia juga dipengaruhi oleh sirkulasi monsun maupun keadaan lokal. Secara garis besar curah hujan di Indonesia dibagi menjadi 3 tipe hujan, yaitu : A (monsunal), B (ekuatorial) dan C (lokal) (Gambar II.4). Tipe curah hujan ini sangat berperan untuk mengetahui pengaruh anomali iklim khususnya El Niño terhadap musim di Indonesia.



Gambar 92. Tipe hujan di Indonesia (Sumber : Aldrian dan Susanto, 2003)

Tipe Hujan Monsun

Memiliki 1 puncak dan 1 lembah, dipengaruhi oleh monsun Barat Laut yang bersifat basah (Nopember-Maret), dan monsun Tenggara yang bersifat kering (Mei-September). Karakteristik pola curah hujan ini adalah distribusi hujannya berbentuk "V" dengan jumlah curah hujan musiman pada bulan Juni, Juli atau Agustus. Saat monsun barat jumlah curah hujan berlimpah, sebaliknya saat monsun timur jumlah curah hujan sangat sedikit. Hal ini disebabkan pada monsun barat gerakan massa udara melewati permukaan laut pada jarak yang cukup jauh sehingga mengandung cukup banyak uap air. Sementara pada monsun timur gerakan massa udara melewati permukaan laut pada jarak yang relatif pendek. Dua mekanisme penting penggerak monsun menurut Webster (1986) adalah : 1) perbedaan pemanasan daratan dan lautan serta gradien tekanan yang dihasilkan yang menggerakkan angin dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, dan 2) perubahan arah angin akibat rotasi bumi.

Di Indonesia daerah yang mempunyai curah hujan tipe monsun cukup luas, meliputi wilayah Sumatera bagian selatan, pulau Jawa sampai dengan Nusa Tenggara Timur, sebagian Papua bagian selatan, sebagian kecil Kalimantan bagian selatan, Sulawesi Selatan dan Tenggara, serta sebagian kecil wilayah Sulawesi Utara, Maluku bagian utara dan Irian bagian utara.

Pola curah hujan tipe monsun digerakkan oleh sel tekanan tinggi dan sel tekanan rendah di benua Asia dan Australia secara bergantian. Musim dingin di daratan Asia yang terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari menimbulkan sel tekanan tinggi di Asia. Sedangkan di benua Australia berlangsung musim panas yang menyebabkan terjadinya sel tekanan rendah. Kondisi demikian menyebabkan terjadinya gerakan massa udara dari benua Asia menuju Australia yang dikenal sebagai monsun barat. Kondisi sebaliknya terjadi pada bulan Juni, Juli, Agustus yang dikenal sebagai monsun timur atau tenggara.

Tipe Hujan Ekuatorial

Memiliki 2 puncak, yaitu Oktober-Nopember dan Maret-Mei. Dua puncak tersebut berhubungan dengan pergerakan ITCZ. Pola curah hujan tipe ekuatorial dicirikan oleh distribusi curah hujan bulanan yang mempunyai dua nilai maksimum yang terjadi setelah ekinoks (pada bulan Maret dan Oktober). Terjadi pada tempat-tempat yang dilalui garis ekuator, seperti di Pontianak. Jumlah curah hujan maksimum terjadi setelah ekinoks. Pola curah hujan ekuatorial secara dominan dipengaruhi oleh konvergensi intertropik, sehingga pengaruh monsun kurang tegas dibandingkan pengaruh insolasi matahari pada waktu ekinoks.

Tipe Hujan Lokal

Memiliki 1 puncak pada Juni-Juli dan 1 lembah pada Nopember-Februari. Puncak curah hujan pada Juni-Juli sekitar 300 mm/bulan. Pola hujan tipe lokal mempunyai ciri distribusi curah hujan bulanannya merupakan kebalikan dari tipe monsun. Di Indonesia pola hujan jenis ini sangat sedikit, contohnya daerah Ambon dan Sulawesi Selatan.

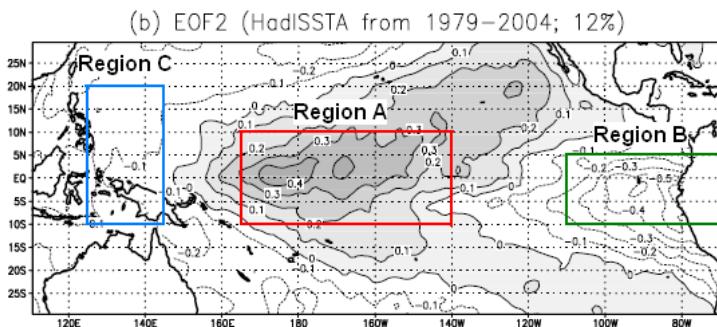
Kondisi geografis wilayah Indonesia yang sangat spesifik akan mempengaruhi pola curah hujan yang terjadi. Wilayah Indonesia yang merupakan kontinen maritim dengan pulau-pulau yang mempunyai kondisi topografi sangat beragam menyebabkan timbulnya pola curah hujan yang sama sekali berbeda dengan dua pola curah hujan sebelumnya. Gunung-gunung atau pegunungan yang terdapat di suatu pulau akan mempengaruhi pola curah hujan yang terjadi di sekitarnya. Faktor orografi ini dapat memperlemah atau bahkan meniadakan pengaruh monsun sehingga ada tempat-tempat dimana pada saat berlangsung monsun timur yang pada umumnya mengalami kekeringan, tetapi justru terjadi banyak hujan.

Pemanasan yang tidak sama antara daratan dan lautan juga menjadi penyebab munculnya pengaruh lokal ini seperti yang terjadi di Jepara dimana terjadi curah hujan yang cukup besar. Menurut Bayong (1992), fenomena ini disebabkan semakin menguatnya monsun oleh angin laut yang lembab serta didukung oleh kondisi topografi yaitu terdapatnya gunung Muria yang membantu mempercepat proses terjadinya hujan. Dengan mengetahui tipe hujan di setiap wilayah, maka dapat dipelajari pola-pola hubungan curah hujan dengan indikator anomali iklim seperti SST.

ENSO MODOKI INDEKS (EMI)

Ashok dkk. (2007) mendefinisikan ENSO Modoki Index (EMI) dengan persamaan $EMI = [ASPL]A - 0,5 [ASPL]B - 0,5 [ASPL]C$ dimana nilai ASML merupakan rata-rata dari tiga wilayah yaitu tengah (A: 10° LU– 10° LS 165° BT– 140° BB), timur (B: 5° LU– 15° LS, 110° – 70° BB), dan barat (C: 20° LU– 1° LS, 125° – 145° BT) Samudera Pasifik (Gambar 2). Kategori El Niño Modoki adalah apabila amplitudo dari indeks tersebut $\geq 0.7 \sigma$, dimana σ adalah standar deviasi musiman.

Adanya hubungan yang erat antara curah hujan dengan EMI telah dinyatakan dalam berbagai hasil penelitian di beberapa negara (W. Cai and T. Cowan. 2009; Juan Feng and Jianping Li. 2011; R Hidayat, et al. 2017; Anna Maria Kusumaningayu et al. 2016; Samir Cordoba-Machado et al. 2015; B. Preethi et al. 2015; J. V. Ratnam et al. 2014; Chunzai Wang and Xin Wang. 2012, Hengyi Weng, et al. 2007; Hengyi Weng et al. 2009; Qiang Zhang et al. 2015).



Gambar 93. Wilayah yang digunakan untuk menghitung EMI (sumber: <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/>).

Berdasarkan hasil penelitian Key Area Keragaman Iklim Indonesia (Estiningtyas et al. 2018) diperoleh bahwa indeks global

EMI memiliki korelasi yang kuat dan signifikan dan paling banyak tersebar di wilayah kunci keragaman Indonesia (31%) dibandingkan dengan indeks global lainnya seperti indeks Nino 3 dan ONI (16%), Nino 3.4 (14%), MEI dan Nino 4 (6%), Nino 1,2 (5%), JMASST (4%), SOI (2%) dan OLR (1%). Pengaruh indeks global terhadap curah hujan beragam antara wilayah di Indonesia.

Hasil penelitian Hidayat et al. (2017) tentang pengaruh La Niña dan La Niña Modoki di Indonesia menunjukkan bahwa indeks Nino 3.4 sangat berkorelasi ($r = -0,95$) dengan curah hujan Indonesia. Anomali curah hujan positif hingga 200 mm / bulan terjadi sebagian besar di wilayah Indonesia selama acara La Niña, tetapi di DJF beberapa daerah di Sumatera, Kalimantan dan Indonesia bagian timur cenderung memiliki curah hujan negatif. Selama La Niña Modoki, anomali curah hujan positif (hingga 50 mm / bulan) terjadi di Pulau Sumatera, Kalimantan, Jawa, dan Indonesia timur pada periode Desember-Januari-Februari (DJF) dan hingga 175 mm / bulan hanya terjadi di Pulau Jawa pada musim Maret-April-Mei (MAM). La Niña memiliki SST pendingin yang kuat di Pasifik khatulistiwa tengah dan timur ($-1,5^{\circ}\text{C}$) di DJF. Sementara pemanasan akibat La Niña Modoki terjadi di Pasifik khatulistiwa barat dan timur ($0,75^{\circ}\text{C}$) dan pendinginan SST di Pasifik tengah ($-0,75^{\circ}\text{C}$) di DJF dan MAM. Sirkulasi Walker pada saat La Niña Modoki (pada DJF dan MAM) menunjukkan konvergensi yang kuat di Pasifik timur, dan konvergensi yang lemah di Pasifik Barat (Indonesia). Sementara pengaruh El Niño Modoki terhadap curah hujan dikaji oleh Kusumaningayu et al. (2016) di wilayah Papua. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa anomali SST El Niño Modoki menyebabkan perbedaan anomali curah hujan di Papua secara spasial dan temporal. Pada periode DJF, pengurangan curah hujan terjadi di Papua dengan maksimum terjadi di wilayah Papua selatan. Selama MAM, ada peningkatan curah hujan di wilayah Papua selatan dan sebaliknya di wilayah Papua utara. Selama JJA, pengurangan curah hujan terjadi di Papua dengan maksimum di

Papua utara. Selama SON, ada pengurangan curah hujan di Papua dengan magnitude lebih kecil dari di JJA dan peningkatan curah hujan di wilayah Papua tengah kecil. Anomali curah hujan di semua musim hingga 50% dari varians curah hujan Papua (signifikan). Pengurangan curah hujan terjadi di wilayah Papua utara dan peningkatan curah hujan di wilayah Papua selatan selama peristiwa El Niño Modoki.

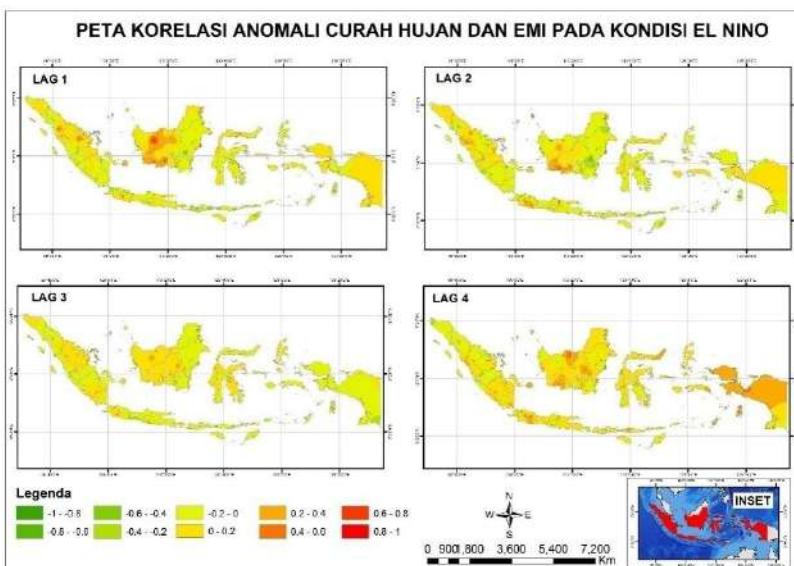
Korelasi Antara Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño dan La Niña

Analisis korelasi dilakukan terhadap data anomali curah hujan dari 621 stasiun hujan di Indonesia dengan periode data bulanan lebih dari 20 tahun. Gambar 3 menunjukkan sebaran tingkat korelasi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi El Niño pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4. Lag adalah perbedaan waktu antara fenomena global (yang direpresentasikan melalui indeks) dengan kejadian curah hujannya. Lag 1 artinya fenomena EMI 1 bulan yang lalu berpengaruh terhadap curah hujan bulan ini, sedangkan lag 2 artinya fenomena EMI 2 bulan yang lalu berpengaruh terhadap curah hujan bulan ini dan seterusnya hingga lag 4. Untuk mengetahui sebaran stasiun dengan tingkat korelasi yang sangat tinggi, maka dilakukan sortasi untuk mendapat nilai korelasi yang lebih dari 0,6 baik positif maupun negatif.

Berdasarkan hasil pengolahan korelasi anomali curah hujan dan EMI diperoleh nilai korelasi tertinggi sebesar -0.743 pada lag 1 di Stasiun Mataram Kediri, Kabupaten Lombok Barat, Provinsi NTB. Selain itu beberapa lokasi yang memiliki nilai korelasi tinggi negatif pada lag 1 antara lain Subang, Karanganyar, Cluwak, Cadasari dan Narmada (Tabel 1). total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi negatif tersebut berjumlah 6 atau 1.0 % dari total 621 stasiun hujan.

Tabel 27. Korelasi Tinggi (Negatif) Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 1

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI R
-0.8--0.6	JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.698
-0.8--0.6	JAWA BARAT	Subang	Karanganyar	-0.694
-0.8--0.6	JAWA TENGAH	Pati	Sta. Cluwak	-0.624
-0.8--0.6	BANTEN	Pandeglang	Cadasari	-0.655
-0.8--0.6	NTB	Lombok Barat	Mataram Kediri	-0.743
-0.8--0.6	NTB	Lombok Barat	Narmada	-0.614



Gambar 3. Peta Korelasi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi El Niño

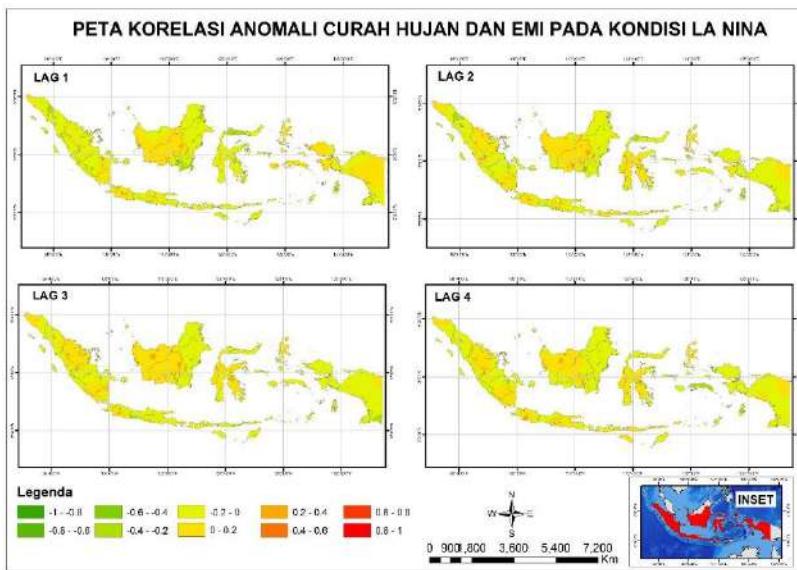
Untuk nilai korelasi positif, diperoleh nilai tertinggi sebesar 0.784 di stasiun Jatiwangi, Kabupaten Majalengka, Provinsi Jawa Barat pada lag 4. Selain itu korelasi tinggi positif diperoleh di Stasiun Cicalengka, Leles, Juntinyuat, Karang Kemiri, Sebulu dan Pongtiku. Dominasi korelasi tinggi positif terletak di Provinsi Jawa Barat, yaitu Kabupaten Bandung nilai r 0.743, Garut nilai r 0.608, Indramayu nilai r 0.619, dan Majalengka dengan nilai r 0.784 (Tabel 2). Total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi positif tersebut berjumlah 7 atau 1.1 % dari total 621 stasiun.

Tabel 2. Korelasi Tinggi (positif) Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 4

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI R
0.6-0.8	JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0.743
0.6-0.8	JAWA BARAT	Garut	Leles	0.608
0.6-0.8	JAWA BARAT	Indramayu	Juntinyuat	0.619
0.6-0.8	JAWA BARAT	Majalengka	Jatiwangi	0.784
0.6-0.8	JATENG	Purworejo	Kar. Kemiri	0.689
0.6-0.8	KALTIM	Kutai Kartanegara	Sebulu	0.636
0.6-0.8	SULSEL	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.626

Pada kondisi La Niña, secara spasial pada lag 1 sampai dengan lag 4 nilai korelasi positif didominasi antara 0 hingga 0.2 dan korelasi negatif antara -0.4 hingga -0.2. Wilayah yang memiliki korelasi tertinggi negatif berada pada lag 1 yang masuk ke dalam kelas korelasi -0.6 s/d -0.4, yaitu Kabupaten Kutai provinsi Kalimantan Timur tepatnya stasiun Teluk Dalam dengan nilai r -0.489 selain itu wilayah lain memiliki nilai r -0.445 yaitu Kemangkon-Purbalingga-Jawa Tengah dan BMKG Barambai-Barito Kuala-Kalimantan Selatan. Stasiun lainnya dengan korelasi negatif cukup tinggi adalah Simpang, Grabag dan Tanah Merah.

Total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi negatif tersebut berjumlah 6 atau 1.0 % dari total 621 stasiun hujan. Sedangkan untuk korelasi tertinggi positif berada pada lag 2 yaitu kabupaten Sumbawa Provinsi Nusa Tenggara Barat stasiun Uthan Rhee dengan nilai $r = 0.452$ yang masuk ke dalam kelas korelasi 0.4 s/d 0.6. Secara rinci dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Jadi total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi positif tersebut hanya berjumlah 1 atau 0.2 % dari total 621 stasiun hujan. Sebaran korelasi pada kondisi La Niña disajikan dalam Gambar 4.



Gambar 94. Peta Korelasi antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña

Tabel 28. Korelasi (Negatif) Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI IR
-0.6--0.4	SUMATERA BARAT	Padang Pariaman	Simpang	-0.45
-0.6--0.4	JAWA TENGAH	Purbalingga	Sta Kemangkon	-0.445
-0.6--0.4	JAWA TENGAH	Purworejo	Sta Grabag	-0.412
-0.6--0.4	KALIMANTAN SELATAN	Barito Kuala	BMKG Barambai	-0.445
-0.6--0.4	KALIMANTAN TIMUR	Samarinda	Stasiun Tanah Merah	-0.425
-0.6--0.4	KALIMANTAN TIMUR	Kutai	Stasiun Teluk Dalam	-0.489

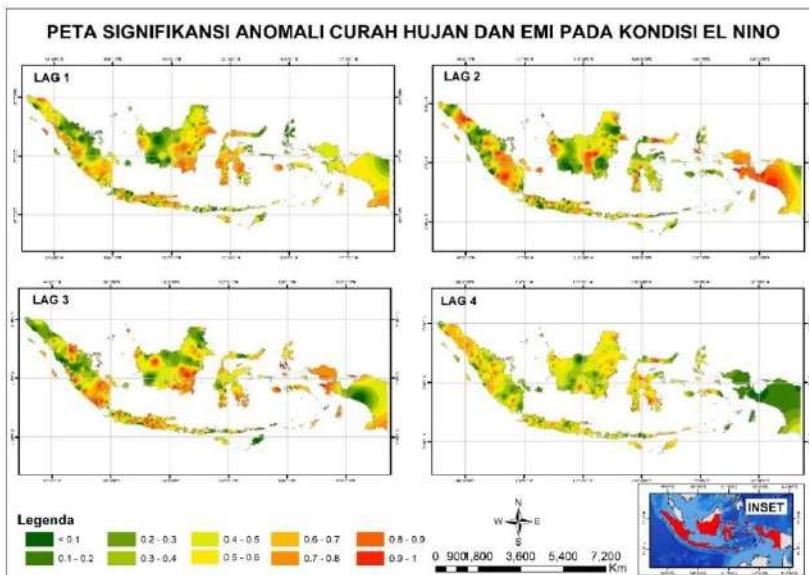
Signifikansi antara Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño dan La Niña

Signifikansi digunakan dalam analisis dalam rangka untuk mengetahui taraf kepercayaan apakah nyata atau tidak. Taraf nyata yang digunakan dalam analisis ini sebesar 90% atau $p=0,1$. Hasil dikatakan nyata apabila nilai $p<0,1$. Gambar 5 menunjukkan sebaran tingkat signifikansi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi El Niño pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4.

Berdasarkan hasil pengolahan signifikansi antara anomali curah hujan dengan EMI pada kondisi El Niño diperoleh bahwa sebaran hasil yang signifikan dominan terjadi pada lag 4. Nilai p yang sangat signifikan ditandai dengan nilai $p=0$. Nilai p tersebut tersebar di 2 lokasi yakni Cicalengka (Prov. Jawa Barat) dan Sebulu (Prov. Kalimantan Timur). Sedangkan nilai signifikansi lainnya yang masuk kedalam kelas <0.1 tersebar di 70 lokasi di Indonesia. Jadi total lokasi yang memiliki signifikansi <0.1 di lag 1 tersebar di 70 lokasi atau 11.3 % dari total 621 stasiun hujan (Tabel 4).

Tabel 29. Signifikansi sangat kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 4

Kelas Signifikansi	Provinsi	Kabupaten	Stasiun	Nilai p
<0.1	JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0
<0.1	KALIMANTAN TIMUR	Kutai Kartanegara	Sebulu	0



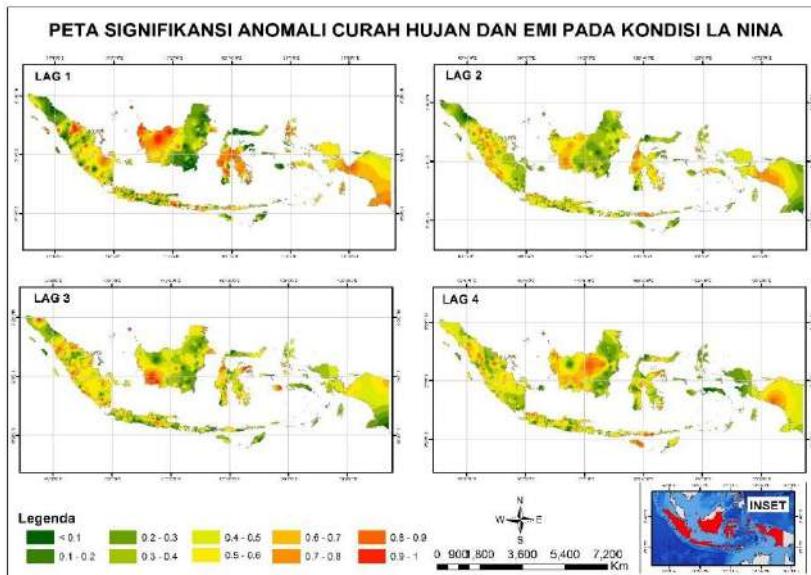
Gambar 95. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi El Niño

Pada kondisi La Niña Gambar 6 menunjukkan sebaran tingkat signifikansi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi La Niña pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4. Berdasarkan hasil analisis, sebaran nilai yang signifikan banyak terdapat di lag 4. Nilai p yang sangat signifikan

(p=0) tersebar di 4 lokasi yakni Stasiun Simpang-Kabupaten Padang Pariaman-Provinsi Sumatera Barat, BMKG Barambai-Kabupaten Barito Kuala-Provinsi Kalimantan Selatan, Stasiun Teluk Dalam-Kabupaten Kutai- Provinsi Kalimantan dan Stasiun Grabag-Kabupaten Purworejo-Provinsi Jawa Tengah. Sedangkan nilai signifikansi lainnya yang masuk kedalam kelas <0.1 tersebar di 128 lokasi di Indonesia. Jadi total lokasi yang memiliki signifikansi <0.1 di lag 1 tersebar di 128 lokasi atau 20.6 % dari total 621 stasiun hujan.

Tabel 30. Signifikansi Sangat Kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1

Kelas Signifikansi	Provinsi	Kabupaten	Stasiun	Nilai p
<0.1	SUMATERA BARAT	Padang Pariaman	Simpang	0
<0.1	JAWA TENGAH	Purworejo	Grabag	0
<0.1	KALIMANTAN SELATAN	Barito Kuala	BMKG Barambai	0
<0.1	KALIMANTAN TIMUR	Kutai	Stasiun Teluk Dalam	0



Gambar 96. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña

Penentuan stasiun hujan untuk pengembangan model prediksi iklim berdasarkan indeks global EMI dilakukan dengan mengkombinasikan antara nilai korelasi dan signifikansi dengan kriteria korelasi kuat atau sangat kuat dan signifikan atau sangat signifikan. Berdasarkan kriteria ini dilakukan identifikasi untuk mengetahui sebaran dan prosentasenya. Hasil identifikasi pada kondisi El Niño diperoleh bahwa persentase nilai korelasi yang dominan adalah di kisaran 0,25 sampai dengan 0,5 (kategori cukup) yaitu 29,3% untuk semua lag. Persentase berikutnya adalah untuk kisaran nilai korelasi 0,5 hingga 0,75 (kategori kuat) sebesar 6,8% untuk semua lag, dan untuk kisaran korelasi sangat kuat (0,75 hingga 1) dengan persentase 0,8% untuk semua lag (Tabel 6).

Tabel 31. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi El Niño

Klasifikasi		Jumlah Stasiun								Ket		
Korelasi	Signifikansi	Lag 1	%	Lag 2	%	Lag 3	%	Lag 4	%	TOTAL	%	
Sangat Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	1	0.2	3	0.5	0	0.0	1	0.2	5	0.8	
Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	10	1.6	6	1.0	10	1.6	16	2.6	42	6.8	dari total 621 Stasiun
Cukup (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	37	6.0	49	7.9	48	7.7	48	7.7	182	29.3	

Pada kondisi La Niña, prosentase paling tinggi dihasilkan untuk kelas korelasi cukup dan signifikan/sangat signifikan sebesar 39,6% dan tidak dihasilkan untuk kelas korelasi kuat dan sangat kuat (Tabel 7).

Tabel 32. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi La Niña

Klasifikasi		Jumlah Stasiun								Ket		
Korelasi	Signifikansi	Lag 1	%	Lag 2	%	Lag 3	%	Lag 4	%	TOTAL	%	
Sangat Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	dari total 621 Stasiun
Cukup (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	76	12.2	67	10.8	62	10.0	41	6.6	246	39.6	

Selanjutnya untuk mengetahui stasiun hujan yang berkorelasi kuat dan signifikan, maka dipilih nilai korelasi yang kuat dan sangat kuat serta signifikan dan sangat signifikan. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa Provinsi Jawa Barat merupakan provinsi dengan jumlah stasiun terbanyak yang memiliki korelasi kuat antara curah hujan dengan EMI. Sementara provinsi lainnya relatif sama (Tabel 8). Sebaran stasiun hujan yang paling banyak adalah di lag 4 yakni di Jatiwangi (Prov. Jabar), Wonosari (Prov. DIY). Pada korelasi kuat negatif dan signifikan berada di Lemahabang (Prov. Jabar), dan Halim (Prov. DKI Jakarta), korelasi kuat positif dan sangat signifikan yang berada di Provinsi Jawa Barat terdapat 3 lokasi yakni di Cicalengka, Leles, dan Jutinyuat,

lalu di Provinsi Jawa Tengah terdapat 2 lokasi yakni di Kar Kemiri, Banyubiru, lokasi lainnya berada di Pangsuma Putussibau (Prov. Kalbar), Sebulu (Prov. Kaltim), Minahasa Utara (Prov. Sulut), Airmadidid (Prov. Sulut) dan Pongtibu (Prov. Sulawesi Utara). Pada koreasi kuat positif dengan signifikansi dengan signifikansi signifikan berada di 3 lokasi yakni di Jiken (Prov. Jawa Tengah), Ruteng (Prov. NTT), Sepinggan (Prov. Kalimantan Timur). Sementara pada kondisi La Niña tidak dihasilkan stasiun hujan yang memiliki korelasi kuat dan signifikan (yang teridentifikasi adalah yang memiliki korelasi cukup dan signifikan).

Tabel 33. Korelasi dan Signifikansi Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño

PROVINSI	KABUPATEN	LOKASI	KORELASI	SIGNIFIKANSI	LAG	KLASIFIKASI KUAT AREA
SUMATERA UTARA	Padang Sidempuan	Sta. Met. Kls. IV Aek Godang	0.645	0.004	1	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
RIAU	Pelewalan	Kemang	0.529	0.024	1	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Majalengka	Baranjar	0.775	0.014	1	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.698	0.054	1	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Karanganyar	-0.654	0.056	1	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA TENGAH	Pati	Ciulaw	-0.624	0.054	1	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA TENGAH	Pandeglang	Cikarang	-0.655	0.054	1	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTT	Lombok Barat	Mataian Kediri	0.743	0.014	1	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTB	Lombok Barat	Namada	0.614	0.059	1	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
KAUIMANTAN BARAT	Pontianak	Sta. Met. Sentang	0.738	0.015	1	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KAUIMANTAN TENGAH	Kotawaringin Timur	Sampit	0.564	0.089	1	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cibuni	0.620	0.056	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cemara	0.606	0.063	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Cianjur	Pacet	0.617	0.058	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.718	0.029	2	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Tasikmalaya	Singaparna	0.773	0.009	2	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Blora	JIKEN	0.816	0.004	2	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Blora	Dawan	-0.751	0.032	2	Korelasi Sangat Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KAUIMANTAN SELATAN	Tabalong	Muara Uya	-0.619	0.056	2	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
SUMATERA BARAT	Lima Puluh	Suliki	0.548	0	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SUMATERA BARAT	Solok	Sukarami	0.567	0.004	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Karawang	Lemahabang	-0.550	0.079	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
DKI JAKARTA	Jakarta Timur	Halim	-0.709	0.015	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Purworejo	Kar Kemiri	0.688	0.019	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
BALI	Jembrana	Palasari	-0.693	0.026	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTT	TTU	Eban	-0.612	0.045	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KAUIMANTAN UTARA	Barito Utara	Muara Teweh Tengah	0.618	0.043	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
KAUIMANTAN UTARA	Tarakan	Sta. Met. Tarakan	0.539	0.047	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI SELATAN	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.577	0.004	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0.743	0.000	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Garut	Leles	0.608	0.036	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Indramayu	Juntinyuat	0.619	0.032	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Karawang	Lemahabang	-0.542	0.059	4	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA BARAT	Majalengka	Jatiwangi	0.784	0.003	4	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
DKI JAKARTA	Jakarta Timur	Halim	-0.55	0.064	4	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA TENGAH	Blora	JIKEN	0.5	0.098	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA TENGAH	Purworejo	Kar Kemiri	0.689	0.013	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Semarang	Banyubiru	0.579	0.049	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
DIY	Slaman	Wonosar	-0.552	0.018	4	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTT	Manggarai	Ruteng	0.541	0.069	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
KAUIMANTAN BARAT	Kapuas Hulu	Sta. Met. Kls. III Pangsuma Putussibau	0.508	0.006	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
KAUIMANTAN TIMUR	Balikpapan	Sta. Met. Kls. II Sepinggan	0.54	0.07	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
KAUIMANTAN TIMUR	Kutai Kartanegara	Sebulu	0.636	0	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI UTARA	Minahasa Utara	Sta. Klim. Kelas II Minahasa Utara	0.562	0.023	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI UTARA	Minahasa Utara	Airmadidid	0.562	0.023	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI SELATAN	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.626	0.001	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan

Penutup

Fenomena perubahan iklim / kejadian iklim ekstrim terus terjadi dan menimbulkan dampak yang signifikan terutama pada sektor pertanian khususnya sub sektor tanaman pangan. Oleh karena itu perlu dilakukan berbagai upaya dalam rangka meminimalkan dampaknya. Salah satunya dengan mengembangkan model prediksi curah hujan dan dampaknya pada sektor pertanian.

Posisi Indonesia yang diapit dua samudera dan dua benua menjadikan iklim Indonesia sangat kompleks dan dinamis. Namun di sisi lain sebagai negara tropis, Indonesia memiliki kelebihan terkait ketersediaan massa uap air (bahang). Dengan selalu tersedianya bahang (heat) dan air produk pertanian dapat dihasilkan sepanjang tahun. Selain itu keragaman iklim memberi peluang untuk menghasilkan produk yang berbeda ataupun yang sama pada waktu yang berbeda yang akan mendorong perdagangan.

Curah hujan sebagai salah satu parameter iklim yang paling erat hubungannya dengan produksi pertanian memiliki karakteristik dan pola yang terkait dengan fenomena global. Dari berbagai hasil penelitian diketahui bahwa ada keterkaitan antara indeks global dengan curah hujan di Indonesia. Oleh karena itu data dan informasi yang terkait dengan ini sangat penting dan perlu dikembangkan agar dapat diimplementasikan di sektor pertanian.

Indeks global EMI yang sudah teridentifikasi memiliki korelasi kuat dan signifikan pada lag 1-4 dapat digunakan sebagai prediktor curah hujan di wilayah (stasiun hujan) yang memiliki korelasi kuat dan sangat kuat serta signifikan dan sangat signifikan. Dengan demikian dapat dikembangkan model-model prediksi curah hujan yang lebih akurat untuk mendukung monitoring dampak kejadian iklim ekstrim pada sektor pertanian

khususnya pada wilayah-wilayah yang sudah teridentifikasi memiliki korelasi yang kuat dan signifikan.

DAFTAR BACAAN

- Aldrian, E., dan R. D. Susanto, 2003, Identification of Three Dominant Rainfall Regions Within Indonesia and Their Relationship To Sea Surface Temperature, International Journal Of Climatology, Int. J. Climatol, 23: 1435-1452. Wiley InterScience.
- Anna Maria Kusumaningayu, Joko Wiratmo and M. Ridho Syahputra. 2016. El Niño Modoki Impacts on Rainfall Anomaly in Papua Indonesia. The 6th International Symposium for Sustainable Humanosphere Humanosphere Science School 2016 Bogor, 15 – 16 November 2016.
- Bayong, Tjasyono, 2000a, Peluang Curah Hujan di Jawa, Jurnal Teknologi Mineral Volume VII No. 2. Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Mineral ITB.
- B. Preethi, T.P. Sabin, J.A. Adedoyin and K. Ashok. 2015. Impacts of the ENSO Modoki and other Tropical Indo-Pacific Climate-Drivers on African Rainfall. Scientific Reports/5:16653/DOI:10.1038/srep16653.
- Chunzai Wang and Xin Wang. 2012. Classifying El niño Modoki I and II by Different Impacts on Rainfall in Southern China and Typhoon Tracks. Journal of Climate Vol. 26.
- Hengyi Weng & Karumuri Ashok & Swadhin K. Behera & Suryachandra A. Rao & Toshio Yamagata. 2007. Impacts of recent El niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. Clim Dyn (2007) 29:113–129 DOI 10.1007/s00382-007-0234-0.

- Hengyi Weng & Swadhin K. Behera & Toshio Yamagata. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El niño Modoki and El niño events. *Clim Dyn* (2009) 32:663–674 DOI 10.1007/s00382-008-0394-6.
- Juan Feng and Jianping Li. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, D13102, doi:10.1029/2010JD015160, 2011
- J. V. Ratnam And S. K. Behera, Y. Masumoto, T. Yamagata. 2014. Remote Effects of El niño and Modoki Events on the Austral Summer Precipitation of Southern Africa. *Journal of Climate* Vol. 27.
- Qiang Zhang, Yue Wang, Vijay P. Singh, Xihui Gu, Dongdong Kong, Mingzhong Xiao. 2015. Impact of ENSO and ENSO Modoki+A regimes on Seasonal Precipitation Variations and Possible Underlying Causes in the Huai River Basin, China. *Journal of Hydrology* 533 (2015) 308-319.
- R Hidayat, MD Juniarti, U Ma'rufah. 2017. Impact of La Niña and La Niña Modoki on Indonesia rainfall variability. *LISAT 2017* IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 149 (2018) 012046 doi :10.1088/1755-1315/149/1/012046
- Samir Cordoba-Machado, Reiner Palomino-Lemus, Sonia Raquel Gamiz-Fortis, Yolanda Castro-Diez, Maria Jesus Esteban-Parra. 2015. Assessing the Impact of El Niño Modoki on Seasonal Precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change* 124 (2015) 41-61.
- Webster, P.J., 1986, The Elementary Monsoon dalam Monsoons, Bab 1, Fein, J.S dan Stephens P.L, Editor, John Wiley and Sons, 3-32.

W. Cai and T. Cowan. 2009. La Niña Modoki impacts Australia autumn rainfall variability. *Geophysical Research Letters*, VoL. 36, L12805, doi:10.1029/2009GL037885.

BAB 2.

PREDIKSI CURAH HUJAN UNTUK PENGELOLAAN PERTANIAN YANG TAHAN RISIKO IKLIM

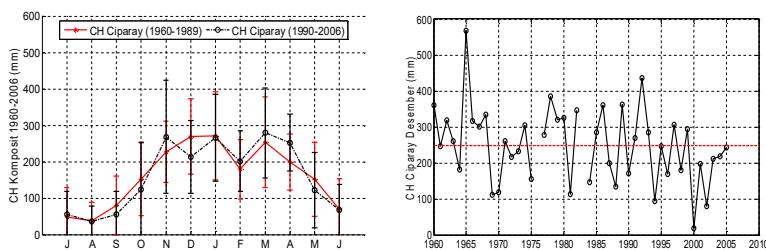
Elza Surmaini dan Elsa Rakhmi Dewi

Pendahuluan

Pertanian dapat dikatakan merupakan sektor yang paling rentan terhadap perubahan iklim global karena iklim adalah faktor yang sangat menentukan keberhasilan suatu kegiatan pertanian. Dampak paling nyata yang dapat dilihat dan dirasakan akibat perubahan iklim antara lain : 1) pergeseran musim dan perubahan pola curah hujan yang akan berakibat pada kekacauan waktu dan musim tanam serta pengaturan pola tanam, 2) peningkatan curah hujan yang berpengaruh terhadap degradasi lahan, kerusakan tanaman dan produktivitas, 3) kekeringan dan banjir yang berpengaruh pada produktivitas, luas tanam dan luas panen.

Sebagai ilustrasi mengenai kemungkinan adanya pergeseran musim yang terjadi dalam dua periode klimatologis (30 tahun-an) terakhir ini dapat dilihat dalam Gambar 1. Dalam gambar tersebut, data pengamatan curah hujan jangka panjang di stasiun Ciparay, Jawa Barat, menunjukkan bahwa selama dasawarsa terakhir ada kecenderungan penurunan curah hujan di bulan Desember, tetapi peningkatan di bulan-bulan November, Maret dan April.

Kecenderungan penurunan jumlah curah hujan bulan Januari terutama terlihat dari tahun 2000 sampai dengan 2005. Pada tahun-tahun sebelumnya, curah hujan Januari terlihat lebih berfluktuasi di sekitar nilai rata-ratanya. Karena Desember merupakan salah satu bulan penting dalam periode musim tanam padi di Indonesia, pergeseran seperti inilah yang mungkin berdampak terhadap kekacauan pengaturan pola tanam dan penentuan musim tanam seperti disebutkan sebelumnya.



Gambar 97. Komposit curah hujan bulanan Juli-Juni dari data pengamatan curah hujan jangka panjang di Ciparay, Jawa Barat (kiri) dan plot data runut waktu curah hujan Januari dari 1960-2005 di stasiun yang sama (kanan) (Sumber : Hadi *et al.*, 2009)

Kejadian iklim ekstrim yang mengakibatkan banjir dan kekeringan seperti pada padi sawah. Data dari Direktorat Perlindungan Tanaman Pangan, Departemen Pertanian menunjukkan pada periode 1989-2016 menyebutkan luas tanaman padi terkena banjir tertinggi adalah pada bulan Januari 2005 yaitu seluas 134.333 hektar, sedangkan yang puso seluas 85.9270 hektar juga pada bulan Januari tahun 2005. Sementara akibat kekeringan tercatat luas terkena 266.719 ha pada bulan Juli tahun 1991, dan puso tertinggi seluas 85.942 ha pada bulan Juli tahun 2015. Luas tanaman padi terkena kekeringan tertinggi tercatat pada tahun 1991. Luas tersebut lebih tinggi daripada kekeringan yang terjadi pada tahun El Niño dengan intensitas kuat pada tahun 1997/1998

dan 2015/2016. Pada kondisi normal, rata-rata tahunan luas terkena kekeringan adalah 153.406 ha, pada tahun El Nino seluas 511.763 ha, sedangkan pada tahun La Nina lebih rendah yaitu 116.822 ha. Pada kejadian El Nino terjadi peningkatan yang signifikan yaitu sekitar 400 persen (Surmaini dan Susanti, 2016).

Menyikapi berbagai dampak tersebut di atas, maka prediksi curah hujan sudah seharusnya menjadi bagian yang selalu diperhitungkan dalam perencanaan pertanian. Prakiraan iklim di sektor pertanian kini telah menjadi kebutuhan utama, bukan hanya bibit, pupuk, dan pemberantas hama. Informasi itu bahkan menjadi acuan dalam memilih jenis bibit dan waktu tanam serta menetapkan jumlah stok bahan pangan pokok yang harus disediakan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Di sejumlah kabupaten/kota, berbagai kelompok petani kini aktif mengikuti sekolah lapangan iklim. Mereka berharap bisa lebih mudah dan pasti dalam menetapkan varietas serta kalender tanam, sesuai gejala-gejala iklim yang dipelajari. Oleh karena itu, pengembangan model-model prakiraan iklim sangat diperlukan demi meningkatkan kesiapan dalam perencanaan pertanian yang adaptif terhadap perubahan iklim.

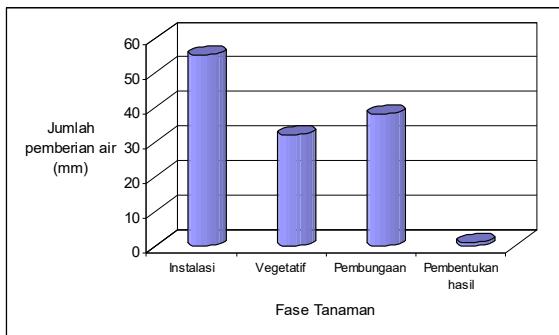
Kebutuhan Prediksi Curah Hujan untuk Pertanian

Pada sektor pertanian, prediksi curah hujan dengan jangka waktu prediksi (*lead time*) ideal selama minimal satu musim ke depan menjadi kebutuhan penting dalam perencanaan kegiatan usahatani. Sedangkan informasi prediksi curah bulanan seperti awal musim hujan, sifat dan jumlah curah hujan, namun kurang detail untuk operasional di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu model prediksi yang dapat memberikan hasil prediksi karakteristik curah hujan prediksi secara kuantitatif.

Dalam kaitannya dengan kegiatan pertanian, aplikasi hasil prediksi curah hujan dapat digunakan untuk : (1) Penentuan pola

tanam, hasil keluaran model yang berupa prakiraan curah hujan dasarian beberapa bulan ke depan dapat digunakan sebagai dasar dalam menyusun perencanaan pola tanam, (2) Potensi irigasi, apabila curah hujan di suatu lokasi tertentu diketahui yang ditunjang dengan ketersediaan pasokan irigasi wilayah tersebut, maka dapat diketahui potensi irigasi wilayah tersebut, (3) Pemilihan komoditas, jumlah curah hujan beberapa bulan ke depan dapat digunakan untuk menentukan jenis komoditas yang dapat ditanam untuk menghindari resiko kehilangan hasil, (4) Pemilihan teknologi budidaya yang akan diterapkan, dan 5) Menetapkan jumlah stok bahan pangan pokok yang harus disediakan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat dan 6) Prediksi curah hujan juga menjadi faktor penting di sektor pengairan atau pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) dalam kaitan dengan sistem peringatan dini ketika terjadi banjir di kawasan permukiman di bagian hilir karena curah hujan yang tinggi (Hadi *et al.* 2009)

Selain untuk penyusunan skenario masa tanam, hasil prediksi hujan dapat digunakan untuk menghitung potensi irigasi. Model dapat menjawab kondisi curah hujan wilayah tertentu, sehingga apabila curah hujan di suatu lokasi tertentu diketahui yang ditunjang dengan ketersediaan pasokan irigasi wilayah tersebut, maka dapat diketahui potensi irigasi wilayah tersebut. Sebagai contoh kasus Ngale, apabila penanaman tetap dilakukan pada tanggal 30 April 2006, maka konsekuensi harus dilakukan penambahan air pada saat tertentu (Estiningtyas *et al.*, 2005). Pada fase instalasi, vegetatif dan pembungaan diperlukan air yang lebih banyak dibandingkan fase pembentukan hasil, yaitu berturut-turut 55, 32, 38 dan 1 mm atau 44%, 25%, 30% dan 1% dari total air yang harus ditambahkan (Gambar 2). Volume air yang harus ditambahkan dapat dihitung dengan cara mengalikan kebutuhan air pada suatu fase tertentu dengan luas lahan yang digunakan untuk pertanaman tersebut.



Gambar 98. Skenario jumlah pemberian air pada setiap fase tanaman padi di Ngale tanggal tanam 30 April 2006 (Estiningtyas *et al.*, 2005)

State of the Art Prediksi Musim

Berbeda dengan teknologi prediksi cuaca operasional yang berkembang pesat sejak digunakannya model numerik, prediksi iklim pada umumnya masih banyak didasarkan kepada model-model empirik (statistik/stokastik). Model empirik maupun model numerik mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pengembangan model empirik biasanya melibatkan pemilihan parameter yang masih mengandung unsur subjektif sehingga untuk setiap lokasi dan waktu yang berbeda mungkin harus digunakan model dengan parameter yang berbeda pula. Di lain pihak, model numerik yang lebih objektif pada umumnya akan menghasilkan kesalahan yang berkembang semakin besar untuk prediksi yang terlalu jauh ke depan.

Pengembangan beberapa model prediksi empirik menggunakan data curah hujan runut waktu sebelum ini telah dilakukan beberapa peneliti dengan berbagai metoda seperti *fourier regression*, *fractal analysis*, *artificial neural network*, *adaptive spline treshold autoregression* (ASTAR), filter Kalman (Dupe, 1999; Haryanto, 1999; Boer *et al.*, 1999; Boer, *et al.*, 2005 dan Estiningtyas, *et al.*, 2005). Puslitbang BMKG megembangkan paket prediksi yang yang menggunakan metoda antara lain : (1)ANFIS (*Adaptive*

Neuro Fuzzy Inference System), (2)Transformasi Wavelet, (3)ARIMA (Autoregressive moving average), dan (4)TISEAN (Non Linear Dynamics/Time Series Analysis).

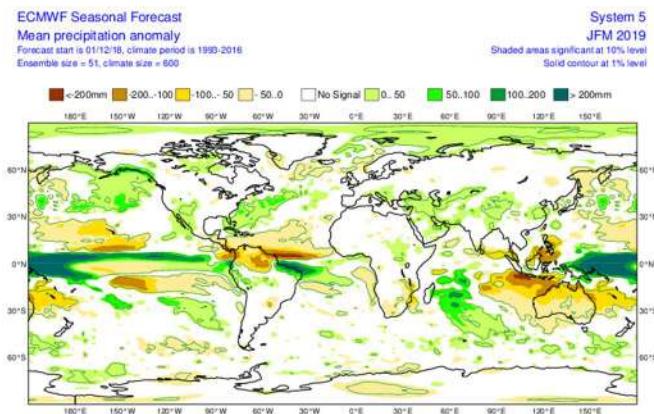
Seperti disinggung sebelumnya, model prediksi empirik cenderung menghasilkan ketelitian yang tidak konsisten karena untuk waktu dan lokasi yang berbeda mungkin diperlukan parameter yang berbeda pula untuk menghasilkan prediksi. Model runut waktu juga biasanya memerlukan data yang cukup panjang dan kontinyu. Jika stasiun pengamatan terbatas, model empirik sulit memberikan gambaran mengenai pola sebaran spasial dari parameter iklim dalam skala yang luas.

Untuk mengantisipasi variasi pola iklim yang semakin dinamis, beberapa pusat prediksi cuaca terkenal di dunia seperti NCEP (AS), ECMWF (Eropa), dan JMA (Jepang), telah mengembangkan prediksi musim (*seasonal*) dengan *lead-time* tiga hingga sembilan bulan ke depan berbasis model numerik. Perkembangan mutakhir menunjukkan bahwa prediksi musim menggunakan metoda *ensemble* yang dikoreksi melalui proses *downscaling* cukup memberikan prospek ketelitian prediksi yang lebih baik. (Palmer *et al.*, 2004).

Terdapat keyakinan yang cukup besar bahwa Global Circulation Model (GCM) juga mampu mengestimasi iklim secara kuantitatif yang dapat dipercaya di masa yang akan datang, terutama pada skala benua atau global (Randall, 2007). Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan GCM adalah terkait dengan resolusi, akurasi dan ketidakpastian. Resolusi keluaran GCM yang kasar menjadi kendala untuk digunakan langsung dalam skala lokal atau DAS. Teknik *downscaling* digunakan untuk menghubungkan keluaran GCM dengan skala global dengan skala lokal. Semua teknik *downscaling* berdasarkan asumsi bahwa keluaran GCM skala luas dapat menggambarkan iklim pada skala hidroklimatologi (Dahm *et al.*, 2016).

Akurasi atau keandalan prediksi sangat diperlukan untuk menyakinkan pengguna. Berbagai teknik statistik dapat

digunakan untuk mengetahui akurasi prediksi. Adapun ketidakpastian tidak dapat dikurangi, tetapi dapat dikuantifikasikan dengan menggunakan teknik ansambel (Surmaini et al. 2018). Contoh hasil prediksi untuk 3 bulan ke depan (Gambar 3) dapat dilihat dari situs internet. Namun demikian, informasi ini agak sulit digunakan untuk aplikasi pertanian seperti diuraikan di atas karena tidak dapat diolah lebih lanjut.



Gambar 99. Contoh produk prediksi anomali curah hujan ansambel Januari-Maret 2019 yang dikeluarkan oleh ECMWF (<http://www.ecmwf.int/>) diakses 16 Desember 2018

Pengolahan Lanjut dan Downscaling Prediksi Musim Ansambel Global

Data keluaran model prediksi *ensemble* global umumnya mempunyai resolusi ruang yang kurang baik karena memiliki ukuran grid antara $1,25^{\circ}$ sampai $2,5^{\circ}$. Skala ini jelas tidak memadai untuk berbagai aplikasi. Oleh karena itu, salah satu aspek pengolahan data prediksi *ensemble* yang penting untuk pertanian

adalah *downscaling* yakni proses untuk menghasilkan data prediksi dengan resolusi ruang yang lebih tinggi atau pada lokasi spesifik dari data prediksi skala global.

Ada dua jenis metoda yang dapat digunakan : (a) *Dynamical Downscaling* (DD) dan (b) *Statistical Downscaling*. Metoda DD dilakukan menggunakan model numerik dengan data prediksi global sebagai nilai awal dan nilai batas. Ini cukup sulit dilakukan karena memerlukan sumberdaya komputasi yang besar dan ketersediaan data prediksi global secara tiga-dimensi. Oleh karena itu, metoda SD merupakan alternatif yang menarik untuk dikaji. Kajian yang dilakukan oleh Kang et al. (2007) menunjukkan bahwa SD dapat meningkatkan ketelitian prediksi curah hujan stasiun secara signifikan untuk studi kasus di Filipina dan Thailand.

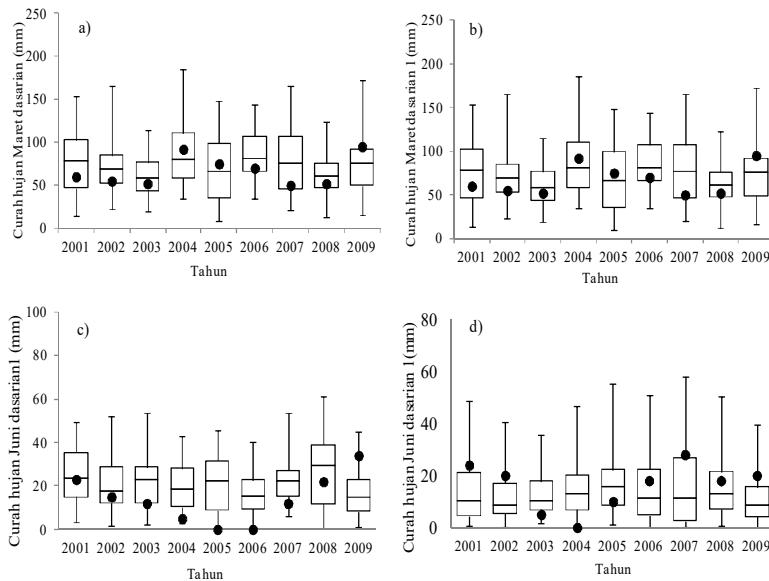
Metode SD untuk wilayah Asia Tenggara juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Juneng et al. (2010) menyatakan bahwa akurasi prediksi curah hujan lokal di wilayah timur laut semenanjung Malaysia dapat ditingkatkan dengan *downscaling* menggunakan metode *Canonical Correlation Analysis* (CCA). Kang et al. (2007) menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) untuk mencari prediktor curah hujan lokal di Filipina dan Thailand dan model regresi linier untuk mencari men-*downscale*. Vimont et al. (2010) menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA), *Maximum Covariance Analysis*, dan CCA untuk memprediksi curah hujan dengan skala propinsi di Indonesia menggunakan prediktor SPL, V 200 hPa dan 850 hPa, dan kelembaban spesifik 850 hPa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil *downscaling* paling akurat di wilayah Jawa, Bali dan Nusa Tenggara pada musim transisi September-Oktober dan cukup akurat pada MK (Mei-Agustus).

Metode SD yang lain adalah metode analog. Penggunaan metode analog dimulai oleh Zorita et al. (1995). Salah satu tujuan dari pengenalan metode ini adalah untuk memperoleh statistik iklim lokal yang konsisten dengan kondisi atmosfer skala luas (Zorita dan von Storch, 1999). Ketika metode ini diterapkan untuk

men-downscale prediksi iklim lokal, basis data yang digunakan idealnya harus dapat mencakup seluruh pola atau kondisi atmosfir yang mungkin muncul di masa depan. Oleh karenanya, keberhasilan aplikasi metode ini akan sangat tergantung dari ketersediaan data pengamatan yang cukup panjang.

Metode analog merupakan metode SD yang relatif mudah diaplikasikan. Kelebihan utama metode ini adalah menggunakan pola iklim dari data pengamatan sehingga struktur spasial dari iklim lokal terwakilkan dengan baik pada hasil simulasi. Oleh karena metode ini menganalogikan pola iklim skala lokal dengan pola iklim skala luas, hal penting yang perlu ditentukan adalah variabel iklim skala luas yang terbaik untuk mewakili variabel iklim lokal yang akan di analogikan. Timbal dan McAvaney (2001) mengajukan kriteria prediktor untuk metode analog sebagai berikut: a) secara realistik mampu disimulasikan oleh model sirkulasi global, b) memiliki kemampuan prediksi yang kuat terhadap variabel prediktan, dan c) memiliki keterkaitan fisis.

Surmaini et al. (2015) menggunakan metode *Constructed Analog* untuk mendownscaling keluaran prediksi curah hujan *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Sistem Prakiraan Iklim versi 2 (CFSv2)* untuk wilayah Jawa Barat dan Sulawesi Selatan. Gambar 4 menunjukkan bahwa *box plot* prediksi ansambel dan nilai observasinya. Sebagian besar curah hujan observasi berada dalam kisaran prediksi curah hujan ansambel, namun tidak selalu berada di sekitar nilai mediannya. Pada beberapa kejadian, nilai observasi terletak di luar kisaran prediksi ansambel, terutama pada saat curah hujan sangat rendah atau mendekati nilai 0.



Gambar 100. Sebaran dari 30 *member* prediksi curah hujan ansambel pada a) Bulan Maret dasarian 1 di Kecamatan Bunder, Kabupaten Cirebon, b) di Kecamatan Cimalaka, Kabupaten Sumedang, c) Bulan Juni dasarian 1 di Kecamatan Krangkeng, Kabupaten Indramayu dan d) Kecamatan Puturiase, Kabupaten Sidrap.

Prediksi Curah Hujan 1-2 Musim ke Depan untuk Perencanaan Pertanian

Menggunakan metode yang telah dikembangkan oleh Surmaini et al. (2015), Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi bekerjasama dengan ITB mengembangkan prediksi curah hujan operasional yang lebih spesifik untuk dimanfaatkan dalam perencanaan pertanian. Sumber data prediksi musim berbasis harian menggunakan prediksi operasional yang digunakan adalah yang dikeluarkan oleh the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System (CFS) versi 2. CFS dikeluarkan setiap hari sebanyak 4 kali sehari (pukul 0, 6, 12, dan

18) untuk 9 bulan ke depan dengan resolusi $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (Saha *et al.*, 2010) NCEP CFS versi 2 yang dapat diakses melalui <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data/cfsr-rfl-ts9/>.

Downscaling prediksi musim yang berbasis harian menghasilkan informasi prediksi berbagai karakteristik curah hujan sampai 6 bulan ke depan yang diperlukan untuk perencanaan strategi budidaya 1-2 musim ke depan. Informasi prediksi karakteristik curah hujan yang diperlukan sektor pertanian seperti prediksi sifat hujan, prediksi curah hujan < 50 mm/dasarian, prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian, prediksi hari tanpa hujan berturut-turut, prediksi hari hujan > 5 hari berturut-turut, prediksi hujan ekstrem, dan nilai onset dan tren SPI. *Update* (pemutakhiran) prediksi dilakukan 4 kali dalam setahun yaitu pada bulan Maret, Juni, September dan Desember seperti dapat dilihat pada Tabel 1. Informasi prediksi tersebut tersedia dalam bentuk peta yang dapat diunduh melalui website balitklimat dengan alamat <http://balitklimat.litbang.pertanian.go.id/>.

Tabel 34. Periode update prediksi karakteristik curah hujan

Update ke	Rilis (Bulan)	Periode prediksi (Bulan)
1	Februari	Maret – Agustus
2	Mei	Juli-November
3	Agustus	September-Februari
4	November	Desember-Mei

Peta prediksi tersedia untuk level nasional dan seluruh provinsi di Indonesia dalam bentuk pdf. Peta tersebut dapat diakses dan didownload dengan mudah. Tampilan link untuk mengakses prediksi iklim untuk disajikan pada Gambar 5 dan 6.



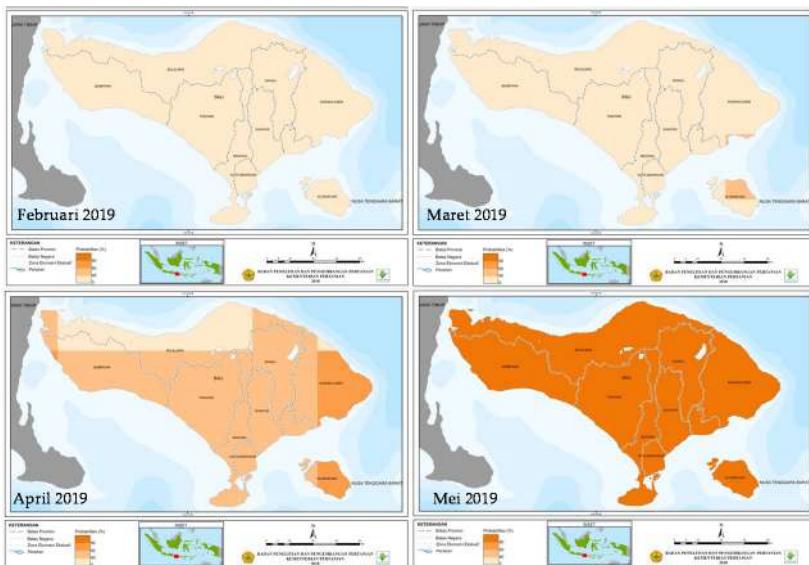
Gambar 101. Tautan untuk mengunduh prediksi iklim untuk pertanian pada website Balitklimat



Gambar 102. Tautan untuk memilih dan mengunduh peta prediksi

Salah satu contoh peta prediksi adalah prediksi hari tanpa hujan lebih dari 10 hari berturut-turut (HTH). Informasi prediksi tersebut diperlukan dalam perencanaan praktik budidaya, pemilihan komoditas, perencanaan irigasi dan lain sebagainya.

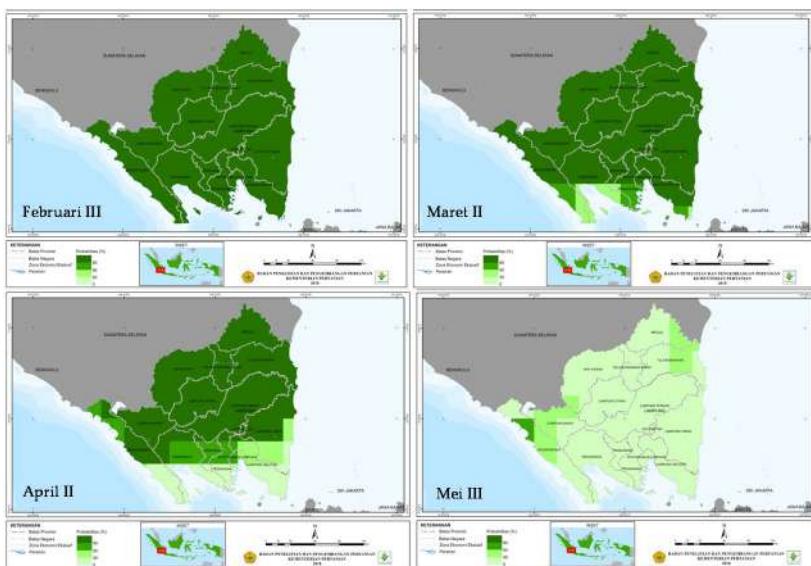
Hasil diskusi dengan stakeholder pada saat sosialisasi bahwa informasi ini sangat bermanfaat dalam menentukan target luas tambah tanam dalam program UPSUS yang sedang dilaksanakan oleh Kementerian Pertanian. Contoh prediksi HTH untuk provinsi Bali bulan Februari – Mei 2019 disajikan pada Gambar 7. Pada gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa peluang HTH mulai tinggi pada bulan April, dan pada bulan berikutnya peluangnya sangat tinggi di seluruh wilayah.



Gambar 103. Peta peluang prediksi HTH Pulau Bali untuk bulan Februari – Mei 2019

Bentuk prediksi peluang curah hujan lainnya adalah curah hujan > 50 mm/dasarian. Prediksi ini dapat juga digunakan untuk menentukan waktu untuk memulai tanam atau awal musim hujan. Peta prediksi tersedia dalam untuk setiap dasarian selama 6 bulan ke depan. Sebagai contoh untuk Provinsi Lampung periode Februari sampai Mei 2019 disajikan pada Gambar 8.

Perubahan curah hujan dasarian > 50 mm terlihat mulai rendah peluangnya di bagian selatan Lampung pada bulan Maret dasarian II. Wilayah tersebut mulai meluas pada April dasarian II. Pada Mei dasarian III seluruh Provinsi Lampung diprediksi rendah peluangnya untuk mendapatkan curah hujan > 50 mm/dasarian. Ini merupakan salah satu indikasi Provinsi Lampung sudah memasuki musim kemarau pada akhir bulan Mei 2019.



Gambar 104. Peta peluang prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian untuk Provinsi Lampung untuk dasarian Februari III–Mei III tahun 2019

Penutup

Meningkatnya kejadian iklim ekstrim mengakibatkan luas lahan pertanian yang terkena banjir dan kekeringan bertambah, sehingga luas lahan yang terkena puso pun meningkat, terutama saat kejadian El Nino. Pengembangan model prakiraan iklim sangat diperlukan untuk meningkatkan kesiapan dalam perencanaan pertanian yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Prediksi musim menggunakan metode *ensemble* yang dikoreksi melalui proses *downscaling* dapat memberikan tingkat ketelitian prediksi yang lebih baik karena menghasilkan data prediksi dengan resolusi ruang yang lebih tinggi atau pada lokasi spesifik dari data prediksi skala global. Metode yang relatif mudah diterapkan yaitu *Statistical Downscaling* (SD). Metode ini telah diaplikasikan untuk menguji ketelitian prediksi curah hujan di Asia Tenggara dan tingkat akurasi prediksi yang dihasilkan pun cukup baik. Metode SD yang lain yaitu metode analog, menggunakan pola iklim dari data pengamatan sehingga struktur spasial dari iklim lokal terwakilkan dengan baik pada hasil simulasi.

Informasi prediksi berbagai karakteristik curah hujan hingga 6 bulan ke depan, hasil downscaling prediksi musim berbasis harian telah dikembangkan oleh Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi bekerjasama dengan ITB menggunakan metode *Constructed Analog*. Karakteristik curah hujan tersebut meliputi prediksi sifat hujan, prediksi curah hujan < 50 mm/dasarian, prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian, prediksi hari tanpa hujan berturut-turut, prediksi hari hujan > 5 hari berturut-turut, prediksi hujan ekstrim, dan nilai onset dan tren SPI. *Update* (pemutakhiran) prediksi dilakukan 4 kali dalam setahun yaitu pada bulan Maret, Juni, September dan Desember dan dapat diunduh melalui website Balitklimat dalam bentuk peta.

Informasi prediksi selanjutnya dapat digunakan untuk perencanaan strategi budidaya 1-2 musim ke depan, pemilihan komoditas, perencanaan irigasi dan lain sebagainya. Selain itu, menurut stakeholder informasi ini sangat bermanfaat dalam menentukan target luas tambah tanam dalam program UPSUS yang sedang dilaksanakan oleh Kementerian Pertanian.

DAFTAR BACAAN

- Boer R, Notodipuro K.A, Las, I. 1999. Prediction of daily rainfall characteristic from monthly climate indicate, Paper pesented at the second international conference on science and technology for the Assesment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999. Italy.
- Boer, R., Sutikno, Faqih, A. 2005. Evaluasi kinerja model *Adaptive Spline Treshold Autoregression* (ASTAR) untuk peramalan hujan sepuluh harian. Lokakarya Nasional Forum Prakiraan, Evaluasi dan Validasi, 15-17 Desember. Jakarta.
- Dahm, R.J, Singh, U.K., Lal, M., Marchand M., Weiland, F.C.S. Singh, S.K., Singh, M.P. 2016. Downscaling GCM data for climate change impact assessments on rainfall: a practical application for the Brahmani-Baitarani river basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 499:1-42
- Dupe, Z.L. 1999. Prediction Nino 3.4 SST anomaly using simple harmonic model. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent. 29 November-1 December 1999. Jakarta.

- Estiningtyas, W, Surmaini, E., Suciantini, Ramadhani, F. 2005. Penggunaan Metode Filter Kalman Untuk Prakiraan Curah Hujan di Sentra Produksi Pangan. Laporan Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi.
- Hadi, T.W., Mukid A., Mulyana, E., Surmaini, E., Wigena A.H. 2009. Pengembangan Model Prediksi Musim (*Seasonal*) untuk Mendukung Kegiatan Pertanian yang Adaptif terhadap Perubahan Iklim. Laporan Penelitian KP3I Badan Litbang Pertanian.
- Haryanto, U. 1999. Respon to climate change : Simple rainfall prediction based on southern oscillation index. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent. 29 November-1 December 1999. Jakarta.
- Juneng, L., Tanggang, F.T., Kang, H., Lee, W. J., dan Seng, Y.K. 2010. Statistical Downscaling Forecasts for Winter Monsoon Precipitation in Malaysia Using Multimodel Output Variables. *Journal Climate*, **23**, 17-36.
- Kang, K.H., Park, C.K., Solis, A.L.S. dan Stithichivapak, K. 2007. Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand. *Geophysics Research Letter*, **34**, L15710.

Palmer, T.N., A. Alessandri, U. Andersen, P. Cantelaube, M. Davey, M. Délécluse, M. Déqué, E. Díez, F.J. Doblas-Reyes, H. Feddersen, R. Graham, S. Gualdi, J.F. Guérémy, R. Hagedorn, M. Hoshen, N. Keenlyside, M. Latif, A. Lazar, E., Maisonnave, V. Marletto, A.P. Morse, B. Orfila, P. Rogel, J.M. Terres and M.C. Thomson. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 85: 853-872

Randall, D. R. 2007. Climate Models and Their Evaluation, dalam Solomon S.D, Eds, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Saha S, Nadiga S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler RW, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Wang J, Hou YT, Chuang HY, Juang HMH, Sela J, Iredell M, Treadon R, Kleist D, van Delst P, Keyser D, Derber J, Ek M, Meng J, Wei H, Yang R, Lord S, van den Dool H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm JK, White G, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou S, Higgins W, Zou CZ, Liu Q, Chen Y, Han Y, Cucurull L, Reynolds RW, Rutledge G, Goldberg M. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin America Meteorology Society* 91: 1015-1057.

Surmaini, E., Hadi, T.W., Subagyono, K. dan Puspito, N.T. 2015. Prediction of drought impact on rice paddies in west Java using analogue downscaling method. *Indones. J. Agric. Sci.* 16 (1): 21-30

- Surmaini, E. dan Susanti, E. 2016. Kekeringan Pertanian: Penyebab, Dampak dan Penanganan. Prosiding Simposium VIII Perhimpuni: Membangun Kapasitas Adaptasi Menghadapi Perubahan Iklim melalui *Climate Smart Agriculture*.hal 232-245.
- Surmaini, E., Hadi, T.W. Subagyono, K., Syahputra, M.R. 2018. Integrasi Prediksi Musim dengan Model Simulasi Tanaman untuk Penentuan Waktu Tanam Padi. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42 (2): 99-110
- Timbal, B., dan McAvaney, B.J. 2001. An analogue-based method to downscale surface air temperature: Application for Australia. *Climate Dynamics*, 17, 947–963.
- Vimont, D.J., D.S Battisti and R.L. Naylor. 2010. Downscaling Indonesian precipitation using large-scale meteorological fields. *Int'l. J. Climatol.* 30: 1706-1722.
- Zorita, E. and H. von Storch. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. *J. Climate* 12(8): 2474-2489.
- Zorita, E., Hughes, J., Lettenmaier, D., dan von Storch, H. 1995. Stochastic downscaling of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. *Journal of Climate*, 8, 1023–1042.

Bab 3.

Penggunaan Sistem Modeling Dampak Perubahan Iklim terhadap Pertanian untuk Proyeksi Produktivitas Tanaman Pangan

Yayan Apriyana dan Aris Pramudia

Pendahuluan

Indonesia yang terletak diantara benua Asia dan Australia dan antara Samudera Pasifik dan Samudra Hindia, secara geografis terletak di khatulistiwa dengan ribuan pulau, dapat dikatakan berada dalam posisi yang unik secara alami. Dua samudera dapat dikatakan sebagai salah satu pengendali iklim dunia dan kondisi Indonesia sangat dipengaruhi oleh karakteristik monsun (Ramage 1971, Murakami dan Matsumoto 1994; Wu dan Kirtman 2007), yang mempengaruhi baik dinamika atmosfir dan suhu permukaan laut di sekitar wilayah Indonesia. Dinamika tersebut membawa dampak luas pada berbagai sektor kehidupan manusia. Dampaknya sebagian besar terkait dengan anomali curah hujan serta peristiwa ekstrim seperti banjir dan kekeringan yang sangat berpengaruh pada sektor pertanian. Banyak laporan menunjukkan bahwa daerah yang terkena bencana iklim telah

semakin meluas dengan meningkatnya kerugian pertanian (Boer dan Las 2003). Perubahan iklim mempengaruhi pergeseran musim, seperti musim hujan semakin pendek tetapi dengan curah hujan yang lebih besar (banjir) dan musim kemarau panjang yang berdampak kekeringan

Stabilitas pangan, terutama ketersediaan makanan berfluktuasi, sangat dipengaruhi oleh variasi iklim dan cuaca (Pendleton & Lawson 1988). Hasil studi FAO (2005) menunjukkan bahwa variabilitas dan perubahan iklim mempengaruhi 11% lahan pertanian di negara berkembang yang dapat mengurangi produksi pangan dan Produk Domestik Bruto (PDB) sebesar 16%. Sementara itu, dampak variabilitas dan perubahan iklim juga dapat mengurangi produksi sereal di Asia Tenggara antara 2,5% dan 7,8% (Fischer et al., 2002). Variabilitas dan perubahan iklim dengan semua dampaknya berpotensi menyebabkan kerugian besar pada produksi tanaman pangan (20,6% untuk beras, 13,6% untuk jagung dan 12,4% untuk kedelai, seperti yang dilaporkan oleh Handoko et al., (2008). Sementara itu, permintaan pangan, terutama beras, terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Diperkirakan pada tahun 2020 populasi akan mencapai 262 juta orang dengan konsumsi beras 134 kg per kapita sehingga permintaan beras nasional mencapai 35,1 juta ton atau 65,9 juta ton gabah kering giling (Budianto, 2002).

Untuk itu diperlukan suatu teknologi yang dapat digunakan untuk menganalisis proyeksi produktivitas tanaman pangan dalam kaitannya dengan perubahan iklim. Tulisan ini membahas dampak perubahan iklim pada pertanian khususnya terhadap produktivitas tanaman pangan serta menjembatani penilaian dampak perubahan iklim dengan analisis kerentanan pangan.

Proyeksi Produktivitas Tanaman Pangan

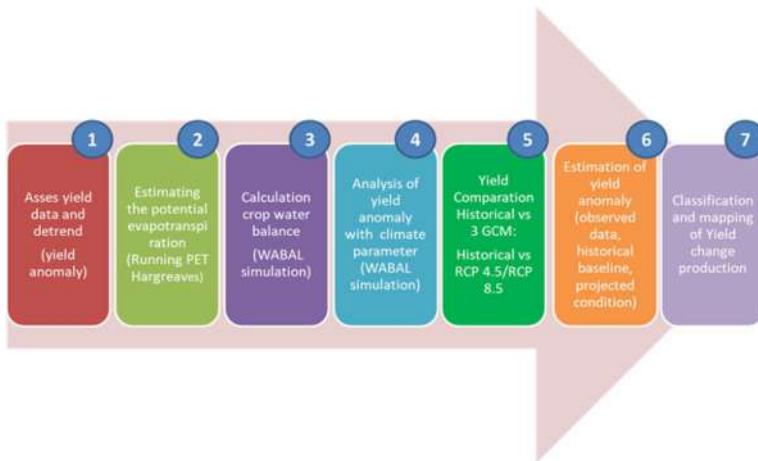
Untuk melakukan analisis proyeksi produktivitas tanaman pangan digunakan MOSAICC (*The Modelling System for Agricultural Impacts of Climate Change*). MOSAICC merupakan Sistem Pemodelan untuk menganalisis Dampak Perubahan Iklim terhadap Pertanian dari FAO dengan mengembangkan perangkat dan model online untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim pada hasil panen.

Analisis dilakukan terhadap tanaman pangan utama di Indonesia (padi pada lahan irigasi dan tada hujan, jagung dan kedelai) dengan dukungan data luas panen, produksi dan hasil padi, jagung, dan kedelai, data iklim berupa curah hujan, suhu maksimum dan minimum, serta data iklim proyeksi yang dimodelkan dari data GCM (*Global Climate Models*). Data yang dimodelkan melalui prosedur downscaling statistik untuk memperoleh variabel iklim yang diinginkan pada lokasi yang sama dari data yang diamati.

Untuk interpretasi input baik model maupun proses, maka terlebih dahulu dilakukan perbandingan produktivitas dari data historis dengan proyeksi produktivitas yang dianalisis menggunakan proyeksi iklim dari GCM menggunakan penilaian RCP (*Representative Concentration Pathways*) yang diperoleh dari IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Tiga GCM (CANES-M2, CNRM-CM5, dan MPI-ESM-RM) digunakan, dengan periode yang berbeda (historis dan masa depan) dengan skenario (RCP 4.5 dan RCP 8.5).

Periode data iklim dan produktivitas dalam kajian ini dari tahun 1971 hingga 2000, sementara proyeksi masa depan mengacu pada periode 2010-2069. Data yang diamati meliputi periode 1981-2010 (dapat bervariasi sesuai dengan ketersediaan data di setiap stasiun). Komoditas yang dianalisis adalah Padi irigasi dan tada hujan, Kedelai dan Jagung.

Analisis data dalam proyeksi produktivitas didahului dengan mengkaji data hasil dan menguraikannya dengan tujuan untuk menghapus tren jangka panjang dalam hasil yang sebagian besar disebabkan oleh faktor-faktor non-iklim. Dengan mengurangi tren dari hasil aktual diperoleh anomali produktivitas, yang variasinya diasumsikan karena iklim. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan evapotranspirasi potensial dengan fungsi PET Hargreaves di MOSAICC, dengan menghitung neraca air tanaman menggunakan simulasi WABAL. Analisis ini menghasilkan fungsi produktivitas, yaitu model regresi yang terbaik yang mampu memprediksi anomali produktivitas dengan menggunakan parameter keseimbangan iklim dan air. Selanjutnya dilakukan analisis korelasi dan regresi antara anomali produktivitas historis dan parameter iklim historis serta output simulasi WABAL. Analisis ini menghasilkan fungsi hasil, yaitu model regresi yang terbaik yang mampu memprediksi anomali dengan menggunakan parameter keseimbangan iklim dan air. Selanjutnya melakukan estimasi anomali produktivitas pada kondisi data historis periode 1981-2010 dan proyeksi anomali hasil pada periode 2010-2039 dan 2040-2069. Langkah berikutnya adalah membandingkan anomali produktivitas antara data yang diamati dan hasil simulasi pada kondisi data historis, dan antara kondisi data historis dan kondisi yang diproyeksikan untuk periode 2010-2039 dan 2040-2069. Langkah terakhir dari analisis ini adalah klasifikasi dan pemetaan perubahan hasil yang diproyeksikan (Gambar 1).



Gambar 105. Langkah-langkah analisis proyeksi produktivitas menggunakan Mosaicc.

Hasil Kajian Model untuk Proyeksi Produktivitas Tanaman Padi

Hasil kajian proyeksi anomali produktivitas dilakukan di sentra produksi tanaman pangan di Jawa Barat yaitu di Indramayu, Karawang, Subang, di Jawa Tengah yaitu di Grobogan, Pati, Sragen, di Yogyakarta yaitu di Sleman, Bantul dan di Jawa Timur yaitu di Jember, Banyuwangi dan Pasuruan.

Sebagai sampel analisis dilakukan di kabupaten Indramayu, Kabupaten Indramayu merupakan kabupaten sentra produksi padi, dan kabupaten penting dalam mendukung produksi beras nasional, namun Indramayu adalah kabupaten yang paling rentan terhadap variabilitas dan perubahan iklim (Gambar 2)



Gambar 106. Peta Lokasi Kabupaten Indramayu

Data dari Kabupaten Indramayu diperoleh dari Pusat Data dan Informasi dari Kementerian Pertanian (Tabel 1). Anomali produktivitas menunjukkan adanya perubahan produktivitas akibat adanya perubahan iklim.

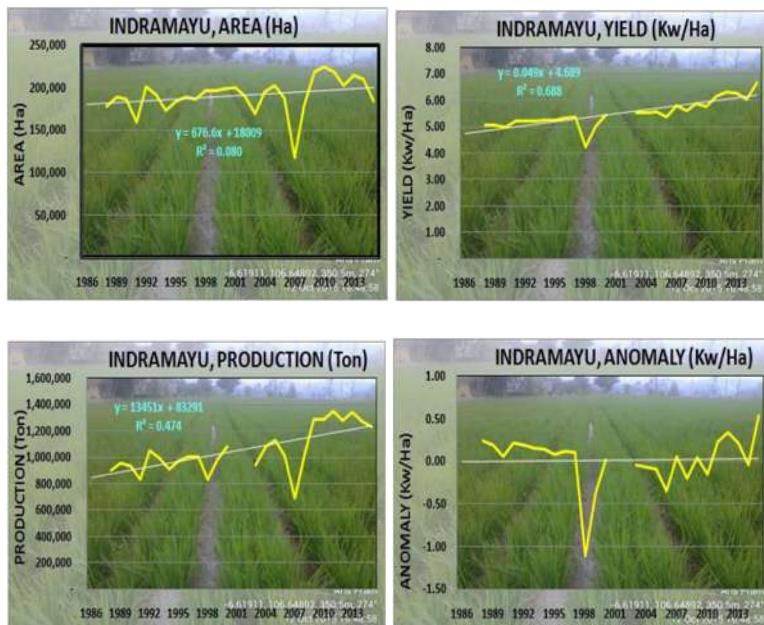
Tabel 35. Data untuk produktivitas dan anomali produktivitas

	A	B	C	D	E	F	G
1	Province						
2	District						
3				INDRAMAYU			
4	1986	195.481	920.465	47	4.71	4.74	-0.03
5	1987	0		0			
6	1988	177.617	900.341	51	5.07	4.84	0.23
7	1989	188.851	957.598	51	5.07	4.89	0.19
8	1990	186.637	931.746	50	4.99	4.93	0.06
9	1991	158.997	826.986	52	5.20	4.98	0.22
10	1992	201.570	1.051.675	52	5.22	5.03	0.19
11	1993	190.634	997.439	52	5.23	5.08	0.15
12	1994	172.437	908.745	53	5.27	5.13	0.14
13	1995	184.192	968.260	53	5.26	5.18	0.08
14	1996	188.422	1.006.447	53	5.34	5.23	0.11
15	1997	186.857	1.004.630	54	5.38	5.28	0.10
16	1998	196.331	827.722	42	4.22	5.33	-1.11
17	1999	195.949	979.566	50	5.00	5.38	-0.38
18	2000	199.158	1.082.281	54	5.43	5.42	0.01
19	2001	200.113		0			
20	2002	189.668		0			
21	2003	169.608	937.786	55	5.53	5.57	-0.04
22	2004	194.674	1.080.234	55	5.55	5.62	-0.07
23	2005	202.486	1.128.360	56	5.57	5.67	-0.10
24	2006	187.770	1.006.991	54	5.36	5.72	-0.36
25	2007	117.775	686.152	58	5.83	5.77	0.06
26	2008	179.330	1.006.927	56	5.61	5.82	-0.20
27	2009	218.392	1.290.035	59	5.91	5.87	0.04
28	2010	224.307	1.290.682	58	5.75	5.91	-0.16
29	2011	218.439	1.351.041	62	6.18	5.96	0.22
30	2012	202.209	1.283.467	63	6.35	6.01	0.34
31	2013	214.019	1.343.098	63	6.28	6.06	0.21
32	2014	209.636	1.270.252	61	6.06	6.11	-0.05
33	2015	184.432	1.233.785	67	6.69	6.16	0.53
34							
35							
36							
37							
38							

Analisis menggunakan pendekatan linier oleh perangkat lunak statistik untuk menghitung tren dan memotong jalur tren di set data. Indeks fit adalah Root Square Mean Error. Untuk menghilangkan tren produktivitas, maka disusun data anomali dengan tren nol. Seri waktu yang dihasilkan sekarang adalah hasil yang dirubah atau menghasilkan anomali produktivitas sebagai fungsi waktu.

Hasil analisis menunjukkan bahwa luas, hasil dan produksi memiliki kecenderungan meningkat. Data anomali menunjukkan bahwa pada tahun 1998 dan 2007 ada anomali yang relatif besar.

Ini karena pada tahun sebelumnya ada kejadian iklim ekstrem El Nino yang kuat (Gambar 3)



Gambar 107. Tren peningkatan luasm panen, produksi dan produktivitas padi sawah di Indramayu

Hasil analisis disajikan dalam tabel dan histogram. Untuk Padi tada hujan hasil analisis menunjukkan bahwa semua model proyeksi iklim, menunjukkan perubahan produktivitas signifikan atau sangat signifikan pada RCP 4.5, baik skenario 1 atau skenario 2, serta pada RCP 8.5, baik skenario 1 atau skenario 2 (Tabel 2). Angka rata-rata (mean) dan standar deviasi (STD) di bawah kolom pengamatan adalah rata-rata dan STD dari data pengamatan, angka rata-rata dan STD di bawah kolom historis adalah rata-rata dan STD dari data historis, angka rata-rata di bawah kolom RCP45_10-39, RCP45_40-69, RCP85_10-39 dan RCP85_40-69 adalah rata-rata proyeksi dari masing-masing GCM. Referensi

pada kolom historis yang menggambarkan perbandingan antara data historis dengan data pengamatan. Referensi pada kolom RCP45_10-39, RCP45_40-69, RCP85_10-39 dan RCP85_40-69 Perolehan kesimpulan antara data proyeksi dengan data historis. Sebagai contoh, RCP45_40-69 pada grafik GCM CANES-M2 memiliki rata-rata anomali di atas produktivitasnya sebesar -0,609 ton / ha dan nilai ini sangat berbeda dengan rata-rata historis hasil-anomali sebesar -0,2559.

Tabel 36. Hasil Uji Signifikansi (Padi Tadah Hujan)

GCM	Parameters	OBSERVED		HISTORICAL		RCP45_10-39	RCP45_40-69	RCP85_10-39	RCP85_40-69
		Mean	Standard Dev.	Mean	Standard Dev.	Mean/Concl.	Mean/Concl.	Mean/Concl.	Mean/Concl.
CANES-M2	Values	-0.0030	0.3530	-0.2559	0.0563	-0.4624	-0.609	-0.482	-0.915
	Coclusion			Not Significant		Very Significant	Very Significant	Very Significant	Very Significant
CNRM-CMS	Values	-0.0030	0.3530	-0.2491	0.0879	-0.3559	-0.456	-0.363	-0.528
	Coclusion			Not Significant		Significant	Very Significant	Significant	Very Significant
MPI-ESM-RM	Values	-0.0030	0.3530	-0.2667	0.0595	-0.4269	-0.547	-0.444	-0.651
	Coclusion			Not Significant		Very Significant	Very Significant	Very Significant	Very Significant

Setelah diperoleh nilai rata-rata dari perubahan hasil produktivitas yang diproyeksikan dari beberapa skenario GCM, selanjutnya dibuat klasifikasi proyeksi perubahan dalam produktivitas (batas kelas interval sekitar 10% dari hasil rata-rata nasional) dengan interval kelas 0,5 t / ha (Tabel 3). Rata-rata perubahan anomali hasil diklasifikasikan menjadi 6 kelas, 3 kelas untuk tren anomali positif (rendah, menengah, tinggi,) dan 3 kelas untuk anomali negatif (rendah, menengah, tinggi)

Tabel 37. Perubahan Anomali Produktivitas (a) untuk padi pada proyeksi dibandingkan dengan data historis

(t/ha)	Classification
<-1.0	High Decreasing
-1.0 to - -0.5	Middle Decreasing
-0.5 to 0	Low Decreasing
0 to 0.5	Low Increasing
0.5 to 1.0	Middle Increasing
>1.0	High Increasing

Jika hasil analisis dari tiga GCM pada emisi menengah (RCP 4.5) dan emisi tinggi (RCP 8.5), proyeksi dekat (2010-2039) dan proyeksi jauh (2040 - 2069) menunjukkan peningkatan yang rendah - peningkatan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Rendah. Jika hasil analisis satu hingga tiga GCM dalam emisi tinggi, dekat dan jauh proyeksi menunjukkan penurunan rendah - penurunan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Tengah. Jika hasil analisis satu hingga tiga GCM di bawah emisi menengah, periode proyeksi dekat dan jauh menunjukkan penurunan rendah - penurunan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Tinggi. Resume hasil analisis perubahan anomali produktivitas tanaman ditunjukkan pada Gambar 4.

Result Analysis	INTERMEDIATE EMISSIONS (RCP 4.5)		HIGH EMISSIONS (RCP 8.5)	
	NEAR PROJECTION Non Significant	FAR PROJECTION Significant	NEAR PROJECTION Non Significant	FAR PROJECTION Significant
High Increasing				
Middle Increasing		LOW	RISK	
Low Increasing				
Low Decreasing				
Middle Decreasing	HIGH	RISK	MIDDLE	RISK
High Decreasing				

Gambar 108. Resume klasifikasi perbedaan tanaman menghasilkan proyeksi anomali (salah satu model CANES-M2, CNRM-CM5, dan MPI-ESM-RM)

Padi Sawah Tadah Hujan

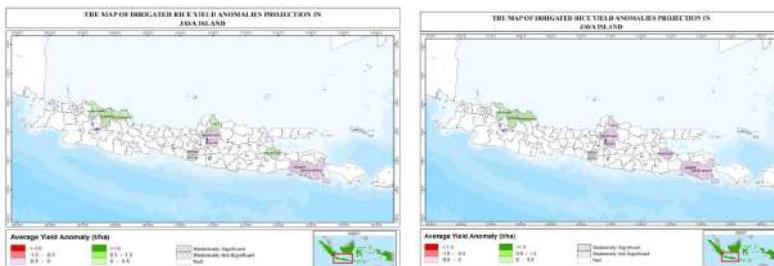
Hasil analisis produktivitas padi tadah hujan diproyeksikan terjadi perubahan produktivitas di 4 provinsi di Jawa pada emisi menengah dan tinggi baik dekat maupun jauh proyeksi di Karawang, Subang (Jawa Barat) dan Pati (Jawa Tengah), hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan peningkatan tinggi – sangat nyata, CNRM menunjukkan peningkatan rendah – tidak nyata, dan MPI menunjukkan peningkatan rendah – tidak nyata. Kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat Risiko Rendah.

Untuk Pati (Jawa Tengah) dan kabupaten Sleman (Yogyakarta) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan sedang - nyata untuk RCP 8,5, sedangkan CNRM menunjukkan penurunan rendah - nyata, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata. Dengan demikian dikategorikan pada tingkat risiko menengah.

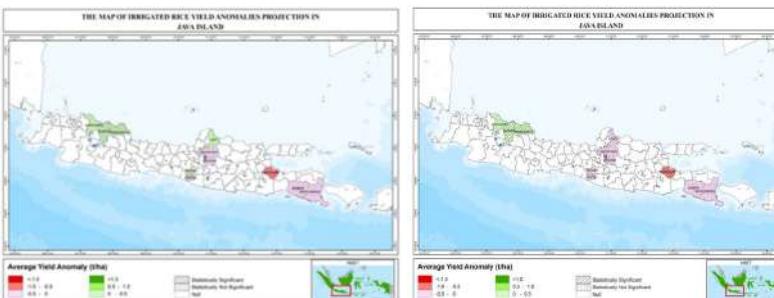
Untuk Kabupaten Indramayu (Jawa Barat), Sragen, Grobongan (Jawa Tengah), Kabupaten Bantul (Yogyakarta), Jember, Pasuruan dan Banyuwangi distric (Jawa Timur) analisis menggunakan CANESM menunjukkan penurunan tinggi - nyata, CNRM

menunjukkan penurunan Rrndah - nyata, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata untuk RCP 4.5, sehingga kategori ini dikategorikan pada tingkat risiko tinggi.

Contoh hasil Analisis MPI-ESM-RM model iklim global disajikan pada gambar (5 dan 6)



Gambar 109. Peta proyeksi produktivitas padi sawah tada hujan di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi menengah (RCP 4.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM



Gambar 110. Peta proyeksi produktivitas padi sawah tada hujan di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi tinggi (RCP 8.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.

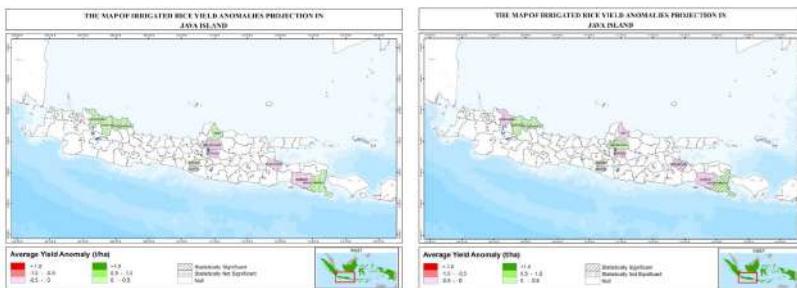
Padi Sawah Irigasi

Hasil analisis untuk hasil panen padi tada hujan diproyeksikan perubahan hasil panen di 4 provinsi di Jawa pada emisi menengah dan tinggi baik dekat dan jauh proyeksi di Karawang dan Subang (Jawa Barat), Pati (Jawa Tengah), Sleman dan Bantul distric (Yogyakarta) dan Banyuwangi (Jawa Timur), hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan peningkatan tinggi – sangat nyata, CNRM menunjukkan peningkatan rendah - nyata, dan MPI menunjukkan peningkatan rendah - nyata. Kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko rendah.

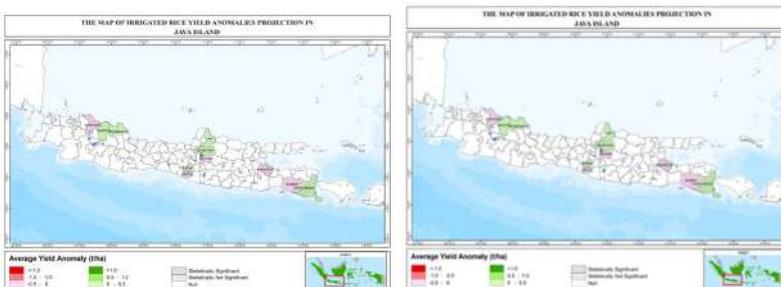
Untuk Kabupaten Pati dan Sragen (Jawa Tengah) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan sedang - nyata untuk proyeksi jauh RCP 8,5, CNRM penurunan rendah - nyata, proyeksi jauh RCP 8,5 dan MPI menunjukkan proyeksi penurunan rendah - nyata, RCP 8,5 jauh , kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko menengah.

Selanjutnya, untuk Indramayu distric (Jawa Barat), Grobogan distric (Jawa Tengah), Jember dan Pasuruan distric (Jawa Timur) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan tinggi - nyata, CNRM menunjukkan Low Decreasing -significant, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata untuk RCP 4,5, kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko tinggi.

Contoh hasil Analisis model iklim global MPI-ESM-RM disajikan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 111. Peta proyeksi produktivitas akan menghasilkan perubahan produktivitas padi sawah irigasi di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi menengah (RCP 4.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.



Gambar 112. Peta proyeksi produktivitas akan menghasilkan perubahan produktivitas padi sawah irigasi di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi tinggi (RCP 8.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.

Penutup

Fungsi produktivitas adalah rumus estimasi anomali produktivitas berdasarkan parameter iklim keluaran dan keseimbangan air dari sistem model Mosaicc. Ada beberapa parameter yang memiliki korelasi tertinggi, yaitu evapotranspirasi aktual, defisit air, kebutuhan air total, dan kelebihan air. Parameter

dominan yang paling mempengaruhi hasil adalah evapotranspirasi aktual.

Proyeksi perubahan hasil ditentukan dengan perbedaan antara anomali produktivitas yang diproyeksikan dan anomali produktivitas data historis. Perubahan tersebut tergantung dengan lokasi. Kami mengklasifikasikan wilayah negara dalam tiga kategori: risiko rendah (peningkatan hasil panen), risiko menengah (penurunan hasil panen berdasarkan RCP 8.5) dan risiko tinggi (penurunan hasil berdasarkan RCP 4.5).

Hasil klasifikasi dan analisis, di Kabupaten Grobogan dan Jember termasuk berisiko tinggi untuk baik untuk padi tada hujan maupun irigasi.

DAFTAR BACAAN

- Boer R. and I. Las. 2003. National Rice Production System In Global Climate Policy Perspective. Pp. 215-234. In Bambang S. et al. (Ed). Rice Technology Policy and Rice Innovation: Book Two. Proceedings of the Scientific Meeting of Rice Plant Research and Development Division, 2003. Sukamandi.
- Budianto J. 2002. Challenges and opportunities of rice research in the perspective of agribusiness. In: B. Suprihatno et al. (Eds.). Rice policy and technological innovation. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor. p. 1-17.
- FAO. 2005. "Impact of Climate Change and Diseases on Food Security and Poverty Reduction". Special event background document for the 31st session of the committee on world food security. Rome, 23-26 May 2005.
- Fischer G, Shah M, Velthuizen HV. 2002. Climate Change and Agricultural Vulnerability. IIASA. Luxemburg, Austria.
- Handoko I, Sugiarto Y, Syaukat Y. 2008. Linkages of Climate Change and Strategic Food Production. Independent Trade and Development Policy Review by Kemitraan / Partnership Indonesia. SEAMEO BIOTROP. Bogor.
- Murakami T, and Matsumoto J. 1994: Summer monsoon over the Asian continent and western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 62, 69-87.
- Pendleton JW, and Lawson TL. 1989. Climatic Variability and Sustainability of Crop yields in the humid tropics. International Symposium on Climatic Varability and Food Security in Developing Countries 5 – 9 Februari 1987. New Delhi. IRRI: 54 – 58.

- Ramage CS. 1971: Monsoon Meteorology. International Geophysics Series, Vol. 15, Academic Press, 296pp.
- Wu R and Kirtman BP. 2007. Roles of the Indian Ocean in the Australian Summer Monsoon-ENSO Relationship. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies1 and George Mason University. 4041 Powder Mill Road, Suite 302 Calverton, Maryland 20705.

EDITOR DAN KONTRIBUTOR

Editor:

Irsal Las, adalah Purnabakti sebagai peneliti utama di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Lahan Pertanian. Jl. Tentara Pelajar No.12 Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16114.

Istiqlal Amin, adalah Purnabakti sebagai peneliti utama di bidang Kesuburan Tanah (Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan), pada kelompok peneliti di Balitklimat. Jl.Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16114.

Hermanto, adalah Purnabakti sebagai pustakawan muda di Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (PUSLITBANGTAN), Jl. Merdeka No.147, RT.1/RW.5, Menteng, Bogor Bar., Kota Bogor, Jawa Barat 16111

Penulis:

Aris Pramudia, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Armi Susandi, adalah lektor di bidang Sains Atmosfer di Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB). Jl. Tamansari 64 Bandung, Jawa Barat 40116.

Budi Kartiwa, adalah peneliti muda di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Dede Dirgahayu, adalah peneliti madya di bidang pemodelan pertumbuhan tanaman padi, pada kelompok peneliti di Lembaga Antariksa Nasional. Jl. Pemuda Persil No.1, Rawamangun, Jakarta Timur 13220.

Didi Sopandie, adalah guru besar di di bidang Fisiologi Tanaman, Institut Pertanian Bogor (IPB). Jl. Raya Dramaga Kampus IPB Dramaga Bogor, Jawa Barat 16680.

Eleonora Runtunuwu, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Elsa Rakhmi Dewi, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Elza Surmaini, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Erni Susanti, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Haris Syahbuddin, adalah kepala Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian (BBP2TP) dan peneliti madya di Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. Jl. Tentara Pelajar No.10, Ciwaringin, Bogor Tengah, Kota Bogor, Jawa Barat 16124

M Noor, adalah peneliti utama di bidang kesuburan tanah dan biologi tanah, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Lahan Rawa, BBSDLPP. Jl. Kebun Karen PO BOX 31, Loktabat Utara, Banjarbaru, Kalimantan Selatan 70712.

Muhammad Syakir, adalah peneliti utama di bidang penelitian Budidaya Tanaman Cengkeh, pada kelompok peneliti di Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Perkebunan. Jl. Tentara Pelajar 1, Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu Bogor 16111.

Nani Heryani, adalah peneliti madya di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Parwati, adalah Kepala Bidang Diseminasi dan peneliti di bidang Remote Sensing dan Geo Information System, pada kelompok peneliti di Lembaga Antariksa Nasional. Jl. Pemuda Persil No.1, Rawamangun, Jakarta Timur 13220.

Suciantini, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Tri Nandar Wihendar, adalah peneliti di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Trikoesoemaningtyas, adalah lektor di bidang Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman, di Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (IPB). Jl. Meranti, Babakan, Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680

Woro Estiningtyas, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Yayan Apriyana, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Yeli Sarvina, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

INDEKS

- Agroekosistem 8, 113, 125
Agrometeorologi 10, 11, 16
Akumulasi compatible osmolytes 56
Aliran mantap 121, 122
Aliran permukaan 113, 120-125
Analisis spasial 15, 261
Anomali iklim 77-81, 84, 92, 163, 223, 266
 curah hujan 341-345, 357, 359, 364, 365, 369-370, 400
Antesis 52, 53, 54, 55, 199, 202, 205, 209
Anther 52, 205
Asimilasi CO₂ 58, 64
Asimilasi Nitrogen 45
Asimilat 44, 53, 55, 59, 191, 203, 206, 313
Asuransi Indeks Iklim 340, 341, 355-359, 361
Asuransi Pertanian 149, 335, 339, 340, 341, 353-359, 361
Belalang kembara 168-170
Biometologi indeks 15
Block máxima 158
CCA (Canonical Corellation Analysis) 285, 299, 305
CCTV 242, 243
Cekaman Abiotik 40, 56, 60, 69, 135, 186, 187, 205, 206, 208, 214
 adaptasi tanaman 56, 59, 60, 187, 192, 193, 194, 197
 fisiologi 69, 214
 heat stress 47-51
 toleransi tanaman 56, 57, 192, 194, 195, 205, 211
Cell membrane thermostability 59

Citra 19, 26
landsat 289, 327, 332, 333-337
modis 281, 282, 286, 288, 289, 295, 327, 328, 332, 333, 334
radar 11, 327, 328, 331, 332, 336, 337
spot 327, 332, 334, 335
Climate Change 24, 47, 156, 186
Climate Modeling 24
Constructed Analog 388, 394
Daerah Aliran Sungai (DAS) 113, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 147, 262, 266,
Daerah Irigasi 113, 125, 128, 130
Daerah Tangkapan Air 122-125
Data TRMM 281, 282, 285, 286, 289, 290, 297, 298, 299, 301, 305
Dehydration avoidance 191
Dehydration tolerance 191, 192
Dipole Mode Index (DMI) 342
Drought escape 191
Drought recovery 192
Downscaling 15, 251-252, 278, 284-285, 385-387
 dynamical 15, 278, 387,
 statistical 15, 18, 278, 387-388, 394
 ansambel 278-284, 286-289
Efisiensi Penggunaan Air 46, 99, 106, 207
Ekinoks 361
El Niño 24, 137, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 283, 284, 297, 300
Emisi gas rumah kaca 40, 156, 186
Energy balance 101
ENSO 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 8, 86
 modoki indeks 357-358, 363
EOF 285, 297, 298, 299
Evaporasi 15, 54, 65, 96, 98, 100, 101-104, 120, 122, 125, 202, 314,
Evapotranspirasi 45, 96, 98-104, 107, 113, 114, 120-122, 125-128, 135, 345

aktual 100, 114, 120, 122, 125
potensial (ETP) 102, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 128
tanaman 96, 100, 126, 127
Fase Pemasakan 55, 105
Fase Reproduktif 52, 53, 55, 204
Fase Vegetatif 44, 54, 55, 58, 290, 295, 296, 307, 328, 332, 46
Fast fouier transform 25, 26
Fenologi 51-53, 163, 188, 191, 207
Fotorespirasi 41, 44, 58
Fotosintat 49, 315
Fotosintesis 41, 43-47, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 64, 65, 68, 97, 99, 135, 162, 163, 189, 203, 211, 310, 311, 318, 319, 321
Generalized Extreme Value (GEV) 158
Generalized Pareto Distribution (GPD) 158
Genotipe 48, 53, 54, 57, 187, 192, 199, 202, 203, 204, 205, 207, 211
Geostatistika 26
GIS 174, 175, 177, 179, 180, 213, 232, 234
Global Circulation Model 17, 178, 179, 248, 249, 251, 252, 256, 257
Global Warming 10, 162, 163, 186, 344, 345, 352
Heat Tolerant Index 201
Hidrometeorologi 152-154
Hormon Endogen 202
HSPs 58, 62, 63, 189, 190
Iklim ekstrim 18, 20, 24, 42, 43, 136, 152, 155-159, 162, 223, 248, 340, 342
Iklim mikro 187, 308, 309, 312, 313, 314, 316, 320, 323
Indeks global 358, 364, 372, 375
Indeks kecukupan air 86, 87, 90
Indeks kekeringan 9, 15
Indeks panas 15
Indeks pertanaman 227, 228

Indeks Vegetasi (EVI) 76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 8, 86, 87, 88, 90, 92
Indian Ocean Dipole 76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 8, 86, 87, 88, 90, 92
Irigasi 10-13, 15, 19, 24, 66, 67, 78, 87, 90, 92, 96, 97, 99, 105, 111, 127, 147, 209, 228, 248, 314, 354
Irigasi Otomatik 106, 107, 109
ITCZ 359, 361
Kalman Filter 26
Kebutuhan Air Tanaman 12, 15, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 107, 111, 126, 286
Kekeringan agronomis 135
Kekeringan hidrologis 135
Kekeringan meteorologis 135, 147
Kemampuan adaptasi 351, 352
Kerentanan 53, 81, 160, 180, 181, 238, 351, 352, 354
Key area 358, 364
Kultivar 44, 50, 113, 202, 203, 204, 209
La Nina 3, 26, 144, 155, 163, 165, 223, 283, 342, 348, 350
Laju Fotosintesis 58, 64, 319, 321
Madden julian oscilation (MJO) 342
Metabolit sekunder 60, 61
Meteorologi pertanian 8-11, 13, 15, 17, 18-21, 156
Migrasi 172, 176
Mitigasi 46, 186, 213, 223, 230, 327, 340
Model Prediksi Curah Hujan 260, 266, 267, 269, 270, 275, 276, 278, 279, 285
Model Simulasi 17, 207, 213, 254, 255
Monsoon 138, 223
 break 138, 143
MOSAICC 402, 403, 404
Mulsa 308, 314, 315
NDVI 328

Neraca Air 9, 12, 15, 18, 87, 107, 113, 114-116, 118-122, 125, 128
Neural network 261, 262, 264, 266
Nilai reflektansi 332, 329
Non linier least square25
Numerical weather prediction 172, 249
OLR 285
Onset 17, 81, 82, 86, 104, 138, 224
Ontogeni 17, 81, 82, 86, 104, 138, 224,
OPT 139, 180, 181, 229, 314, 341, 342, 350
outbreak 162, 163
Overlay 31, 33, 36, 298, 291
Oxygen evolving complex57
Partisi asimilat. 59, 206
POT 158
Pemuliaan 57, 68, 186, 198, 199, 200, 203, 204, 206-210
Penginderaan Jauh 19, 176, 281,-284, 326-332, 336, 337
resolusi spasial 24, 285, 290, 327, 328, 329, 331-334, 336
resolusi temporal 281, 290, 327, 331, 332, 334, 335, 336
Pola hujan
equatorial 80, 84
monsunal 81
pergeseran 162
Permeabilitas 59, 65, 195, 196, 317
Pola tanam 20, 78-80, 113, 128, 224-226, 228, 242, 244, 248, 319, 320, 346-348
Potensial osmotik 46, 192, 195
Prakiraan iklim 9, 16, 17, 18, 20, 160
Prediksi iklim 10, 21 , 25, 148, 178, 180, 234, 242, 248, 249, 251, 253, 254, 256, 257, 260, 348
Prediksi probabilistic 248, 251, 253, 254, 256, 257
Presipitasi 40, 41, 46, 104, 113, 120, 171, 356
Representative Concentration Pathways 402, 407-414

Respirasi 44, 47, 53, 58, 64, 196, 319, 346
RMSE 27-29
R-Skill 27-29
R-Square 27, 29
Rumah kaca 40, 156, 186, 201, 308, 312, 313, 316, 317, 318
Sadewa 19
Salinitas 43, 56, 66-69, 162, 186, 193-196, 211, 212, 214, 342
Satelit 11, 19, 26, 32, 232, 249, 281, 282, 284-286, 327-336, 357
Sea surface temperature 268, 271, 273, 289, 290, 297, 299, 300,
305
SI katam terpadu 24, 149, 230, 232, 233, 234, 235, 236, 238, 239,
240-244
Soil water balance 101
Spikelet 53-56, 187, 200, 203, 204, 208, 209
Tingkat kehijauan vegetasi 282, 284
Time lag 358
Transpirasi 45, 46, 56, 61, 86, 90, 96-104, 135, 187, 188, 192, 199,
318, 319, 341
Universal kriging 26
Variabilitas iklim 8, 10, 24, 25, 40, 76, 77, 79, 187, 223, 254
Varietas unggul 186, 210, 212, 287
Viabilitas polen 52, 202
WABAL 403
Wereng 163, 165-168, 172, 179, 180, 210, 236, 344, 350
Zona agro-ekologis 42

GLOSARIUM

- **El Niño**

Fenomena perubahan iklim secara global yang diakibatkan oleh memanas nya suhu permukaan air laut Pasifik bagian timur.

- **ENSO (El Niño Southern Oscillation)**

Variasi angin dan suhu permukaan laut di wilayah tropis belahan timur Samudra Pasifik yang ireguler dan berkala.

- **Indeks kecukupan air**

Nisbah evapotranspirasi aktual dan evapotranspirasi tanaman dan persentase kehilangan hasil.

- **IOD (Indian Ocean Dipole)**

Perbedaan suhu permukaan laut antara dua daerah di Samudera Hindia bagian barat dan di Samudra Hindia bagian timur.

- **Pola hujan equatorial**

Wilayahnya memiliki distribusi hujan bulanan bimodal dengan dua puncak musim hujan maksimum dan hampir sepanjang tahun masuk dalam kriteria musim hujan.

- Pola curah hujan monsunal

Wilayah yang mempunyai perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dan periode musim kemarau.

- Variabilitas iklim

Fluktuasi unsur iklim yang terjadi secara tiba-tiba namun tidak berlangsung lama.

- Agrometeorologi

Ilmu yang melakukan pengaturan dan rekayasa terhadap berbagai sumber daya yang ada seperti air, tanah, dan udara dalam rangka mendukung kegiatan pertanian

- Anther

Kepala sari yang mengandung serbuk sari (polen)

- Anthesis

Fase saat bunga mulai mekar atau terbuka dan terjadi secara bersamaan dengan masaknya organ produksi jantan dan betina

- Asimilasi Nitrogen

Pembentukan senyawa nitrogen organik seperti asam amino dari senyawa nitrogen anorganik yang hadir di lingkungan

- Asimilat

Hasil fotosintesis tanaman

- Asuransi Pertanian

Perjanjian antara petani dan pihak perusahaan asuransi untuk mengikatkan diri dalam pertanggungan risiko usaha tani

- Cekaman Abiotik

Segala kondisi perubahan lingkungan yang mungkin akan menurunkan atau merugikan pertumbuhan atau perkembangan tumbuhan dengan contoh komponen sebagai berikut air, udara, cahaya matahari, tanah, topografi, dan iklim

- Climate Modeling

Representasi matematis dari sistem iklim berdasarkan prinsip fisika, biologi dan kimia

- Closed Circuit Television (CCTV)

Sebuah sistem TV dimana sinyal tidak didistribusikan secara publik namun dipantau, terutama untuk keperluan pengawasan dan keamanan

- Daerah Aliran Sungai (DAS)

Suatu kawasan yang dibatasi oleh titik-titik tinggi di mana air yang berasal dari air hujan yang jatuh, terkumpul dalam kawasan tersebut

- Daerah Irigasi (DI)

Kesatuan lahan yang mendapat air dari satu jaringan irigasi, meliputi bangunan bendung, saluran-saluran primer dan sekunder termasuk bangunan utama dan pelengkap

saluran pembawa dan saluran pembuang

- Daerah Tangkapan Air (DTA)

Suatu kawasan yang berfungsi sebagai daerah penadah air yang mempunyai manfaat penting untuk mempertahankan kelestarian fungsi sumber air di wilayah daerah

- Dipole Mode Index (DMI)

Ukuran gradien suhu muka laut zonal anomali di katulistiwa Samudera Hindia

- Efisiensi Penggunaan Air (Water Use Efficiency, WUE)

Cara sederhana untuk mengetahui apakah hasil tanaman dipengaruhi oleh pasokan air

- ENSO Modoki Indeks

Fenomena laut atmosfer di Samudera Pasifik yang menunjukkan adanya anomali suhu permukaan laut (SPL) yang dihitung dari rata-rata SPL pada tiga wilayah, yaitu wilayah A (165°BT - 140°BB , 10°LS - 10°LU), B (110°BB - 70°BB , 15°LS - 5°LU), and C (125°BT - 145°BT , 10°LS - 20°LU)

- Emisi Gas Rumah Kaca

Gas rumah kaca yang dihasilkan oleh aktivitas yang ada dan salah satunya terdiri dari karbondioksida

- Eskalasi

Kenaikan atau pertambahan (volume, jumlah, dan sebagainya)

- Evapotranspirasi Potensial (ETP)

Nilai yang menggambarkan kebutuhan lingkungan, sekumpulan vegetasi, atau kawasan pertanian untuk melakukan evapotranspirasi yang ditentukan oleh beberapa faktor, seperti intensitas penyinaran matahari, kecepatan angin, luas daun, temperatur udara, dan tekanan udara

- Fast Fourier Transform

Suatu algoritme untuk menghitung transformasi Fourier diskrit (Discrete Fourier Transform, DFT) dengan cepat dan efisien

- Fotorespirasi

Respirasi pada tumbuhan yang dibangkitkan oleh penerimaan cahaya yang diterima oleh daun

- Fotosintat

Produksi asimilasi karbon dioksida selama fotosintesis

- Fotosintesis

Suatu proses biokimia pembentukan zat makanan seperti karbohidrat yang dilakukan oleh tumbuhan, terutama tumbuhan yang mengandung zat hijau daun atau klorofil

- Generalized Extreme Value (GEV)

Distribusi nilai ekstrim umum (GEV) adalah keluarga dari distribusi probabilitas berkelanjutan yang dikembangkan dalam teori nilai ekstrim untuk menggabungkan keluarga Gumbel,

Fréchet dan Weibull yang juga dikenal sebagai distribusi nilai ekstrim tipe I, II, dan III.

- Generalized Pareto Distribution (GPD)

Dalam statistik, Generalized Pareto Distribution adalah distribusi probabilitas berkelanjutan. GPD sering digunakan untuk memodelkan ekor distribusi lain.

- Genotipe

Komposisi pewarisan individu dengan atau tanpa ekspresi fenotip dari satu atau beberapa sifat. Klasifikasi gen dari komposisi tersebut dinyatakan dalam satu rumus. Genotip terutama ditentukan dari penampakan keturuanan atau kerabatnya

- Global Circulation Model (GCM)

Model sirkulasi umum (GCM) adalah jenis model iklim . Ini menggunakan model matematis dari sirkulasi umum atmosfer planet atau lautan. Ini menggunakan persamaan Navier-Stokes pada bola berputar dengan istilah termodinamika untuk berbagai sumber energi (radiasi , panas laten)

- Global Warming

Meningkatnya temperatur suhu rata-rata di lapisan atmosfer, laut dan daratan di permukaan bumi

- Hidrometeorologi

Ilmu yang mempelajari tentang hubungan antara unsur-unsur meteorologi dengan siklus hidrologi

- Hormon Endogen

Hormon tanaman yang dihasilkan oleh tanaman itu sendiri

- ITCZ

Inter Tropical Convergence Zone atau daerah konvergensi ekuator merupakan zona yang berada di antara dua cekungan ekuatorial yang memiliki tekanan udara yang sangat rendah dari daerah sekitarnya

- Iklim Mikro

Iklim dalam satu wilayah spesifik dalam satu area yang lebih luas

- Indeks Vegetasi (EVI)

Salah satu parameter yang digunakan untuk menganalisa keadaan vegetasi dari suatu wilayah

- Kebutuhan Air Tanaman

Jumlah air yang dibutuhkan oleh tanaman pada suatu periode untuk dapat tumbuh dan produksi secara normal

- Key Area

Wilayah yang kondisi curah hujannya sangat dipengaruhi oleh indikator iklim global

- Kultivar

sekelompok tumbuhan yang telah dipilih/diseleksi untuk suatu atau beberapa ciri tertentu yang khas dan dapat dibedakan secara jelas dari kelompok lainnya, serta tetap mempertahankan ciri-ciri

khas ini jika diperbanyak dengan cara tertentu, baik secara seksual maupun aseksual

- Madden Julian Oscilation (MJO)

Variasi intraseasonal (30-90 harian) di daerah tropis, yang umumnya berakibat pada anomali angin, suhu muka laut, perawanhan dan intensitas hujan

- Mitigasi

Serangkaian upaya untuk mengurangi resiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana

- Model Simulasi

Suatu model *tiruan* dari suatu proses atau sistem tertentu. Model simulasi harus mempunyai karakteristik yang serupa dengan proses (sistem) yang sesungguhnya

- Modis

Sensor multispektral yang memiliki jumlah 36 band yang mempunyai resolusi spasial yang berbeda-beda mulai dari 250 m (band 1-2), 500 m (band 3-7), 1000 m (band 8-36) dengan panjang gelombang mulai dari 0,620-14,385 μm

- Data TRMM

Data TRMM adalah data precipitasi (hujan) yang didapat dari satelit meteorologi TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) dengan sensornya PR (*Precipitation Radar*), TMI (*TRMM Microwave Imager*), dan VIRS (*Visible and Infrared Scanner*), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), dan LIS (*Lightning Imaging Sensor*)

- Neraca Air (Water Balance)

Neraca masukan dan keluaran air disuatu tempat pada periode tertentu, sehingga dapat untuk mengetahui jumlah air tersebut kelebihan (surplus) ataupun kekurangan (defisit)

- Nilai Reflektansi

Rasio energi yang dipantulkan dengan total energi yang mengenai suatu permukaan per unit area

- Onset

Seberapa cepat efek dari suatu interaksi terjadi dan menentukan seberapa penting tindakan yang harus dilakukan untuk menghindari akibat dari suatu reaksi

- Ontogeni

Mendeskripsikan asal usul dan perkembangan organisme sejak dari telur yang dibuahi ke bentuk dewasanya.

- Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)

Hewan atau tumbuhan baik berukuran mikro ataupun makro yang mengganggu, menghambat, bahkan mematikan tanaman yang dibudidayakan. Berdasarkan jenis serangannya OPT dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu hama, vektor penyakit, dan gulma

- Outbreak OPT

Meledaknya populasi Organisme Pengganggu Tanaman

- Permeabilitas

Salah satu parameter petrofisik yang berupa kemampuan batuan untuk dapat meloloskan fluida. Satuan permeabilitas yang umum digunakan ialah Darcy. Aliran fluida dalam media berpori berdasarkan Hukum Darcy diturunkan secara empiris.

- Potensial Osmotik

Zat cair dalam vakuola dan bagian-bagian sel lainnya yang mengandung zat-zat terlarut di dalamnya, artinya zat cair tersebut adalah suatu larutan dan potensial airnya (seandainya dikeluarkan dari sel) adalah potensial larutan atau potensial osmotik yang nilainya lebih rendah daripada potensial air murni.

- Prakiraan Iklim

Penggunaan ilmu dan teknologi untuk memperkirakan kondisi rata-rata cuaca berdasarkan waktu yang panjang untuk suatu lokasi di bumi untuk waktu yang akan datang

- Prediksi Iklim

Suatu proses memperkirakan secara sistematis tentang kondisi rata-rata cuaca berdasarkan waktu yang panjang untuk suatu lokasi di bumi untuk waktu yang akan datang

- Prediksi Probabilistik

Suatu proses memperkirakan secara sistematis suatu peluang kejadian

- Presipitasi

Setiap produk dari kondensasi uap air di atmosfer. Ia terjadi ketika atmosfer (yang merupakan suatu larutan gas raksasa) menjadi jenuh dan air kemudian terkondensasi dan keluar dari larutan tersebut (terpresipitasi). Udara menjadi jenuh melalui dua proses, pendinginan atau penambahan uap air

- Respirasi

Proses mobilisasi energi yang dilakukan jasad hidup melalui pemecahan senyawa berenergi tinggi (SET) untuk digunakan dalam menjalankan fungsi hidup. Dalam pengertian kegiatan kehidupan sehari-hari, respirasi dapat disamakan dengan pernapasan

- Sea Surface Temperature (SST)

Suhu air yang dekat dengan permukaan laut. Arti sebenarnya dari permukaan bervariasi sesuai dengan metode pengukuran yang digunakan, namun antara 1 milimeter (0,04 inci) dan 20 meter (70 kaki) di bawah permukaan laut

- Si Katam Terpadu

Sistem Informasi mengenai Kalender Tanam Terpadu yang berisikan informasi Estimasi waktu dan luas tanam padi dan palawija, Estimasi wilayah rawan banjir kekeringan serta serangan OPT, rekomendasi varietas, kebutuhan benih, pupuk dan alat mesin pertanian, Info tanam - BPP, Kalender tanam rawa, Monitoring online kondisi tanaman pangan, Standing crop padi sawah seluruh indonesia, Prediksi curah hujan dan musim bersumber dari IRI dan IFAD, Peta prediksi curah hujan bulanan tingkat kabupaten (BMKG), Informasi penyedia Alsintan. Informasi tersedia untuk lahan sawah irigasi dan lahan rawa pada level kecamatan seluruh Indonesia

- Spikelet

Cabang bulir perbungaan rumput, umumnya mengandung beberapa bunga rumput yang disebut floret.

- Statistic Downscaling

Proses dua langkah yang terdiri dari pengembangan hubungan statistik antara variabel iklim lokal (misalnya, suhu udara permukaan dan curah hujan) dan prediktor skala besar (misalnya, bidang tekanan) dan penerapan hubungan tersebut ke output dari eksperimen model iklim global untuk mensimulasikan karakteristik iklim lokal di masa depan.

- Teknik Downscaling

Metode untuk mendapatkan informasi iklim atau perubahan iklim beresolusi tinggi dari model iklim global resolusi yang relatif kasar (GCMs)

- Tingkat Kehijauan Vegetasi (TKV)

Merupakan cerminan tingkat kehijauan vegetasi yang dapat digunakan sebagai parameter kondisi kekeringan. Nilai TKV dapat berubah disebabkan oleh kondisi ketersediaan air yang ada akibat pergantian musim. Kondisi TKV yang rendah dapat berakibat lanjut pada penurunan produksi pangan, terjadi kebakaran, dan lain sebagainya. Untuk antisipasi akibat buruk tersebut, perlu dilakukan upaya pemantauan TKV

- Transpirasi

Hilangnya uap air dari permukaan tumbuhan

- Varietas Unggul

Galur hasil pemuliaan yang mempunyai satu atau lebih keunggulan khusus seperti potensi hasil tinggi, tahan terhadap hama, tahan terhadap penyakit, toleran terhadap cekaman lingkungan, mutu produk baik, dan atau sifat-sifat lainnya serta telah dilepas oleh pemerintah

- Viabilitas Polen

Daya hidup alat penyebaran dan perbanyakan generatif dari tumbuhan berbunga yang ditunjukan dengan gejala pertumbuhan atau gejala metabolism

- Zona Agro-Ekologis

Suatu wilayah berdasarkan keadaan fisik lingkungan yang hampir sama, dimana keragaman dan hewan dapat diharapkan akan berbeda dan tidak nyata. Komponen utama agroekologi adalah iklim, fisiografi atau bentuk wilayah, dan tanah. Iklim merupakan kodisi rata-rata cuaca dalam jangka waktu yang panjang, fisiografi, berkaitan dengan bentuk wilayah, dan tanah merupakan media utama dalam melakukan kegiatan pertanian. Ketiga komponen tersebut bersatu padu dalam menciptakan suatu produk uang melimpah dan berkualitas, serta bermanfaat

HANDBOOK

IKLIM PERTANIAN

INDONESIA

Seiring dengan perkembangan isu perubahan iklim dan makin besarnya dampak perubahan iklim yang dirasakan sektor pertanian terutama terhadap produksi pertanian dan ketersediaan pangan, informasi iklim menjadi isu penting dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Hal ini dapat dilihat dari meningkatnya permintaan terhadap informasi dan teknologi adaptasi seiring dengan kerugian yang disebabkan oleh bencana akibat kejadian iklim ekstrim. Pada tahun 1997/1998, Indonesia mengalami deraan iklim yang buruk berupa kejadian *El Niño* yang diikuti oleh *La Niña* sehingga menimbulkan kerugian cukup besar pada sektor pertanian. Hal tersebut menjadi titik ungkit penyebab berkembang pesatnya teknologi adaptasi terhadap kejadian iklim ekstrim dan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya kemampuan adaptasi terhadap kejadian iklim ekstrim.

Buku ini menggambarkan perkembangan aplikasi klimatologi dan meteorologi di sektor pertanian untuk meningkatkan ketahanan (*resilience*) melalui berbagai upaya adaptasi terhadap perubahan iklim. Buku ini terdiri dari empat bagian yaitu model, peran, strategi dan teknologi. Model menguraikan tentang meteorologi pertanian dan basis data iklim serta model perubahan iklim dan pertanian cerdas iklim. Pada bagian peran dikupas tentang dampak cekaman abiotik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman serta variabilitas iklim dan dinamika waktu tanam padi. Bagian strategi diuraikan tentang antisipasi dan perbaikan tanaman untuk adaptasi, teknologi inovasi sistem informasi kalender tanam terpadu sebagai upaya adaptasi perubahan iklim, pemanfaatan prediksi musim untuk pengelolaan risiko pertanian, prediksi iklim untuk pertanian, dan dinamika pertumbuhan padi dan curah hujan berdasarkan data modis dan TRMM. Bagian teknologi diinformasikan berbagai inovasi yang dihasilkan oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian berupa analisis hubungan anomali curah hujan dengan ENSO Modoki Indeks pada kondisi *El Niño* dan *La Niña* untuk mendukung pengembangan model prediksi curah hujan di Indonesia, prediksi curah hujan untuk pengelolaan pertanian, serta penggunaan sistem modeling untuk proyeksi produktivitas tanaman pangan yang diharapkan mampu mendukung upaya untuk perencanaan pertanian yang tahan terhadap keragaman dan perubahan iklim.

Semoga buku ini menjadi jendela informasi tentang perkembangan dan teknologi aplikasi informasi iklim pada sektor pertanian, sehingga semakin meningkatkan pemahaman dan kesadaran masyarakat khususnya bagi pengambil kebijakan, terhadap pentingnya upaya adaptasi sektor pertanian menghadapi perubahan iklim.



IAARD
PRESS

Sekretariat Badan Litbang Pertanian
Jl. Ragunan No. 29 Pasar Minggu, Jakarta 12540
Telp. (021) 7806202, Fax. (021) 7806644
Website : www.litbang.pertanian.go.id
email : iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Pertanian
ISBN 978-602-344-254-6

9 786023 442546