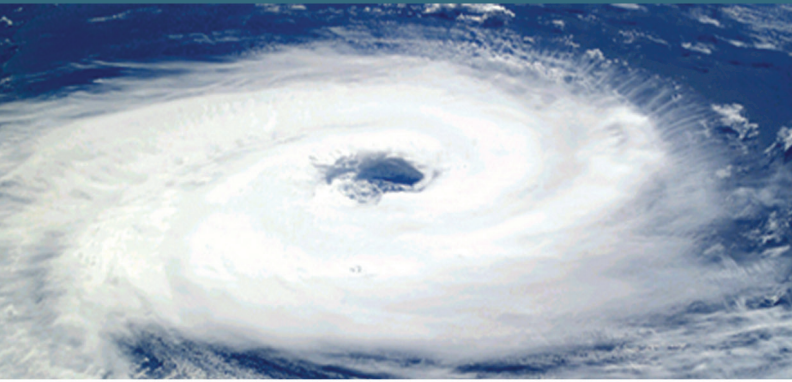


HANDBOOK IKLIM PERTANIAN INDONESIA

Editor:

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



IKLIM PERTANIAN INDONESIA

IKLIM PERTANIAN INDONESIA

Editor:

Irsal Las

Istiqlal Amin

Hermanto

Harris Syahbuddin

Yayan Apriyana



IAARD
PRESS

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 Rakhmi 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, penurunan luas panen, penurunan produktivitas dan produksi pertanian. Pada tahun 1997/1998, Indonesia khususnya dan dunia pada umumnya pernah mengalami kondisi yang buruk akibat terjangkit El Nino yang kemudian diikuti oleh La Nina yang sama-sama kuat. Seluruh lapisan dunia mengalami gangguan ketersediaan pangan. Pengalaman ini juga sekaligus membuktikan tangguhannya sub sektor perkebunan dalam mengkompensasi gejolak ekonomi di Indonesia.

Posisi geografis Indonesia yang berdekatan dengan sumber energi 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, banjir 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) Refokusing

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 inter disiplin 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 banjir 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, informasi 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 harian, 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 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 manajemenantisipasi 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 penyesuaian/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	xi
Perkembangan Isu-isu Penting	xii
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 monsunial.....	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.	Ketersediaan Air DTA Danau Singkarak pada Tingkat Kecamatan berdasarkan Analisi 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 perwakilan di sentra produksi padi.	312
Tabel 19. Tingkat ketepatan dan kisaran kesalahan pendugaan data curah hujan pada proses validasi model di beberapa stasiun perwakilan 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 ₂ O 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 tadah 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 output 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 Irigasi 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 ($0C^{\circ}10$) 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 tadah 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 tadah hujan di Kecamatan Arahau, 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 efesiensi operational rutin budidaya pertanian seperti penanaman, pembibitan, panen dan juga mempengaruhi kemandirian 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 staretegis 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 pengambilan 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 dieksploitasi untuk menyelesaikan berbagai masalah yang berhubungan dengan produksi pertanian

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

- (1) Peralatan dan instrument 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*

Berbicara 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.

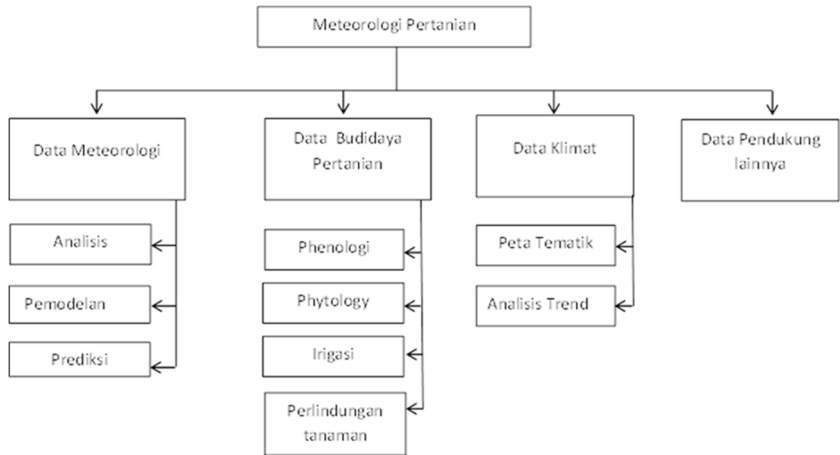
Data dalam meteorologi pertanian memiliki ruang lingkup yang cukup besar dan sangat beragam. Penggunaan data tergantung kepada aplikasi dan tujuan yang ingin dicapai. Data dasar yang umum digunakan dalam meteorologi pertanian adalah data runut waktu (*time series data*), data spasial dan data *phenology* tanaman. Untuk aplikasi dan analisis lain yang lebih komplek 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 menunjukkan 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 budadaya 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 atmosfer 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, pemantauan kondisi cuaca tanaman, pemodelan tanaman, resiko hama dan penyakit proteksi peternakan, pemantauan, kejadian ekstrim (banjir dan kekeringan)
Intensitas curah hujan	15 menit, 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, irigasi, 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 irigasi, perhitungan neraca air, dan kebutuhan air tanaman

Informasi dan Pelayanan Meteorologi Pertanian

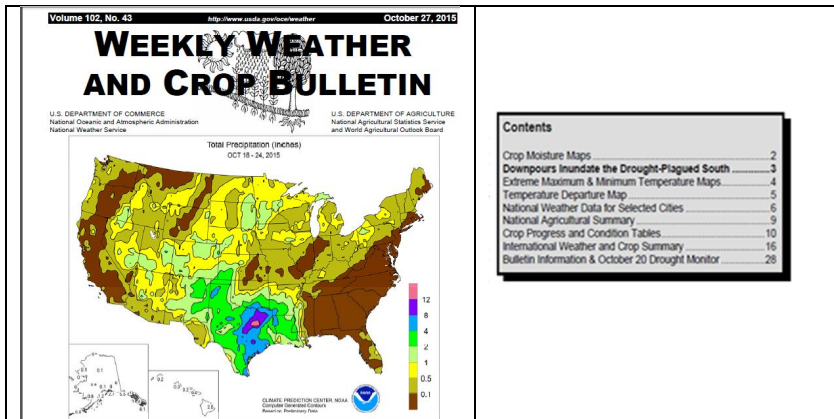
Histori data (data lampau)

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, perlima 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 pertanian 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 perlima harian. Dalam proses budidaya pun, petani membutuhkan informasi prakiraan iklim/cuaca. Terutama pada fase-fase pertumbuhan tanaman 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 pelayanan informasinya 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 atmosfer, 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 Kementrian 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 sytem*).

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 ditiitikberatkan 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.

Disememinasi 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 keragaan kewilayahan 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 Change

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.

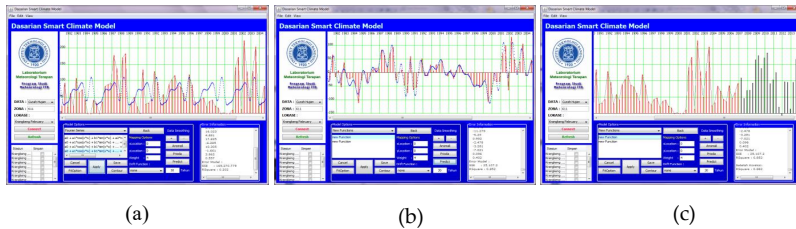
(iii) Analisis sifat periodik

Analisis sifat priodik 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. Menunjukkan 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.

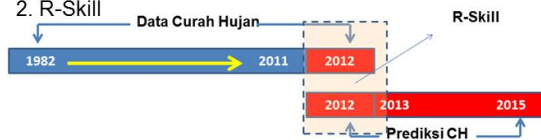
Untuk perhitungan *R-Skill*, data curah hujan yang dimasukkan ke dalam *database* adalah 1982 hingga 2012 untuk memprediksi

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

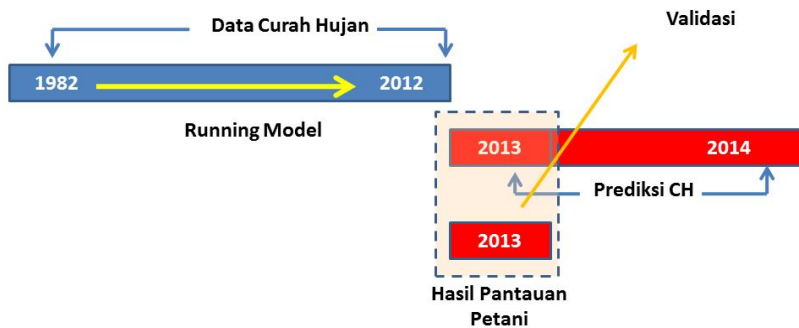
No	Stasiun	<i>R-Square</i>	<i>R-Skill</i>	<i>RMSE</i>
1	Anjatan	0,77	0,74	65,44
2	Bondan	0,76	0,82	31,23
3	Bugel	0,72	0,73	35,10
4	Cidempet	0,76	0,79	49,55
5	Cikedung	0,77	0,68	43,43
6	Gabuswetan	0,79	0,76	34,55
7	Indramayu	0,80	0,77	50,86
8	Jatibarang	0,74	0,70	46,03
9	Jutinyuat	0,82	0,65	65,11
10	Kedokan 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

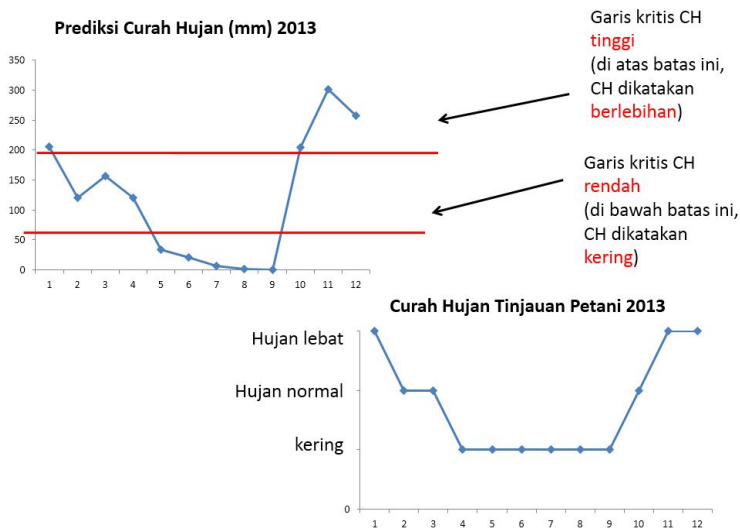
Selain verifikasi, karena hasil prediksi model akan diimplementasikan oleh masyarakat, maka sangat direkomendasikan untuk melakukan validasi. Validasi tersebut dilakukan dengan cara membandingkan hasil prediksi model

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.



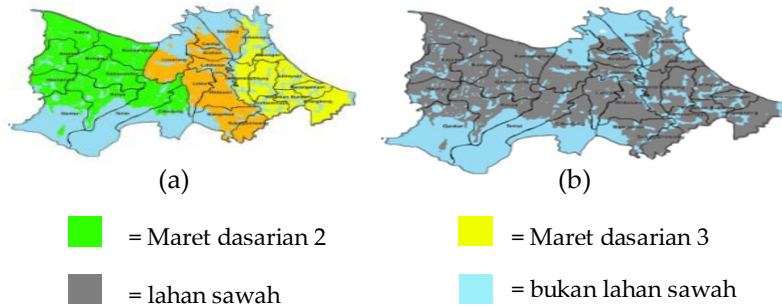
Gambar 6. Proses validasi lapangan.

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 *threshol* 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 peta *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*.

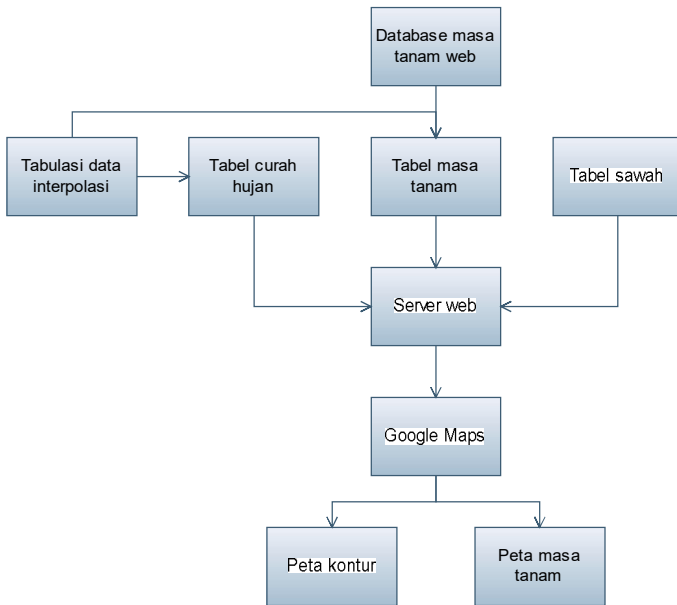
Salah satu contoh pemanfaatan *Google Map* pada bidang pertanian adalah memberikan informasi mengenai risiko atau ancaman terhadap tanaman di dunia yang terancam punah. Pengembangan yang melibatkan kerjasama *Kew*, *International Union for Conservation of Nature* (IUCN), dan *Natural History Museum*, 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

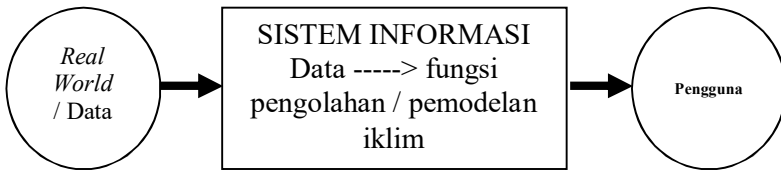
pemetaan tematik yang sangat potensial untuk dikembangkan, akan tetapi terdapat beberapa fungsi yang perlu diperbaiki (Sandvik, 2008).

	id	masa_tanam	fid_sawah	kode_subdesa	dasarian	bulan	tahun	siap_bibit	dasarian	siap_bibit	bulan	siap_bibit	tahun	olah_tanah	dasarian
	0	3212004	1	1	1	2015		3		10		2014		2	
	0	3212007	2	11	2014		2	11	2014		11	2014		1	
	0	3212008	3	12	2014		2	10	2014					1	
	1	3212009	3	12	2014		2	10	2014					1	
	2	3212010	3	12	2014		2	10	2014					1	
	2	3212011	3	12	2014		2	10	2014					1	
	20	3212012	1	11	2014		3	11	2014					2	
	20	3212013	1	11	2014		3	9	2014					2	
	20	3212014	1	11	2014		1	12	2014					3	
	20	3212017	2	11	2014		3	9	2014					2	
	0	3212018	2	11	2014		3	1	2015					2	
	0	3212019	2	11	2014		3	1	2015					2	
	1	3212020	2	11	2014		3	2	2015					2	
	2	3212021	2	11	2015		3	1	2015					2	
	2	3212022	2	11	2014		2	4	2015					1	
	20	3212024	2	11	2014		3	2	2015					2	
	20	3212028	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

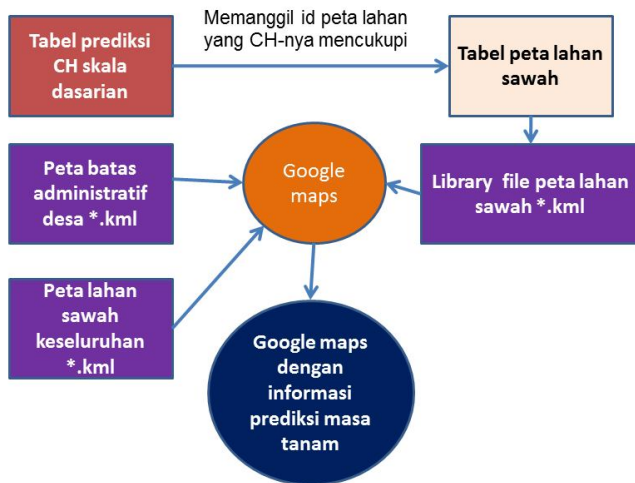
Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, sistem informasi pertanian yang dibentuk dalam suatu sistem informasi meteorologi ditandai dengan dikembangkan sistem basis data sebagai salah satu basis dari suatu bentuk sistem informasi. Pola sistem informasi secara umum memanipulasi dunia-nyata (*real-world*) sedemikian 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

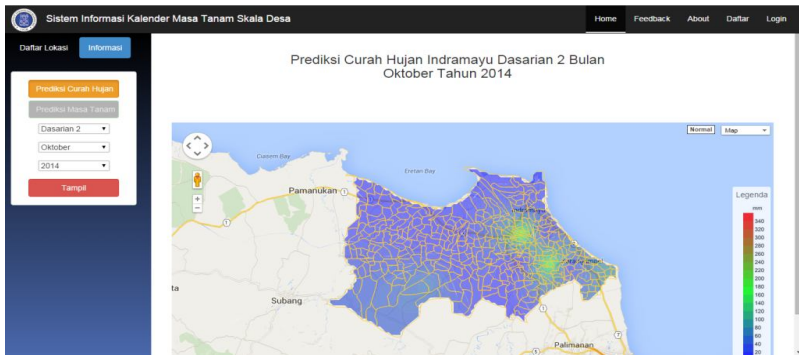
web dinamis sehingga dapat menampilkan *content* yang bisa berubah secara otomatis. *Database* akan dibaca oleh server dan ditampilkan secara informatif.

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*.

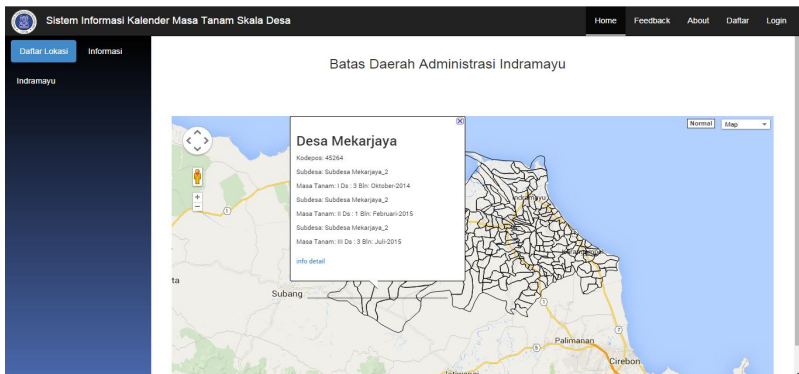
Peta lahan sawah dilengkapi dengan batas administratif desa sehingga *user* akan mengetahui batas-batas lahan sawah di setiap desa, sekaligus bisa mendapatkan penjelasan detil mengenai kondisi lahan sawah di setiap desa tersebut. Pembuatan peta lahan sawah ini dilakukan dengan mendigitasi keseluruhan 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.



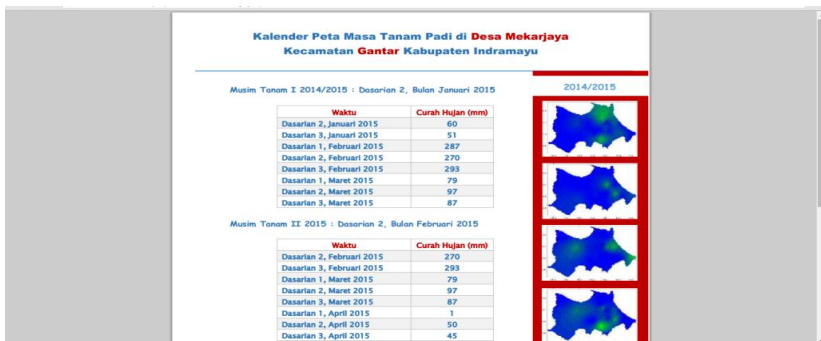
Gambar 12. Halaman web prediksi curah hujan untuk wilayah Indramayu



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 detail 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 detail dapat dilihat dengan mengklik salah satu desa atau sub-desa pada *Google maps* dan selanjutnya muncul *pop up* yang menunjukkan informasi detail tersebut (lihat Gambar 11).

Jika pengguna meng-klik info detail di menu *pop up*, *filepdf* 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 detail prediksi masa tanam di desa Mekarjaya dalam format PDF

Pada Gambar 12 ditunjukkan contoh informasi detail 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 atmosfer. 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 biomasa. 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 C_3 karena terjadinya fotorespirasi. Dengan mengurangi fotorespirasi, pengayaan CO_2 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 CO_2 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 CO_2 (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 CO_2 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 didaerah 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 °C (Litbang BMKG, 2009). Lebih lanjut disebutkan bahwa khusus untuk kota-kota di Indonesia, kenaikan suhunya mencapai 1°C dalam 10 tahun. Menurut Sakya (2014) kenaikan suhu di Banten tercatat tertinggi selama 30 tahun sebesar 1,3°C, disusul wilayah lampung 1,1 °C, Jawa Barat 0,8 °C, Jawa Tengah 0,7 °C dan Jawa Timur 0,3 °C. Penelitian Runtunuwu dan Kondoh (2008) menunjukkan telah terjadi peningkatan suhu udara global selama 100 tahun terakhir, rata-rata 0.57°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 Gommers, 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 realistis 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, praktek 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 merespon sama sekali terhadap peningkatan CO₂, karena jalur C₄ tidak dihambat oleh O₂ dan dapat dipenuhi 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 CO₂ hampir mencapai konsentrasinya. Namun demikian, tidak ada kesepakatan baku terkait pengaruh secara kuantitatif akibat kenaikan CO₂, 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 *poli-fructosans* 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 CO₂ yang tinggi. Hal ini mungkin terjadi apabila tanaman yang mendapatkan CO₂ 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 peningkatan 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 peningkatan CO₂ dan pertumbuhan jangka panjang dalam kondisi CO₂ yang tinggi. Respirasi gelap pada tanaman padi per satuan luas akan meningkat dengan meningkatnya CO₂, 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. Upreti *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 (Upreti *et al.*, 2001).

Asimilasi Nitrogen

Rasio C:N pada daun tanaman umumnya meningkat dalam kondisi kadar CO₂ atmosfer 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 sereal, 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 °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 hijaunya 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, perkecambahan 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
<i>Opanta</i> (cactus)	> 65	-
<i>Sempervivum arachnoidem</i> (sukulen)	57-61	-
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 pra-panen 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 biomas 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 sereal 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 tandan 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 membengkok, 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, perkecambahan 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 °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 Reproduksi

Fase reproduktif pada padi lebih sensitif terhadap suhu tinggi dibandingkan pada fase vegetatif (Wahid *et al.*, 2007; Wassmann *et al.*, 2009). Pembungaan 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 kualitas 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 amonium tersier atau kuartar, 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

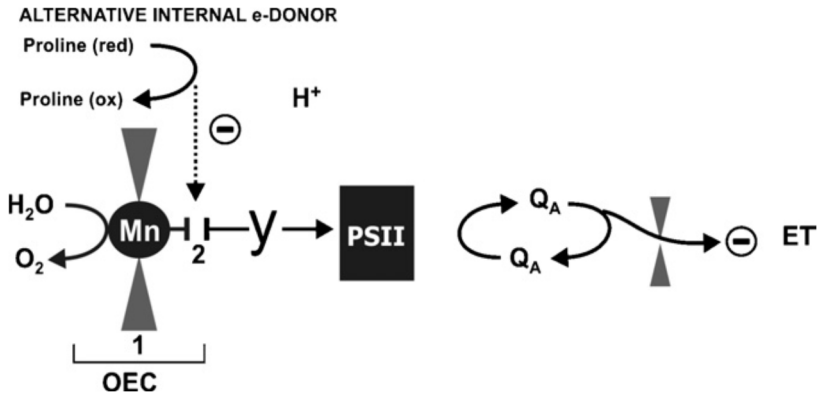
fenotipe tanaman yang toleran terhadap cekaman. Sebagai kesimpulan, karena fungsinya yang jelas dari senyawa osmolit sebagai respon terhadap cekaman abiotik pada tanaman, maka toleransi tanaman terhadap cekaman mungkin dapat ditingkatkan dengan meningkatkan akumulasi senyawa osmolit kompatibel melalui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

Fotosintesis

Reaksi fotokimia pada lamela tyllakoid dan metabolisme karbon pada stroma telah diindikasikan sebagai tempat utama terjadinya kerusakan. Fluoresen klorofil, rasio antara variabel fluoresen terhadap maksimum fluoresen (F_v/F_m), dan dasar fluoresen (F_o) 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 H_2O untuk mendonorkan elektron kepada PSII (De Ronde *et al.* 2004).

Suhu tinggi mempengaruhi kapasitas fotosintesis tanaman C_3 dan C_4 . 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 (P_n). Pada jagung, P_n 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 $20\text{--}30^\circ\text{C}$, 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 $1\text{--}50^\circ\text{C}$. 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 kuartier 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 Ghanafar, 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 penyaring 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

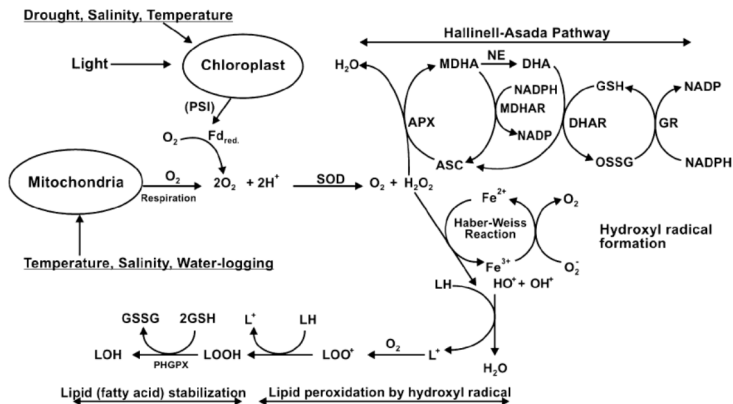
isopren dalam jumlah banyak umumnya memiliki fotosintesis yang lebih baik pada kondisi cekaman suhu tinggi. Oleh karena itu tampaknya terdapat hubungan antara emisi isoprene dengan toleransi suhu tinggi.

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 ($^1\text{O}_2$), radikal superoksida (O_2^-), hidrogen peoksida (H_2O_2) dan radikal hidroksil ($\text{OH}^\cdot$). AOS menyebabkan otokatalitik peroksidasi lipida membran dan beberapa pigmen, yang menyebabkan kehilangan semi-permiabilitas 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 toksisitas O_2^- dan H_2O_2 tidak sehebat ($\text{OH}^\cdot$), yang dibentuk oleh O_2^- dan H_2O_2 jika Fe^{2+} dan Fe^{3+} berada dalam jumlah yang sangat kecil saja melalui reaksi Haber–Weiss. Radikal $\text{OH}^\cdot$ 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 skematik pembentukan dan penghilangan radikal superoksida, 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 Stress (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 tadah hujan, yang mempengaruhi 10 juta ha padi gogo dan lebih dari 13 juta ha padi sawah tadah 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 metabolis. Defisit air akan menyebabkan penutupan stomata yang akan menurunkan konsentrasi 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 metabolis 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 sheat 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 terlindung 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 pengguguran 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 barrier 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 permiabel sehingga memungkinkan terjadi desikasi jika cekaman yang lebih tinggi diberikan.

Adaptasi biokimia yang umum adalah penyesuaian osmotik (*osmotic adjustment*), 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-betain, 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 teramati adalah konsekuensi dari terjadinya perubahan ekspresi tersebut meliputi pembungaan 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. Salinisasi 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 praktek 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 (Ponnamperuma, 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

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. 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, Zuily-Fodil Y, Pham-Thi AT. 2004. Effect of drought stress on lipid metabolism in the leaves of *Arabidopsis thaliana* (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-pyrroline-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, Hodges 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 valuated 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, Marmioli 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 exsertion 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, Phaer 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 Menghadapai 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, Gommers 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.
- Upreti 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.

- Upreti 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 accumulate salt 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 (sereal) 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 pertumbuhan 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 tadah 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.

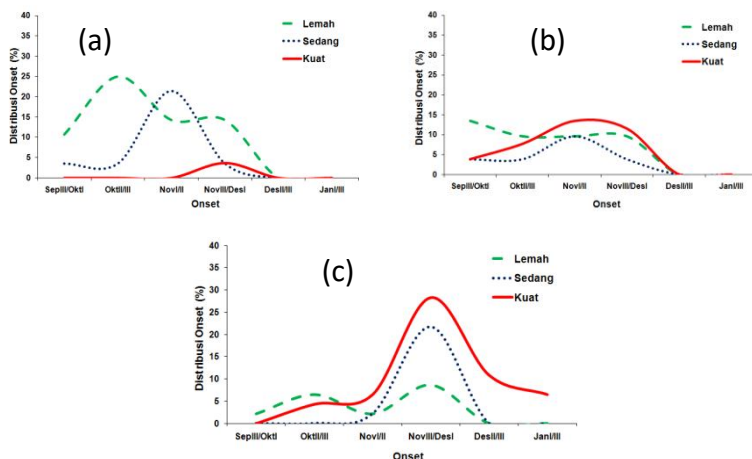
Mundurnya awal tanam akibat anomali iklim sangat berdampak serius terhadap pola tanam dan waktu tanam pada musim tanam berikutnya sehingga akan mengganggu stabilitas hasil padi. Untuk

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

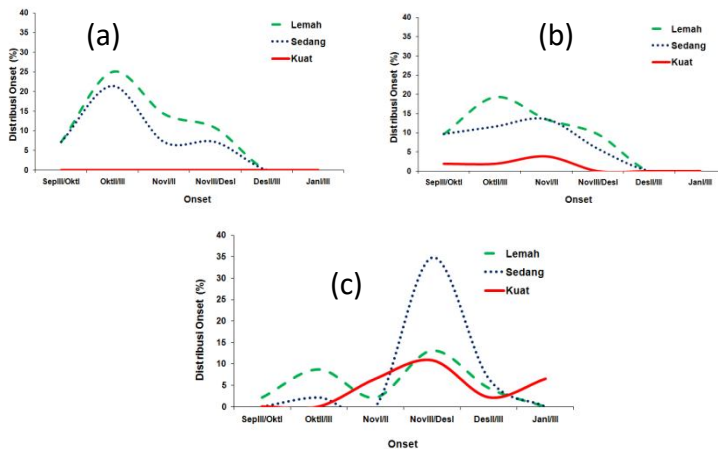
Puncak tanam atau awal musim tanam (*onset*) di wilayah dengan pola curah hujan monsunial seperti di Jawa Barat pada umumnya terjadi pada September dasarian III/ Oktober dasarian I (Las *et al.* 2007). Puncak tanam semakin mundur dari Barat ke Timur. Pada wilayah yang terpengaruh lemah oleh ENSO seperti 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

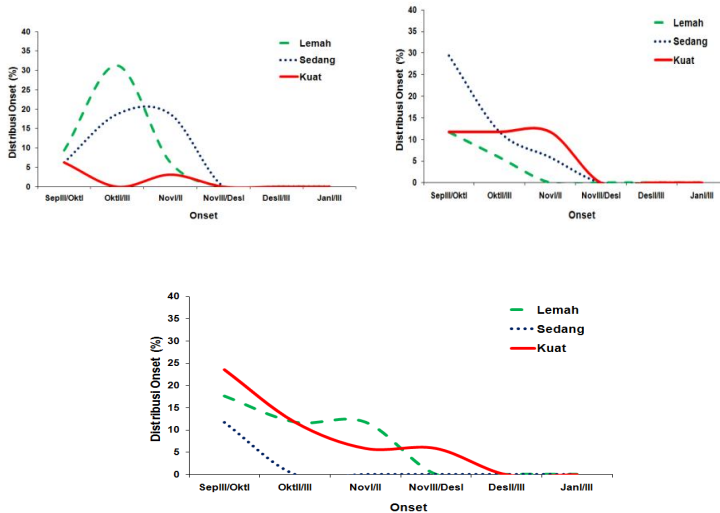
umumnya mundur 1-2 dasarian sedangkan di Indramayu mundur 6 dasarian (Gambar 2). Di wilayah yang tidak terpengaruh baik oleh ENSO maupun IOD seperti di sebagian besar kabupaten Bogor, Cianjur dan Bandung, puncak tanam tidak mengalami pergeseran, seluruh puncak tanam terjadi pada September III/Oktobre 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).



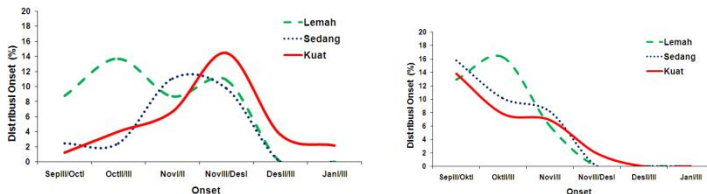
Gambar 18. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian IOD di (a) Karawang; (b) Subang (c) dan Indramayu, Jawa Barat.

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 bergeser 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

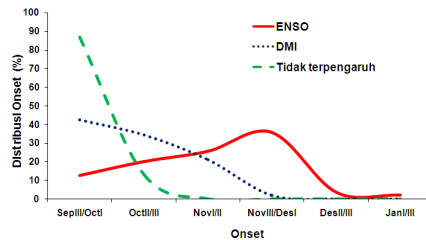
dapat mencapai hingga sampai 5-6 dasarian pada November III/Desember I. Sebaliknya di wilayah selatan Jawa Barat pergeseran puncak tanam yang didominasi IOD hanya bergeser 1 dasarian saja (Gambar 4). Dan secara keseluruhan pada pola wilayah monsunal, pergeseran puncak tanam terjadi bila kejadian ENSO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



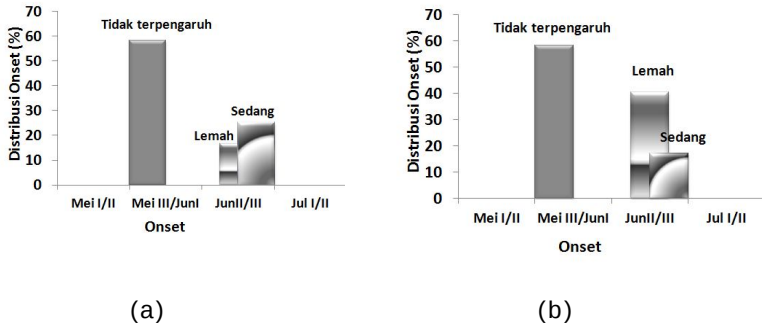
Gambar 20. Hubungan tingkat korelasi dengan onset pada kejadian (a) ENSO dan (b) IOD di Jawa Barat.



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 onsets pada saat terjadi (a) ENSO dan (b) IOD di wilayah equatorial (Sumatera Barat).

Di wilayah monsun 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/Oktober 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/Oktober 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 tadah 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 tadah 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.

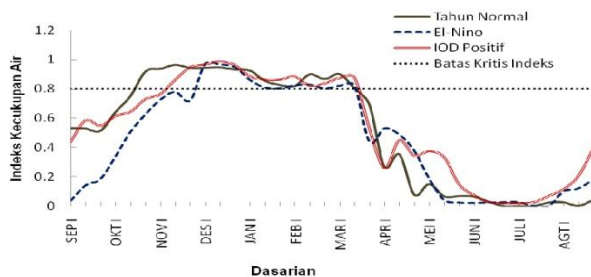
Hasil analisis potensi waktu tanam untuk lahan sawah irigasi menggunakan neraca air sawah irigasi menunjukkan bahwa pada tahun normal, El Niño, maupun IOD positif baik di Anjatan, Kertasemaya maupun di Krangkeng, pada September III defisit kehilangan air masih tinggi di atas 40% (Gambar 8). Defisit kehilangan 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 tadah 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 tadah 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

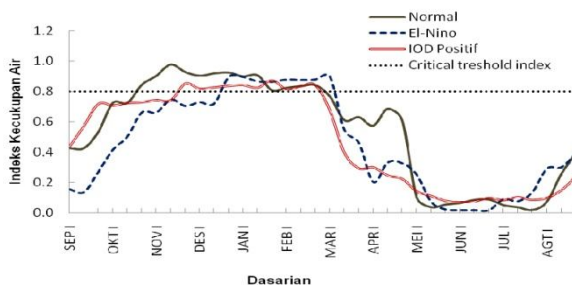
tahun-tahun normal yaitu pada November III – pada Desember I – Januari III. Pada wilayah yang terindikasi lemah terkena El Niño seperti di Kertasemaya waktu tanam juga mundur 3 dasarian dan potensi tanam pada November III – Maret II.

Mundurunya 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).

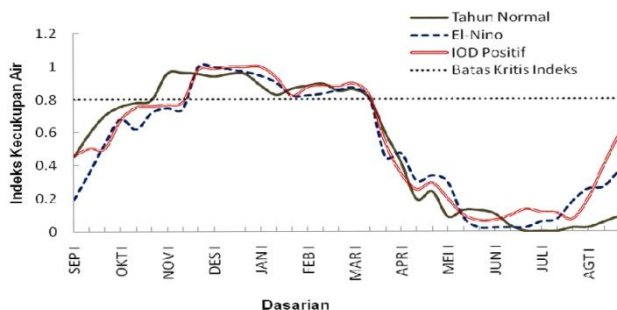
Saat terjadi IOD positif indeks kecukupan air mempunyai rentang yang lebih panjang dibandingkan dengan saat terjadi El Niño sehingga potensi waktu tanam lebih lama yaitu pada November II atau lebih lambat 2 dasarian dari tahun normalnya. Sebaliknya waktu tanam lebih panjang 2 dasarian di Anjatan dan 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)

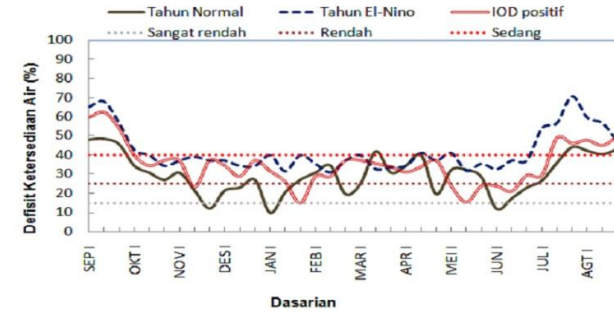


(b)

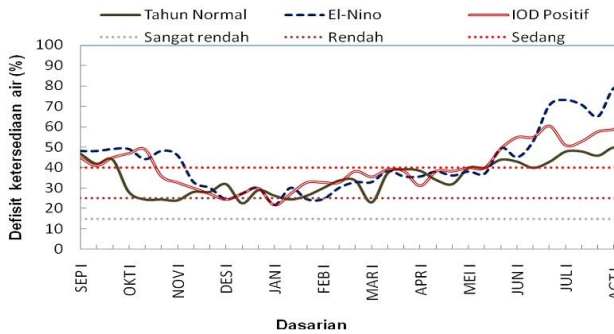


(c)

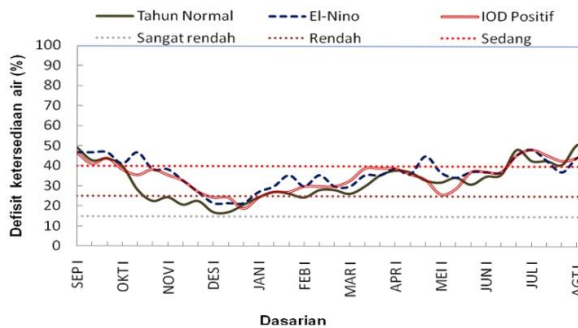
Gambar 23. Fluktuasi indeks kecukupan air pada lahan tadah hujan di wilayah terkena dampak ENSO dan IOD. Di (a) Anjatan, (b) Krangkeng dan (c) Kertasemaya, Kabupaten Indramayu.



(a)



(b)



(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 Ciranjang	September III – Maret II September III – Maret III	September III – April II 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 Ciranjang	September III – Maret III September III – April I	September III – April III 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 Ciranjang	September III – Maret III September III – April II	September III – April III September III – April II

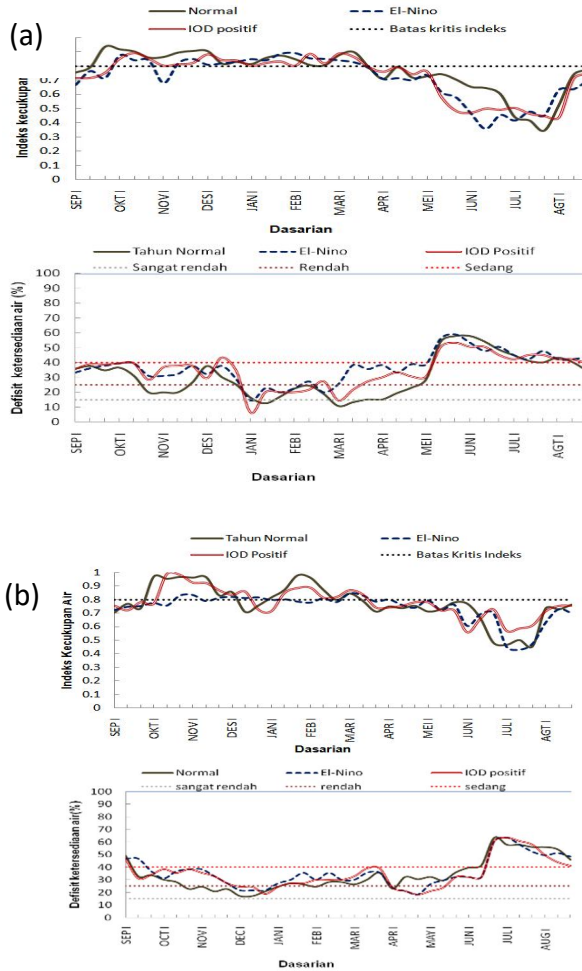
Potensi Waktu Tanam di Pesisir Selatan

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 Sumani	Mei II – Maret II Juni I – Maret III	Mei I – Maret I Mei I – Maret II
El Niño	Pesisir Selatan	Tarusan Batang Kapas	Oktober I – Maret II Oktober III – Maret I	September I – Mei I Oktober I – Mei III
	Solok	Saning Bakar Sumani	Mei II – Maret III Juni I – Maret II	Mei I – Maret I Mei I – Maret I
IOD Positif	Pesisir Selatan	Tarusan Batang Kapas	Oktober I – Maret II Oktober II – Maret I	September I – Mei I September II – Mei III
	Solok	Saning Bakar Sumani	Mei II – Maret II Juni I – Maret III	Mei I – Maret I 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 tadah hujan di wilayah monsunial, 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 tadah 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 tadah hujan yaitu pada Agustus III dengan potensi waktu tanam sampai dengan Mei I. Pada saat terjadi El Niño maupun IOD positif baik di lahan tadah 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 monsunial seperti di Cianjur maupun wilayah equatorial seperti di Solok. Awal musim tanam padi lahan tadah hujan maupun irigasi di Cianjur pada September III, sedangkan di Solok awal musim tanam di lahan tadah 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, Velthuisen 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, Syaikat 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, Subagyo 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. Meteorol.* 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 Variability 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 (Djufray 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 atmosfer 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 atmosfer 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 menggantikannya 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, perkolasi, 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, perkolasi, 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. Secara 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 macak-macak 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. Subagyo *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 ET_a (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 (ET_c) benar, mengingat ET_c menjadi dasar dalam penentuan kebutuhan air tanaman dan ketersediaan air. Menurut Allen *et al.* (1998) ET_c 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 atmosfer. 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 atmosfer. Pada transpirasi, penguapan terjadi terutama di ruang antar sel daun dan selanjutnya melalui stomata uap air akan lepas ke atmosfer. 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 (Murdiyarto, 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 (atmosfer), 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 :

$$ET = K_c \times E_{To}$$

E_{To} menggambarkan evapotranspirasi potensial. Penghitungan ET diawali dengan mencari nilai E_{To} terlebih dahulu. E_{To} (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 K_c atau koefisien tanaman yang menyatakan hubungan antara E_{To} dan ET tanaman. Nilai K_c beragam sesuai dengan jenis tanaman, fase pertumbuhan dan kondisi cuaca yang ada. Nilai K_c 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 evaporasi 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 evaporasi, 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 :

$$ETo = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

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)
 e_s = tekanan uap pada kondisi jenuh (kPa)
 e_a = tekanan uap aktual (kPa)
 $e_s - e_a$ = 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 (ET_o) FAO Penman Monteith tersebut dapat diduga evapotranspirasi pada tanaman dengan menghubungkan ET_o 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 perjalanannya, 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 tadah hujan. Kebutuhan air pada daerah yang memiliki irigasi terutama irigasi teknis, biasanya tercukupi, namun tidak demikian halnya pada lahan tadah hujan. Pada kondisi tadah hujan, yaitu lahan sawah yang mengandalkan hujan untuk penyiramannya umunya 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 Otomatik

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 Otomatik

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 otomatis dengan Sensor

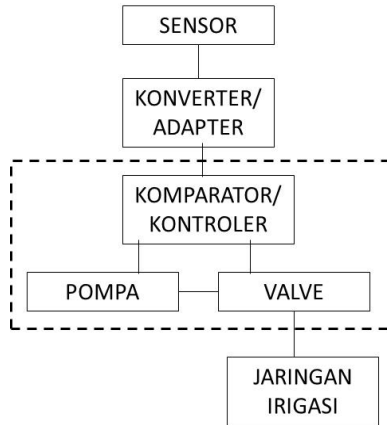
Untuk memantau kelembaban tanah dan mengontrol sistem irigasi otomatis, peralatan yang diperlukan adalah beberapa sensor

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.

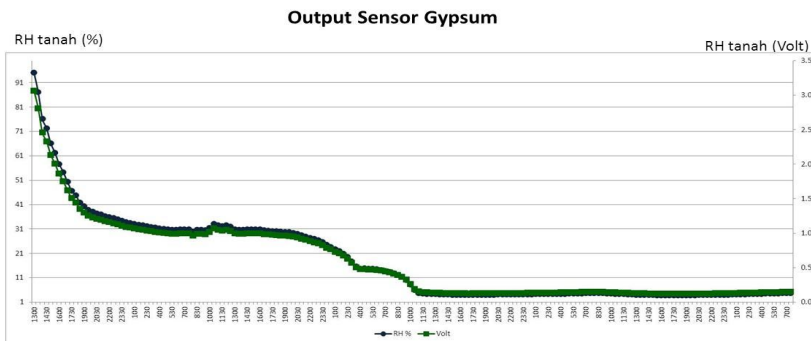
Contoh pada suatu kegiatan penelitian, kadar air pada kapasitas lapang sebagai perlakuan dikontrol menggunakan sensor gypsum. Sensor gypsum untuk mengontrol kelembaban tanah pada rangkaian ini mempunyai keluaran resistensi (tahanan) dalam perubahan tingkat kelembaban tanah. Sensor gypsum untuk kelembaban tanah dengan keluaran resistensi kemudian dihubungkan dengan rangkaian pengubah sinyal resistensi (komparator/adapter) menjadi tegangan (Voltage) ketinggian 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 menit)

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

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

Sistem Irigasi Otomatik di Kawasan Rumah Pangan Lestari (KRPL)

Sistem Irigasi otomatis 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 komposer mencapai 3 lapisan tanah. Tanah ditutup oleh terpal dan diperam selama 21 hari. Setelah 21 hari tanah dimasukkan 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 otomatis.

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 Recsource Reseach Problem 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. Murtalaksono, 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*.
- Murdiyarso D. 1991. Kapita Selektu 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, Sutiriono, R. 1992. Efisiensi Penggunaan Air pada Tumpang Sari Jagung Kedelai di Tanah Entisol Lombok. Laporan Hasil Penelitian Fakultas Pertanian Universitas Mataram. Mataram.
- Subagyo 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 guludan) 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.

Thornhtwaite 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:

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

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

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

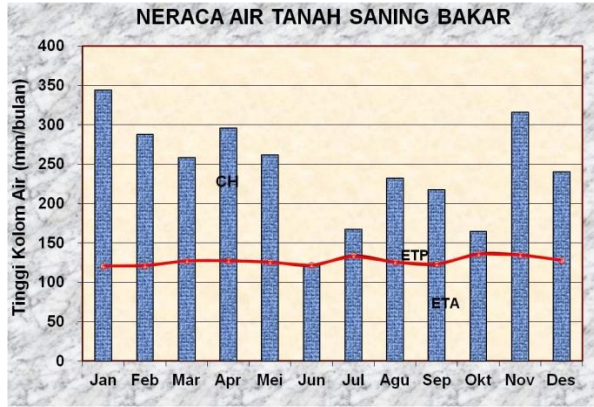
dimana

- 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

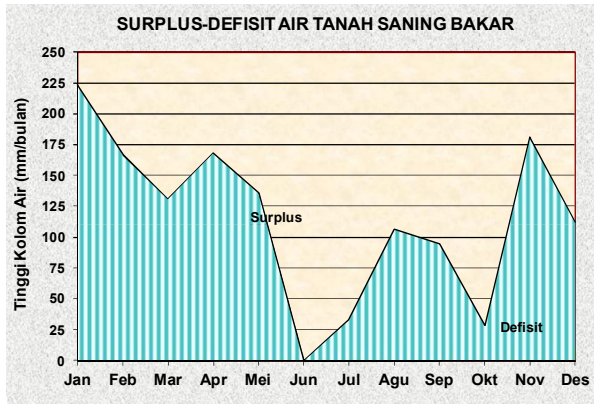
Tabel 1 menyajikan teladan hasil perhitungan neraca air bulanan di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok, Sumatera Barat. Sedangkan Gambar 1 menunjukkan. Grafik Neraca Air Bulanan dan Grafik Surplus-Defisit Air Tanah di lokasi tersebut.

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)



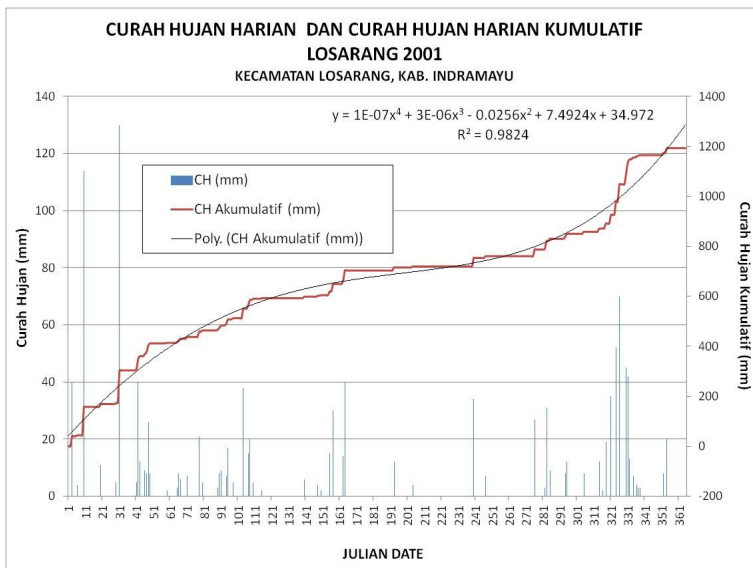
(b)

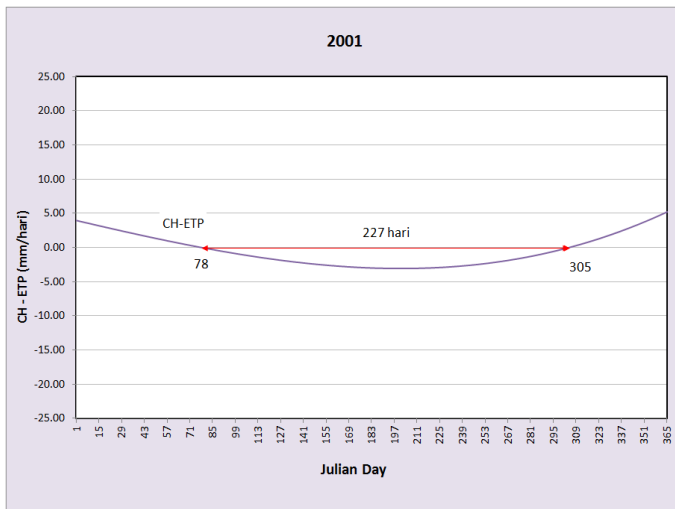
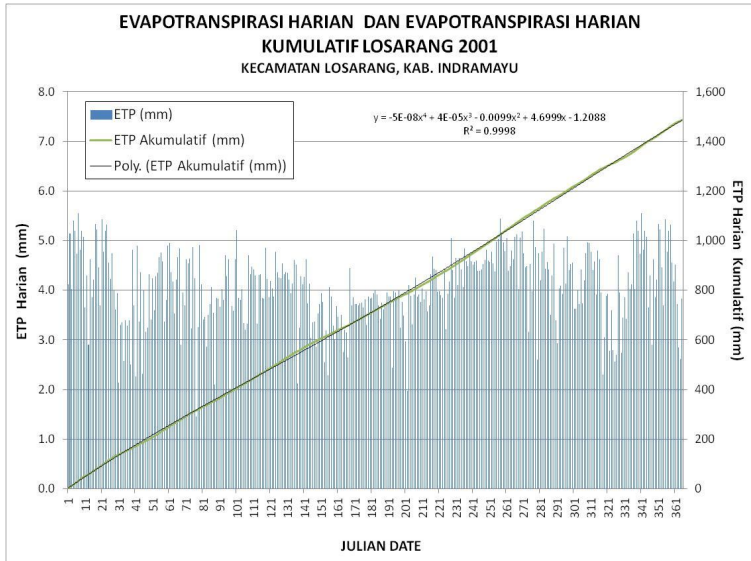
Gambar 29. Neraca Air Bulanan (a) dan Surplus-Defisit Air Bulanan (b) di Saning Bakar, Kecamatan X Koto Singkarak, Kabupaten Solok.

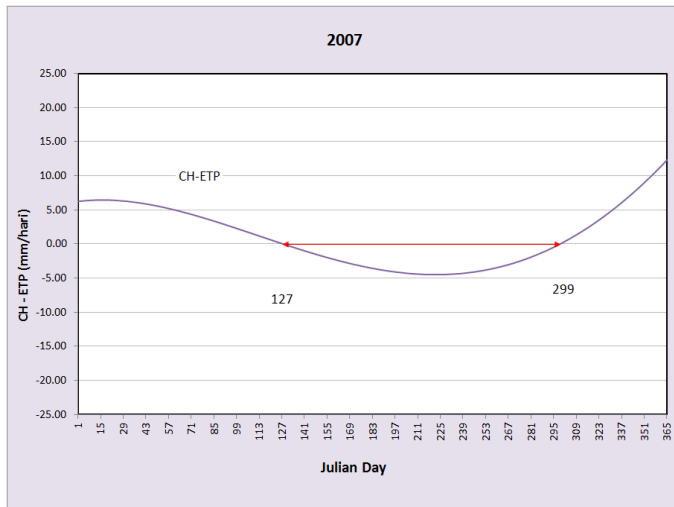
Tabel 1 dan Grafik 1 menunjukkan bahwa berdasarkan analisis neraca air lahan, terjadi kondisi surplus ketersediaan air sepanjang tahun. Total surplus neraca air tahunan di selama 12 bulan mencapai 1.383 mm, tertinggi pada bulan Desember sebesar 223 mm.

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 di tetapkan 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 :

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

dimana

E_o : Evaporasi permukaan air bebas (mm/tahun)

t : suhu rerata tahunan ($^{\circ}\text{C}$)

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 dipermukaan 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:

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

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

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

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 statistik 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 (P_1) 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 di hitung dengan Metode Cook (1940) dalam Chow (1964).

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

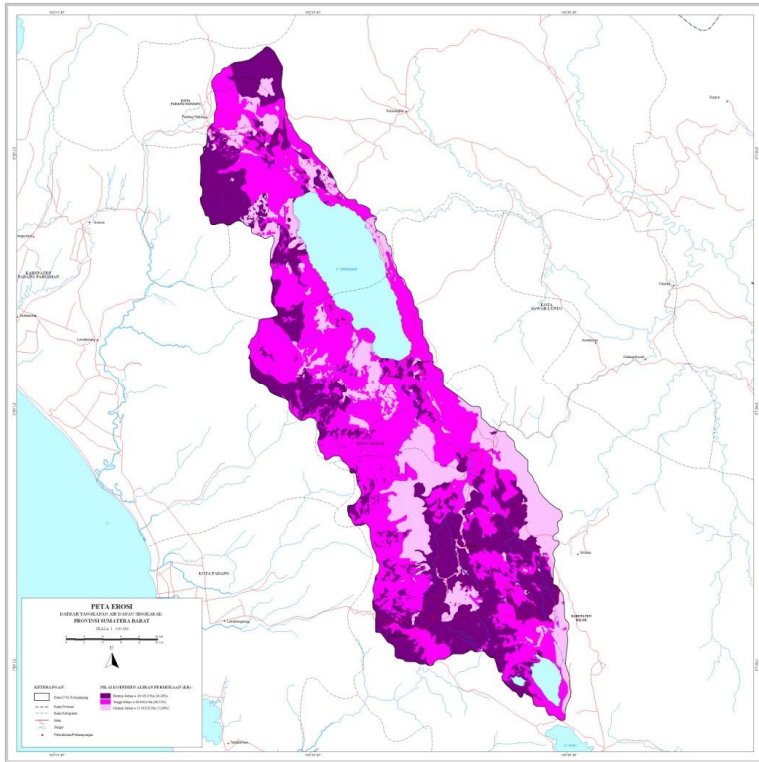
tanah, tutupan vegetasi, kerapatan drainase serta kerapatan drainase.

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.

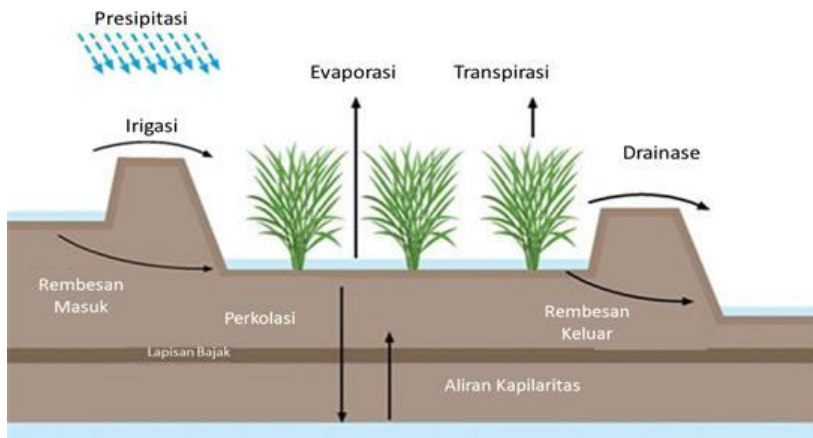
DAS Tahunan.

Kabupaten	Kecamatan	Luas (ha)	Elevasi Rerata	Curah Hujan Rata-rata Tahunan	Suhu Rata-rata Tahunan	Evaporasi Permukaan Air	Evapo-transpirasi Aktual	Koefisien Aliran Permukaan (Metode Cook)	Total Ketersediaan Air
Tanah Datar - Batipuh - X Koto - Batipuh Selatan - Rambatan		8,680 4,950 10,388 3,478	742 876 585 644	2,908 2,908 2,908 2,908	23.2 22.4 24.2 23.8	1,299.6 1,249.7 1,359.6 1,336.9	1,196.5 1,157.2 1,242.9 1,225.4	0.64 0.65 0.67 0.65	53,480,061.8 30,332,445.4 57,081,807.7 20,482,065.1
	Padang Panjang - Padang Panjang Timur - Padang Panjang Barat	2,958 1,879	900 807	2,908 2,908	22.3 22.9	1,240.9 1,275.3	1,150.2 1,177.4	0.59 0.62	21,318,327.2 12,356,640.3
	Kota Solok - Lubuk Sikarah - Tanjung Harapan	7,519 1,877	926 400	2,428 2,120	22.1 25.3	1,231.3 1,432.4	1,109.6 1,205.9	0.66 0.62	33,692,654.0 6,519,787.6
	Solok - Junjung Sirih - 10 Koto Singkarak - Lembang Jaya - Kubung - Gunung Talang - Bukit Sundi - Danau Kembar	7,129 14,448 6,039 17,777 17,846 5,985 2,315	810 699 860 842 865 519 944	2,908 2,514 2,799 2,426 2,732 2,735 2,831	22.8 23.5 22.5 22.6 22.5 24.6 22.0	1,274.1 1,315.9 1,255.6 1,262.2 1,253.7 1,385.3 1,224.8	1,176.5 1,178.6 1,155.3 1,131.9 1,149.5 1,248.7 1,133.1	0.70 0.67 0.68 0.67 0.67 0.65 0.66	37,030,601.7 63,670,037.7 31,766,798.6 75,925,592.1 93,208,545.9 31,135,303.2 13,366,332.2
Ketersediaan Air DTA Danau Singkarak									581,367,000.4

Neraca Air Daerah Irigasi

Neraca air Daerah Irigasi pada dasarnya merupakan imbalan 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 perkolasi (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 perkolasi (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:

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

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 :

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

$K_{\text{c mid (Tab)}}$: 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 koefisien tanaman yang dapat menentukan nilai Kc 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 :

$$G_i > G_{\min}$$

$$G_i = G_{i-1} - Perc_i - ETc_i + CH_i)$$

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:

$$Ir_i = G_{\max} - (G_{i-1} - Perc_i - ETc_i + CH_i)$$

dimana,

Ir_i : 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)

$Perc$: perkolasi (mm)

$ET_{c,i}$: evapotranspirasi tanaman pada hari ke-i (mm),

CH_i : curah hujan pada hari ke-i (mm)

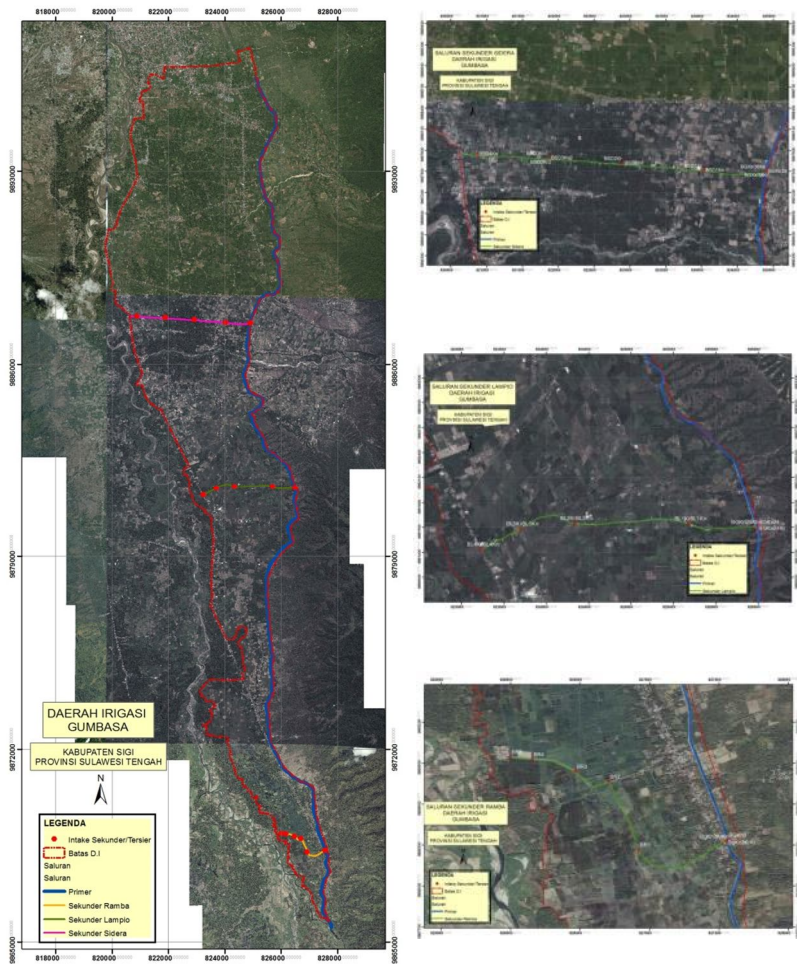
Data masukan yang diperlukan dalam perhitungan analisis neraca ketersediaan kebutuhan air lahan sawah meliputi:

(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.

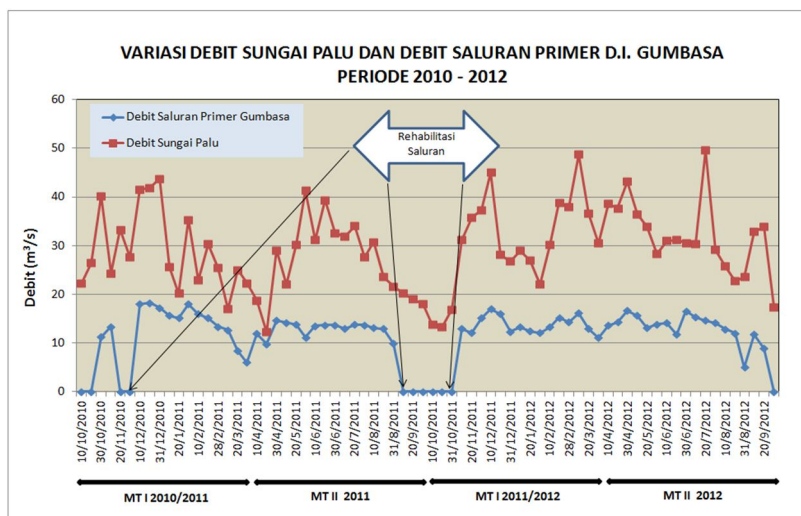
Daerah Irigasi (D.I.) Gumbasa dengan luas potensial 10,500 Ha dan luas fungsional 7,922 Ha berada di Wilayah Kabupaten Sigi mengairi sawah di 5 Kecamatan, 26 Desa dan 1 Kelurahan. Sumber irigasi D.I. Gumbasa berasal dari Sungai Palu yang merupakan jenis sungai kontinyu dengan karakteristik mampu mengalirkan 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 melalu 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 m³/s, debit minimum terjadi pada tanggal 31 Agustus 2012 sebesar 5.00 m³/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 m³/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 I 2011/2012 (l/s)										Debit Irigasi Tersedia 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	12.0	1,776.1
BGKn3KrKr	19	18.5	39.6	39.6	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	11.0	246.7
BGKn3KrKn	14	10.0	29.0	29.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	5.0	175.0
BR1	20	13.9	41.9	37.7	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	1.7	245.0
BR2	14	9.7	29.4	26.4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	1.2	171.5
BR3	14	9.7	29.4	26.4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	1.2	171.5
BR4	41	28.4	86.0	77.4	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2	3.4	502.2
BR5	56	38.8	117.4	105.7	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	4.6	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 (rekomendasi) pada D.I. Gumbasa.

Tabel tersebut menunjukan 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 Saluran Primer D.I. Gumbasa (l/s)	Fase Pertumbuhan	Kebutuhan Irigasi (l/s)	Periode	Fase Pertumbuhan	Kebutuhan Irigasi (l/s)	Keterangan
200	NOPI	N	9,506	NOPI	N	12,675.2	Perlu Waktu Pengolahan cepat dan Serentak
	NOPII		9,506			6,337.6	
	NOPIII		9,506			9,506.4	
	DES I		6,338			9,506.4	
	DES II		9,506			9,506.4	
	DES III		9,506			9,506.4	
	JAN I		9,506			9,506.4	
	JAN II		9,506			9,506.4	
	JAN III		9,506			9,506.4	
	FEB I		9,506			9,506.4	
	FEB II		9,506			9,506.4	
	FEB III		9,506			0.0	
200	MAR I	N	9,506	MARI	N	12,675.2	Panen Serentak
	MAR II		0			6,337.6	
	MAR III		0			6,337.6	
	APR I		0			9,506.4	
	APR II		9,506			9,506.4	
	APR III		9,506			9,506.4	
	MEI I		6,338			9,506.4	
	MEI II		9,506			9,506.4	
	MEI III		9,506			9,506.4	
	JUN I		9,506			9,506.4	
	JUN II		9,506			0.0	
	JUN III		9,506			0.0	
200	JUL I	N	9,506	JULI	N	12,675.2	Idem
	JUL II		9,506			6,337.6	
	JUL III		9,506			6,337.6	
	AGS I		9,506			9,506.4	
	AGS II		9,506			9,506.4	
	AGS III		0			9,506.4	
	SEP I		0			9,506.4	
	SEP II		0			9,506.4	
	SEP III		0			9,506.4	
	OKT I		0			9,506.4	
	OKT II		0			0.0	
	OKT III		0			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 Efesiensy. 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 diasosiasikan 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 :

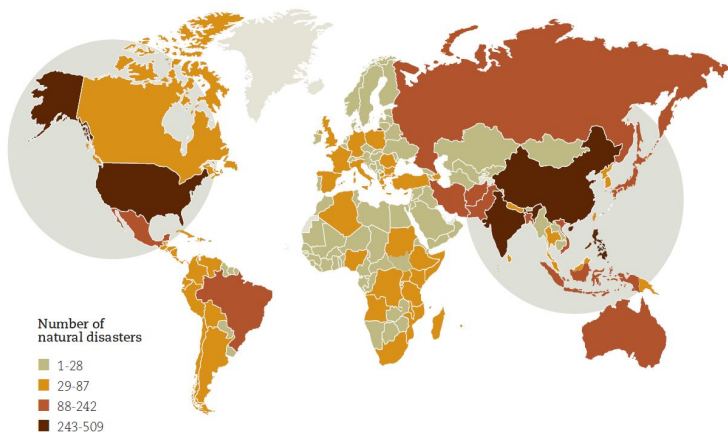
1. Geophysics contoh gempa bumi, aktivitas gunung berapi
2. Hidrologi contoh Banjir, tanah longsor, gelombang laut
3. Meteorologi, contoh badai, suhu ekstrim, kabut asap
4. Klimatologi contoh kekeringan, kebakaran hutan,
5. Biologi contoh bencana karena penyakit
6. Ekstraterestial contoh jatuhnya meteor

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.



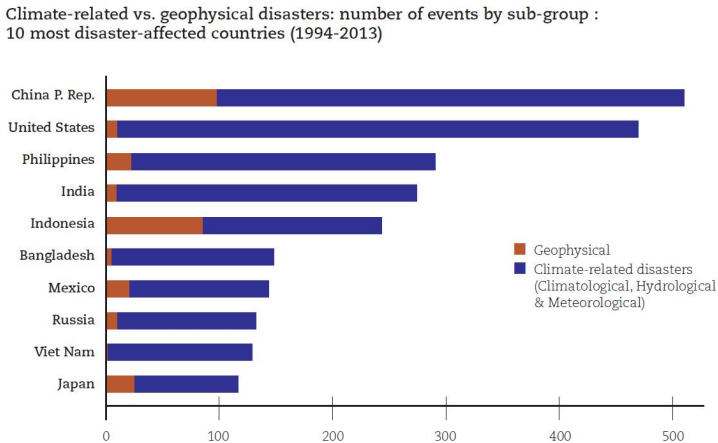
Gambar 35. Jumlah dan persentase kejadian bencana alam di dunia dalam kurun waktu 1994-2013 (sumber: CRED, 2015)



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 (*theshold 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 (cyclon, 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 berjalannya 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 indeks 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, kualitas, kandungan protein dll), transportasi, keragaman makanan, pengolahan pasca panen, kemudahan akses dan indikator sosial ekonomi.