

Analisis Nilai Iklim Ekstrim

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

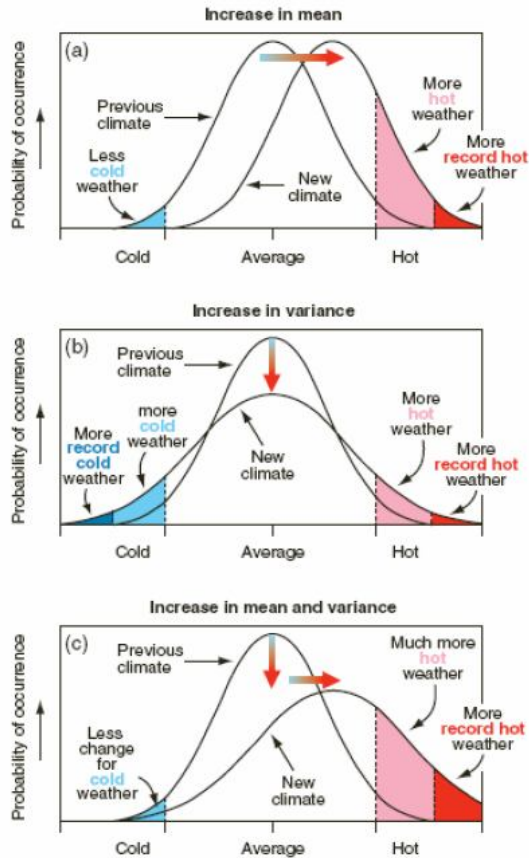
Ada dua pendekatan yang sering digunakan dalam analisis nilai ekstrim yaitu metode klasik atau *block máxima* dan *peak over threshold value* (POT). Metode *block máxima* mengambil nilai maksimum dalam kurun waktu tertentu. Sebagai contoh nilai maksimum dalam satu tahun atau satu bulan periode waktu.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

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

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

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

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



Gambar 38. Analisis perubahan nilai mean dan 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).

Integrasi Adaptasi Perubahan Iklim dan Upaya Pengurangan Resiko Bencana Iklim Ekstrim

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

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

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

DAFTAR BACAAN

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

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

BAGIAN III. STRATEGI

BAB 1.

ANTISIPASI DAN PERBAIKAN TANAMAN UNTUK ADAPTASI

Didy Sopandie, Trikoesoemaningtyas, dan Nani Heryani

Antisipasi dan Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

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

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

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

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Abiotik Akibat Perubahan Iklim

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Suhu Tinggi

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

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

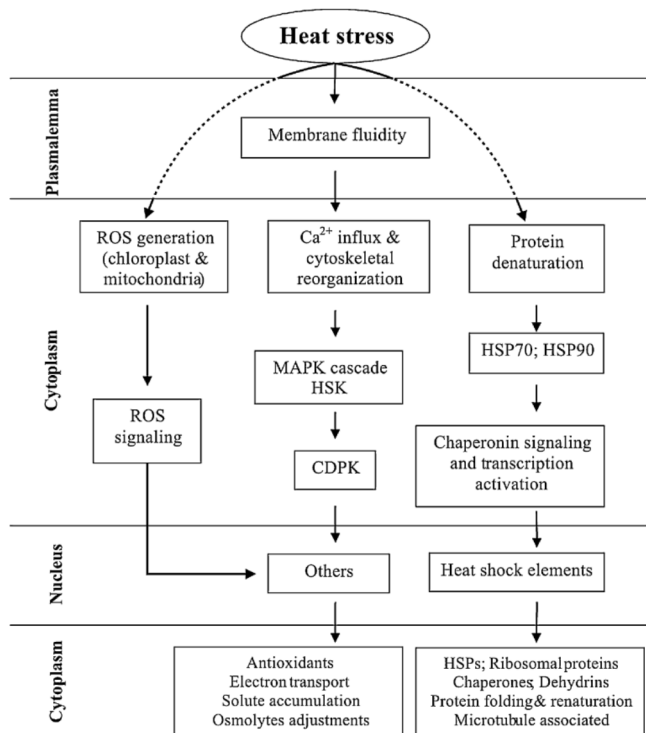
Varietas padi N22 (*aus*) konsisten toleran terhadap suhu tinggi, dan juga toleran terhadap kekeringan dengan mensintesis enzim-enzim yang menghilangkan ROS (*reactive oxygen species*), seperti ditunjukkan oleh kandungan H₂O₂ yang rendah pada malainya dibandingkan varietas peka N118. Varietas N22 terbukti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

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

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

Pengaruh cekaman suhu tinggi dapat dilihat pada berbagai tingkat, termasuk bekerjanya membran plasma dan lintasan biokimia pada sitoplasma atau organel sitoplasma. Pengaruh awal dari cekaman suhu tinggi adalah pada plasmamembran, yang menunjukkan lebih cairnya lapisan lipida (*lipid bilayer*). Hal ini menyebabkan induksi influx Ca^{2+} dan reorganisasi cytoskeletal, yang menghasilkan upregulasi *mitogen activated protein kinases* (MAPK) dan *calcium dependent protein kinase* (CDPK). Proses signaling dari alur signal tersebut pada tingkat *nuclear* menyebabkan peningkatan produksi *antioxidants* dan *compatible osmolytes* untuk keseimbangan air pada sel dan penyesuaian osmotik (*osmotic adjustment*). Produksi ROS (*reactive oxygen species*)

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



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

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

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

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

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

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

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

Mekanisme Adaptasi terhadap Cekaman Kekeringan

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Salinitas

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

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

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

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

(Ghafoor et al., 2004)

Tabel 15. Respons tanaman terhadap salinitas

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

(Seaman 2004)

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

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

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

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

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

Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Rendaman

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

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

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

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

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

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

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Suhu Tinggi

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

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

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

Genetika Toleransi Suhu Tinggi.

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

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

Pemuliaan Konvensional.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(Wassmann *et al.* 2009)

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

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

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

Pemuliaan Padi untuk Wilayah Bersuhu Tinggi

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

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

Kriteria Seleksi untuk Toleransi dan Penghindaran Suhu Tinggi pada Padi.

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

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

Pendekatan Molekuler dan Bioteknologi

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

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

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

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

Perbaikan Toleransi terhadap Suhu Tinggi dengan Pendekatan Lain

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

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

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Kekeringan

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

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

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

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

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

Perbaikan genetika resistensi cekaman kekeringan

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

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

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

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

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

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

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

Varietas tanaman pangan yang toleran kekeringan

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

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

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Salinitas

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

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

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

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

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

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

Perbaikan Tanaman untuk Adaptasi terhadap Cekaman Rendaman

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

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

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

Tinjauan dan Prospek ke Depan

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

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

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

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

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

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

DAFTAR BACAAN

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

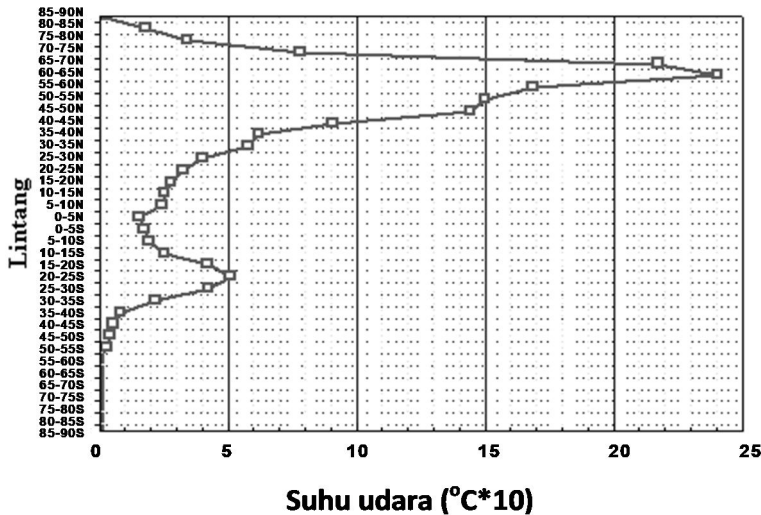
BAB 2.

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

Haris Syahbuddin, Yayan Apriyana dan Eleonora Runtunuwu

Pendahuluan

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



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

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

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

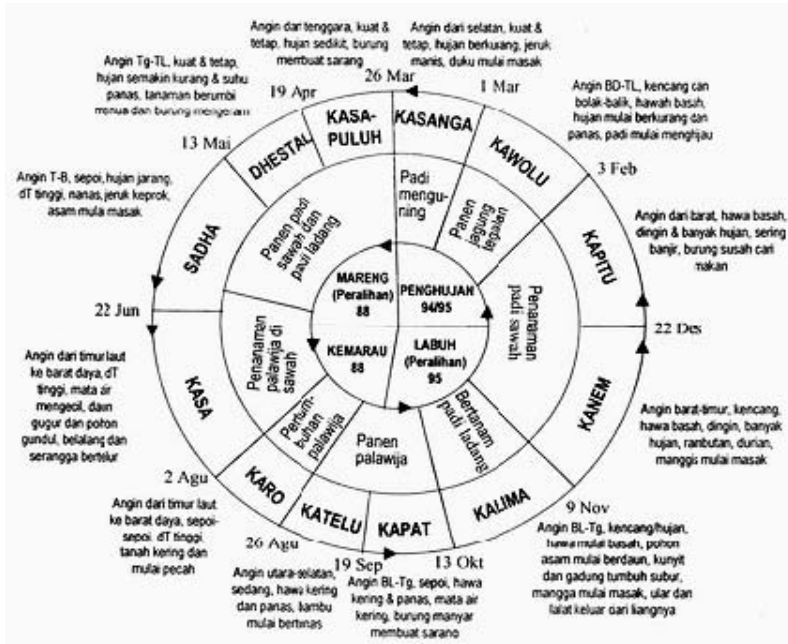
terus meningkat, karena merupakan penyebab utama perubahan iklim global. Perubahan iklim global ditandai antara lain oleh peningkatan intensitas kejadian anomali iklim, baik iklim ekstrim basah, terutama fenomena La Nina, maupun iklim kering seperti fenomena El Nino. Ketidakpastian curah hujan yang seiring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

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

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

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

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

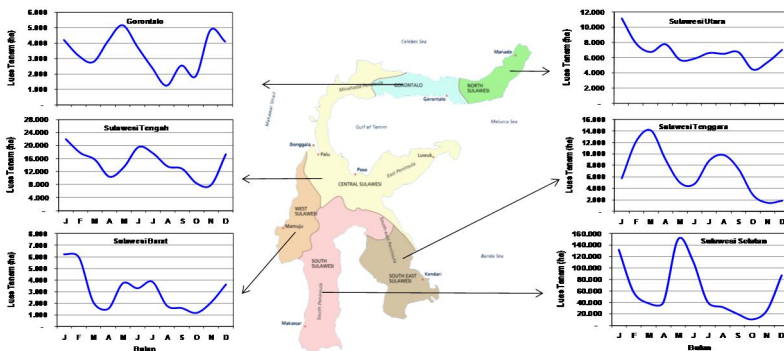


Gambar 41. Kalender pertanian Jawa (<http://senijawakuno.blogspot.com/2012/12/tanda-dan-ciri-pranata-mangsa-arisan.html>)

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

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

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



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

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

pola waktu tanam selama siklus setahun agar lebih mudah dipahami.

Atlas Kalender Tanam

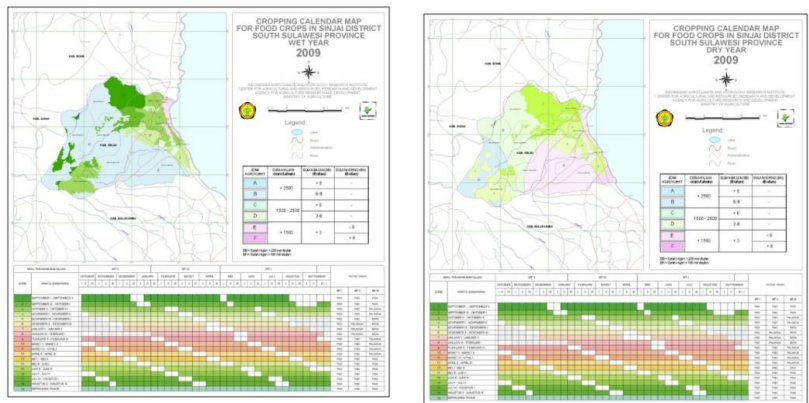
Balitbangtan sejak tahun 2007, menyusun informasi kalender tanam tanaman padi setiap kecamatan untuk seluruh Indonesia dalam bentuk atlas. Atlas Kalender Tanam Tanaman Pangan Skala 1:250.000 yang telah dibuat adalah pulau Jawa (Las *et al.*, 2007; Runtunuwu *et al.* 2011a), Sumatera (Las *et al.* 2008;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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Pengembangan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu

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

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

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

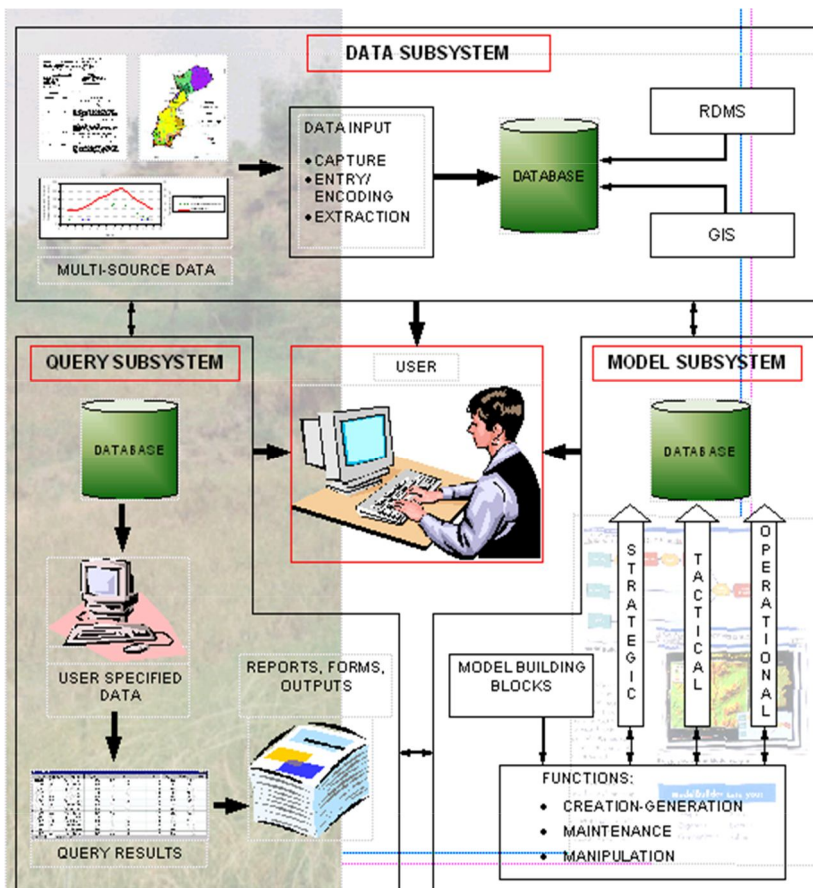
benih yang perlu disiapkan pengguna sebelum masuk periode musim tanam berikutnya.

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

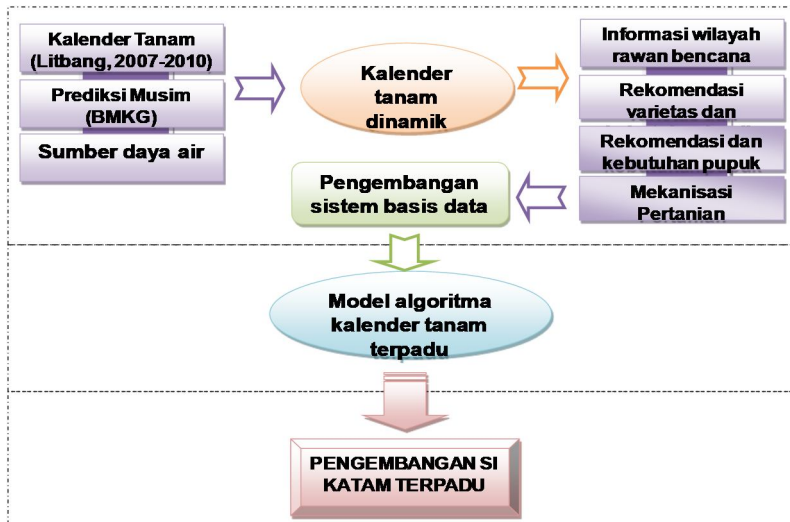
Sejalan dengan Permentan No 45/2011, Badan Litbang Pertanian mengembangkan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (selanjutnya disingkat SI Katam Terpadu) yang menjadi rujukan bagi pengambil kebijakan dalam penyusunan rencana pengelolaan pertanian tanaman pangan skala kecamatan (Ramadhani et. al. 2012,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

Konsep pengembangan sistem

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



Gambar 44. Tiga subsistem pengelolaan informasi

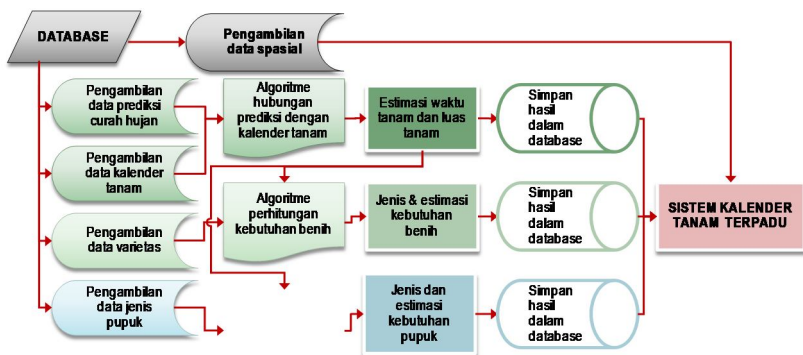


Gambar 45. Alur pengembangan SI Katam Terpadu

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

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

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



Gambar 46. Bagan Alir sistem Katam Terpadu

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

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

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

Data dan informasi

Umum

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

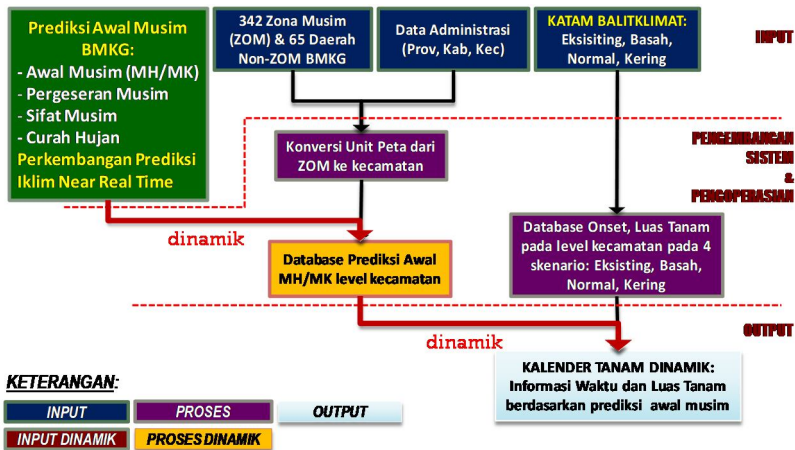
lahan sawah skala 1:250.000 yang digunakan merupakan peta digital yang dibuat BBSDLP (BBSDLP, 2000). Data luas baku sawah dari Kabupaten Dalam Angka seluruh Indonesia yang diterbitkan oleh BPS kabupaten/kota menjadi bahan rujukan.

Estimasi Kalender Tanam dan Luas Tanam

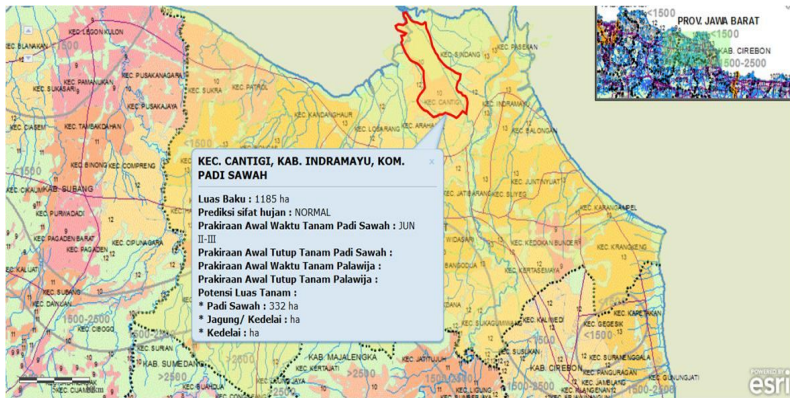
Data dasar prediksi iklim yang tersedia dalam sistem basis data katam terpadu yaitu sifat musim dan jumlah curah hujan bulanan setiap kecamatan untuk musim tanam ke depan. Sifat musim yang dimaksud adalah atas normal (AN), normal (N) dan bawah normal (BN), BMKG (2013). Data ini diperoleh dari BMKG dalam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

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

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



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



Gambar 48. Informasi estimasi awal waktu tanam

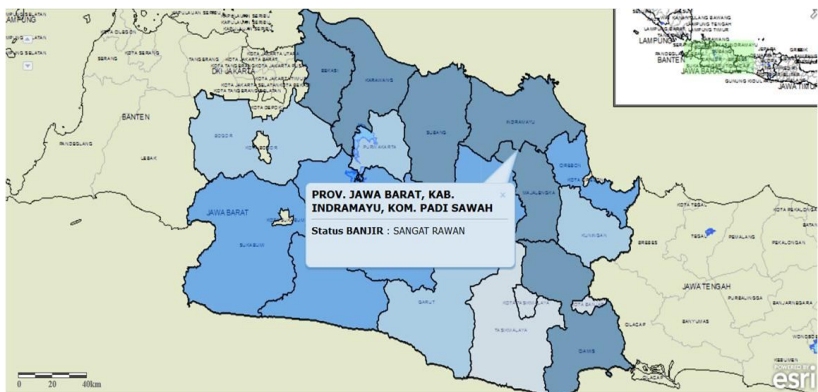
Luas Wilayah Terkena Banjir, Kekeringan dan Serangan OPT

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

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

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

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



Gambar 49. Informasi spasial tingkat kerawanan banjir

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

Gambar 50. Informasi tabular tingkat kerawanan serangan OPT

Rekomendasi Varietas dan Kebutuhan Benih

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

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

#	Kabupaten	Kerentanan	Status Kerentanan	Rekomendasi Varietas	Perkiraan Luas Ancaman Bencana (%)
	INDRAMAYU	BANJIR	SANGAT RAWAN	INPARA 4, INPARA 5, KAPUAS, BATANGHARI, BANYUASIN, TAPUS	11,1
	INDRAMAYU	KEKERINGAN	SANGAT RAWAN	INPARI 10, SITUBAGENDIT, SILUGONGGO DAN INPAGO 5	3,2
	INDRAMAYU	WERENG BATANG COKLAT	SANGAT RAWAN	INPARI 13, MEKONGGA	4,1
	INDRAMAYU	TIKUS SAWAH	SANGAT RAWAN		3,7
	INDRAMAYU	PENGGEREK BATANG PADJ	SANGAT RAWAN		1,6
	INDRAMAYU	TUNGRO			
	INDRAMAYU	BLAST	SANGAT RAWAN	BATANG PIAMAN, SITU PATENGGANG, LIMBOTO, DANAU GAUNG, BATUTUGIK	0,8
	INDRAMAYU	KRESEK (BLB)	SANGAT RAWAN	INPARI 1, INPARI 6, INPARI 17, CONDE, ANGKE	3,7
	INDRAMAYU	REKOMENDASI UMUM		MEKONGGA, INPARI 3, INPARI 7, CIHERANG, CONDE, WAY APO BURU, CIGEULIS, INPARI 10	
	INDRAMAYU	BANJIR	SEDANG	INPARI 29, INPARI 30, INPARA 1, INPARA 2, INPARA 3, INPARA 4, INPARA 5	5,7
	INDRAMAYU	KEKERINGAN	SANGAT RAWAN	INPARI 10, SITUBAGENDIT, SILUGONGGO DAN INPAGO 5	100,0
	INDRAMAYU	WERENG BATANG COKLAT	SANGAT RAWAN	INPARI 13, MEKONGGA	100,0
	INDRAMAYU	TIKUS SAWAH	SANGAT RAWAN		100,0
	INDRAMAYU	PENGGEREK BATANG PADJ	SANGAT RAWAN		100,0
	INDRAMAYU	TUNGRO	RAWAN	TUKAD UNDA, BONDODYODO, TUKAD PETANU, TUKAD BALIAN	3,4
	INDRAMAYU	BLAST	SANGAT RAWAN	BATANG PIAMAN, SITU PATENGGANG, LIMBOTO, DANAU GAUNG, BATUTUGIK	5,4
	INDRAMAYU	KRESEK (BLB)	SANGAT RAWAN	INPARI 1, INPARI 6, INPARI 17, CONDE, ANGKE	100,0
	INDRAMAYU	REKOMENDASI UMUM		MEKONGGA, INPARI 3, INPARI 7, CIHERANG, CONDE, WAY APO BURU, CIGEULIS, INPARI 10	

Gambar 51. Informasi tabular rekomendasi varietas

Rekomendasi dan kebutuhan pupuk

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

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

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

Mekanisasi Pertanian

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

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

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

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

Gambar 52. Informasi tabular rekomendasi pupuk

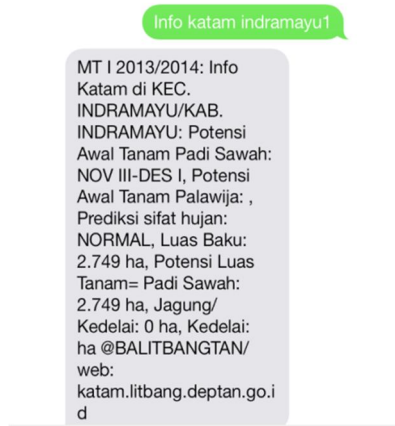
KALENDER TANAM TERPADU
DATA ALAT DAN SARANA PERTANIAN (ALSINTAN)
KECAMATAN : PONJONG (3403070)
KAB/KOTA : GUNUNG KIDUL (3403), PROVINSI : YOGYAKARTA (34)

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

Gambar 53. Informasi tabular rekomendasi traktor

Aplikasi SMS dan Android

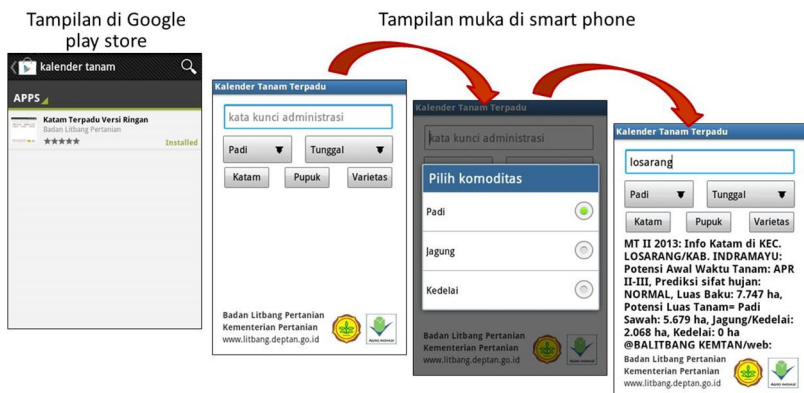
Telah dikembangkan sistem delivery informasi Katam Terpadu melalui sms dan aplikasi berbasis android. Kelebihan sistem delivery dengan sms dapat dilakukan melalui personal handphone masing-masing pengguna yang dihubungkan dengan SMS Center Katam terpadu (08-123-565-1111). Gambar 16 menampilkan contoh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



Gambar 54. Informasi SI Katam Terpadu melalui SMS

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

[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.litbang.katam terpadu](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.litbang.katam%20terpadu) (Gambar 17).



Gambar 55. Informasi SI Katam Terpadu melalui *smartphone*

Penguatan Kelembagaan

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

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

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

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

Pengembangan Sistem Monitoring *Online*

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



Gambar 56. Informasi SI Katam Terpadu melalui *smartphone*



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

Penutup

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

DAFTAR BACAAN

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Ramadhani, F., E. Runtunuwu, H. Syahbuddin. 2013. Pengembangan Sistem Kalender Tanam Terpadu. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Bogor.
- Runtunuwu E., A. Kondoh. 2008. Assessing global climate variability and change under coldest and warmest periods at different latitudinal regions. *Indonesian Journal of Agricultural Science* 9(1), 7-18.
- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani, dan W.T. Nugroho. 2012a. Dinamika kalender tanam Padi di Sulawesi. *Majalah Pangan* 21(2):113-124.
- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani. 2012b. Dinamika waktu tanam tanaman padi Pulau Kalimantan. *Jurnal Agronomi* 40(1):8-14.
- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, F. Ramadhani, A. Pramudia, D. Setyorini, K. Sari, Y. Apriyana, E. Susanti, Haryono, P. Setyanto., I. Las, M. Sarwani. 2012c. Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu: Status Terkini dan Tantangan Kedepan. *Jurnal Sumber Daya Lahan* 6(2):67-78.
- Runtunuwu E., Syahbuddin H., I. Amien, I. Las. 2011a. New cropping calendar map development for paddy rice field in Java Island. *Ecolab* 5(1):1-14.
- Runtunuwu E., H. Syahbuddin, W. T. Nugroho. 2011b. Deliniasi kalender tanam tanaman padi sawah untukantisipasi anomali iklim mendukung program peningkatan produksi beras nasional. *Majalah Pangan* 20(4):341-356.

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

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

BAB 3.

PEMANFAATAN PREDIKSI MUSIM UNTUK PENGELOLAAN RISIKO PERTANIAN

Elza Surmaini

Pendahuluan

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

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

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

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

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

Status Terkini Perkembangan Prediksi Musim Berbasis GCM

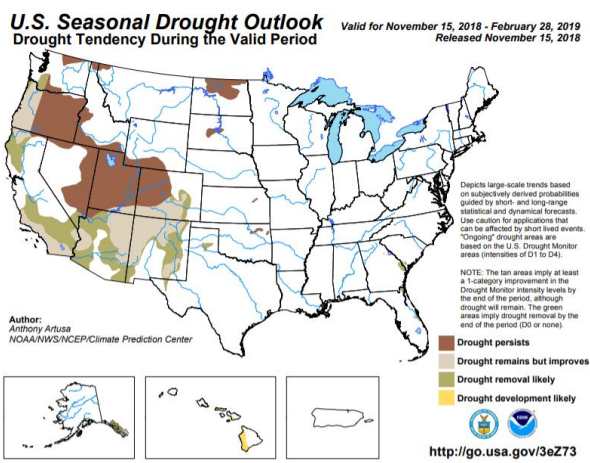
Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan prediksi cuaca dan iklim dalam skala ruang dan waktu telah meningkat pesat. Revolusi dalam prediksi cuaca dan iklim, disebabkan oleh perkembangan pesat teori dan pemahaman mengenai prediktabilitas cuaca dan iklim di satu sisi dan perkembangan luar biasa teknologi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

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

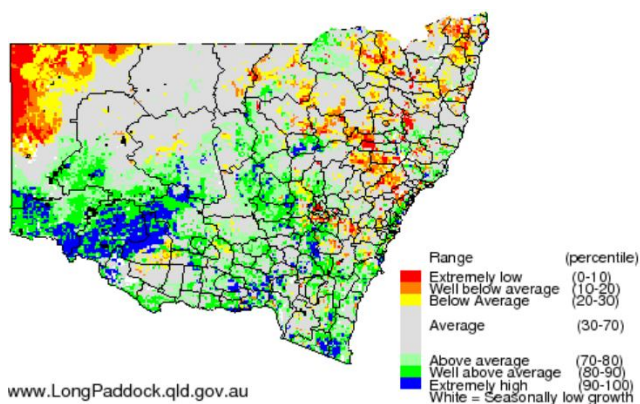
perkembangan teori *Numerical Weather Prediction* (NWP) atau prediksi cuaca numerik. Model NWP dapat mengeksploitasi komputer untuk menggambarkan kondisi atmosfer secara lebih realistis. Bersamaan dengan itu, sektor utama ekonomi dunia (termasuk pertanian, energi, transportasi, dan pasokan air) telah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

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

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



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



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

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

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

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

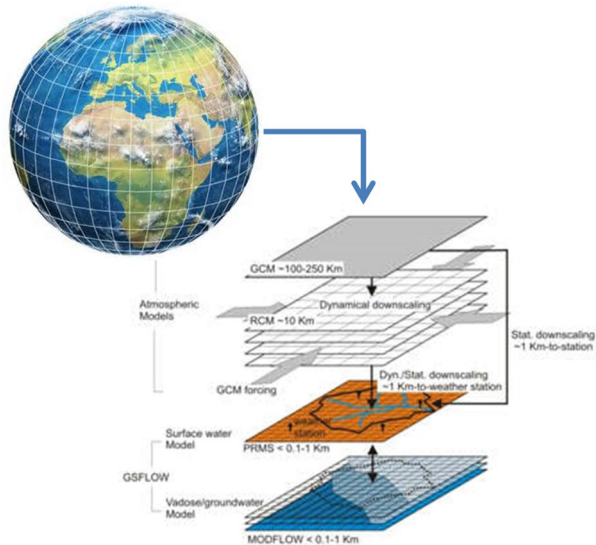
Potensi dan Kendala Pemanfaatan Prediksi Musim Berbasis GCM

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

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

Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan GCM adalah terkait dengan resolusi, akurasi dan ketidakpastian. Keluaran GCM memiliki resolusi yang rendah dan tidak mampu merepresentasikan proses-proses yang skalanya lebih kecil (Smith and Costa, 2018). Untuk memperoleh informasi skala regional dan lokal dari keluaran GCM, dibutuhkan teknik *downscaling* (Rummukainen, 2010). Akurasi atau keandalan prediksi sangat diperlukan untuk menyakinkan pengguna. Berbagai teknik statistik dapat digunakan untuk mengetahui akurasi prediksi. Adapun ketidakpastian tidak dapat dikurangi, tetapi dapat dikuantifikasikan dengan menggunakan teknik ansambel.

Untuk memperoleh informasi skala regional dan lokal dari keluaran GCM, dibutuhkan proses *downscaling* menangkap perubahan variabel iklim lokal yang tidak dapat diestimasi dari prediksi GCM, karena dampak tersebut secara spasial bervariasi dalam orde kurang dari 10 km (Hidalgo *et al.*, 2008). Dua pendekatan utama dalam teknik *downscaling* adalah *dynamical downscaling* (DD) dan *statistical downscaling* (SD). DD *Dynamical downscaling* menggunakan model regional (*Regional Climate Model*, RCM) dengan resolusi yang lebih tinggi. Namun metode ini membutuhkan sumber daya komputasi besar dan waktu yang lama. SD menggunakan metode statistik untuk memperoleh hubungan empiris antara keluaran GCM dan data pengamatan yang digunakan untuk mendapatkan kondisi iklim skala lokal. Metode SD lebih banyak digunakan karena memerlukan sumber daya komputasi yang lebih rendah dan waktu kalkulasi yang jauh lebih pendek. Ilustrasi proses *downscaling* GCM disajikan pada Gambar 4.

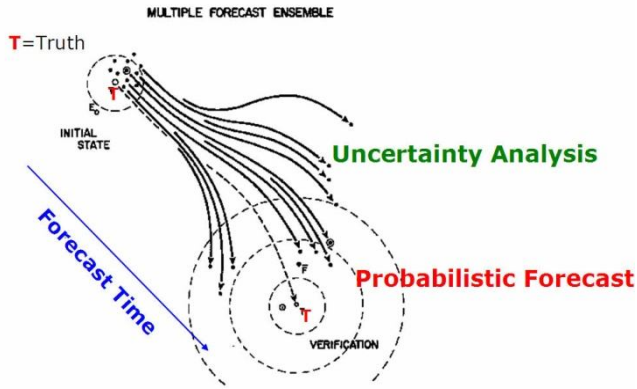


Gambar 60. Proses *downscaling* keluaran model GCM
(sumber:<http://epscorspo.nevada.edu/>)

Akurasi prediksi perlu disampaikan karena terkait dengan tingkat kepercayaan pengguna. Akurasi prediksi dapat diuji dengan melakukan validasi dengan menggunakan prediksi *hindcast*. Berbagai metode statistik telah dikembangkan untuk menguji akurasi prediksi seperti koefisien korelasi, *root mean square error* untuk prediksi kontinu dan *metode Relative Operating Characteristics* (ROC), *Heidke Skill Score* (HSS) untuk prediksi dikotomi.

Ketidakpastian prediksi dapat dikuantifikasi jika menggunakan teknik ansambel. Prediksi ansambel terdiri dari beberapa (biasanya 5 sampai 100) hasil model prediksi cuaca numerik, yang berbeda kondisi awalnya dan/atau representasi numerik dari atmosfer yang merupakan dua sumber utama dari ketidakpastian prediksi (Gneiting and Raftery, 2005; Panagoulia

and Lourmas 2006). Dengan pengolahan secara statistik, teknik ansambel akan menghasilkan prediksi probabilistik (Toth et al., 2001; Kharin dan Zwiers, 2001) sehingga dapat digunakan dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait risiko iklim. Ilustrasi prediksi probabilistik disajikan pada Gambar 5.



Gambar 61. Ilustrasi prediksi probabilistik (sumber: www.chrs.web.uci.edu)

Pemanfaatan Prediksi Musim Untuk Menentukan Waktu Tanam Berdasarkan Potensi Hasil

Ketidakpastian iklim 1-2 musim ke depan sangat berisiko dalam pertanian, karena dapat menyebabkan kegagalan panen apabila tidak diantisipasi dengan baik. Apabila prediksi iklim 6-9 bulan ke depan yang akurat tersedia, maka penyesuaian strategi usahatani dapat dilakukan melalui perencanaan waktu tanam dan intervensi teknologi budidaya untuk mendapatkan hasil yang optimal (Meinke and Stone, 2005; Cabrera et al., 2009).

Menurut Laux et al. (2010) penyesuaian waktu tanam merupakan cara yang paling murah dan efisien untuk meningkatkan produktivitas tanaman, menstabilkan atau bahkan memperkuat ketahanan pangan. Prediksi waktu tanam dan hasil

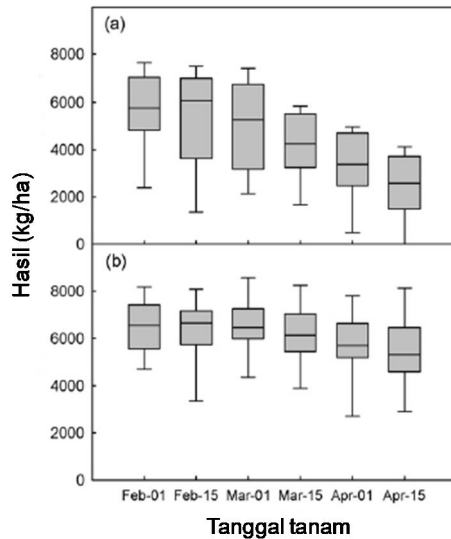
sangat penting bagi petani untuk merencanakan praktek budidaya seperti pemilihan komoditas, varietas, perencanaan irigasi, pupuk, dan sarana pertanian lainnya. Bagi pengambil kebijakan, prediksi waktu tanam diperlukan menyusun strategi distribusi benih dan pupuk. Prediksi hasil diperlukan untuk mengetahui daerah yang mengalami surplus atau defisit, sehingga dapat digunakan untuk menyusun strategi distribusi dan stok padi. Menurut Hansen dan Indeje (2004), informasi prediksi iklim seharusnya diterjemahkan dalam bentuk informasi hasil dan alternatif teknologi budidaya yang tepat pada musim tanam yang akan datang.

Lebih lanjut Hansen et al. (2006) menyatakan bahwa produksi pertanian merupakan fungsi dinamik, interaksi non-linier antara cuaca, tanah, dinamika transpor makanan dan fisiologi tanaman hari per hari. Model simulasi tanaman dinamik dapat mengintegrasikan semua parameter tersebut dalam interval harian. Model simulasi tanaman sebagai alat pengambil keputusan secara luas telah digunakan oleh para pakar dan telah divalidasi di berbagai wilayah dunia (contohnya; Jones *et al.*, 2003; Balkovič *et al.*, 2013; Kuntjoro *et al.* 2015). Model simulasi tanaman juga telah digunakan oleh para pakar pertanian untuk mengevaluasi dampak variabilitas iklim dan perubahan iklim terhadap produksi pertanian (Baigorria *et al.*, 2007; Challinor dan Wheeler, 2008; Weber *et al.*, 2014; Coorbels *et al.*, 2018).

Untuk perencanaan waktu tanam yang operasional, berbagai penelitian telah dikembangkan dengan mengintegrasikan keluaran prediksi musiman dengan model simulasi tanaman (Ines dan Hansen, 2006; Shin et al, 2009; Surmaini *et al.*, 2018). Sivakumar dan Motha (2007) menekankan perlu upaya lebih aktif dari para ahli agrometeorologi untuk menggunakan prediksi musiman dalam perencanaan dan operasional pertanian.

Salah satu contoh aplikasi penentuan waktu tanam berdasarkan estimasi hasil adalah memprediksi produksi gandum di Eropa dengan mengintegrasikan keluaran prediksi multi-model ansambel DEMETER dan ERA-40 dengan model simulasi tanaman

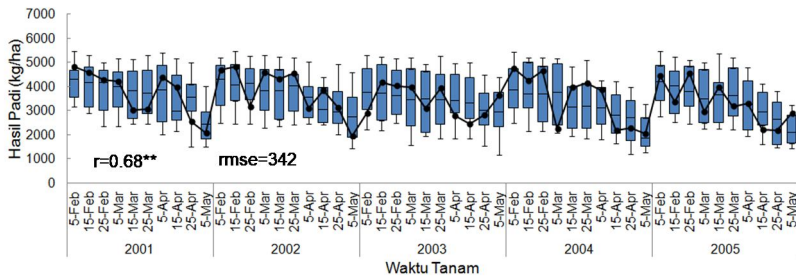
WOFOST. Hasil prediksi probabilistik hasil gandum ini cukup akurat dan telah dipertimbangkan untuk dijadikan salah satu *output* prediksi yang operasional (Palmer *et al.*, 2004; Lizumi *et al.*, 2018). Salah satu contoh aplikasi penentuan waktu tanam berdasarkan prediksi hasil di Brazil disajikan pada Gambar 6 (Soler *et al.*, 2007).



Gambar 62. Hasil simulasi tanaman jagung dengan berbagai tanggal tanam pada a) lahan tadah hujan dan b) lahan irigasi di Piracicaba, Brazil (sumber: Soler *et al.*, 2007).

Di Indonesia penentuan waktu tanam operasional berdasarkan prediksi hasil belum banyak dikembangkan. Penelitian yang mengintegrasikan data *reforecast* prediksi musiman ansambel dengan model simulasi tanaman dikembangkan oleh Surmaini *et al.* (2018). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Integrasi prediksi curah hujan musiman dengan basis data simulasi produktivitas padi, menggunakan metode analog, menghasilkan informasi probabilistik yang dapat digunakan untuk pengambilan

keputusan yang lebih baik dalam menentukan waktu tanam. Contoh prediksi hasil padi sawah tadah hujan di Kabupaten Indramayu disajikan pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan secara konsisten bahwa mundurnya tanggal tanam MK1 sampai dasarian 3 bulan Maret menyebabkan penurunan hasil yang signifikan



Gambar 63. *Box plot* ansambel prediksi dan observasi hasil padi pada beberapa tanggal tanam periode 2001-2005 pada MK1 tadah hujan di Kecamatan Arahau, Kabupaten Indramayu (sumber : Surmaini *et al*, 2018)

Prediksi Probabilistik : Interpretasi dan Pengambilan Keputusan

Dalam penggunaan prediksi probabilistik, informasi yang penting perlu diketahui dan dimengerti oleh pengguna adalah ketidapastian prediksi. Kesalahan pengguna dalam menginterpretasikan prediksi dapat berakibat buruk dalam pengambilan keputusan. Gigerenzer *et al* (2005) melakukan wawancara terhadap pengguna informasi dengan berbagai latar belakang. Contohnya, diprediksi akan terjadi hujan di Boston besok dengan peluang 30%. Dari survei tersebut diketahui bahawa pemahaman pengguna sangat beragam seperti a) akan turun hujan pada 30% wilayah Boston besok, b) Akan terjadi hujan selama 30% dari waktu besok di Boston, 3) Terdapat 30% persen peluang akan terjadi hujan di suatu tempat di Boston besok, dan

d) pada semua lokasi di Boston akan terjadi hujan besok dengan peluang 30%. Dan jawaban yang benar adalah d) .

Berbagai studi yang dilakukan di berbagai negara yang telah menggunakan prediksi probabilistik seperti Amerika, Afrika Selatan, dan Australia, dan beberapa negara Eropa menunjukkan bahwa terdapat kesenjangan dalam pemahaman yang diberikan oleh lembaga pelayanan jasa meteorologi (Blench, 1999). Berbagai permasalahan diantaranya adalah kegagalan dalam menterjemahkan *output* prediksi GCM ke dalam bentuk prediksi musiman, selain itu juga bentuk informasi yang diperlukan oleh pengguna.

Penggunaan prediksi iklim ansambel mempunyai beberapa keuntungan dibanding prediksi iklim tunggal. Pertama, prediksi ansambel memberikan pilihan tingkat probabilitas sesuai kebutuhan pengguna, dan dengan akurasi prediksi yang lebih baik. Dengan prediksi ansambel, pengguna dapat menentukan sendiri tingkat probabilitas yang akan menjadi keputusan untuk menggunakan atau tidak menggunakan prediksi tersebut. Sebagai contoh, peluang akan terjadi hujan adalah 80%, maka pengguna dengan cost-lost ratio 0.8 atau lebih rendah akan memutuskan untuk menggunakan prediksi, sedangkan pengguna dengan cost-lost ratio diatas 0.8 akan mengambil keputusan tidak akan menggunakan prediksi tersebut.

Penutup

Di tingkat global, informasi prediksi iklim berkembang cukup pesat selama dekade terakhir dan memberikan layanan yang dapat memenuhi kebutuhan sektor pertanian. Berbagai pusat prediksi iklim mengeluarkan prediksi iklim musiman yang dapat dengan mudah diakses oleh pengguna. Namun untuk penggunaan dalam skala lokal perlu dilakukan proses downscaling terlebih dahulu.

Di Indonesia pemanfaatan prediksi musiman berbasis GCM yang bersifat probabilistik masih sangat terbatas dan belum

digunakan dalam prediksi operasional. Berbagai kendala yang menyebabkan hal ini terjadi antara lain 1) keterbatasan sumberdaya manusia yang mampu mengolah data tersebut menjadi lebih informatif, 2) sistim komputasi dan kapasitas penyimpanan data yang masih rendah, 3) masih rendahnya pemahaman pengguna mengenai konsep prediksi probabilistik. Padahal informasi prediksi ansebel ini sangat bermanfaat bagi sektor pertanian karena berbagai prediksi tersedia dalam bentuk data harian sampai 9 bulan ke depan.

Pada tingkat nasional perlu suatu *interface* untuk menterjemahkan prediksi musiman iklim tersebut sesuai kebutuhan sektor pertanian. Berbagai upaya dapat dilakukan untuk mendapatkan prediksi dengan skala lokal yang andal, dan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Upaya tersebut dapat dilakukan tahap sebagai berikut : a) melakukan *downscaling* untuk mendapatkan resolusi yang lebih tinggi, b) mengolah informasi tersebut menjadi lebih mudah diaplikasi oleh petani misalnya menjadi prediksi kejadian kekeringan atau banjir, prediksi produksi, dan prediksi waktu tanam, c) menterjemahan informasi tersebut dalam bahasa yang mudah dipahami oleh pengguna, dan e) meningkatkan aksesibilitas pengguna untuk mendapatkan informasi tersebut misalnya membuat pusat layanan informasi iklim di setiap kabupaten, memberikan prediksi iklim melalui radio dan layanan sms.

Informasi prediksi iklim perlu dilengkapi dengan informasi peluang agar dapat menggambarkan ketidakpastian prediksi. Pada tahap awal interpretasi dan pengambilan keputusan perlu diterjemahkan oleh *forecaster* untuk memberikan informasi yang lebih sesuai dengan kebutuhan pengguna. Oleh karena itu, perlu dibangun satu lembaga yang dapat menterjemahkan prediksi sesuai dengan kebutuhan sektor.

DAFTAR BACAAN

- Baigorria, G.A. 2007. Assessing the use of seasonal climate forecasts to support farmers in the Andean Highlands. In: Sivakumar, M.V.K. and Hansen, J. (Eds.), *Climate prediction and Agriculture: Advances and challenges*. (pp. 99–110). Springer, Berlin/Heidelberg.
- Balkovič, J., van der Velde, M., Schmid, E., Skalský, R., Khabarov, N., Obersteiner, M., Stürmer, B., Wei, X. 2013. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation, *Agricultural Systems*, 120(C): 61-75.
- Blench R. 1999. Seasonal climate forecasting: Who can use it and how should it be disseminated? *Nat Resour Perspect* 47:1–8. Overseas Development Institute, London. Available at: www.odi.org.uk/nrp/47.html
- Cabrera, V. E., Solis, D., Baigorria, G.A. dan Letson, D. 2009. Managing climate variability in agricultural analysis. In: Long, J. A. and Wells, D. S. (Eds). *Ocean Circulation and El Niño: New Research*. Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY.
- Challinor A. J., and T. R. Wheeler, 2008: Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. *Agric. Forest Meteorol.*, 148, 343-356.

- Corbeels, M., Berre, D., Rusinamhodzi, L., Ridaura, S.L. 2018. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257 : 46–52
- Gingerenzer, G., Hertwig, R., van de Broek, E., Fasolo, B. and Katsikopoulos, K. 2005. A 30% chance of rain tomorrow. How does the public understanding probabilistic weather forecast. *Risk Analysis* 25:1–7.
- Gneiting, T. dan Raftery, A.E. (2005): Weather forecasting with ensembles methods. *Science*, 310, 248–249.
- Hansen, J.W., Indeje, M., 2004. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 143–157.
- Hansen, J.W., A. Challinor, A. Ines, T. Wheeler, V. Moron. 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Clim Res.* 33: 27–41
- Hidalgo, H. G., Dettinger, M. D., and Cayan, D. R. 2008. Downscaling with constructed analogues: daily precipitation and temperature fields over the United States, California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, CEC-500-2007123.
- Ines, A.V.M., Hansen, J.W. 2006. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 138 (2006) 44–53
- Jones, J.W. , Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, A U., Gijsman, J. dan Ritchie. J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7

- Kharin, V. V. dan Zwiers, F.W. 2001. Skill as function of time scale in ensemble of seasonal hindcast. *Climate Dyn.*, 17, 127–141.
- Koentjoro, B.S. , Sitanggang, I.S, Makarim, A.K. 2015. Model Simulasi dan Visualisasi Prediksi Potensi Hasil dan Produksi Kedelai di Jawa Timur. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 34 (3): 195-201
- Laux, P., Jäckel, G., Tingem, R.M., Kunstmann, H. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon: A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:1258–1271
- Lewis, J. M. 2005. Roots of ensemble forecasting. *Mon. Weather Rev.* 133:1865–85.
- Iizumi, T., Shin, Y., Kim, W., Kim, M., Choi, J. 2018. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Climate Services*, 11: 13–23
- Meinke, H., and Stone, R.C. 2005. Seasonal and interannual climate forecasting: New tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic Change*, 70, 221–253
- Naylor RL, Mastrandea MD (2009) Coping with Climate Risks in Indonesia Rice Agriculture: A Policy Perspective. In *Uncertainty and Environmental Decision Making A Handbook of Research and Best Practice* (Filar dan Haure, Eds). Springer.
- Palmer, T.N., A. Alexandri and 23 others. 2004. Development of European Multimodel ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). *Bulletin of American Meteorological Society* June 2004 : 853-872

- Randal, D. R. (2007). Climate Models and Their Evaluation. In S. D. Solomon, Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Rummukainen, M. 2010. State-of-the-art with regional climate models. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1(1), 82–96.
- Shin, D.W., Baigorria, G.A., Lim, Y.-K. , Cocke1, S., LaRow, T. E., O'Brien, J. J. dan W. Jones, J.W. 2009. Assessing Crop Yield Simulations with Various Seasonal Climate Data. Science and Technology Infusion Climate Bulletin. 7th NOAA Annual Climate Prediction Application Science Workshop Norman, OK, 24-27 October
- Smid, M., Costa, A.C. 2018. Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban systems, International Journal of Urban Sciences, 22:3, 277-307, DOI: 10.1080/12265934.2017.1409132
- Sivakumar, M.V.K., dan Motha R.P. 2007. Managing Wheather and Climate Risk Management in Agriculture. Springer. 503p
- Soler, C.M.T, Sentelhas, P., dan Hoogenboom, G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. Eurpean Journal of Agronomy, 27,165-177.
- Surmaini, E., Hadi, T.W., Subagyono, K. dan Puspito, N.T. 2015. Prediction of drought impact on rice paddies in west Java using analogue downscaling method. *Indones. J. Agric. Sci.* 16 (1): 21-30

- Surmaini, E., Hadi, T.W. Subagyono, K., Syahputra, M.R. 2018. Integrasi Prediksi Musim dengan Model Simulasi Tanaman untuk Penentuan Waktu Tanam Padi. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42 (2): 99-110
- Toth Z, Zhu Y. dan Marchok T. 2001. On the ability of ensembles to distinguish between forecasts with small and large uncertainty. *Wea. Forecasting*, 16: 436–477.
- Webber, H.Gaiser, T. , Ewert F. 2014. What role can crop models play in supporting climate change adaptation decisions to enhance food security in Sub-Saharan Africa?. *Agricultural Systems* 127:161-177
- Weigel A.P., M.A. Liniger and C. Appenzeller 2008: Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts? *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 134, 241-260

BAB 4.

PREDIKSI IKLIM UNTUK PERTANIAN

Woro Estiningtyas dan Aris Pramudia

Pendahuluan

Dalam bidang pertanian, mendapatkan gambaran kondisi curah hujan beberapa periode ke depan merupakan suatu hal yang sangat penting. Hal ini dapat mengantarkan para praktisi melakukan adaptasi dan antisipasi terhadap berbagai kemungkinan resiko yang akan dihadapinya. Dengan demikian keberhasilan pertanian dapat menjadi tergantung pada seberapa bagus model prediksi curah hujan yang digunakan (Allison and Stuart, 1990).

Berbagai teknik pemodelan sudah banyak diterapkan dalam upaya menghasilkan *output* prediksi curah hujan yang baik. Secara garis besar ada dua teknik pendekatan dalam pemodelan prediksi curah hujan, yaitu melalui pendekatan analisis keterkaitan antar waktu, seperti *fourier regression*, *fractal analysis*, *autoregressive*, *moving average*, dan sebagainya, atau melalui pendekatan analisis keterkaitan ruang atau keterkaitan antara parameter. Beberapa peneliti seperti Dupe (1999), Haryanto (1999), atau Boer, Notodiputro dan Las (1999) pernah melakukan prediksi curah hujan melalui pendekatan analisis keterkaitan waktu, juga Tim Puslittanak (1996) mengembangkan model curah hujan melalui pendekatan analisis keterkaitan ruang atau keterkaitan antara

parameter, seperti hubungan antara curah hujan dengan anomali suhu muka laut di Nino-3,4.

Model-model yang pernah disusun oleh berbagai peneliti umumnya menggambarkan adanya ketidakseimbangan antara analisis deret waktu (*time series analysis*) dengan aspek analisis ruang (*spatial analysis*). Model-model peramalan deret waktu umumnya dilakukan hanya pada satu atau beberapa stasiun yang analisisnya dilakukan di satu-dua titik stasiun, sehingga keterkaitan ruang antara stasiun cenderung tidak dibahas. Sebaliknya pada model-model prediksi yang menggunakan analisis keterkaitan ruang antar stasiun atau analisis hubungan antar parameter umumnya diterapkan pada satu periode tertentu atau terhadap nilai rata-rata dari satu periode yang dibatasi, sehingga keterkaitan deret waktu menjadi terabaikan. Dengan demikian selalu terbuka kesempatan untuk mengembangkan model peramalan curah hujan terutama model peramalan curah hujan yang mampu menerapkan keterkaitan deret waktu sekaligus dengan keterkaitan ruang antar stasiun atau dengan keterkaitan parameter iklim dan parameter fisik lainnya.

Analisis Jaringan Syaraf Tiruan sebagai Alternatif

Konsep Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf (*neural network, NN*) adalah suatu paradigma pengetahuan baru. Hal ini meniru otak manusia dalam proses penyelesaian dan penyimpanan memori. Suatu jaringan syaraf buatan (*artificial neural network, ANN*), sering disebut juga jaringan syaraf tersimulasi (*simulated neural network, SNN*) atau hanya jaringan syaraf (*neural network, NN*), adalah suatu gabungan dari berbagai interkoneksi syaraf buatan yang menggunakan suatu model matematika atau model komputasi untuk memproses informasi yang didasarkan pada pendekatan koneksi terhadap

perhitungan. Inspirasi awal terhadap teknik ini adalah berasal dari pengujian jaringan bioelektrik di dalam otak manusia yang dibentuk oleh neurons dan synapses. Dalam suatu model jaringan syaraf, node sederhana (disebut juga 'neuron', 'neurode', 'PE' atau unsur-unsur pengolahan, atau 'satuan') yang terhubung secara bersama membentuk suatu jaringan node yang disebut jaringan syaraf (neural network).

Analisis jaringan syaraf atau NNA sudah banyak diterapkan untuk melakukan prediksi dalam bidang klimatologi dan hidrologi. Lee, Cho dan Wong (1998) melakukan interpolasi spasial untuk menduga curah hujan harian di 367 titik berdasarkan data curah hujan dari 100 stasiun yang terdekat di Swiss. Lee et al. (1998) membagi wilayah studi menjadi empat bagian dan pada setiap bagian disusun model dengan metode yang berbeda. Dua bagian terbesar menggunakan analisis jaringan syaraf dengan teknik perceptron multi-lapisan yang didasarkan hanya pada informasi lokasi, dua bagian yang terkecil menggunakan model linear yang didasarkan pada ketinggian dengan asumsi bahwa wilayah tersebut dipengaruhi oleh kondisi orografik. Hasilnya menunjukkan bahwa model non-linier menggunakan analisis jaringan syaraf menghasilkan prediksi yang sangat baik, sedangkan model linear di daerah yang kecil memberikan hasil prediksi yang jelek.

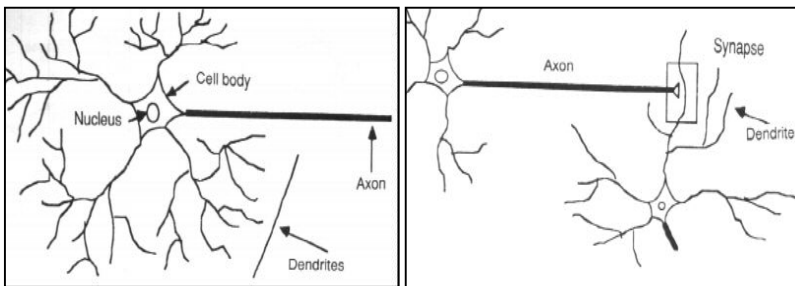
Apriyanti (2005) melakukan studi tentang penggunaan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*) dalam peramalan curah hujan di DAS Saguling Bandung. Teknik pembelajaran yang digunakan adalah jaringan syaraf tiruan propagasi balik standar dengan arsitektur banyak lapis, yaitu satu lapisan input, satu lapisan tersembunyi, dan satu lapisan output. Teknik ini kemudian dibandingkan dengan model yang dibentuk menggunakan metode regresi komponen utama (*principal component regression*, PCR). Hasil studi Apriyanti (2005) menunjukkan bahwa model jaringan syaraf tiruan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan propagasi balik

memperlihatkan hasil terbaik pada jumlah neuron 9 dan laju pembelajaran 0,02. Hasil pembelajaran dengan jaringan syaraf tiruan ini juga menunjukkan hasil validasi yang lebih baik ($R^2 = 74\%$) dibandingkan menggunakan PCR ($R^2 = 63\%$). Setelah dioptimasi hasil validasi model jaringan syaraf tiruan meningkat menjadi $R^2 = 87\%$.

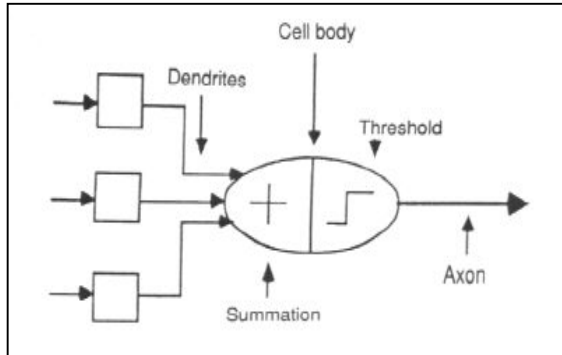
Penerapan Konsep Jaringan Syaraf Tiruan pada Pemodelan

Suatu jaringan syaraf langkah maju (*feedforward*), yaitu suatu jenis jaringan syaraf yang umum, tersusun dari rangkaian simpul-simpul (*nodes*) dan koneksi-koneksi. Simpul ini tersusun dalam suatu lapisan (*layer*). Koneksi berbentuk khas dimana dari setiap simpul dalam lapisan tertentu berkoneksi dengan semua syaraf pada lapisan berikutnya. Dengan cara ini setiap simpul pada lapisan tertentu terhubung dengan semua simpul pada lapisan berikutnya.

Biasanya terdapat paling tidak tiga lapisan pada suatu jaringan langkah maju, terdiri dari lapisan input (*input layer*), suatu lapisan tersembunyi (*hidden layer*), dan suatu lapisan output (*output layer*). Lapisan input memberi umpan kepada lapisan tersembunyi, kemudian lapisan tersembunyi memberi umpan kepada lapisan output. Pengolahan aktual dalam suatu jaringan terjadi didalam simpul pada lapisan tersembunyi dan lapisan output (Gambar 1).

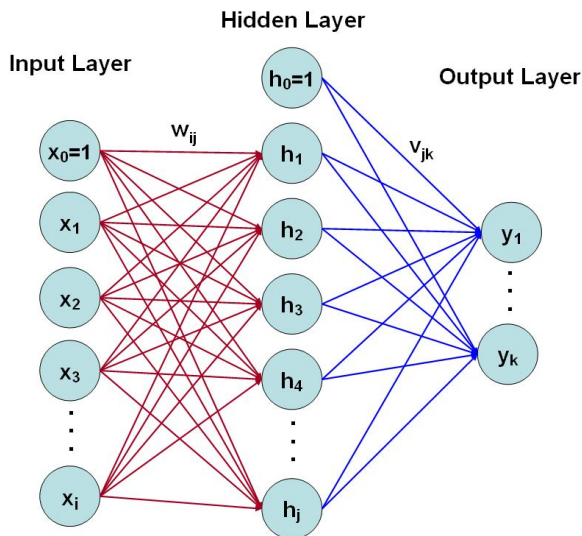


(a) komponen-komponen syaraf (neuron) (b) gambaran mengenai synapses



(c) model jaringan syaraf

Gambar 64. Konsep jaringan syaraf manusia dan model jaringan syaraf tiruan



Gambar 65. Skema neural network

Setiap koneksi antara syaraf memiliki bobot numerik. Apabila jaringan ini bekerja, suatu nilai akan diberikan pada setiap simpul – nilai tersebut akan diberikan oleh operator manusia, dari sensor

lingkungan, ataupun dari beberapa program eksternal. Setiap simpul kemudian memberikan nilai tertentu pada suatu koneksi yang membawanya keluar, kemudian setiap koneksi mengalikannya dengan suatu pembobot. Setiap simpul pada lapisan berikutnya kemudian menerima nilai yang merupakan penjumlahan dari nilai yang dihasilkan dari setiap koneksi, dan dalam setiap simpul dilakukan perhitungan sederhana terhadap nilai tersebut. Secara khas fungsi ini merupakan fungsi sigmoid. Proses ini kemudian berulang, dengan hasil yang dilewatkan pada lapisan sub-sekuen dari simpul-simpul hingga mencapai simpul pada lapisan *output*.

Kurva *sigmoid* sering digunakan sebagai fungsi transfer karena memperkenalkan non-linearitas ke dalam perhitungan jaringan dengan 'memainkan' aktivitas syaraf dalam kisaran $[0,1]$. Fungsi sigmoid memiliki kelebihan yaitu memiliki fungsi turunan yang sangat sederhana. Fungsi lain dengan penampilan yang sama yang dapat digunakan adalah fungsi tangen hiperbolik, $\tanh$, yang memainkan aktivasi di dalam kisaran $[-1,1]$. Jika tidak terdapat non-linearitas dalam pengolahan, jaringan kehilangan banyak daya kemampuan perhitungan, menghasilkan operasi matrik perkalian sederhana dari aljabar linear.

Recurrent network (RNs) adalah model yang memiliki aliran data dua arah. Apabila dalam feed-forward network mengolah data secara linear dari input ke output, maka dalam RNs juga mengolah data dari tahap pengolahan yang lebih akhir ke tahap sebelumnya. Suatu RNs yang sederhana (*simple recurrent network*, SRN) menggunakan suatu jaringan tiga-lapisan, yang ditambahkan satu set 'context units' di dalam lapisan input. Terdapat koneksi dari lapisan tengah (hidden layer) terhadap satuan konteks ini dengan bobot satu. Pada setiap tahap, input dikembangkan dalam dalam suatu cara feed-forward standar, dan kemudian dilakukan aturan latihan (umumnya digunakan *back-propagation*). Koneksi balik yang dihasilkan pada satuan kontek selalu memiliki salinan nilai satuan *hidden* sebelumnya. Dengan

demikian jaringan ini dapat membuat status yang singkat, memungkinkan penyelesaian tugas sebagai pendugaan yang berada di bawah tekanan *multi-layer perceptron* baku.

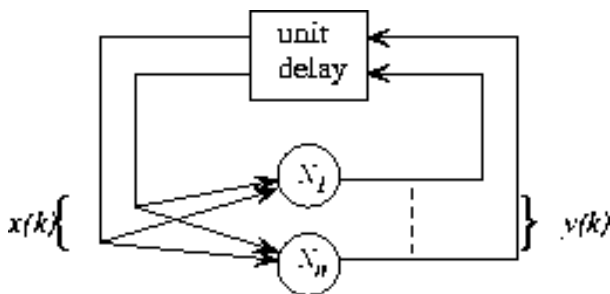
Aturan penyelesaian dalam penetapan bobot pada recurrent neural network sama dengan struktur pada perceptron. Pengolahan sejumlah q perceptron dapat didefinisikan sebagai:

$$Y_q(k) = \int \left(\sum_{p=1}^n w_q X_p(k) \right) \dots\dots\dots (1)$$

dimana output perceptron pada saat bolak-balik adalah $y_q(k)$ dihitung menggunakan n input $x_p(k)$, $1 < p < n$. Fungsi non-linear f didefinisikan sebagai:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{jika } x > 0, \text{ dan} \\ 0, & \text{untuk selainnya} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

sehingga fungsi menyederhanakan 'cutt off' nilai-nilai negatif. Pembolak-balikan dalam jaringan perseptron berarti bahwa perseptron dapat dikombinasikan dengan cara yang kompleks. Bentuk umum struktur *recurrent network* disajikan pada Gambar 3.



Gambar 66. Struktur umum *recurrent network*.

Persamaan umum dalam *recurrent neural network* adalah sebagai berikut:

$$x_i(t+1) = G_i(w, i, x(t)), \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

dimana $x_i(t+1)$ adalah *output* dari satuan ke- i pada waktu $(t+1)$, x adalah vektor status, w adalah matrik penghubung sinoptik, i adalah vektor input eksternal, dan G adalah fungsi non-linear yang dapat diturunkan. *Recurrent neural network* merupakan analisis jaringan syaraf yang menggunakan fungsi waktu. Sehingga dapat dimanfaatkan atau diterapkan pada peubah yang memiliki fungsi waktu, misalnya untuk prediksi curah hujan.

Analisis jaringan syaraf atau NNA sudah banyak diterapkan untuk melakukan prediksi dalam bidang klimatologi dan hidrologi. Lee, Cho dan Wong (1998) melakukan interpolasi spasial untuk menduga curah hujan harian di 367 titik berdasarkan data curah hujan dari 100 stasiun yang terdekat di Swiss. Lee et al. (1998) membagi wilayah studi menjadi empat bagian dan pada setiap bagian disusun model dengan metode yang berbeda. Dua bagian terbesar menggunakan analisis jaringan syaraf dengan teknik *perceptron* multi-lapisan yang didasarkan hanya pada informasi lokasi, dua bagian yang terkecil menggunakan model linear yang didasarkan pada ketinggian dengan asumsi bahwa wilayah tersebut dipengaruhi oleh kondisi orografik. Hasilnya menunjukkan bahwa model non-linier menggunakan analisis jaringan syaraf menghasilkan prediksi yang sangat baik, sedangkan model linear di daerah yang kecil memberikan hasil prediksi yang jelek.

Apriyanti (2005) melakukan studi tentang penggunaan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*) dalam peramalan curah hujan di DAS Saguling Bandung. Teknik pembelajaran yang digunakan adalah jaringan syaraf tiruan propagasi balik standar dengan arsitektur banyak lapis, yaitu satu lapisan input, satu

lapisan tersembunyi, dan satu lapisan output. Teknik ini kemudian dibandingkan dengan model yang dibentuk menggunakan metode regresi komponen utama (*principal component regression*, PCR). Hasil studi Apriyanti (2005) menunjukkan bahwa model jaringan syaraf tiruan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan propagasi balik memperlihatkan hasil terbaik pada jumlah neuron 9 dan laju pembelajaran 0,02. Hasil pembelajaran dengan jaringan syaraf tiruan ini juga menunjukkan hasil validasi yang lebih baik ($R^2 = 74\%$) dibandingkan menggunakan PCR ($R^2 = 63\%$). Setelah dioptimasi hasil validasi model jaringan syaraf tiruan meningkat menjadi $R^2 = 87\%$.

Penyusunan Model Prediksi Curah Hujan dengan Analisis Jaringan Syaraf Tiruan

Bahan Penelitian

Bahan-bahan dan peralatan yang dibutuhkan untuk melaksanakan kegiatan-kegiatan penelitian ini, antara lain:

Data curah hujan bulanan dari tujuh stasiun curah hujan yang mewakili wilayah curah hujan dominan di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut, yaitu Stasiun Baros Serang, Stasiun Kalenpetung Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang, Stasiun Kasomalang Subang, Stasiun Tarogong Garut dan Stasiun Bungbulang Garut, hasil pencatatan periode 1990-2007.

Data indikator anomali iklim, yaitu data anomali suhu muka laut pada zone NINO-3,4 dan data indeks osilasi selatan hasil pencatatan tahun 1990-2007.

Data curah hujan bulanan, dan data indikator anomali iklim digunakan untuk analisis dan penyusunan model prediksi curah

hujan, dan untuk memprediksi kondisi curah hujan selama periode 2008.

Penyusunan Model

Model prediksi curah hujan adalah model untuk memprediksi data curah hujan bulanan. Keluaran model (Y) adalah nilai curah hujan pada waktu (t+3), sedangkan data masukan yang digunakan adalah:

X1 = kode bulan, bernilai 1 untuk bulan Januari, 2 untuk bulan

Februari, dan seterusnya, bernilai 12 untuk bulan Desember,

X2 = nilai-nilai curah hujan pada waktu (t),

X3 = nilai-nilai curah hujan pada waktu (t+1),

X4 = nilai-nilai curah hujan pada waktu (t+2),

X5 = nilai-nilai rata-rata anomali suhu muka laut zone Nino-3,4 pada waktu t, dan

X6 = nilai-nilai indeks osilasi selatan (SOI) pada waktu t.

Dalam penyusunan model dilakukan coba-coba (*trial and error*) untuk mendapatkan model terbaik yang melibatkan kombinasi antara peubah-peubah X1, X2, X3, X4, X5 dan X6.

Langkah-langkah training analisis jaringan syaraf dalam penetapan bobot atau koefisien persamaan adalah sebagai berikut:

Langkah 1. Inisialisasi:

1a. Normalisasi data input x_i dan target t_k kedalam kisaran [0 ... 1]

1b. Penetapan nilai awal untuk semua pembobot w_{ij} untuk matriks X dan v_{jk} untuk matriks H, yaitu matriks antara yang tidak dimunculkan.

Langkah 2. Tahap langkah maju ke depan; Pendugaan $\hat{Y}$ dugaan (y_k) dan Y aktual (t_k):

2a. Menentukan training set untuk x_i dan t_k .

2b. Menghitung h_j dan y_k melalui persamaan berikut:

$$h_j = \frac{1}{1 + e^{-\beta \sum w_{ij} x_i}}$$

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-\beta \sum v_{jk} h_j}}$$

dimana:

$$\sum w_{ij} x_i = w_{0j} + w_{1j} * x_1 + w_{2j} * x_2 + w_{3j} * x_3 + w_{4j} * x_4 + w_{5j} * x_5 + w_{6j} * x_6$$

$$Y_k = CH_{t+3}$$

subskrip j akan merujuk pada urutan dalam matrik H.

Langkah 3. Penentuan nilai galat E per tahun, sebagai berikut:

$$\forall E = \sum p 0.5 (tkp - ykp)^2$$

dimana tkp = nilai target data ke-p dari training node k, dan ykp = nilai dugaan data ke-p dari training node k.

Langkah 4. Proses learning atau training untuk menentukan nilai bobot vjk dan wij dilakukan melalui iterasi menggunakan modul Solver pada piranti lunak MS Excel. Target dari proses iterasi adalah menentukan nilai Y dugaan sedekat mungkin dengan nilai Y aktual sehingga menghasilkan galat yang mendekati nol.

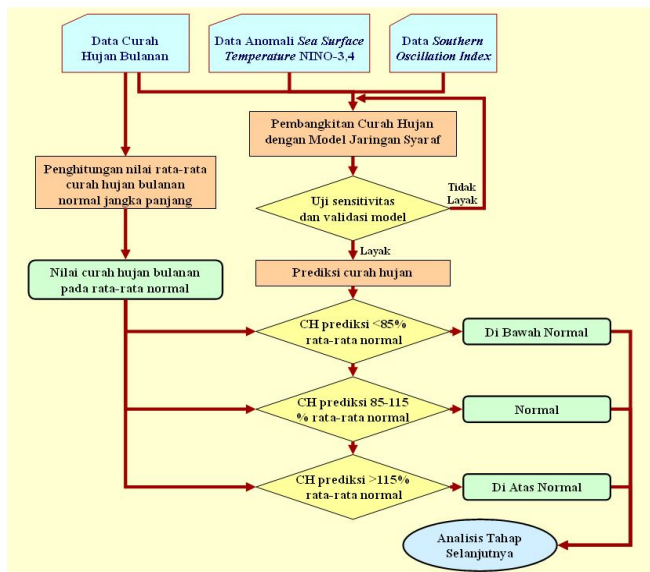
Ketersediaan panjang data curah hujan pada stasiun-stasiun yang dianalisis berbeda satu dengan yang lain, sehingga panjang set data yang digunakan untuk pembentukan model pun menjadi berbeda. Untuk pembentukan model di Stasiun Baros Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang dan Stasiun Kasomalang Subang digunakan data tahun 1990-2002, untuk Stasiun Kalenpetung Serang dan Stasiun Tarogong Garut digunakan data tahun 1992-2002, sedangkan untuk Stasiun Bungbulang digunakan data tahun 1992-1998.

Validasi Model

Validasi model adalah memanfaatkan model yang sudah terbentuk pada tahap pembentukan untuk memprediksi data curah hujan pada periode data yang berbeda dengan periode data pembentukan model. Hasil prediksi tersebut kemudian dibandingkan dengan data aktualnya. Periode data untuk validasi model adalah periode 2003-2007 untuk Stasiun Baros Serang, Stasiun Kalenpetung Serang, Stasiun Karawang, Stasiun Tambakdahan Subang, Stasiun Kasomalang Subang, dan Stasiun Tarogong Garut, serta periode 2000-2004 untuk Stasiun Bungbulang Garut.

Prediksi

Setelah melalui uji validasi, dan model dianggap layak untuk digunakan, maka model tersebut akan digunakan untuk prediksi curah hujan tahun 2008. Karena tidak terdapat nilai anomali suhu muka laut pada zone NINO-3,4 dan data SOI untuk tahun 2008, maka untuk melakukan prediksi curah hujan 2008 digunakan data anomali SST dan data SOI tahun 2007, dengan asumsi bahwa kondisi curah hujan nilai-nilai indikator penyimpangan iklim tersebut tidak berubah. Hasil prediksi curah hujan kemudian dibandingkan dengan nilai rata-rata normalnya, sehingga dapat diprediksi apakah kondisi curah hujan pada periode 2008 berada pada kondisi rata-rata normal, di bawah rata-rata normal atau di atas rata-rata normal. Batasan kisaran rata-rata normal menggunakan kriteria yang digunakan oleh Badan Meteorologi dan Geofisika, yaitu pada kisaran antara 85-115% dari nilai rata-ratanya (Gambar 4). Nilai-nilai prediksi curah hujan tersebut selanjutnya akan digunakan untuk memprediksi potensi produksi padi.



Gambar 67. Analisis dan pemodelan prediksi curah hujan.

Model Prediksi Curah Hujan di Banten

Model disusun untuk menduga curah hujan tiga bulan ke depan ($Y=CHt+3$). Proses coba-coba (*trial and error*) melibatkan berbagai kombinasi peubah masukan X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 . Pada bagian ini dikemukakan penampilan model-model prediksi curah hujan yang dibentuk dari beberapa peubah masukan sebagai peubah tunggal ataupun kombinasi beberapa peubah, antara lain (1) peubah X_1 , (2) kombinasi peubah X_2 , X_3 dan X_4 , (3) peubah X_5 , (4) peubah X_6 , (5) kombinasi peubah X_1 , X_2 , X_3 dan X_4 dan (6) kombinasi peubah X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 .

Tabel 1 dan Gambar 5 menyajikan rangkuman dan hasil pendugaan curah hujan dari model prediksi curah hujan di Stasiun Baros Serang, yang merupakan stasiun perwakilan bagi Wilayah IIA Pantura Banten, menggunakan beberapa kombinasi peubah masukan X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 serta perbandingannya

dengan nilai aktual periode 1990-2002. Ketika model menggunakan data masukan kode bulan atau peubah X1, terlihat bahwa model hanya membentuk hasil prediksi yang sifatnya siklik atau berulang secara periodik dengan nilai yang sama untuk setiap siklusnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,306 mulai dari 0,196 hingga 0,502, ketepatan model 79% dengan kesalahan maksimum sekitar 8,6 mm/bulan.

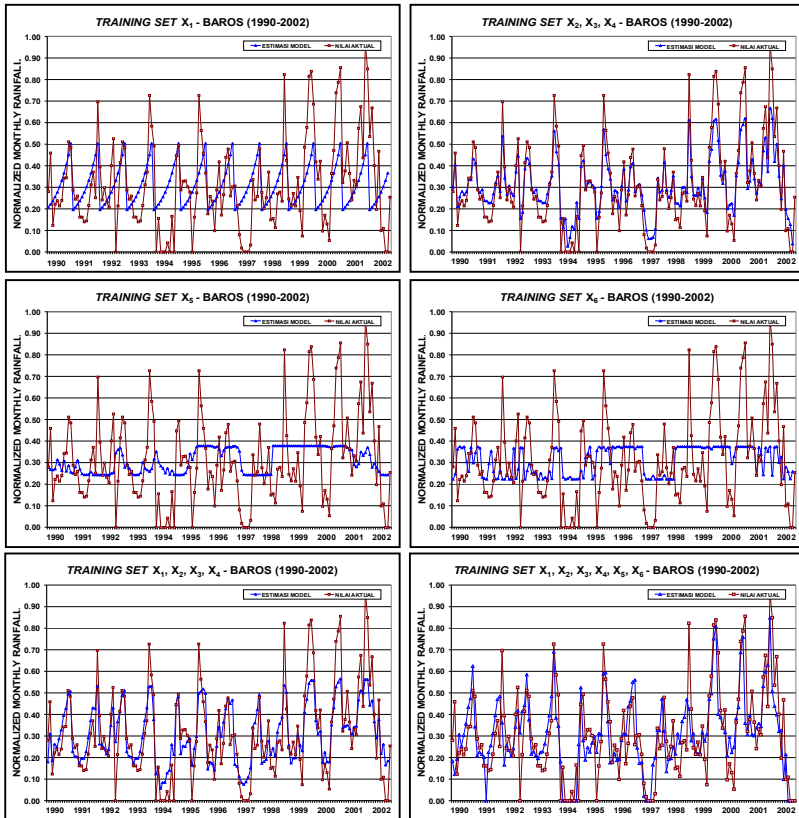
Ketika model menggunakan data masukan peubah X2, X3 dan X4, yaitu nilai-nilai curah hujan pada bulan lalu, dua bulan dan tiga bulan sebelumnya, terlihat bahwa model mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan dengan fluktuasi acak yang seirama dengan nilai aktualnya. Namun pada beberapa nilai-nilai ekstrim hasil prediksi terlihat tidak sebesar nilai aktualnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,638 mulai dari 0,027 hingga 0,665, ketepatan model 84% dengan kesalahan maksimum sekitar 8,0 mm/bulan.

Tabel 17. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan pada beberapa kombinasi peubah masukan di Stasiun Baros Serang (Wilayah IIA Pantura Banten).

No	Peubah Masukan	Jumlah Iterasi	Kisaran Prediksi	Ketepatan Model (%)	MSE per Tahun	Kesalahan Maksimum (mm/bulan)
1.	X1	80	0,196 - 0,502 (0,306)	79	0,208	8,6
2.	X2, X3, X4	343	0,027 - 0,665 (0,638)	84	0,164	8,0
3.	X5	32	0,244 - 0,379 (0,135)	76	0,240	9,9
4.	X6	29	0,223 - 0,374 (0,151)	77	0,234	9,7
5.	X1, X2, X3, X4	50	0,058 - 0,566 (0,508)	85	0,150	6,2
6.	X1, X2, X3, X4, X5, X6	332	0,035 - 0,741 (0,706)	90	0,098	4,1

Catatan: Kisaran data aktual 0,000 – 0,848

Ketika model menggunakan data masukan peubah X5 atau X6, yaitu nilai anomali SST tiga bulan sebelumnya atau nilai indeks osilasi selatan, terlihat bahwa model hanya menghasilkan nilai prediksi dibatasi oleh nilai minimum dan nilai maksimum tertentu. Sehingga meskipun berfluktuasi mengikuti fluktuasi acak curah hujan, namun hasil prediksinya terlihat tidak lentur karena terbatas pada kisaran tertentu. Kisaran nilai prediksi untuk peubah X5 adalah 0,135 mulai dari 0,244 hingga 0,379, sedangkan untuk peubah X6 kisaran nilai prediksi adalah 0,151 mulai dari 0,223 hingga 0,374. Ketepatan prediksi model menggunakan peubah X5 adalah 76% dengan kesalahan maksimum 9,9 mm/bulan, sedangkan menggunakan peubah X6 ketepatan model adalah 77% dengan kesalahan maksimum sekitar 9,7 mm/bulan.



Gambar 68. Hasil pembentukan model dengan kombinasi beberapa peubah X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 di Stasiun Baros Serang (Wilayah IIA Pantura Banten).

Ketika model menggunakan data masukan kombinasi peubah X_1 , X_2 , X_3 dan X_4 , terlihat bahwa model mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan dengan fluktuasi acak yang lebih dekat dengan nilai aktualnya. Pada nilai-nilai ekstrim, hasil prediksi terlihat lebih mendekati nilai aktualnya dibandingkan kombinasi peubah X_2 , X_3 dan X_4 . Kisaran nilai prediksi adalah 0,508 mulai

dari 0,058 hingga 0,566, ketepatan model 85% dengan kesalahan maksimum sekitar 6,2 mm/bulan.

Ketika model menggunakan masukan semua peubah X1, X2, X3, X4, X5 dan X6, terlihat bahwa model memprediksi nilai-nilai curah hujan yang hampir berimpit dengan nilai aktualnya. Kisaran nilai prediksi adalah 0,706 mulai dari 0,035 hingga 0,741, ketepatan model 90% dengan kesalahan maksimum sekitar 4,1 mm/bulan.

Hal tersebut di atas menggambarkan bahwa dengan data masukan curah hujan berturut-turut tiga bulan sebelumnya, model yang dibentuk dengan teknik analisis jaringan syaraf mampu memprediksi nilai-nilai curah hujan yang berfluktuasi seirama dengan nilai-nilai aktualnya, kecuali pada saat terjadi nilai ekstrim. Dengan memasukan peubah-peubah nilai anomali SST dan nilai indeks osilasi selatan model mampu memprediksi nilai-nilai yang lebih dekat dengan nilai-nilai ekstrim tersebut. Pada akhirnya model yang mengkombinasikan keenam peubah masukan menghasilkan nilai prediksi terbaik dengan kisaran nilai prediksi paling lebar, nilai ketepatan paling tinggi dan nilai kesalahan paling kecil.

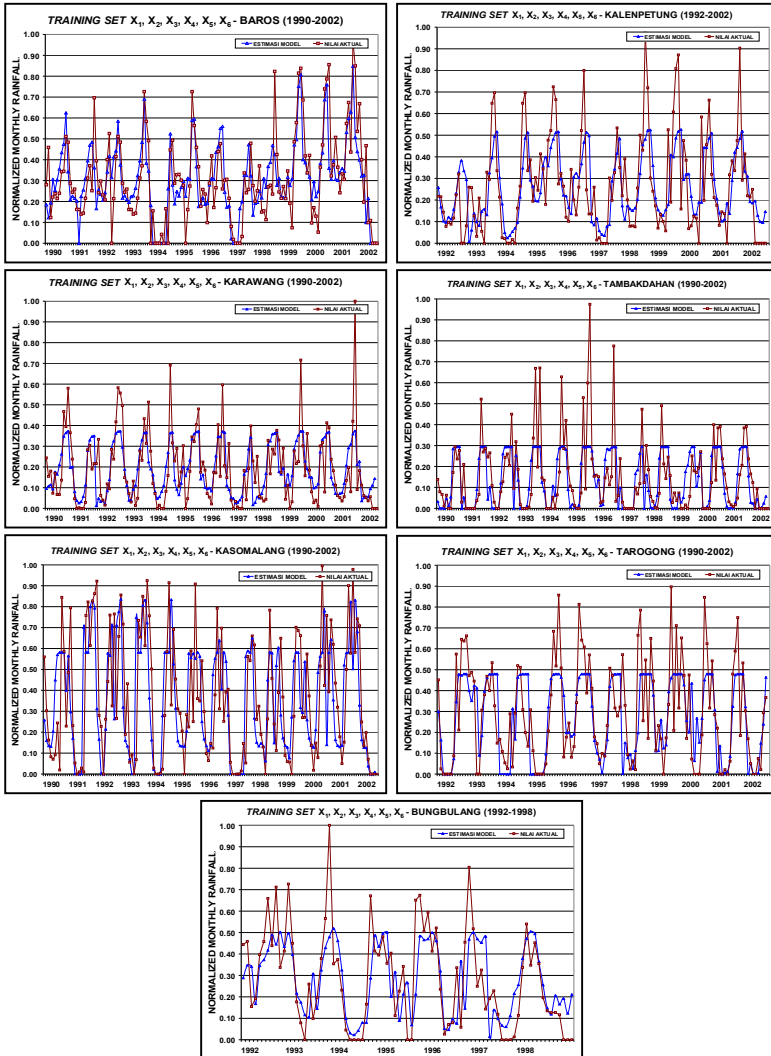
Perbandingan Model Prediksi Curah Hujan Antar Stasiun

Tabel 2 dan Gambar 6 menyajikan rangkuman dan hasil pendugaan curah hujan dari model prediksi curah hujan menggunakan peubah masukan X1, X2, X3, X4, X5 dan X6 di tujuh stasiun curah hujan yang mewakili beberapa wilayah curah hujan di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut, serta perbandingannya dengan nilai aktual pada periode yang sama. Terdapat beberapa kriteria yang ditelaah untuk membandingkan kualitas model Antar stasiun tersebut, antara lain kisaran prediksi model yang dilihat dari selisih minimum dan maksimum nilai prediksi, tingkat ketepatan

prediksi model terhadap nilai aktual, serta besarnya kesalahan maksimum prediksi.

Tabel 18. Rangkuman pembentukan model prediksi curah hujan terbaik dari stasiun-stasiun perwakilan di sentra produksi padi.

No	Stasiun/Lokasi	Jumlah Iterasi	Kisaran Prediksi	Ketepatan Model (%)	MSE per Tahun	Kesalahan Maksimum (mm/bulan)
1.	Baros Serang Banten	332	0,035 - 0,741 (0,706)	90	0,098	4,1
2.	Kalenpetung Serang Banten	59	0,089 - 0,518 (0,429)	84	0,163	6,3
3.	Karawang	81	0,006 - 0,385 (0,379)	90	0,101	6,0
4.	Tambakdahan Subang	85	0,000 - 0,295 (0,295)	89	0,111	5,0
5.	Kasomalang Subang	450	0,000 - 0,835 (0,835)	88	0,121	7,2
6.	Tarogong Garut	50	0,000 - 0,480 (0,480)	82	0,179	7,1
7.	Bungbulang Garut	81	0,015 - 0,519 (0,504)	91	0,086	7,2



Gambar 69. Hasil training atau pembentukan model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

Dilihat dari kisaran prediksi model, maka model yang memiliki kisaran terlebar adalah model untuk Stasiun Kasomalang Subang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,835 antara 0,000 hingga 0,835 dan Stasiun Baros Serang Banten dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,706 antara 0,035 hingga 0,741. Sementara itu, stasiun-stasiun yang memiliki kisaran prediksi yang paling sempit adalah Stasiun Tambakdahan Subang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,295 antara 0,000 hingga 0,295 dan Stasiun Karawang dengan lebar nilai prediksi sebesar 0,379 antara 0,006 hingga 0,385. Namun dilihat dari besarnya ketepatan

(akurasi) dan kecilnya galat maka model yang paling memiliki ketepatan tinggi antara nilai prediksi dengan nilai aktual dan memiliki galat terkecil adalah Stasiun Bungbulang Garut dengan ketepatan 91% dan galat 0,086, Stasiun Baros Serang Banten dengan ketepatan 90% dan galat 0,098, serta Stasiun Karawang dengan ketepatan 90% dan galat 0,101. Sementara itu, stasiun-stasiun yang memiliki tingkat ketepatan paling rendah dan galat terbesar adalah Stasiun Tarogong Garut dengan ketepatan 82% dan galat 0,179, serta Stasiun Kalenpetung Serang Banten dengan ketepatan 84% dan galat 0,163.

Validasi Model Prediksi Curah Hujan

Validasi dilakukan terhadap model terbaik yang dihasilkan pada proses training. Gambar 7 menyajikan fluktuasi prediksi curah hujan bulanan pada tahap validasi model (garis biru) dan perbandingannya terhadap nilai aktual (garis coklat) pada periode yang sama, sedangkan Tabel 14 menyajikan tingkat ketelitian dan kisaran rata-rata kesalahan pendugaan data curah hujan pada tahap validasi model. Pada Gambar 28 terlihat bahwa nilai prediksi curah hujan pada periode curah hujan tinggi di Stasiun Baros, Stasiun Karawang dan Stasiun Kasomalang beberapa terjadi lebih tinggi dari nilai aktualnya dan pada beberapa

kejadian ekstrim nilai prediksi terlihat jauh lebih rendah daripada nilai aktualnya. Sementara itu, di Stasiun Kalenpetung, Stasiun Tambakdahan, Stasiun Tarogong dan Stasiun Bungbulang, pada puncak periode basah nilai prediksi umumnya lebih rendah dari nilai aktualnya. Terlihat bahwa nilai-nilai prediksi model di keempat stasiun dibatasi oleh nilai maksimum tertentu yang nilainya lebih rendah dari beberapa kejadian ekstrim yang ada.

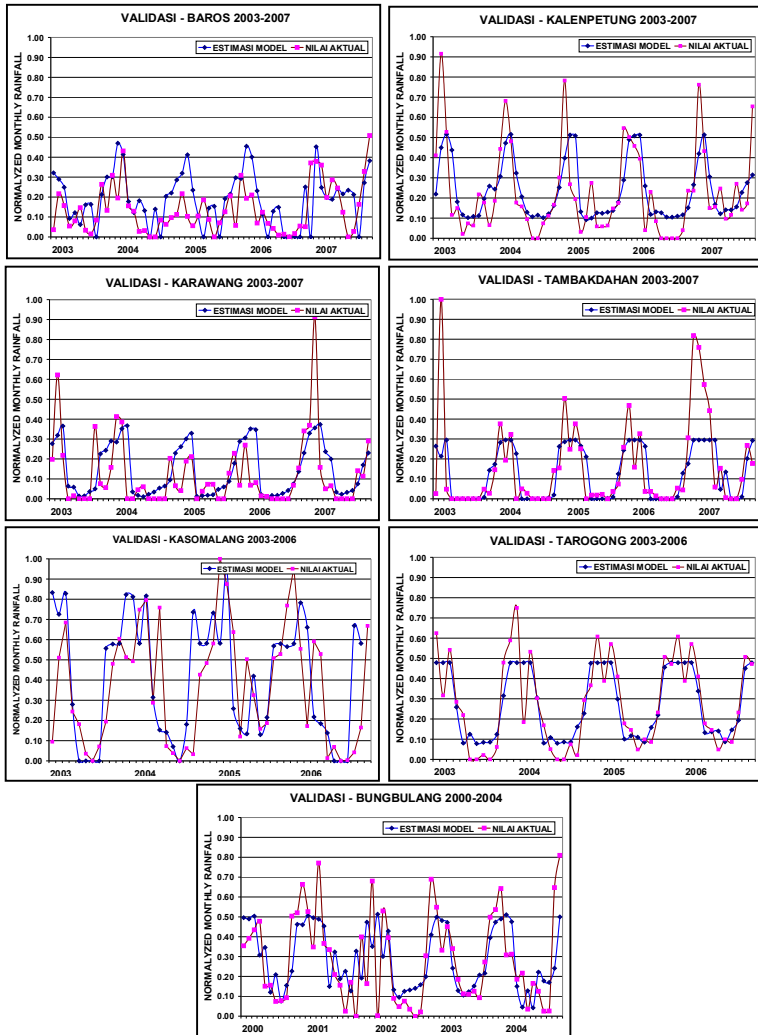
Di Stasiun Baros Serang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 85-91% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 3,8-6,4 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2003, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2007. Di Stasiun Kalenpetung Serang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 79-94% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 2,2-2,8 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2004, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2005.

Di Stasiun Karawang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 79-93% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 3,9-11,8 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2005, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2007. Di Stasiun Tambakdahan Subang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 89-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 2,1-15,6 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2004, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2003. Di Stasiun Kasomalang Subang tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 54-69% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 20,2-30,2 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2005, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2006.

Tabel 19. Tingkat ketepatan dan kisaran kesalahan pendugaan data curah hujan pada proses validasi model di beberapa stasiun perwakilan di sentra produksi padi di Pantura Banten, Pantura Jawa Barat dan Kabupaten Garut.

No.	Stasiun/Lokasi	Tingkat Ketepatan (%)	Tahun dgn Rata2 Bias Terkecil	Tahun dgn Rata2 Bias Terbesar	Kisaran Kesalahan (mm/bulan)
1.	Baros – Serang	85 – 91%	2003	2007	3,8 – 6,4
2.	Kalenpetung – Serang	79 – 94%	2004	2005	2,2 – 2,8
3.	Karawang	79 – 93%	2005	2007	3,9 – 11,8
4.	Tambakdahan – Subang	89 – 97%	2004	2003	2,1 – 15,6
5.	Kasomalang – Subang	54 – 69%	2005	2006	20,2 – 30,2
6.	Tarogong – Garut	89 – 97%	2006	2004	1,1 – 4,4
7.	Bungbulang – Garut	72 – 97%	2003	2002	1,4 – 11,7

Di Stasiun Tarogong Garut tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 89-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 1,1-4,4 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2006, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2004. Di Stasiun Bungbulang Garut tingkat ketepatan rata-rata per tahun dari nilai prediksi model terhadap nilai aktualnya mencapai 72-97% atau setara dengan tingkat kesalahan maksimum rata-rata setinggi 1,4-11,7 mm/bulan. Nilai rata-rata bias terkecil terjadi pada tahun 2003, sedangkan nilai rata-rata bias terbesar terjadi pada tahun 2002.

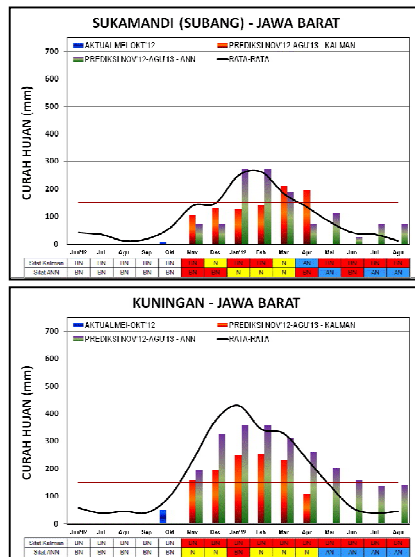


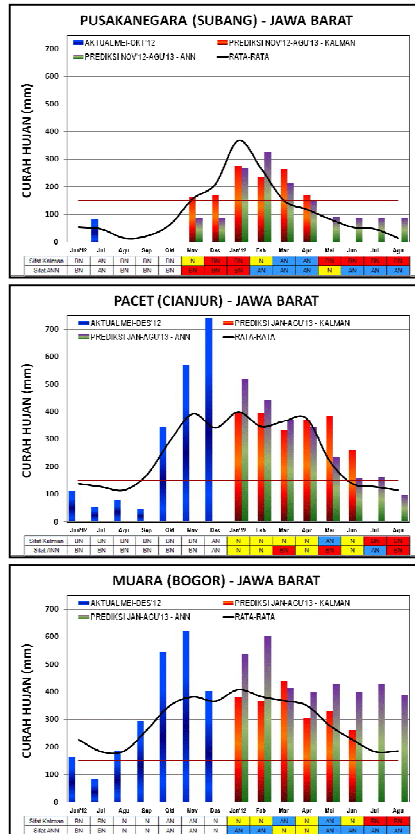
Gambar 70. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

Model Prediksi Curah Hujan untuk Prediksi Musim

Komposisi Variabel Input Model

Model disusun untuk menduga curah hujan tiga bulan ke depan ($Y=CHt+3$). Proses coba-coba (trial and error) melibatkan berbagai kombinasi peubah masukan X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 . Pada bagian ini dikemukakan penampilan model-model prediksi curah hujan yang dibentuk dari beberapa peubah masukan sebagai peubah tunggal ataupun kombinasi beberapa peubah, antara lain (1) peubah X_1 , (2) kombinasi peubah X_2 , X_3 dan X_4 , (3) peubah X_5 , (4) peubah X_6 , (5) kombinasi peubah X_1 , X_2 , X_3 dan X_4 dan (6) kombinasi peubah X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 dan X_6 .





Gambar 71. Proses validasi model prediksi curah hujan menggunakan teknik analisis jaringan syaraf propagasi balik terhadap data curah hujan di beberapa stasiun di sentra produksi padi.

DAFTAR BACAAN

- Allison H, Dais GB, and Stuart R. 1990. Long-term analysis and prediction of rainfall using a geostatistical method. In. Muchoc RC, and Bellamy JA. (eds). Climatic Analysis in crop production: Models and Management in the semi-rid and tropics and sub-tropics.
- Apriyanti N. 2005. Optimasi Jaringan Syaraf Tiruan dengan Algoritma Genetika untuk Peramalan Curah Hujan [skripsi]. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.
- Boer R, Notodipuro KA, dan Las I. 1999. Prediction of daily rainfall characteristic from monthly climate indicate. Paper presented at the second international conference on science and technology for the Assesment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.
- Dupe ZL. 1999. Prediction Nino 3.4 SST anomaly using simple harmonic model. Paper presented at the second international conference on science and technology for the Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.

- Haryanto U. 1999. Response to climate change: Simple rainfall prediction based on Southern Oscillation Index. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for the Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999.
- Lee S, Cho S, and Wong PM. 1998. Rainfall Prediction Using Artificial Neural Networks. J. of Geographic Information and Decision Analysis, vol.2 (no.2), 233-242.
- Panagoulia D, Bardossy A, and Lourmas G. 2006. Diagnostic statistics of daily rainfall variability in an evolving climate. Advances in Geosciences, 7:349-354.
- Tim Pyslittanak. 1996. Laporan Penelitian Agroklimat dan Pengembangan Database Iklim untuk Peningkatan Hasil Pertanian di Sulawesi Utara dan Sulawesi Tengah. Bogor. Pyslittanak

BAB 5.

DINAMIKA PERTUMBUHAN TANAMAN PADI DAN CURAH HUJAN DI PULAU JAWA PERIODE TAHUN 2007-2009 BERDASARKAN DATA MODIS DAN TRMM

Dede Dirgahayu dan Parwati

Pendahuluan

Dalam rangka mencapai swasembada pangan, pemerintah terus berupaya untuk meningkatkan produksi tanaman pangan, khususnya padi. Produksi padi setiap tahunnya mengalami fluktuasi akibat adanya bencana kekeringan dan banjir di lahan sawah terutama di Pulau Jawa. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mencapai swasembada pangan adalah dengan melakukan pemantauan terhadap kondisi pertanaman padi di Pulau Jawa sehingga pemerintah dapat segera mengambil tindakan yang diperlukan dalam menjaga dan meningkatkan produksi padi nasional.

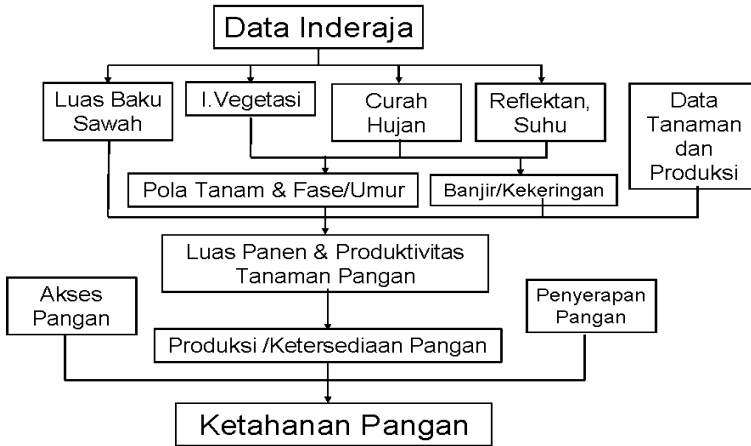
Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dipengaruhi oleh faktor internal (genetik) dan faktor eksternal (seperti iklim, tanah, dan topografi). Curah hujan sebagai sumber air bagi tanaman padi

mutlak diperlukan dalam pertumbuhan dan perkembangannya. Oleh karenanya, informasi curah hujan sangat diperlukan guna mengoptimalkan penggunaan air pada setiap fase pertumbuhan padi untuk dapat mencapai tingkat produksi yang maksimal.

Pemantauan kondisi tanaman padi serta kondisi curah hujan sebagai sumber air untuk pertumbuhan padi dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi satelit penginderaan jauh yaitu melalui satelit Terra/Aqua MODIS dan TRMM. Satelit Terra/Aqua MODIS yang memiliki resolusi temporal tinggi (setiap hari) dapat memantau perubahan-perubahan yang terjadi selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi. Sedangkan satelit TRMM dapat memberikan informasi curah hujan setiap 3 jam. Dengan menggunakan satelit MODIS dan TRMM diharapkan pemantauan pertumbuhan tanaman padi di Pulau Jawa menjadi lebih efisien, baik dari segi biaya dan waktu sehingga dapat membantu para pengambil keputusan dalam menentukan kebijakan secara lebih tepat guna menjaga dan meningkatkan produksi padi secara nasional.

Berdasarkan UU RI No. 7 tahun 1996, ketahanan pangan adalah kondisi terpenuhinya pangan bagi rumah tangga yang tercermin dari tersedianya pangan yang cukup, baik jumlah maupun mutunya, aman, merata, dan terjangkau. Untuk mencapai kondisi tersebut, pemerintah terus berupaya untuk meningkatkan produksi tanaman pangan tanaman padi.

Data satelit penginderaan yang memiliki cakupan luas dan resolusi tinggi dan dapat dimanfaatkan untuk mendukung program ketahanan pangan nasional. Beberapa hal yang dapat dilakukan dengan data satelit penginderaan jauh adalah menghitung luas lahan sawah, fase tanam/Tingkat Kehijauan Vegetasi (TKV), curah hujan, dan prediksi banjir/kekeringan (Gambar 1).



Gambar 72. Peran data penginderaan jauh dalam mendukung informasi yang diperlukan untuk Ketahanan Pangan

Hipotesis

Untuk penelitian ini, hipotesis yang diambil adalah:

- Kondisi pertumbuhan tanaman padi sawah dapat dideteksi menggunakan nilai-nilai EVI. Kurva nilai-nilai EVI selama masa pertumbuhan tanaman padi sawah mengikuti pola kurva normal. Dalam kondisi normal, puncak kurva menggambarkan puncak fase pertumbuhan vegetatif, kemudian kurvanya menurun sejalan dengan fase pertumbuhan generatif, karena tingkat kehijauannya berkurang. Apabila terjadi gangguan terhadap pertumbuhan tanaman padi, maka dapat diketahui berdasarkan perubahan pola kurva nilai EVI-nya.
- Ketersediaan air mempengaruhi pertumbuhan tanaman padi. Pada saat awal tanam dan selama fase pertumbuhan vegetatif kebutuhan air lebih tinggi dibandingkan pada fase pertumbuhan generatif. Dengan demikian terdapat hubungan antara curah hujan dengan awal musim tanam,

sehingga awal musim tanam dapat diprediksi berdasarkan hasil prediksi curah hujan.

- c. Dalam analisis fase pertumbuhan dan produksi padi, faktor-faktor lain seperti genetik, perlakuan tanaman padi, tanah, dan cuaca (selain curah hujan) diasumsikan dalam kondisi optimum.

Fenomena ENSO dapat diidentifikasi melalui adanya penyimpangan suhu permukaan laut Pasifik Tropik. ENSO terdiri atas komponen El Nino dan Osilasi Selatan (Trenberth, 1997; Naylor, et al., 2001). Kondisi El Nino berkaitan erat dengan menghangatnya suhu permukaan laut di Pasifik Tropik bagian timur, sebaliknya pada kondisi La Nina suhu permukaan laut di Pasifik Tropik bagian timur mendingin. Sedangkan Osilasi Selatan menggambarkan kondisi perbedaan tekanan udara antara Darwin dan Tahiti, dimana pada kondisi El Nino tekanan udara di Tahiti lebih rendah daripada di Darwin, dan sebaliknya yang terjadi pada kondisi La Nina.

Studi variabilitas curah hujan di wilayah Indonesia dan Malaysia berdasarkan fenomena ENSO dari data penginderaan jauh telah dilakukan oleh Nicholls 1989; Haylock and McBride 2001; Hendon 2003; Aldrian and Susanto 2003. Umumnya, kondisi curah hujan yang rendah di wilayah Indonesia dan sekitarnya berkaitan dengan fenomena El Nino. Sebaliknya kondisi curah hujan tinggi di wilayah Indonesia dan sekitarnya berkaitan dengan fenomena La Nina. Berdasarkan adanya hubungan antara suhu permukaan laut di Pasifik Tropik dan curah hujan di wilayah Tropik, maka dilakukan pemodelan untuk prediksi curah hujan di wilayah Tropik, terutama di wilayah Indonesia.

Falcon et al. (2004) menyebutkan pengaruh *El Nino/Southern Oscillation* (ENSO) terhadap penurunan produksi padi di Pulau Jawa rata-rata mencapai 21% untuk kenaikan suhu permukaan laut Pasifik Tropik sebesar 1°C pada bulan Agustus periode tahun 1997/1998 – 2001/2002 (Tabel 1). Penurunan produksi tersebut berlaku jika memasukkan faktor waktu (t) sebagai variabel

prediktor dan tidak ada antisipasi dari pemerintah untuk mengurangi dampak ENSO.

Tabel 20. Pengaruh kenaikan suhu permukaan laut Pasifik Tropik terhadap produksi padi di Indonesia (Falcon et al, 2004).

<i>Significant Provincial Production Effects Caused by a 1°C Increase in the August SSTA</i>				
Province	Crop-Year Production Effect (September–August) (tmt)	Percentage of National Effect	Significance of Production Effect (t-statistic)	Ratio of Production Effect to Average Yearly Production 1997/98– 2001/02
West Java	–380	28.83	–3.01	–0.037
Central Java	–238	18.06	–3.67	–0.026
East Java	–232	17.60	–4.06	–0.026
South Sulawesi	–102	7.74	–2.02	–0.033
North Sumatra	–54	4.10	–1.57	–0.016
West Sumatra	–46	3.49	–2.18	–0.026
East Kalimantan	–41	3.11	–2.60	–0.118
North Sulawesi	–38	2.88	–3.31	–0.104
West Nusa Tenggara	–30	2.28	–2.63	–0.021
Riau	–17	1.29	–2.14	–0.041
Southeast Sulawesi	–10	0.76	–1.68	–0.033
Bali	–3	0.23	–2.82	–0.003
Subtotal	–1,191	90.36		
Coefficient for all- Indonesia (table 1)	–1,318	100.00		

Beberapa kegiatan pemantauan pertumbuhan tanaman padi dari data satelit telah dilakukan di Pusat Pengembangan Pemanfaatan dan Teknologi Penginderaan Jauh – LAPAN, diantaranya adalah pemantauan tingkat kehijauan vegetasi, fase pertumbuhan, serta profil pertumbuhan tanaman padi dari indeks vegetasi. Sementara untuk mendapatkan model prediksi fase pertumbuhan padi perlu dilakukan analisis hubungan antara indeks vegetasi dengan curah hujan, baik secara temporal maupun spasial. Penelitian Fontana, dkk (2007) menunjukkan korelasi yang tidak nyata antara hujan dengan EVI tanaman pada musim dingin.

Korelasi yang nyata ditunjukkan antara akumulasi hujan selama pertumbuhan vegetatif dengan EVI maksimum yang dapat dicapai.

Pemodelan untuk prediksi curah hujan dengan waktu tunda 5 bulan ke depan berdasarkan data satelit telah dibangun oleh LAPAN sejak tahun 1997. Model prediksi yang digunakan adalah model korelasi statistik spasial yaitu CCA (*Canonical Corellation Analysis*) dan EOF (*Emphirical Orthogonal Function*). Parameter yang digunakan adalah suhu permukaan laut Pasifik Tropik dan data OLR (*Outgoing Longwave Radiation*) di wilayah Tropik dari satelit NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Model prediksi ini dibangun berdasarkan data bulanan selama 22 tahun (1982 – 2003), dengan suhu permukaan laut sebagai input data, dan prediksi OLR sebagai outputnya. Data OLR dikonversi menjadi data curah hujan berdasarkan Data *Global Precipitation Climatological Project* (GPCP) dengan resolusi spasial $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ dari USA *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) untuk seluruh wilayah Indonesia. Hasil prediksi curah hujan dari data OLR mempunyai tingkat akurasi yang bervariasi antara 50 – 80%. Korelasi yang baik diperoleh pada musim kemarau sekitar Juni-Juli-Agustus (JJA), sedangkan korelasi yang rendah diperoleh pada musim hujan sekitar Desember-Januari-Februari (DJF). Namun, kelemahan prediksi curah hujan dari data OLR terletak pada resolusi spasialnya yang rendah yaitu 2.5° atau sekitar 277 km², sehingga kurang sesuai untuk menggambarkan kondisi curah hujan wilayah lokal.

Data TRMM mempunyai keunggulan, antara lain tersedia secara *near real-time* setiap tiga jam sekali, konsisten, daerah cakupan yang luas yaitu wilayah tropik, resolusi spasial yang cukup tinggi ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), dan dapat diakses secara gratis. Berbagai penelitian, validasi, serta aplikasi data TRMM telah banyak dilakukan (Meneghini *et al.* 2004, Mori *et al.* 2004, Wolff *et al.* 2005, Ichikawa dan Yasunari 2006, Shige *et al.* 2007). Oleh

karenanya perlu dikembangkan model prediksi curah hujan bulanan di Indonesia dari data TRMM untuk membantu pengguna dalam memperoleh informasi prediksi curah hujan yang wilayahnya lebih lokal.

Berdasarkan pengalaman penelitian tentang pengairan irigasi yang optimal, maka Ditjen Sumberdaya Air, Dept.PU (2006) secara mendetail menetapkan kebutuhan air tanaman padi (lihat Tabel 2)

Tabel 21. Kebutuhan air pada fase pertumbuhan padi di Pulau Jawa

No	Tahap Pertumbuhan	Varietas Lokal				Varietas Unggul			
		Jeluk mm/hr	Debit Lt/dt/ Ha	Periode (Hari)	Jumlah (mm)	Jeluk mm	Debit Lt/dt /Ha	Periode (Hari)	Jumlah (mm)
0	Pengolahan Tanah	12.7	1.5	-		12.7	1.5	-	
1	Pembibitan	3.0	0.4	20	60	3.0	0.4	20	60
2	Tanam s/d Primordia	7.5	0.9	40	300	6.4	0.8	35	224
3	Primordia s/d Bunga	8.8	1.0	25	220	7.7	0.9	20	154
4	Bunga 10 % s/d Penuh	8.8	1.0	20	176	9.0	1.0	20	180
5	Bunga Penuh s/d Pemasakan	8.4	1.0	20	168	7.8	0.9	20	156
6	Pemasakan s/d Panen	0.0	0.0	15	0	0.0	0.0	15	0
	Total (dari mulai tanam)			120	864			110	714

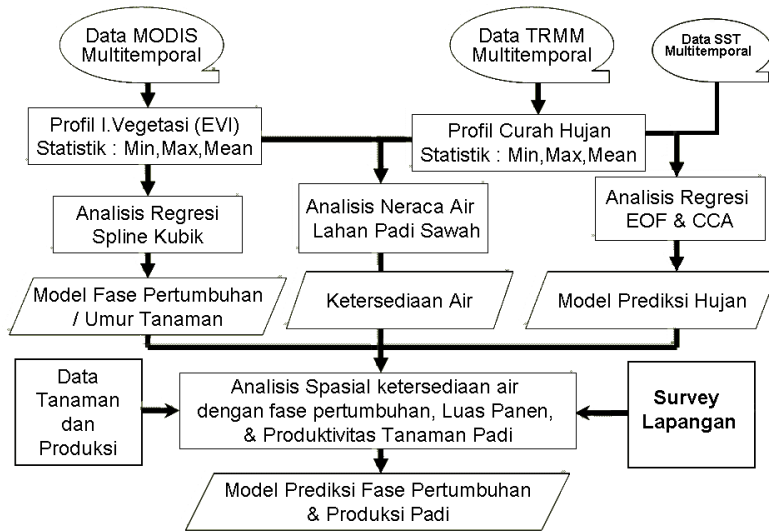
Pengembangan model identifikasi dan prediksi fase pertumbuhan padi sawah di Pulau Jawa berdasarkan data MODIS dari satelit Terra/Aqua dan data satelit TRMM, menggunakan perawatan utama EVI (*Enhanced Vegetation Index*) dari data satelit Terra/Aqua MODIS dan curah hujan dari data TRMM. Hubungan dari kedua parameter ini selanjutnya digunakan untuk membangun model prediksi produksi padi dengan tingkat kepercayaan tertentu. Penggunaan Citra tersebut bertujuan untuk mengetahui hubungan antara ketersediaan air dengan fase pertumbuhan padi, model prediksi fase pertumbuhan padi sawah, dan model prediksi produksi padi di Pulau Jawa.

Kontinuitas penyediaan informasi pemantauan kondisi tanaman padi sawah di Pulau Jawa, pemantauan ketersediaan air bagi tanaman padi sawah di Pulau Jawa, serta model prediksi fase pertumbuhan padi dapat dikembangkan untuk model prediksi produksi padi dengan tingkat ketelitian tertentu.

Pemerintah di tingkat pusat maupun daerah untuk mengantisipasi serta mengambil kebijakan dalam

Metode Penelitian

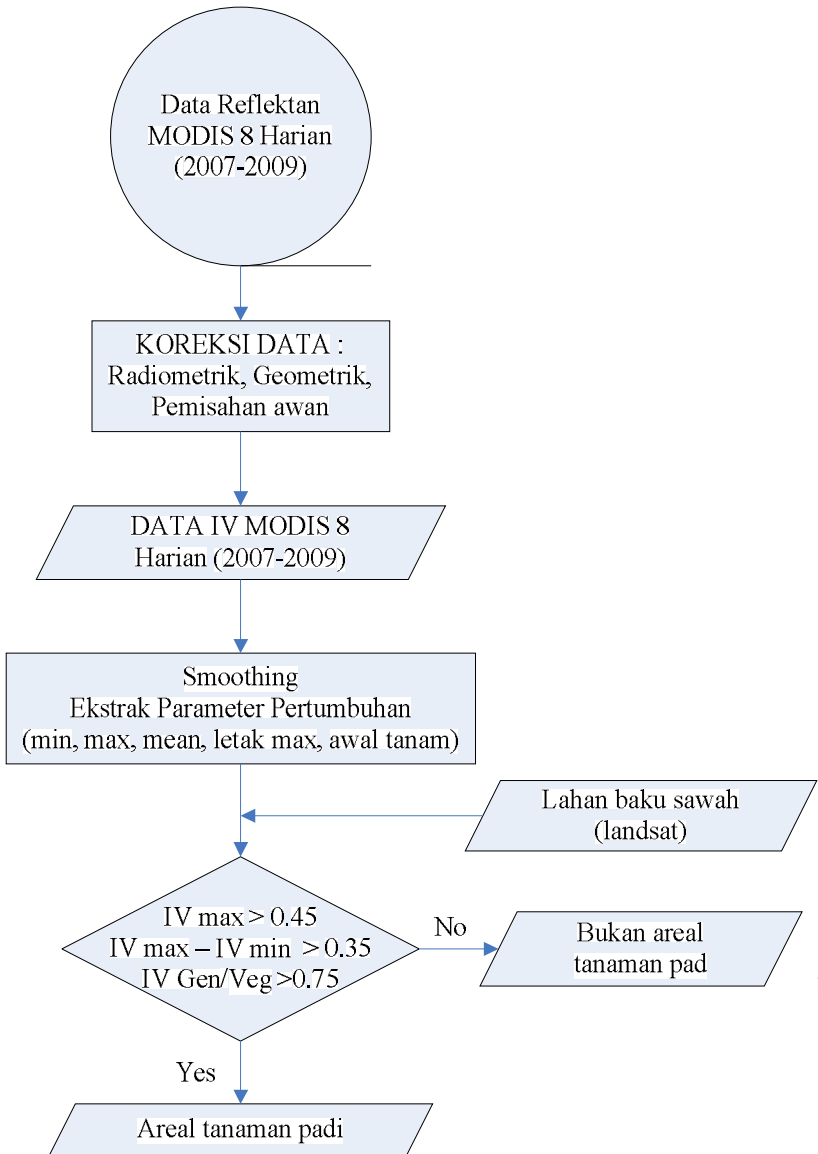
Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini secara garis besar dapat dilihat pada diagram alir Gambar 4-1.



Gambar 73. Diagram alir metode penelitian

Pembuatan Profil Pertumbuhan Tanaman Padi

Pertumbuhan tanaman padi dari mulai tanam (0 HST) hingga panen (120 HST) dapat ditunjukkan dengan perubahan tingkat kehijauan atau indeks vegetasi (EVI) selama pertumbuhan dalam bentuk grafik atau profil EVI terhadap waktu (Kogan, 1990; 1995; 2002). Untuk membuat profil Indeks Vegetasi memerlukan dua tahap kegiatan, yaitu pertama penentuan area tanaman padi dan yang kedua ekstraksi statistik nilai EVI pada area tertentu yang memiliki kesamaan waktu tanam dan klasifikasi lahan sawah padi. Tahapan yang dilakukan untuk menentukan areal tanaman padi dapat dilihat pada Gambar 4-2.



Gambar 74. Diagram alir metode penentuan tanaman padi dan non padi di lahan sawah

Untuk membedakan tanaman padi dan data reflektan MODIS 8 harian dari tahun 2007-2009. Kemudian dilakukan koreksi geomterik dan mozaiking dengan menggunakan software MODIS tool dan Er-Mapper. Setelah itu dilakukan pemisahan awan dengan menggunakan software Er-Mapper. Setelah data MODIS dikoreksi kemudian dilakukan ekstraksi nilai EVI dari data tersebut sehingga diperoleh data raster indeks vegetasi (IV) MODIS 8 harian dari tahun 2007 sampai dengan 2009. Rumus yang digunakan untuk ekstraksi EVI yaitu (Huete, 1997):

$$EVI = \frac{r_{NIR} - r_{Red}}{r_{NIR} + C_1 r_{Red} - C_2 r_{Blue} + L} \times G \quad \dots (1)$$

dimana $L=1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, and G (gain factor) = 2.5.

Kemudian data raster tersebut diperhalus (*smoothing*) untuk menghilangkan noise (teutama awan) agar diperoleh profil EVI yang halus. Smoothing yang dilakukan adalah dengan menggunakan moving median 3 dan rata-rata. Artinya setiap tiga data dicari nilai mediannya kemudian dirata-ratakan. Kemudian hasil dari smoothing tersebut *dioverlay* dengan lahan baku sawah dari data landsat sehingga diperoleh profil IV per piksel.

Selanjutnya dibuat program untuk menghitung parameter pertumbuhan tanaman padi agar dapat membedakan tanaman padi dengan objek lainnya. Program tersebut menghitung nilai minimum, maksimum, letak minimum, serta letak maksimum dari seri data yang terkumpul. Dari nilai-nilai tersebut dapat dihitung awal tanam, panen dan nilai statistiknya seperti nilai rata-rata, kovarian, *slope* dan *skewness*. Nilai-nilai tersebut dapat dimanfaatkan dalam pengolahan data lebih lanjut untuk menentukan obyek yang diduga tanaman padi. Jika IV dari EVI maksimum > 0.45, selisih EVI maksimum dan minimum > 0.35 dan rasio dari IV generatif dengan vegetatif > 0.75 maka area tersebut merupakan tanaman padi dan selainnya bukan tanaman padi.

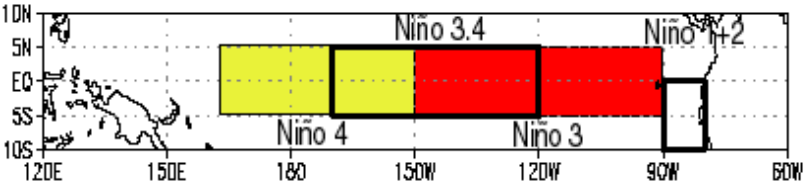
Setelah tahap penentuan areal tanaman padi dilakukan tahap selanjutnya yaitu penurunan model pertumbuhan tanaman padi.

Pata anomali SST Pasifik Tropik dan data TRMM wilayah Indonesia periode tahun 1998 – 2008. Keterangan Data SST dan TRMM yang digunakan secara rinci dapat dilihat pada Tabel 4-1 berikut.

Tabel 22. Data TRMM dan SST Pasifik Tropik yang digunakan

Jenis Data	SST Pasifik Tropik	TRMM Indonesia
Cakupan wilayah	89.5°S – 89.5°N; 0.5°E - 359.5°W (180 x 360)	91.125°E – 154.125°E; 13.875°S – 9.125°N (64 x 24)
Resolusi Spasial	1° x 1°	1° x 1°
Resolusi Temporal	Jan 1998 – Dec 2008 (132 bulan)	Jan 1998 – Dec 2008 (132 bulan)
Sumber	Optimum Interpolation SST (NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA)	TRMM (NASA)

Wilayah analisis SST Pasifik Tropik mencakup 4 wilayah Nino, yaitu: Niño-1+2 (0°-10°S,90°-80°W), Niño 3 (5°N-5°S, 150°-90°W), Niño-3.4 (5°N-5°S, 170°-120°W), dan Niño-4 (5°N-5°S, 160°E-150°W). Umumnya kondisi ENSO yang berpengaruh terhadap iklim di Indonesia adalah di wilayah Niño-3.4. Pembagian wilayah Niño dapat dilihat pada Gambar 4-4.



Gambar 75. Pembagian wilayah Nino di Samudera Pasifik Tropik (Sumber: Climate Prediction Center /NCEP)

Model Pertumbuhan Tanaman Padi

Time series EVI dari hasil *ploting* setiap training area dianalisis untuk menentukan saat terjadinya *fase vegetatif* maksimum (60 hari), awal tanam, dan akhir tanam (*fase bera*), sehingga dapat diketahui korespondensi antara umur tanaman padi dengan kisaran nilai EVI serta untuk membuat profil pertumbuhan tanaman padi.

Analisis korelasi dan regresi dilakukan untuk memperoleh model persamaan regresi selama pertumbuhan tanaman padi fase vegetatif atau generatif. Bentuk persamaan yang akan dicoba adalah polinom orde 3 atau *Spline Qubic* dengan persamaan umum sebagai berikut :

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 \quad \dots (5)$$

X : waktu/umur tanaman padi (HST)

Y : merupakan parameter pertumbuhan tanaman seperti kehijaun tanaman atau Indeks Vegetasi (IV) yang dapat ditunjukkan dengan EVI, sedangkan t adalah waktu atau HST (hari setelah tanam). Transformasi EVI dapat dilakukan agar skala nilai EVI yang semula berkisar antara -1 s/d +1 menjadi data 8 bit dengan kisaran nilai 0 – 255, sehingga tidak berbeda jauh dengan kisaran umur (X) dari 0 s/d 120 HST (Hari Setelah Tanam). Transformasi EVI menjadi Indeks vegetasi (IV) dalam 8 bit dilakukan dengan formula :

$$IV = 128 + 125 \cdot EVI \quad \dots (6)$$

Dengan menggunakan parameter tanaman padi yang diperoleh pada Tabel 1 kemudian dapat diturunkan model fase pertumbuhan. Sebelumnya terlebih dahulu dilakukan rekode Citra EVI_Maksimum menjadi 6 kelas (Maksimum_Id), rekode Citra Maksimum-Tanam menjadi 3 kelas (Mx-Tn_Id), *overlay* matriks antara Maksimum_Id dengan Mx-Tn_Id untuk membuat citra Klasifikasi Padi sawah sebanyak 18 kelas. Kemudian dihitung nilai atribut klasifikasi sawah (Swh_Id) dengan menggunakan persamaan (2). Hasil Rekode Maksimum_Id dan Mx-Tn_Id serta

kombinasinya (*overlay* matriks) dapat dilihat pada Tabel 1 . Kemudian hasil dari klasifikasi tersebut dikonversi menjadi poligon.

Tabel 23. Rekode EVI_Maksimum dan EVI Maksimum-EVI Tanam serta Hasil Kombinasinya (*Overlay* Matriks)

EVI_Maksimum	Rekode	EVI Maksimum - Tanam		
		< 0.4	0.4-0.5	>0.5
		1	2	3
0.45-0.50	1	1	2	3
0.51-0.55	2	4	5	6
0.56-0.60	3	7	8	9
0.61-0.65	4	10	11	12
0.66-0.70	5	13	14	15
> 0.7	6	16	17	18

Ekstraksi informasi awal tanam (AT) padi dilakukan berdasarkan waktu terjadinya EVI Maksimum atau Letak Maksimum (LM) dengan menggunakan persamaan (3). Selanjutnya hasil AT dikonversi menjadi poligon. Kemudian dengan menggunakan piksel-piksel yang memiliki kelas padi (Swh_Id) dan awal tanam (AT) yang relatif homogen dibuat poligon dengan menggunakan *Software ArcView*. Kemudian dihitung nilai atribut padi (Padi_Id) dengan menggunakan persamaan (4). Vektor poligon yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi Region Raster dengan menggunakan *software ErMapper* ke file EVI Multitemporal untuk dihitung nilai statistiknya (Mean dan Standar deviasinya) pada setiap region dengan atribut Padi_Id. Selanjutnya hasil ekstraksi EVI dengan awal tanam yang berbeda-beda dikelompokkan berdasarkan umur padi yang sama (mengacu pada letak EVI maksimum) dalam bentuk Tabel 5-2.

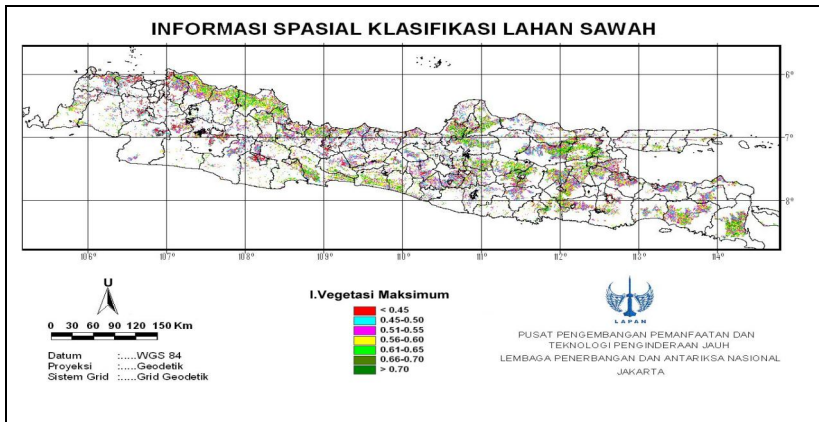
Tabel 24. Contoh Rekapitulasi hasil ekstraksi Mean EVI pada region Padi_Id

No	Umur Padi (HST)	EVI1	EVI2		EVIn	Keterangan
1	-12					Sebelum tanam
2	-4					Sebelum tanam
3	4					Vegetatif, bercampur air
4	12					Vegetatif, bercampur air
5	20					Vegetatif, bercampur air
6	28					Vegetatif
7	36					Vegetatif
8	44					Vegetatif
9	52					Vegetatif
10	60					Vegetatif Maksimum
11	68					Generatif
12	76					Generatif
13	84					Generatif
14	92					Generatif
15	100					Generatif
16	108					Generatif
17	116					Generatif
18	124					Bera

Keterangan :

EVI1, EVI2, ..., EVIn : EVI pada awal tanam ke 1,2,...,n

Contoh Hasil ekstraksi EVI Multitemporal untuk periode tanam Oktober 2008 – Maret 2009 pada lahan sawah di wilayah pantura Jawa Barat (Bekasi, Karawang, Subang, Indramayu, dan Cirebon) dapat dilihat pada Tabel Lampiran 1. Sedangkan distribusi spasial klasifikasi lahan sawah di pulau Jawa dapat dilihat pada Gambar 5-1.

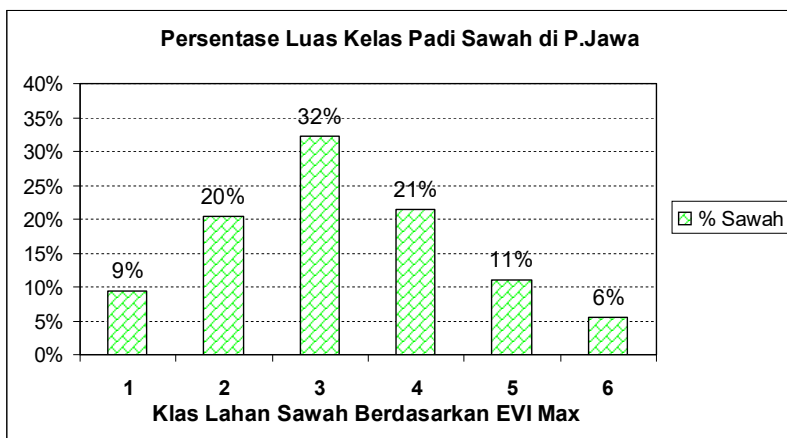


Gambar 76. Citra Klasifikasi Lahan Sawah berdasarkan Indeks Vegetasi (EVI) Maksimum

Dari distribusi spasial tersebut menunjukkan bahwa kelas yang dominan adalah kelas yang memiliki kisaran EVI Maksimum : 0.55-0.60 atau termasuk kelas 7, 8 dan 9 pada Tabel 5-1. Pesentase luas sawah di pulau Jawa berdasarkan kelas EVI maksimum dapat dilihat pada Tabel 5-3 dan grafik pada Gambar 5-2.

Tabel 25. Distribusi Luas Lahan Sawah di P.Jawa Berdasarkan Kelas EVI Maksimum

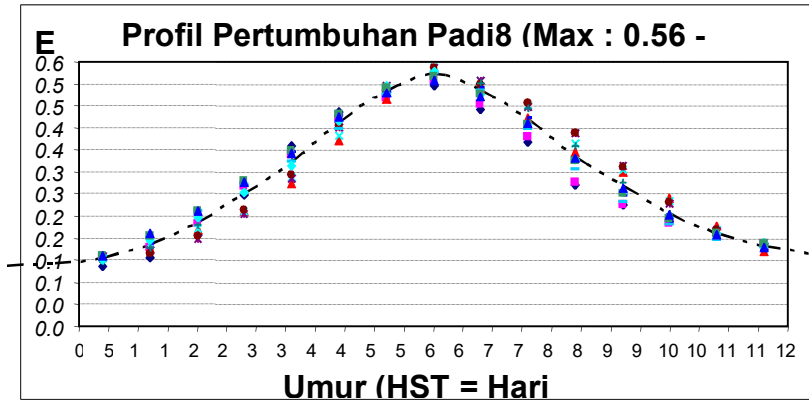
No	EVI_Max	Max_Id	% Luas
1	0.45-0.50	1	9.4%
2	0.51-0.55	2	20.5%
3	0.56-0.60	3	32.2%
4	0.61-0.65	4	21.4%
5	0.66-0.70	5	11.0%
6	> 0.7	6	5.5%



Gambar 77. Distribusi Luas Sawah di P Jawa berdasarkan EVI Maksimum

Hasil profil dan analisi regresi yang paling dominan di pulau Jawa adalah sebagai berikut:

Nilai EVI maksimum 0.56-0.60 dibuat profil fase pertumbuhan seperti yang terlihat pada Gambar 5-3.



Gambar 78. Profil pertumbuhan tanaman padi kelas 8

Hasil analisis Regresi menghasilkan persamaan sebagai berikut :

Fase vegetatif :

$$Y_{Veg} = 145.151 + 0.2712 X + 0.0249 X^2 - 0.0002 X^3 \dots (11)$$

Fase generatif :

$$Y_{Gen} = 86.63 + 5.3578 X - 0.0754 X^2 + 0.0003 X^3 \dots (12)$$

Aplikasi Model Pertumbuhan Tanaman Padi untuk Menduga Umur Padi

Pendugaan umur tanaman padi dapat dilakukan dengan menggunakan kedua model pertumbuhan tanaman padi tersebut di atas berdasarkan parameter EVI, tetapi diperlukan minimal 2 data multi temporal Data EVI MODIS untuk ditentukan terlebih dahulu kondisi lahan sawah, apakah berada dalam dominasi air atau bera serta fase pertumbuhan tanaman padi vegetatif dan generatif. Pendugaan umur tanaman padi dengan menggunakan kedua model di atas memang cukup rumit, karena ada beberapa tahapan proses yang harus dilakukan serta implementasi model yang berkebalikan. Dalam prakteknya secara teknis untuk

menerapkan model pertumbuhan tersebut harus dibuat citra fase padi sebagai *Masking* untuk menduga umur tanaman padi dalam suatu citra tunggal. Untuk membuat citra fase tersebut diperlukan minimal dua citra EVI pada 2 waktu yang berbeda (t dan $t-1$), misalnya dengan perbedaan waktu 10 hari. Kondisi fase vegetatif (perubahan positif) dan generatif (perubahan negatif) lahan sawah yang didominasi oleh vegetasi dapat dideteksi berdasarkan perubahan nilai EVI atau DEVI dengan kriteria sebagai berikut:

$$DEVI(t) = EVI(t) - EVI(t-1)$$

- (a) Fase dominan air, jika $EVI(t) \leq 0.19$
- (b) Fase bera, jika $EVI(t) > 0.19$ dan $EVI(t) < 0.22$
- (c) Fase vegetatif jika nilai $DEVI > 0$
- (d) Fase generatif jika nilai $DEVI < 0$

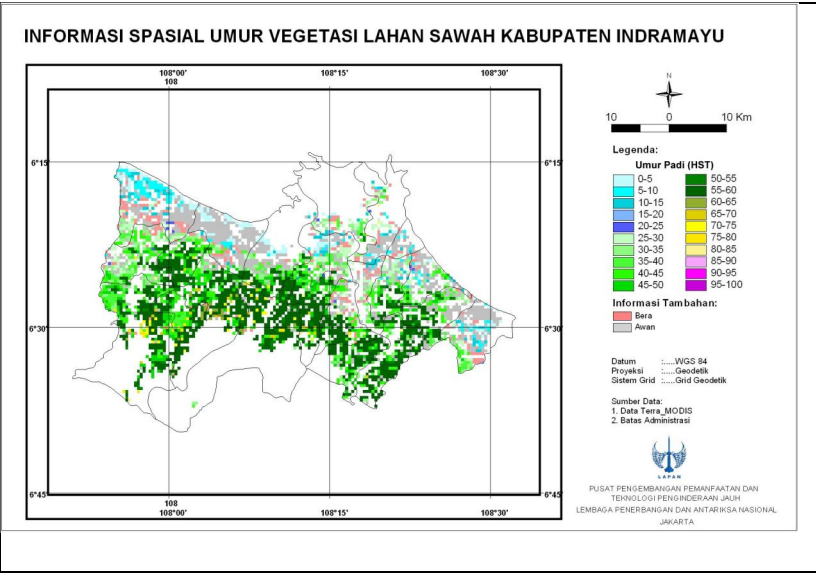
Umur tanaman padi dapat ditentukan berdasarkan kisaran nilai EVI yang diduga berdasarkan persamaan pertama jika memenuhi kriteria a, dan c serta diduga berdasrkan model persamaan kedua jika memenuhi kriteria d. Sebagai contoh jika ingin dibuat citra spasial umur tanaman padi dengan selang 5 hari, maka klasifikasi citra EVI menjadi umur padi dapat dilakukan dengan kriteria seperti yang tercantum pada Tabel 5-4.

Tabel 26. Kisaran EVI untuk menduga Umur Tanaman Padi

No	Umur (HST)	KISARAN EVI		dIV
1	0-10	145	150	+
2	11-20	151	159	+
3	21-30	160	169	+
4	31-40	170	181	+
5	41-50	182	192	+

No	Umur (HST)	KISARAN EVI		dIV
6	51-60	193	200	+
7	61-70	199	193	-
8	71-80	192	182	-
9	81-90	181	171	-
10	91-100	170	161	-
11	101-110	160	153	-
12	111-120	152	149	-

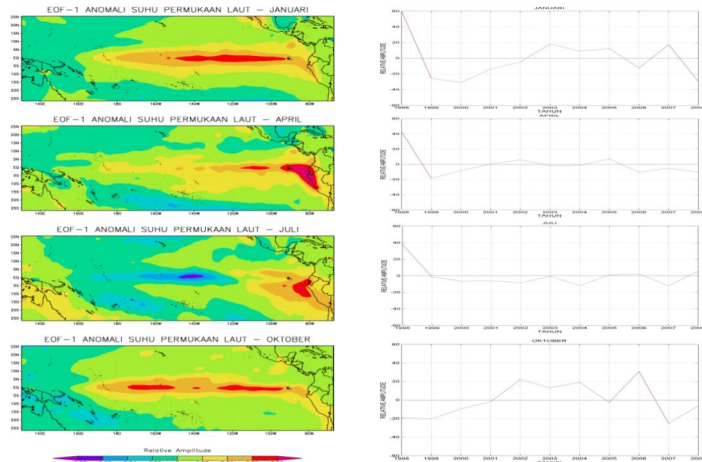
Validasi model pertumbuhan dilakukan melalui hasil pengamatan survey lapangan di daerah Indramayu, Cilacap dan Lamongan (lihat Lampiran)



Gambar 79. Estimasi Umur Tanaman Padi Awal Januari 2009 di Kabupaten Indramayu, Jawa Barat

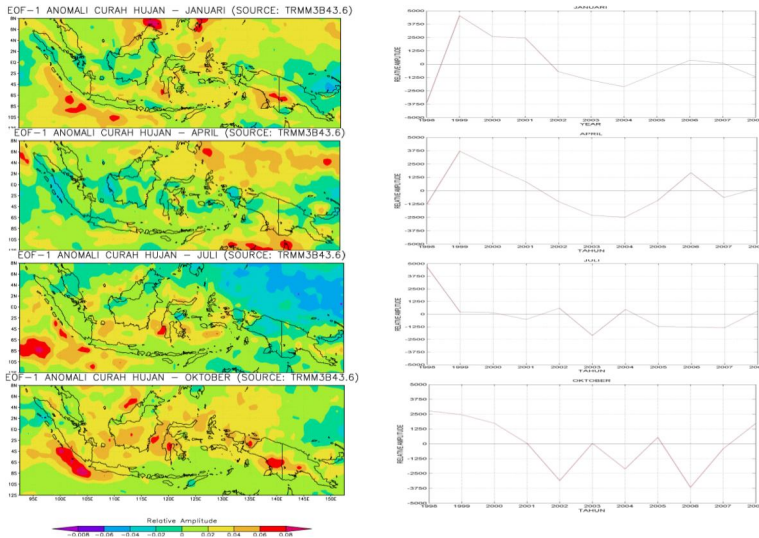
Hasil analisis EOF antara anomali curah hujan (TRMMa) Indonesia dan Anomali SST (SSTa) Pasifik Tropik.

Analisis EOF digunakan untuk memilih data anomali curah hujan TRMM di Indonesia dan anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal pada kondisi El Nino. Analisis ini dilakukan untuk setiap bulan dari Januari – Desember periode tahun 1998-2008. Sebagai contoh, pada Gambar 3 dapat dilihat hasil analisis EOF terhadap anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal masing-masing pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober selama tahun 1998 – 2008. Pada Gambar 3 secara spasial dapat dijelaskan bahwa anomali SST Pasifik Tropik tampak kuat terjadi dari wilayah Niño 3 (5°N - 5°S , 150° - 90°W) hingga ke wilayah Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W) pada bulan Oktober, kemudian kekuatan intensitas ENSO mulai merapat ke wilayah barat pada bulan Januari, April, hingga di wilayah Nino 1+2 pada bulan Juli. Analisis spasial ini kemudian diintegrasikan dengan analisis temporal pada bulan-bulan yang sama periode tahun 1998 – 2008, sehingga dapat diketahui waktu (bulan dan tahun) yang berpotensi menjadi ENSO.



Gambar 80. Hasil Analisis EOF terhadap anomali SST Pasifik Tropik secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober

Sementara itu, contoh hasil analisis EOF terhadap anomali curah hujan TRMM di Indonesia pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober secara spasial (dari barat hingga timur, serta dari utara hingga selatan) dan temporalnya dari tahun 1998 – 2008 dapat dilihat pada Gambar 4. Secara spasial, umumnya pada bulan Juli dan Oktober sebagian wilayah Indonesia mempunyai anomali curah hujan yang cukup kuat (direpresentasikan oleh warna jingga hingga merah), sedangkan pada bulan Januari dan Juli relatif lebih rendah anomali curah hujannya.

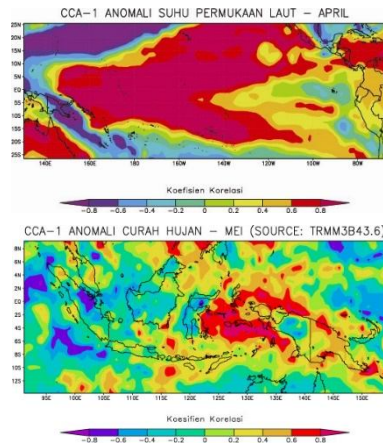


Gambar 81. Hasil Analisis EOF terhadap anomali curah hujan TRMM di Indonesia secara spasial dan temporal (1998 – 2008) pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober.

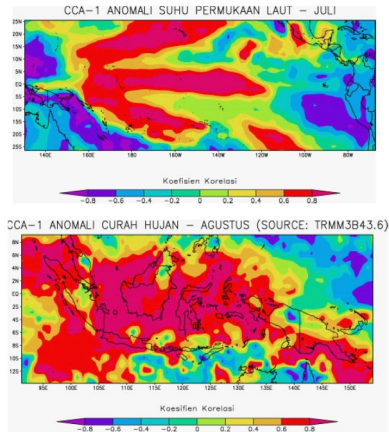
Hasil analisis CCA antara anomali curah hujan (TRMM) Indonesia dan anomali SST Pasifik Tropik. Hasil analisis EOF selanjutnya digunakan sebagai input untuk melakukan analisis korelasi dengan metode CCA antara anomali curah hujan Indonesia terhadap anomali SST Pasifik Tropik. Analisis ini juga dilakukan setiap bulan (Januari – Desember) periode tahun 1998 - 2008. Sebagai contoh pada tulisan ini ditampilkan hasil CCA dari anomali SST Pasifik Tropik bulan April dan anomali curah hujan Indonesia bulan Mei (Gambar 5-12a) untuk merepresentasikan periode MAM, serta hasil CCA dari anomali SST Pasifik Tropik bulan Juli dan anomali curah hujan Indonesia bulan Agustus untuk merepresentasikan periode JJA (Gambar 5-12b). Sedangkan hasil analisis CCA untuk periode SON dan DJF dapat dilihat pada Gambar 5-13a dan 5-13b.

Hasil korelasi yang cukup tinggi antara anomali SST Pasifik Tropik dan anomali curah hujan TRMM Indonesia ditandai dengan warna merah. Pada Gambar 5-12a, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan April yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) lebih dominan berada di wilayah Niño-4 (5°N - 5°S , 160°E - 150°W), sementara di lokasi Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W) korelasinya lemah ($r < 0.6$). Hal ini menyebabkan rendahnya korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan Mei. Pada Gambar 5-12a dapat dilihat bahwa wilayah yang mempunyai korelasi tinggi untuk anomali curah hujan Indonesia pada bulan Mei hanya terdapat di wilayah Maluku dan sebagian Papua.

Pada Gambar 5-12b, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan Juli yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) berada di lokasi Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W). Hal ini menyebabkan tingginya korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan Agustus. Pada Gambar 5-12b dapat dilihat bahwa wilayah yang mempunyai korelasi tinggi untuk anomali curah hujan Indonesia pada bulan Agustus hampir berada di seluruh wilayah Indonesia.

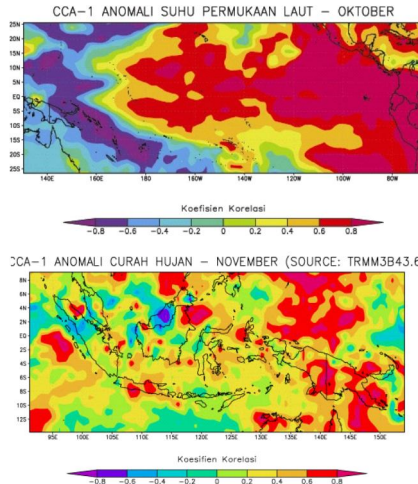


Gambar 82. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari.

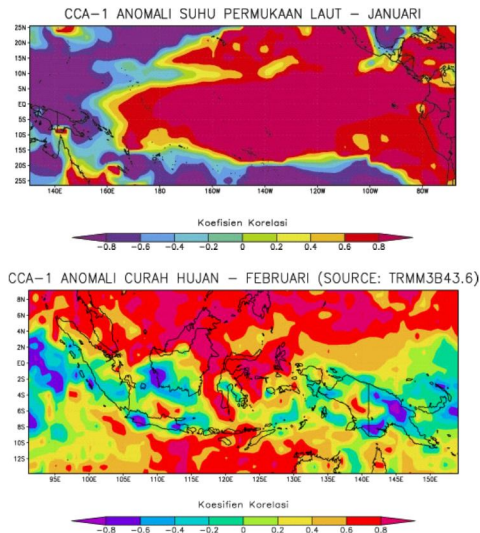


Gambar 83. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Juli dan anomali curah hujan Indonesia bulan Agustus.

Pada periode SON, kondisi anomali SST Pasifik Tropik bulan Oktober yang mempunyai nilai korelasi tinggi ($r = 0.8$) berada di wilayah Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170° - 120°W), namun korelasi anomali curah hujan Indonesia pada bulan November bervariasi dari rendah hingga tinggi (Gambar 6a). Sementara itu, pada Gambar 6b dapat dilihat bahwa sinyal El Niño di wilayah Niño 3.4 kuat pada bulan Januari, namun curah hujan di wilayah Indonesia yang berkorelasi kuat pada bulan Februari terdapat di wilayah utara Indonesia dan selatan Indonesia. Bervariasinya korelasi curah hujan pada periode DJF, kemungkinan disebabkan oleh adanya pengaruh monsun serta suhu permukaan laut lokal di wilayah Indonesia.



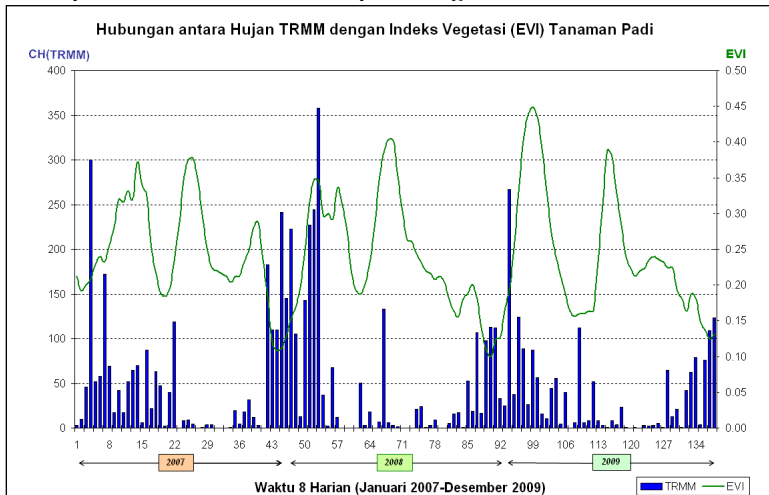
Gambar 84. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Oktober dan anomali curah hujan Indonesia bulan November.



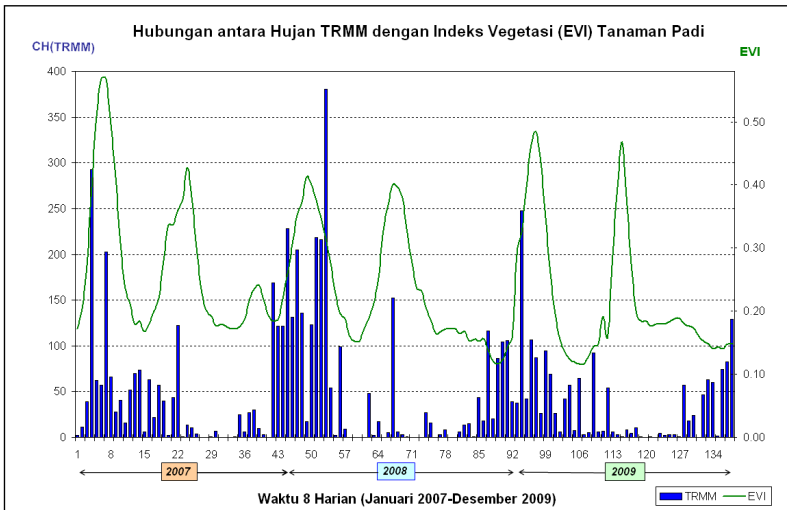
Gambar 85. CCA antara anomali SST Pasifik bulan Januari dan anomali curah hujan Indonesia bulan Februari

Hubungan Antara Fase Pertumbuhan dengan Curah Hujan

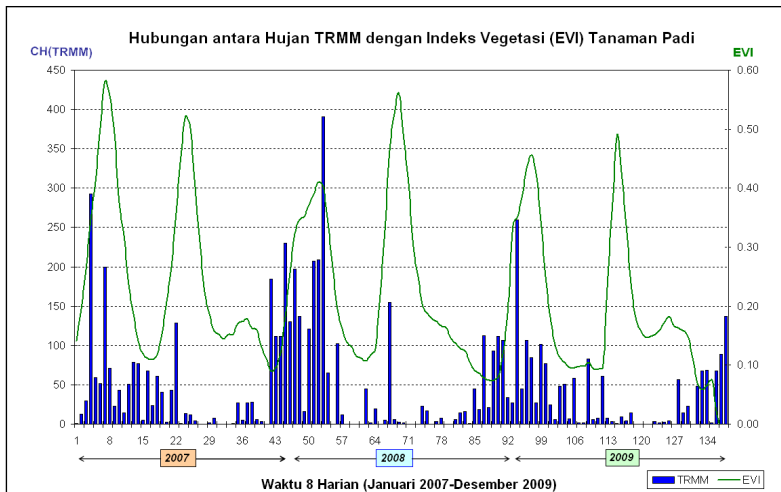
Faktor ketersediaan air menentukan pertumbuhan tanaman. Pada masa awal pertumbuhannya hingga mencapai fase pertumbuhan vegetatif maksimum (sekitar 55 – 60 HST) tanaman padi membutuhkan air. Untuk lahan sawah irigasi dengan kondisi pengairan yang cukup optimal, pasokan air tambahan dari hujan tidak begitu berpengaruh. Faktor curah hujan sangat berpengaruh pada lahan-lahan sawah tadah hujan atau lahan sawah irigasi yang mengalami cekaman air pada musim kemarau (umumnya pada periode Mei-Agustus). Untuk melihat hubungan antara curah hujan dengan fase pertumbuhan tanaman padi, maka dapat dilihat berdasarkan plot data hujan TRMM dengan EVI Multitemporal pada lahan sawah irigasi di Kabupaten Indramayu. Hasil ekstraksi data TRMM dan EVI 8 harian, pada setiap kelas sawah di Indramayu, Cilacap, dan Lamongan dapat dilihat pada Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-21.



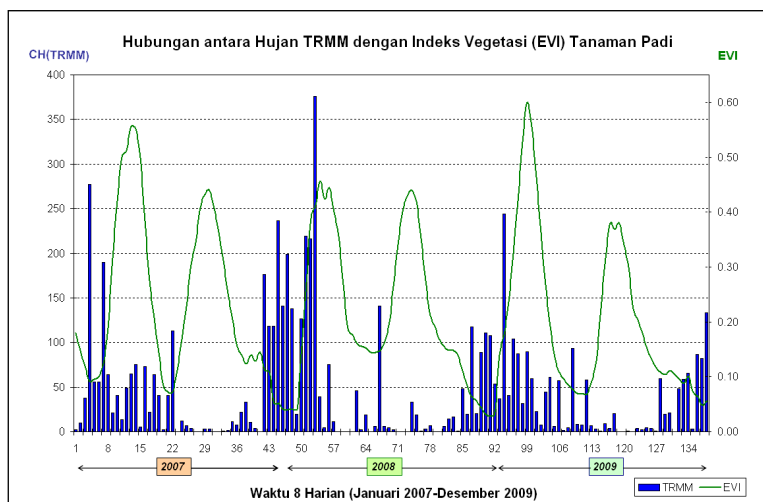
Gambar 86. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.45-0.50



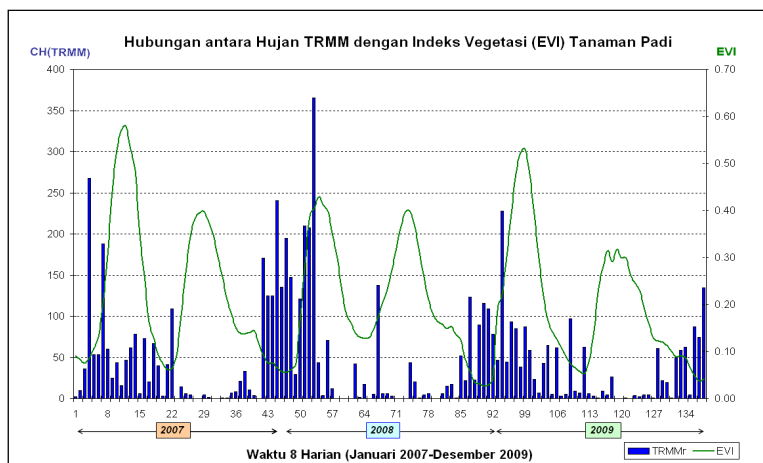
Gambar 87. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.50-0.55



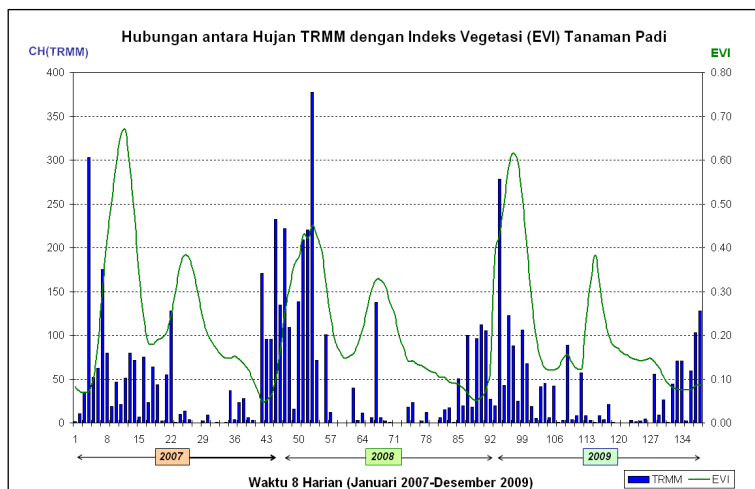
Gambar 88. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.55-0.60



Gambar 89. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.60-0.65



Gambar 90. Hubungan antaa Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max 0.65-0.70



Gambar 91. Hubungan antara Fluktuasi Hujan TRMM dengan EVI padi pada Lahan Sawah yang memiliki EVI Max > 0.70

Berdasarkan Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-21 menunjukkan bahwa :

Profil EVI mendahului curah hujan. Artinya fluktuasi curah hujan tampak lebih lambat dari EVI tanaman padi. Kondisi aktual di lapangan menunjukkan terjadinya keterlambatan tanam padi. Pasokan air dari curah hujan tidak dimanfaatkan secara optimal untuk kebutuhn pertumbuhan tanaman padi.

Fluktuasi curah hujan dengan dengan delay hingga 1 bulan mengikuti pertumbuhan padi pada musim tanam pada delapan harian 34 – 62 atau Oktober – Maret. Peningkatan curah hujan diikuti dengan kenaikan EVI, atau sebaliknya.

Fluktuasi curah hujan tidak mengikuti pertumbuhan tanaman padi pada musim tanam pada delapan harian April - September. Walaupun curah hujan menurun, tetapi EVI tetap meningkat. Pertumbuhan tanaman tetap berlangsung karena adanya pasokan air dari pengairan irigasi.

Tanaman padi pada awal pertumbuhan hingga umur 30 hari memerlukan air yang cukup sekitar 50 mm/ minggu, maka untuk menentukan korelasi antara hujan dengan EVI dipilih saat lahan sawah sudah didominasi oleh tanaman padi, yaitu setelah 15 hari.

Penutup

Hasil analisis spasial dan regresi terhadap data di daerah pantura Jawa Barat yang meliputi Karawang-Subang-Indramayu, Cilacap dan Lamongan diperoleh 6 model pertumbuhan untuk tanaman padi yang memiliki nilai kisaran EVI maksimum 0.46-0.50; 0.51-0.55; 0.56-0.60; 0.61-0.65; 0.66-0.70, dan > 0.7 untuk setiap fase vegetatif dan generatif.

Tingkat korelasi (CCA) antara anomali SST Pasifik Tropik dan anomali TRMM Indonesia bervariasi menurut musim, dimana pada periode JJA (Juni, Juli, Agustus) memiliki akurasi yang tinggi ($r > 0.8$), sedangkan pada periode MAM (Maret, April, Mei) memiliki akurasi yang rendah ($r < 0.6$).

Fluktuasi curah hujan dengan delay hingga 1 bulan di pulau Jawa mengikuti pertumbuhan padi pada musim tanam Oktober – Maret. Peningkatan curah hujan diikuti dengan kenaikan EVI, atau sebaliknya. Sebaliknya pada April – September menunjukkan tetap adanya peningkatan nilai EVI, walaupun curah hujan menurun, karena pasokan air diperoleh dari pengairan irigasi.

Saran

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menduga produktivitas tanaman padi dengan menggunakan kombinasi air tersedia dari curah hujan dan air irigasi dan indek vegetasi (EVI).

DAFTAR BACAAN

- Aldrian E, and Susanto RD. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their Relationship to sea surface temperature, *Intl. J. Climatol.*, 23, 1435-1452.
- Ditjen Sumberdaya Air. 2006. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor : 13 /Prt/M/2006. Tentang Organisasi Dan Tata Kerja Balai Wilayah Sungai.
- Falcon, W. P., R. L. Naylor, W. L. Smith, M. B. Burke, E. B. McCullough, 2004: Using climate models to improve Indonesian food security. *Bull Indonesian Econ Studies*, 40, 357-79.
- Fontana, D.C, et all. 2007. Assessing the Relationship Between shire Winter Crop Yield and Seasonal Variability of the MODIS NDVI and EVI images. *Applied GIS : an international, refereed, open source journal*. Vol 3, No 7, p 1-16. Australia.
- Haylock M, and McBride J. 2001. Spatial coherence and predictability of Indonesian wet season rainfall, *J. Climate*, 14, 3882-3887.
- Hendon HH. 2003. Indonesian rainfall variability: impacts of ENSO and local air-sea `interaction, *J. Climate*, 16, 1775-1790.
- Huete AR, Liu HQ, Batchily K dan Van Leeuwen W. 1997. A Comparisons of Vegetation Indices Global Set of TM Images for EOS MODIS. *Remote Sensing of Environtment* 59 : 440 - 451.

- Ichikawa H. and T. Yasunari, 2006: Time–Space Characteristics of Diurnal Rainfall over Borneo and Surrounding Oceans as Observed by TRMM-PR. *Journal of Climate*: Vol. 19, No. 7, pp. 1238–1260.
- Kogan, F.N., 1990: Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int. J. Remote Sens.* 11 (8), 1405–1419.
- Kogan, F.N., 1995: Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15 (11), 91–100.
- Kogan, F.N., 2002: World droughts in the new millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices. *Eos Trans. Am. Geophy. Union* 83 (48), 562–563.
- Meneghini, R., J. A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto and J. Kwiatkowski, 2004: A Hybrid Surface Reference Technique and Its Application to the TRMM Precipitation Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 21, No. 11, pp. 1645–1658.
- Mori S., H. Jun-Ichi, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakurai, H. Hashiguchi, and T. Sribimawati, 2004: Diurnal Land–Sea Rainfall Peak Migration over Sumatera Island, Indonesian Maritime Continent, Observed by TRMM Satellite and Intensive Rawinsonde Soundings. *Monthly Weather Review*: Vol. 132, No. 8, pp. 2021–2039.
- Nicholls, N.: 1989, Sea surface temperatures and Australian winter rainfall. *J. Climate*, 2, 965–973.
- Naylor, R. L., W. P. Falcon, D. Rochberg, and N. Wada, 2001: Using El Niño/Southern Oscillation climate data to predict rice production in Indonesia, *Climatic Change*, 50, 255–65.

- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and C.-L. Shie, 2007: Spectral Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM PR Data. Part II: Algorithm Improvement and Heating Estimates over Tropical Ocean Regions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(7), 1098-1124
- Trenberth, K. E., 1997: The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771-2777.
- Wolff, D. B., D. A. Marks, E. Amitai, D. S. Silberstein, B. L. Fisher, A. Tokay, J. Wang and J. L. Pippitt, 2005: Ground Validation for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 22, No. 4, pp. 365–380.
- Xiao, Xiangming dkk. 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* 95 (2005) 480–492. *Science Direct*.

BAGIAN IV. TEKNOLOGI

BAB 1.

HUBUNGAN ANOMALI CURAH HUJAN DENGAN ENSO MODOKI INDEKS (EMI) PADA KONDISI EL-NINO DAN LA-NINA UNTUK MENDUKUNG PENGEMBANGAN MODEL PREDIKSI CURAH HUJAN DI INDONESIA

Woro Estiningtyas, Aris Pramudia dan Dariin Firda

Pendahuluan

Mengetahui gambaran kondisi curah hujan beberapa waktu ke depan sangat penting agar dapat dilakukan antisipasi seandainya diketahui bahwa curah hujan sangat kurang ataupun sangat berlebih. Kedua kondisi ini bisa berdampak berupa banjir dan kekeringan. Oleh karena itu hingga saat ini telah banyak dikembangkan berbagai model prediksi curah hujan dengan tujuan dan kepentingan yang berbeda-beda. Semua mengarah pada keinginan untuk meningkatkan akurasi yang lebih baik dan menekan risiko akibat dampak perubahan iklim dan kejadian iklim ekstrim.

Curah hujan merupakan salah satu parameter iklim yang paling erat hubungannya dengan tanaman. Fluktuasi dan besaran

curah hujan serta sebaran dan distribusinya sangat berpengaruh terhadap jenis komoditas pertanian yang dikembangkan. Di wilayah dengan sebaran bulan basah lebih dari 7-9 bulan pada umumnya dapat dilakukan penanaman padi 2 kali dan bisa menjadi 3 kali apabila didukung dengan pengaturan air melalui irigasi. Sebaliknya wilayah dengan curah hujan sangat rendah dan tersebar hanya 3-4 bulan hanya bisa tanam padi 1 kali dengan produksi yang kurang optimal apabila hanya mengandalkan curah hujan. Oleh karena itu gambaran pola dan besaran serta distribusi curah hujan beberapa waktu ke depan sangat diperlukan.

Indeks global yang merepresentasikan kondisi dan proses massa uap air yang terjadi di atmosfer memiliki hubungan yang kuat dengan kejadian hujan di suatu wilayah dengan jeda waktu (time lag) yang berbeda-beda. Hubungan ini dapat diketahui dengan melakukan analisis korelasi dan signifikansinya apakah berkorelasi kuat dan nyata (signifikan) atau tidak. Indeks global yang berkorelasi kuat dan nyata menunjukkan bahwa curah hujan di wilayah tersebut sangat dipengaruhi oleh pola dan besaran indeks global. Artinya indeks global tersebut dapat digunakan sebagai indikator untuk mengetahui pola dan sebaran curah hujan, dengan kata lain indeks global tersebut dapat digunakan sebagai prediktor curah hujan. Adanya hubungan yang erat antara curah hujan dengan indeks global menjadi dasar utama untuk melakukan penelitian dan kajian tentang pola hubungan serta sejauh mana keeratan antara kedua parameter tersebut.

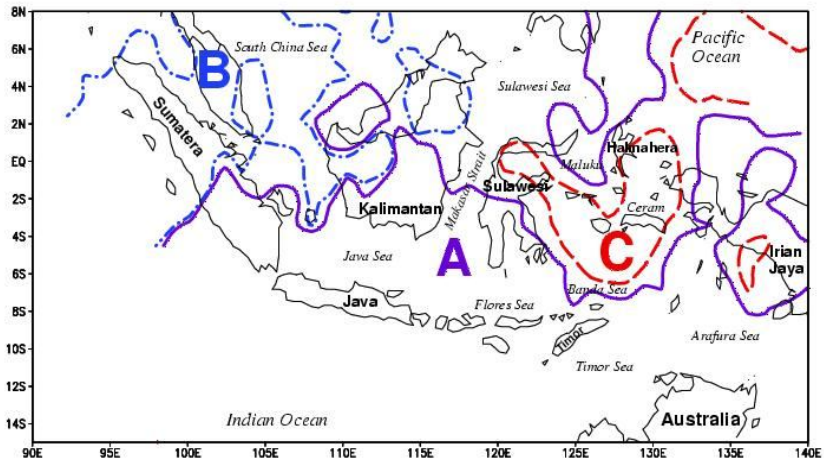
Salah satu indeks global yang berkorelasi kuat dan signifikan terhadap curah hujan di beberapa wilayah di Indonesia adalah ENSO Modoki Indeks (EMI). Berdasarkan hasil penelitian Estiningtyas et al. (2018) indeks EMI paling banyak tersebar (31%) dengan korelasi kuat dan signifikan di wilayah kunci (Key Area) di beberapa lokasi di Indonesia. Tulisan ini membahas tentang hasil korelasi dan signifikansi antara anomali curah hujan dengan indeks EMI dan implikasinya untuk pengembangan model

prediksi curah hujan di Indonesia yang merupakan bagian dari hasil penelitian DIPA Balitklimat tahun 2018.

Karakteristik Curah Hujan di Indonesia

Indonesia terletak di wilayah yang dilewati oleh garis ekuator. Oleh karena itu dalam kondisi normal, wilayah Indonesia mendapatkan curah hujan yang lebih besar dibandingkan dengan wilayah lain yang tidak berada di daerah ekuator. Semakin jauh dari ekuator jumlah curah hujan semakin menurun dan mencapai minimum di daerah kutub. Curah hujan yang melimpah terjadi di sepanjang wilayah konvergensi ekuator atau pita Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ). Curah hujan yang besar terjadi di wilayah udara naik yang merupakan daerah tekanan rendah, sebaliknya di wilayah udara turun seperti di daerah subtropik memiliki curah hujan yang jumlahnya jauh lebih kecil.

Selain dipengaruhi oleh posisi ITCZ, curah hujan di Indonesia juga dipengaruhi oleh sirkulasi monsun maupun keadaan lokal. Secara garis besar curah hujan di Indonesia dibagi menjadi 3 tipe hujan, yaitu : A (monsunal), B (ekuatorial) dan C (lokal) (Gambar II.4). Tipe curah hujan ini sangat berperan untuk mengetahui pengaruh anomali iklim khususnya El Niño terhadap musim di Indonesia.



Gambar 92. Tipe hujan di Indonesia (Sumber : Aldrian dan Susanto, 2003)

Tipe Hujan Monsunal

Memiliki 1 puncak dan 1 lembah, dipengaruhi oleh monsun Barat Laut yang bersifat basah (Nopember-Maret), dan monsun Tenggara yang bersifat kering (Mei-September). Karakteristik pola curah hujan ini adalah distribusi hujannya berbentuk “V” dengan jumlah curah hujan musiman pada bulan Juni, Juli atau Agustus. Saat monsun barat jumlah curah hujan berlimpah, sebaliknya saat monsun timur jumlah curah hujan sangat sedikit. Hal ini disebabkan pada monsun barat gerakan massa udara melewati permukaan laut pada jarak yang cukup jauh sehingga mengandung cukup banyak uap air. Sementara pada monsun timur gerakan massa udara melewati permukaan laut pada jarak yang relatif pendek. Dua mekanisme penting penggerak monsun menurut Webster (1986) adalah : 1) perbedaan pemanasan daratan dan lautan serta gradien tekanan yang dihasilkan yang menggerakkan angin dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, dan 2) perubahan arah angin akibat rotasi bumi.

Di Indonesia daerah yang mempunyai curah hujan tipe monsun cukup luas, meliputi wilayah Sumatera bagian selatan, pulau Jawa sampai dengan Nusa Tenggara Timur, sebagian Papua bagian selatan, sebagian kecil Kalimantan bagian selatan, Sulawesi Selatan dan Tenggara, serta sebagian kecil wilayah Sulawesi Utara, Maluku bagian utara dan Irian bagian utara.

Pola curah hujan tipe monsun digerakkan oleh sel tekanan tinggi dan sel tekanan rendah di benua Asia dan Australia secara bergantian. Musim dingin di daratan Asia yang terjadi pada bulan Desember, Januari dan Pebruari menimbulkan sel tekanan tinggi di Asia. Sedangkan di benua Australia berlangsung musim panas yang menyebabkan terjadinya sel tekanan rendah. Kondisi demikian menyebabkan terjadinya gerakan massa udara dari benua Asia menuju Australia yang dikenal sebagai monsun barat. Kondisi sebaliknya terjadi pada bulan Juni, Juli, Agustus yang dikenal sebagai monsun timur atau tenggara.

Tipe Hujan Ekuatorial

Memiliki 2 puncak, yaitu Oktober-Nopember dan Maret-Mei. Dua puncak tersebut berhubungan dengan pergerakan ITCZ. Pola curah hujan tipe ekuatorial dicirikan oleh distribusi curah hujan bulanan yang mempunyai dua nilai maksimum yang terjadi setelah ekinoks (pada bulan Maret dan Oktober). Terjadi pada tempat-tempat yang dilalui garis ekuator, seperti di Pontianak. Jumlah curah hujan maksimum terjadi setelah ekinoks. Pola curah hujan ekuatorial secara dominan dipengaruhi oleh konvergensi intertropik, sehingga pengaruh monsun kurang tegas dibandingkan pengaruh insolasi matahari pada waktu ekinoks.

Tipe Hujan Lokal

Memiliki 1 puncak pada Juni-Juli dan 1 lembah pada Nopember-Februari. Puncak curah hujan pada Juni-Juli sekitar 300 mm/bulan. Pola hujan tipe lokal mempunyai ciri distribusi curah hujan bulanannya merupakan kebalikan dari tipe monsun. Di Indonesia pola hujan jenis ini sangat sedikit, contohnya daerah Ambon dan Sulawesi Selatan.

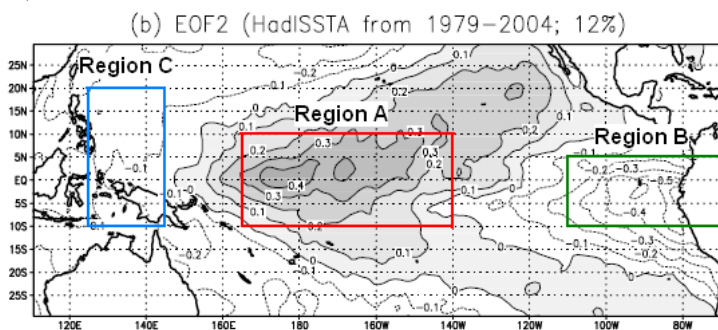
Kondisi geografis wilayah Indonesia yang sangat spesifik akan mempengaruhi pola curah hujan yang terjadi. Wilayah Indonesia yang merupakan kontinen maritim dengan pulau-pulau yang mempunyai kondisi topografi sangat beragam menyebabkan timbulnya pola curah hujan yang sama sekali berbeda dengan dua pola curah hujan sebelumnya. Gunung-gunung atau pegunungan yang terdapat di suatu pulau akan mempengaruhi pola curah hujan yang terjadi di sekitarnya. Faktor orografi ini dapat memperlemah atau bahkan meniadakan pengaruh monsun sehingga ada tempat-tempat dimana pada saat berlangsung monsun timur yang pada umumnya mengalami kekeringan, tetapi justru terjadi banyak hujan.

Pemanasan yang tidak sama antara daratan dan lautan juga menjadi penyebab munculnya pengaruh lokal ini seperti yang terjadi di Jepara dimana terjadi curah hujan yang cukup besar. Menurut Bayong (1992), fenomena ini disebabkan semakin menguatnya monsun oleh angin laut yang lembab serta didukung oleh kondisi topografi yaitu terdapatnya gunung Muria yang membantu mempercepat proses terjadinya hujan. Dengan mengetahui tipe hujan di setiap wilayah, maka dapat dipelajari pola-pola hubungan curah hujan dengan indikator anomali iklim seperti SST.

ENSO MODOKI INDEKS (EMI)

Ashok dkk. (2007) mendefinisikan ENSO Modoki Index (EMI) dengan persamaan $EMI = [ASPL]A - 0,5 [ASPL]B - 0,5 [ASPL]C$ dimana nilai ASML merupakan rata-rata dari tiga wilayah yaitu tengah (A: 10° LU–10° LS 165° BT–140° BB), timur (B: 5° LU–15° LS, 110°–70° BB), dan barat (C: 20° LU–1° LS, 125°–145° BT) Samudera Pasifik (Gambar 2). Kategori El Niño Modoki adalah apabila amplitudo dari indeks tersebut $\geq 0.7 \sigma$, dimana σ adalah standar deviasi musiman.

Adanya hubungan yang erat antara curah hujan dengan EMI telah dinyatakan dalam berbagai hasil penelitian di beberapa negara (W. Cai and T. Cowan. 2009; Juan Feng and Jianping Li. 2011; R Hidayat, et al. 2017; Anna Maria Kusumaningayu et al. 2016; Samir Cordoba-Machado et al. 2015; B. Preethi et al. 2015; J. V. Ratnam et al. 2014; Chunzai Wang and Xin Wang. 2012, Hengyi Weng, et al. 2007; Hengyi Weng et al. 2009; Qjang Zhang et al. 2015).



Gambar 93. Wilayah yang digunakan untuk menghitung EMI (sumber: <http://www.jamstec.go.jp/frcgc/>).

Berdasarkan hasil penelitian Key Area Keragaman Iklim Indonesia (Estiningtyas et al. 2018) diperoleh bahwa indeks global

EMI memiliki korelasi yang kuat dan signifikan dan paling banyak tersebar di wilayah kunci keragaman Indonesia (31%) dibandingkan dengan indeks global lainnya seperti indeks Nino 3 dan ONI (16%), Nino 3.4 (14%), MEI dan Nino 4 (6%), Nino 1,2 (5%), JMASST (4%), SOI (2%) dan OLR (1%). Pengaruh indeks global terhadap curah hujan beragam antara wilayah di Indonesia.

Hasil penelitian Hidayat et al. (2017) tentang pengaruh La Niña dan La Niña Modoki di Indonesia menunjukkan bahwa indeks Nino 3.4 sangat berkorelasi ($r = -0,95$) dengan curah hujan Indonesia. Anomali curah hujan positif hingga 200 mm / bulan terjadi sebagian besar di wilayah Indonesia selama acara La Niña, tetapi di DJF beberapa daerah di Sumatera, Kalimantan dan Indonesia bagian timur cenderung memiliki curah hujan negatif. Selama La Niña Modoki, anomali curah hujan positif (hingga 50 mm / bulan) terjadi di Pulau Sumatera, Kalimantan, Jawa, dan Indonesia timur pada periode Desember-Januari-Februari (DJF) dan hingga 175 mm / bulan hanya terjadi di Pulau Jawa pada musim Maret-April-Mei (MAM). La Niña memiliki SST pendingin yang kuat di Pasifik khatulistiwa tengah dan timur ($-1,5^{\circ}\text{C}$) di DJF. Sementara pemanasan akibat La Niña Modoki terjadi di Pasifik khatulistiwa barat dan timur ($0,75^{\circ}\text{C}$) dan pendinginan SST di Pasifik tengah ($-0,75^{\circ}\text{C}$) di DJF dan MAM. Sirkulasi Walker pada saat La Niña Modoki (pada DJF dan MAM) menunjukkan konvergensi yang kuat di Pasifik timur, dan konvergensi yang lemah di Pasifik Barat (Indonesia). Sementara pengaruh El Niño Modoki terhadap curah hujan dikaji oleh Kusumaningayu et al. (2016) di wilayah Papua. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa anomali SST El Niño Modoki menyebabkan perbedaan anomali curah hujan di Papua secara spasial dan temporal. Pada periode DJF, pengurangan curah hujan terjadi di Papua dengan maksimum terjadi di wilayah Papua selatan. Selama MAM, ada peningkatan curah hujan di wilayah Papua selatan dan sebaliknya di wilayah Papua utara. Selama JJA, pengurangan curah hujan terjadi di Papua dengan maksimum di

Papua utara. Selama SON, ada pengurangan curah hujan di Papua dengan magnitudo lebih kecil dari di JJA dan peningkatan curah hujan di wilayah Papua tengah kecil. Anomali curah hujan di semua musim hingga 50% dari varians curah hujan Papua (signifikan). Pengurangan curah hujan terjadi di wilayah Papua utara dan peningkatan curah hujan di wilayah Papua selatan selama peristiwa El Niño Modoki.

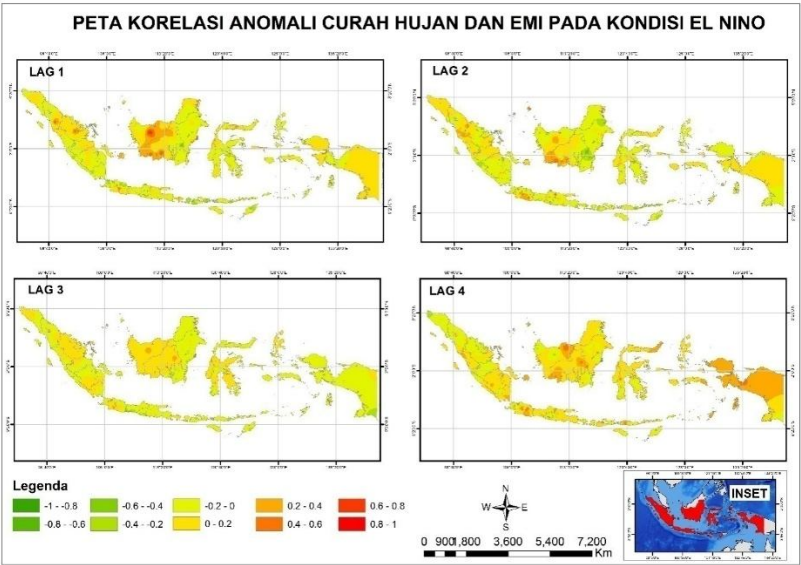
Korelasi Antara Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño dan La Niña

Analisis korelasi dilakukan terhadap data anomali curah hujan dari 621 stasiun hujan di Indonesia dengan periode data bulanan lebih dari 20 tahun. Gambar 3 menunjukkan sebaran tingkat korelasi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi El Niño pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4. Lag adalah perbedaan waktu antara fenomena global (yang direpresentasikan melalui indeks) dengan kejadian curah hujannya. Lag 1 artinya fenomena EMI 1 bulan yang lalu berpengaruh terhadap curah hujan bulan ini, sedangkan lag 2 artinya fenomena EMI 2 bulan yang lalu berpengaruh terhadap curah hujan bulan ini dan seterusnya hingga lag 4. Untuk mengetahui sebaran stasiun dengan tingkat korelasi yang sangat tinggi, maka dilakukan sortasi untuk mendapat nilai korelasi yang lebih dari 0,6 baik positif maupun negatif.

Berdasarkan hasil pengolahan korelasi anomali curah hujan dan EMI diperoleh nilai korelasi tertinggi sebesar -0.743 pada lag 1 di Stasiun Mataram Kediri, Kabupaten Lombok Barat, Provinsi NTB. Selain itu beberapa lokasi yang memiliki nilai korelasi tinggi negatif pada lag 1 antara lain Subang, Karanganyar, Cluwak, Cadasari dan Narmada (Tabel 1). total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi negatif tersebut berjumlah 6 atau 1.0 % dari total 621 stasiun hujan.

Tabel 27. Korelasi Tinggi (Negatif) Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 1

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI R
-0.8--0.6	JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.698
-0.8--0.6	JAWA BARAT	Subang	Karanganyar	-0.694
-0.8--0.6	JAWA TENGAH	Pati	Sta. Cluwak	-0.624
-0.8--0.6	BANTEN	Pandeglang	Cadasari	-0.655
-0.8--0.6	NTB	Lombok Barat	Mataram Kediri	-0.743
-0.8--0.6	NTB	Lombok Barat	Narmada	-0.614



Gambar 3. Peta Korelasi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi El Niño

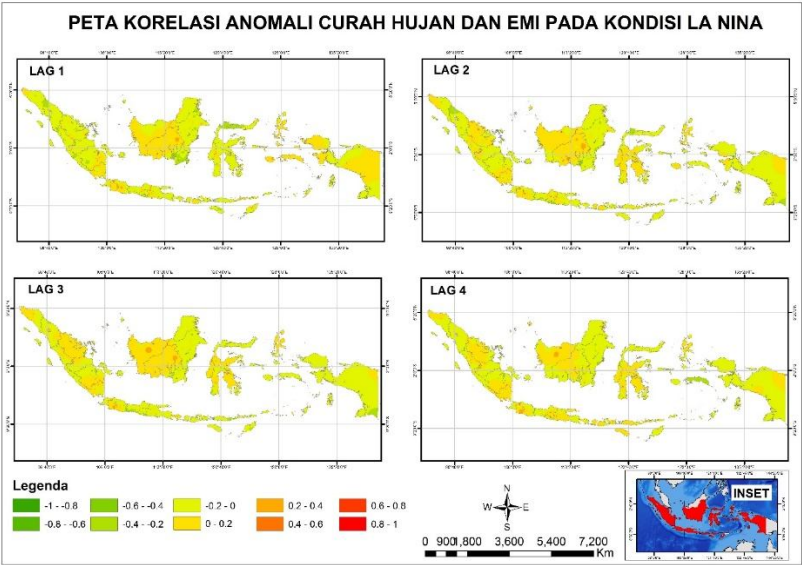
Untuk nilai korelasi positif, diperoleh nilai tertinggi sebesar 0.784 di stasiun Jatiwangi, Kabupaten Majalengka, Provinsi Jawa Barat pada lag 4. Selain itu korelasi tinggi positif diperoleh di Stasiun Cicalengka, Leles, Juntinyuat, Karang Kemiri, Sebulu dan Pongtiku. Dominasi korelasi tinggi positif terletak di Provinsi Jawa Barat, yaitu Kabupaten Bandung nilai r 0.743, Garut nilai r 0.608, Indramayu nilai r 0.619, dan Majalengka dengan nilai r 0.784 (Tabel 2). Total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi positif tersebut berjumlah 7 atau 1.1 % dari total 621 stasiun.

Tabel 2. Korelasi Tinggi (positif) Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 4

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI R
0.6-0.8	JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0.743
0.6-0.8	JAWA BARAT	Garut	Leles	0.608
0.6-0.8	JAWA BARAT	Indramayu	Juntinyuat	0.619
0.6-0.8	JAWA BARAT	Majalengka	Jatiwangi	0.784
0.6-0.8	JATENG	Purworejo	Kar. Kemiri	0.689
0.6-0.8	KALTIM	Kutai Kartanegara	Sebulu	0.636
0.6-0.8	SULSEL	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.626

Pada kondisi La Niña, secara spasial pada lag 1 sampai dengan lag 4 nilai korelasi positif didominasi antara 0 hingga 0.2 dan korelasi negatif antara -0.4 hingga -0.2. Wilayah yang memiliki korelasi tertinggi negatif berada pada lag 1 yang masuk ke dalam kelas korelasi -0.6 s/d -0.4, yaitu Kabupaten Kutai provinsi Kalimantan Timur tepatnya stasiun Teluk Dalam dengan nilai r -0.489 selain itu wilayah lain memiliki nilai r -0.445 yaitu Kemangkong-Purbalingga-Jawa Tengah dan BMKG Barambai-Barito Kuala-Kalimantan Selatan. Stasiun lainnya dengan korelasi negatif cukup tinggi adalah Simpang, Grabag dan Tanah Merah.

Total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi negatif tersebut berjumlah 6 atau 1.0 % dari total 621 stasiun hujan. Sedangkan untuk korelasi tertinggi positif berada pada lag 2 yaitu kabupaten Sumbawa Provinsi Nusa Tenggara Barat stasiun Uthan Rhee dengan nilai r 0.452 yang masuk ke dalam kelas korelasi 0.4 s/d 0.6. Secara rinci dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Jadi total stasiun yang memiliki korelasi tertinggi positif tersebut hanya berjumlah 1 atau 0.2 % dari total 621 stasiun hujan. Sebaran korelasi pada kondisi La Niña disajikan dalam Gambar 4.



Gambar 94. Peta Korelasi antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña

Tabel 28. Korelasi (Negatif) Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1

KELAS KORELASI	PROVINSI	KABUPATEN	STASIUN	NILAI IR
-0.6--0.4	SUMATERA BARAT	Padang Pariaman	Simpang	-0.45
-0.6--0.4	JAWA TENGAH	Purbalingga	Sta Kemangkong	-0.445
-0.6--0.4	JAWA TENGAH	Purworejo	Sta Grabag	-0.412
-0.6--0.4	KALIMANTAN SELATAN	Barito Kuala	BMKG Barambai	-0.445
-0.6--0.4	KALIMANTAN TIMUR	Samarinda	Stasiun Tanah Merah	-0.425
-0.6--0.4	KALIMANTAN TIMUR	Kutai	Stasiun Teluk Dalam	-0.489

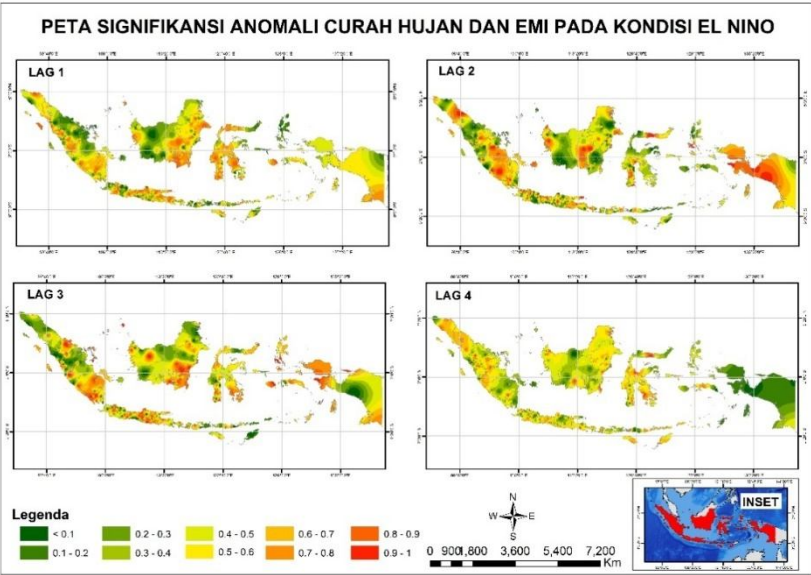
Signifikansi antara Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño dan La Niña

Signifikansi digunakan dalam analisis dalam rangka untuk mengetahui taraf kepercayaan apakah nyata atau tidak. Taraf nyata yang digunakan dalam analisis ini sebesar 90% atau $p=0,1$. Hasil dikatakan nyata apabila nilai $p<0,1$. Gambar 5 menunjukkan sebaran tingkat signifikansi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi El Niño pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4.

Berdasarkan hasil pengolahan signifikansi antara anomali curah hujan dengan EMI pada kondisi El Niño diperoleh bahwa sebaran hasil yang signifikan dominan terjadi pada lag 4. Nilai p yang sangat signifikan ditandai dengan nilai $p=0$. Nilai p tersebut tersebar di 2 lokasi yakni Cicalengka (Prov. Jawa Barat) dan Sebulu (Prov. Kalimantan Timur). Sedangkan nilai signifikansi lainnya yang masuk kedalam kelas <0.1 tersebar di 70 lokasi di Indonesia. Jadi total lokasi yang memiliki signifikansi <0.1 di lag 1 tersebar di 70 lokasi atau 11.3 % dari total 621 stasiun hujan (Tabel 4).

Tabel 29. Signifikansi sangat kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi El Niño Lag 4

Kelas Signifikansi	Provinsi	Kabupaten	Stasiun	Nilai p
<0.1	JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0
<0.1	KALIMANTAN TIMUR	Kutai Kartanegara	Sebulu	0



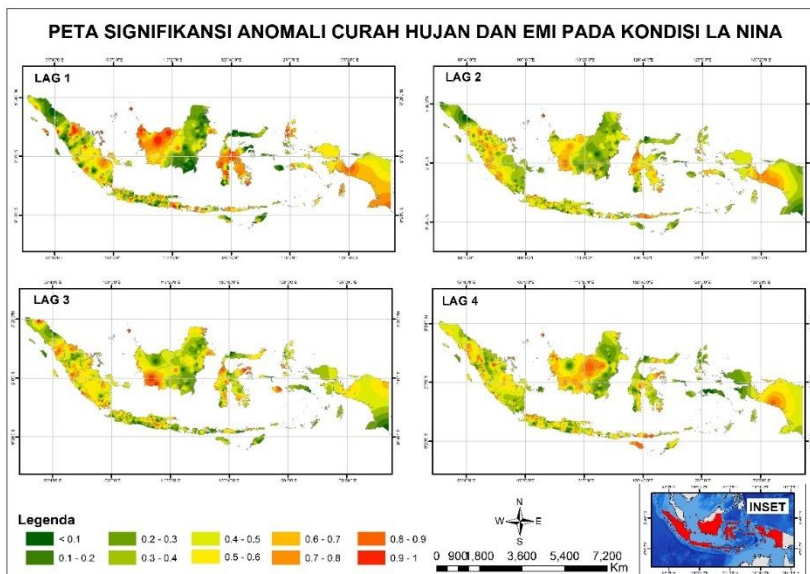
Gambar 95. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi El Niño

Pada kondisi La Niña Gambar 6 menunjukkan sebaran tingkat signifikansi antara indikator global (EMI) dengan anomali curah hujan di seluruh Indonesia pada kondisi La Niña pada lag 1, lag 2, lag 3 dan lag 4. Berdasarkan hasil analisis, sebaran nilai yang signifikan banyak terdapat di lag 4. Nilai p yang sangat signifikan

($p=0$) tersebar di 4 lokasi yakni Stasiun Simpang-Kabupaten Padang Pariaman-Provinsi Sumatera Barat, BMKG Barambai-Kabupaten Barito Kuala-Provinsi Kalimantan Selatan, Stasiun Teluk Dalam-Kabupaten Kutai- Provinsi Kalimantan dan Stasiun Grabag-Kabupaten Purworejo-Provinsi Jawa Tengah. Sedangkan nilai signifikansi lainnya yang masuk kedalam kelas <0.1 tersebar di 128 lokasi di Indonesia. Jadi total lokasi yang memiliki signifikansi <0.1 di lag 1 tersebar di 128 lokasi atau 20.6 % dari total 621 stasiun hujan.

Tabel 30. Signifikansi Sangat Kuat antara Anomali Curah Hujan dan EMI pada Kondisi La Niña Lag 1

Kelas Signifikansi	Provinsi	Kabupaten	Stasiun	Nilai p
<0.1	SUMATERA BARAT	Padang Pariaman	Simpang	0
<0.1	JAWA TENGAH	Purworejo	Grabag	0
<0.1	KALIMANTAN SELATAN	Barito Kuala	BMKG Barambai	0
<0.1	KALIMANTAN TIMUR	Kutai	Stasiun Teluk Dalam	0



Gambar 96. Peta Signifikansi Anomali Curah Hujan EMI pada Kondisi La Niña

Penentuan stasiun hujan untuk pengembangan model prediksi iklim berdasarkan indeks global EMI dilakukan dengan mengkombinasikan antara nilai korelasi dan signifikansi dengan kriteria korelasi kuat atau sangat kuat dan signifikan atau sangat signifikan. Berdasarkan kriteria ini dilakukan identifikasi untuk mengetahui sebaran dan prosentasenya. Hasil identifikasi pada kondisi El Niño diperoleh bahwa persentase nilai korelasi yang dominan adalah di kisaran 0,25 sampai dengan 0,5 (kategori cukup) yaitu 29,3% untuk semua lag. Persentase berikutnya adalah untuk kisaran nilai korelasi 0,5 hingga 0,75 (katagori kuat) sebesar 6,8% untuk semua lag, dan untuk kisaran korelasi sangat kuat (0,75 hingga 1) dengan persentase 0,8% untuk semua lag (Tabel 6).

Tabel 31. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi El Niño

Klasifikasi		Jumlah Stasiun										Ket
Korelasi	Signifikansi	Lag 1	%	Lag 2	%	Lag 3	%	Lag 4	%	TOTAL	%	
Sangat Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	1	0.2	3	0.5	0	0.0	1	0.2	5	0.8	dari total 621 Stasiun
Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	10	1.6	6	1.0	10	1.6	16	2.6	42	6.8	
Cukup (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	37	6.0	49	7.9	48	7.7	48	7.7	182	29.3	

Pada kondisi La Niña, prosentase paling tinggi dihasilkan untuk kelas korelasi cukup dan signifikan/sangat signifikan sebesar 39,6% dan tidak dihasilkan untuk kelas korelasi kuat dan sangat kuat (Tabel 7).

Tabel 32. Presentase sebaran hasil korelasi dan signifikansi pada kondisi La Niña

Klasifikasi		Jumlah Stasiun										Ket
Korelasi	Signifikansi	Lag 1	%	Lag 2	%	Lag 3	%	Lag 4	%	TOTAL	%	
Sangat Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	dari total 621 Stasiun
Kuat (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
Cukup (Negatif/Positif)	Sangat Signifikan/Signifikan	76	12.2	67	10.8	62	10.0	41	6.6	246	39.6	

Selanjutnya untuk mengetahui stasiun hujan yang berkorelasi kuat dan signifikan, maka dipilih nilai korelasi yang kuat dan sangat kuat serta signifikan dan sangat signifikan. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa Provinsi Jawa Barat merupakan provinsi dengan jumlah stasiun terbanyak yang memiliki korelasi kuat antara curah hujan dengan EMI. Sementara provinsi lainnya relatif sama (Tabel 8). Sebaran stasiun hujan yang paling banyak adalah di lag 4 yakni di di Jatiwangi (Prov. Jabar), Wonosari (Prov. DIY). Pada korelasi kuat negatif dan signifikan berada di Lemahabang (Prov. Jabar), dan Halim (Prov. DKI Jakarta), korelasi kuat positif dan sangat signifikan yang berada di Provinsi Jawa Barat terdapat 3 lokasi yakni di Cicalengka, Leles, dan Jutinyuat,

lalu di Provinsi Jawa Tengah terdapat 2 lokasi yakni di Kar Kemiri, Banyubiru, lokasi lainnya berada di Pangsuma Putussibau (Prov. Kalbar), Sebulu (Prov. Kaltim), Minahasa Utara (Prov. Sulut), Airmadidid (Prov. Sulut) dan Pongtibu (Prov. Sulawesi Utara). Pada koreasi kuat positif dengan signifikansi dengan signifikansi signifikan berada di 3 lokasi yakni di Jiken (Prov. Jawa Tengah), Ruteng (Prov. NTT), Sepinggan (Prov. Kalimantan Timur). Sementara pada kondisi La Niña tidak dihasilkan stasiun hujan yang memiliki korelasi kuat dan signifikan (yang teridentifikasi adalah yang memiliki korelasi cukup dan signifikan).

Tabel 33. Korelasi dan Signifikansi Anomali Curah Hujan dengan EMI pada Kondisi El Niño

PROVINSI	KABUPATEN	LOKASI	KORELASI	SIGNIFIKANSI	LAC	KLASIFIKASI KEY AREA
SUMATERA UTARA	Padang Sidempuan	Sta. Met. Kls. IV Aek Godang	0.645	0.004	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
	RIAU	Pelalawan	0.520	0.024	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Majalengka	Banjaran	0.775	0.014	3	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.698	0.054	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Karanganyar	-0.694	0.056	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA TENGAH	Pati	Cluwag	-0.624	0.054	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
BANTEN	Pandeglang	Cadasari	-0.655	0.004	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
	NTB	Lombok Barat	-0.740	0.014	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTB	Lombok Barat	Namadis	-0.614	0.059	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
KALIMANTAN BARAT	Pontianak	Sta. Met. Sintang	0.738	0.015	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KALIMANTAN TENGAH	Kotawaringin Timur	Sampit	0.564	0.089	3	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cibuni	0.620	0.056	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cernara	0.606	0.063	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Cianjur	Pacet	0.617	0.058	2	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA BARAT	Subang	Subang	-0.718	0.029	2	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Tasikmalaya	Singaparna	0.773	0.009	2	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
DKI JAKARTA	Jakarta Timur	Halim	-0.672	0.033	2	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Blora	JIKEN	0.816	0.004	2	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
BALI	Klungkung	Dawan	-0.751	0.032	2	Korelasi Sangat Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KALIMANTAN SELATAN	Tabalong	Muara Uya	-0.619	0.056	2	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
SUMATERA BARAT	Lima Puluh	Sulilo	0.548	0	0	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SUMATERA BARAT	Solek	Sukerami	0.567	0.004	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Karawang	Lemahabang	-0.550	0.079	3	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
DKI JAKARTA	Jakarta Timur	Halim	-0.709	0.015	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Purworejo	Kar Kemiri	0.688	0.019	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
BALI	Jembrana	Palasasri	-0.693	0.026	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTT	TTU	Eban	-0.612	0.045	3	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
KALIMANTAN UTARA	Barito Utara	Muara Teweh Tengah	0.618	0.043	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
KALIMANTAN UTARA	Tarakan	Sta. Met. Tarakan	0.539	0.047	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI SELATAN	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.577	0.004	3	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Bandung	Cicalengka	0.743	0.000	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Garut	Leles	0.608	0.036	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Indramayu	Juntinguat	0.610	0.032	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA BARAT	Karawang	Lemahabang	-0.542	0.069	4	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA BARAT	Majalengka	Jatwangi	0.784	0.003	4	Korelasi Sangat Kuat Positif - Sangat Signifikan
DKI JAKARTA	Jakarta Timur	Halim	-0.545	0.064	4	Korelasi Kuat Negatif - Signifikan
JAWA TENGAH	Blora	Iken	0.5	0.098	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
JAWA TENGAH	Purworejo	Kar Kemiri	0.689	0.013	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
JAWA TENGAH	Semarang	Banyubiru	0.579	0.049	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
DIY	Sleman	Wonosar	-0.552	0.018	4	Korelasi Kuat Negatif - Sangat Signifikan
NTT	Manggarai	Ruteng	0.541	0.069	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
KALIMANTAN BARAT	Kapuas Hulu	Sta. Met. Kls. III Pangsuma Putussibau	0.508	0.006	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
KALIMANTAN TIMUR	Balikpapan	Sta. Met. Kls. II Sepinggan	0.54	0.07	4	Korelasi Kuat Positif - Signifikan
KALIMANTAN TIMUR	Kutai Kartanegara	Sebulu	0.636	0	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI UTARA	Minahasa Utara	Sta. Klim. Kelas II Minahasa Utara	0.562	0.023	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI UTARA	Minahasa Utara	Airmadidid	0.562	0.023	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan
SULAWESI SELATAN	Tator	Sta. Met. Kelas IV Pongtiku	0.626	0.001	4	Korelasi Kuat Positif - Sangat Signifikan

Penutup

Fenomena perubahan iklim / kejadian iklim ekstrim terus terjadi dan menimbulkan dampak yang signifikan terutama pada sektor pertanian khususnya sub sektor tanaman pangan. Oleh karena itu perlu dilakukan berbagai upaya dalam rangka meminimalkan dampaknya. Salah satunya dengan mengembangkan model prediksi curah hujan dan dampaknya pada sektor pertanian.

Posisi Indonesia yang diapit dua samudera dan dua benua menjadikan iklim Indonesia sangat kompleks dan dinamis. Namun di sisi lain sebagai negara tropis, Indonesia memiliki kelebihan terkait ketersediaan massa uap air (bahang). Dengan selalu tersedianya bahang (heat) dan air produk pertanian dapat dihasilkan sepanjang tahun. Selain itu keragaman iklim memberi peluang untuk menghasilkan produk yang berbeda ataupun yang sama pada waktu yang berbeda yang akan mendorong perdagangan.

Curah hujan sebagai salah satu parameter iklim yang paling erat hubungannya dengan produksi pertanian memiliki karakteristik dan pola yang terkait dengan fenomena global. Dari berbagai hasil penelitian diketahui bahwa ada keterkaitan antara indeks global dengan curah hujan di Indonesia. Oleh karena itu data dan informasi yang terkait dengan ini sangat penting dan perlu dikembangkan agar dapat diimplementasikan di sektor pertanian.

Indeks global EMI yang sudah teridentifikasi memiliki korelasi kuat dan signifikan pada lag 1-4 dapat digunakan sebagai prediktor curah hujan di wilayah (stasiun hujan) yang memiliki korelasi kuat dan sangat kuat serta signifikan dan sangat signifikan. Dengan demikian dapat dikembangkan model-model prediksi curah hujan yang lebih akurat untuk mendukung monitoring dampak kejadian iklim ekstrim pada sektor pertanian

khususnya pada wilayah-wilayah yang sudah teridentifikasi memiliki korelasi yang kuat dan signifikan.

DAFTAR BACAAN

- Aldrian, E., dan R. D. Susanto, 2003, Identification of Three Dominant Rainfall Regions Within Indonesia and Their Relationship To Sea Surface Temperature, *International Journal Of Climatology*, Int. J. Climatol, 23: 1435-1452. Wiley InterScience.
- Anna Maria Kusumaningayu, Joko Wiratmo and M. Ridho Syahputra. 2016. El Niño Modoki Impacts on Rainfall Anomaly in Papua Indonesia. The 6th International Symposium for Sustainable Humanosphere Humanosphere Science School 2016 Bogor, 15 – 16 November 2016.
- Bayong, Tjasyono, 2000a, Peluang Curah Hujan di Jawa, *Jurnal Teknologi Mineral Volume VII No. 2*. Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Mineral ITB.
- B. Preethi, T.P. Sabin, J.A. Adedoyin and K. Ashok. 2015. Impacts of the ENSO Modoki and other Tropical Indo-Pacific Climate-Drivers on African Rainfall. *Scientific Reports*/5:16653/DOI:10.1038/srep16653.
- Chunzai Wang and Xin Wang. 2012. Classifying El niño Modoki I and II by Different Impacts on Rainfall in Southern China and Typhoon Tracks. *Journal of Climate* Vol. 26.
- Hengyi Weng Æ Karumuri Ashok Æ Swadhin K. Behera Æ Suryachandra A. Rao Æ Toshio Yamagata. 2007. Impacts of recent El niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Clim Dyn* (2007) 29:113–129 DOI 10.1007/s00382-007-0234-0.

- Hengyi Weng Æ Swadhin K. Behera Æ Toshio Yamagata. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El niño Modoki and El niño events. *Clim Dyn* (2009) 32:663–674 DOI 10.1007/s00382-008-0394-6.
- Juan Feng and Jianping Li. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, D13102, doi:10.1029/2010JD015160, 2011
- J. V. Ratnam And S. K. Behera, Y. Masumoto, T. Yamagata. 2014. Remote Effects of El niño and Modoki Events on the Austral Summer Precipitation of Southern Africa. *Journal of Climate* Vol. 27.
- Qiang Zhang, Yue Wang, Vijay P. Singh, Xihui Gu, Dongdong Kong, Mingzhong Xiao. 2015. Impact of ENSO and ENSO Modoki+A regimes on Seasonal Precipitation Variations and Possible Underlying Causes in the Huai River Basin, China. *Journal of Hydrology* 533 (2015) 308-319.
- R Hidayat, MD Juniarti, U Ma'rufah. 2017. Impact of La Niña and La Niña Modoki on Indonesia rainfall variability. *LISAT 2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 149 (2018) 012046 doi :10.1088/1755-1315/149/1/012046
- Samir Cordoba-Machado, Reiner Palomino-Lemus, Sonia Raquel Gamiz-Fortis, Yolanda Castro-Diez, Maria Jesus Esteban-Parra. 2015. Assessing the Impact of El Niño Modoki on Seasonal Precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change* 124 (2015) 41-61.
- Webster, P.J., 1986, *The Elementary Monsoon dalam Monsoons*, Bab 1, Fein, J.S dan Stephens P.L, Editor, John Wiley and Sons, 3-32.

W. Cai and T. Cowan. 2009. La Niña Modoki impacts Australia autumn rainfall variability. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L12805, doi:10.1029/2009GL037885.

BAB 2.

PREDIKSI CURAH HUJAN UNTUK PENGELOLAAN PERTANIAN YANG TAHAN RISIKO IKLIM

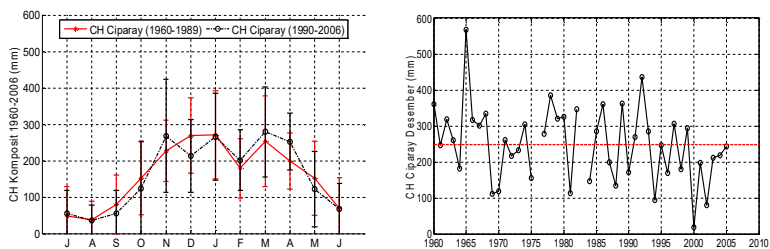
Elza Surmaini dan Elsa Rakhmi Dewi

Pendahuluan

Pertanian dapat dikatakan merupakan sektor yang paling rentan terhadap perubahan iklim global karena iklim adalah faktor yang sangat menentukan keberhasilan suatu kegiatan pertanian. Dampak paling nyata yang dapat dilihat dan dirasakan akibat perubahan iklim antara lain : 1) pergeseran musim dan perubahan pola curah hujan yang akan berakibat pada kekacauan waktu dan musim tanam serta pengaturan pola tanam, 2) peningkatan curah hujan yang berpengaruh terhadap degradasi lahan, kerusakan tanaman dan produktivitas, 3) kekeringan dan banjir yang berpengaruh pada produktivitas, luas tanam dan luas panen.

Sebagai ilustrasi mengenai kemungkinan adanya pergeseran musim yang terjadi dalam dua periode klimatologis (30 tahun-an) terakhir ini dapat dilihat dalam Gambar 1. Dalam gambar tersebut, data pengamatan curah hujan jangka panjang di stasiun Ciparay, Jawa Barat, menunjukkan bahwa selama dasawarsa terakhir ada kecenderungan penurunan curah hujan di bulan Desember, tetapi peningkatan di bulan-bulan November, Maret dan April.

Kecenderungan penurunan jumlah curah hujan bulan Januari terutama terlihat dari tahun 2000 sampai dengan 2005. Pada tahun-tahun sebelumnya, curah hujan Januari terlihat lebih berfluktuasi di sekitar nilai rata-ratanya. Karena Desember merupakan salah satu bulan penting dalam periode musim tanam padi di Indonesia, pergeseran seperti inilah yang mungkin berdampak terhadap kekacauan pengaturan pola tanam dan penentuan musim tanam seperti disebutkan sebelumnya.



Gambar 97. Komposit curah hujan bulanan Juli-Juni dari data pengamatan curah hujan jangka panjang di Ciparay, Jawa Barat (kiri) dan plot data runtut waktu curah hujan Januari dari 1960-2005 di stasiun yang sama (kanan) (Sumber : Hadi *et al.*, 2009)

Kejadian iklim ekstrim yang mengakibatkan banjir dan kekeringan seperti pada padi sawah. Data dari Direktorat Perlindungan Tanaman Pangan, Departemen Pertanian menunjukkan pada periode 1989-2016 menyebutkan luas tanaman padi terkena banjir tertinggi adalah pada bulan Januari 2005 yaitu seluas 134.333 hektar, sedangkan yang puso seluas 85.9270 hektar juga pada bulan Januari tahun 2005. Sementara akibat kekeringan tercatat luas terkena 266.719 ha pada bulan Juli tahun 1991, dan puso tertinggi seluas 85.942 ha pada bulan Juli tahun 2015. Luas tanaman padi terkena kekeringan tertinggi tercatat pada tahun 1991. Luas tersebut lebih tinggi daripada kekeringan yang terjadi pada tahun El Niño dengan intensitas kuat pada tahun 1997/1998

dan 2015/2016. Pada kondisi normal, rata-rata tahunan luas terkena kekeringan adalah 153.406 ha, pada tahun El Nino seluas 511.763 ha, sedangkan pada tahun La Nina lebih rendah yaitu 116.822 ha. Pada kejadian El Nino terjadi peningkatan yang signifikan yaitu sekitar 400 persen (Surmaini dan Susanti, 2016).

Menyikapi berbagai dampak tersebut di atas, maka prediksi curah hujan sudah seharusnya menjadi bagian yang selalu diperhitungkan dalam perencanaan pertanian. Prakiraan iklim di sektor pertanian kini telah menjadi kebutuhan utama, bukan hanya bibit, pupuk, dan pemberantas hama. Informasi itu bahkan menjadi acuan dalam memilih jenis bibit dan waktu tanam serta menetapkan jumlah stok bahan pangan pokok yang harus disediakan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Di sejumlah kabupaten/kota, berbagai kelompok petani kini aktif mengikuti sekolah lapangan iklim. Mereka berharap bisa lebih mudah dan pasti dalam menetapkan varietas serta kalender tanam, sesuai gejala-gejala iklim yang dipelajari. Oleh karena itu, pengembangan model-model prakiraan iklim sangat diperlukan demi meningkatkan kesiapan dalam perencanaan pertanian yang adaptif terhadap perubahan iklim.

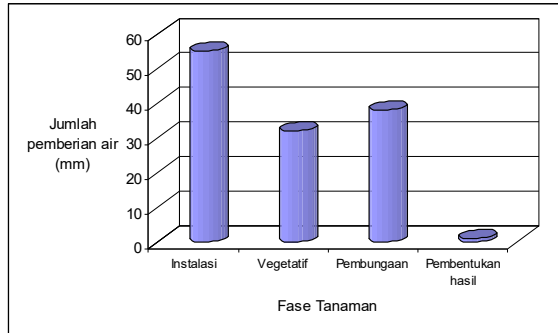
Kebutuhan Prediksi Curah Hujan untuk Pertanian

Pada sektor pertanian, prediksi curah hujan dengan jangka waktu prediksi (*lead time*) ideal selama minimal satu musim ke depan menjadi kebutuhan penting dalam perencanaan kegiatan usahatani. Sedangkan informasi prediksi curah bulanan seperti awal musim hujan, sifat dan jumlah curah hujan, namun kurang detail untuk operasional di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu model prediksi yang dapat memberikan hasil prediksi karakteristik curah hujan prediksi secara kuantitatif.

Dalam kaitannya dengan kegiatan pertanian, aplikasi hasil prediksi curah hujan dapat digunakan untuk : (1) Penentuan pola

tanam, hasil keluaran model yang berupa prakiraan curah hujan dasarian beberapa bulan ke depan dapat digunakan sebagai dasar dalam menyusun perencanaan pola tanam, (2) Potensi irigasi, apabila curah hujan di suatu lokasi tertentu diketahui yang ditunjang dengan ketersediaan pasokan irigasi wilayah tersebut, maka dapat diketahui potensi irigasi wilayah tersebut, (3) Pemilihan komoditas, jumlah curah hujan beberapa bulan ke depan dapat digunakan untuk menentukan jenis komoditas yang dapat ditanam untuk menghindari resiko kehilangan hasil, (4) Pemilihan teknologi budidaya yang akan diterapkan, dan 5) Menetapkan jumlah stok bahan pangan pokok yang harus disediakan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat dan 6) Prediksi curah hujan juga menjadi faktor penting di sektor pengairan atau pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) dalam kaitan dengan sistem peringatan dini ketika terjadi banjir di kawasan permukiman di bagian hilir karena curah hujan yang tinggi (Hadi et al. 2009)

Selain untuk penyusunan skenario masa tanam, hasil prediksi hujan dapat digunakan untuk menghitung potensi irigasi. Model dapat menjawab kondisi curah hujan wilayah tertentu, sehingga apabila curah hujan di suatu lokasi tertentu diketahui yang ditunjang dengan ketersediaan pasokan irigasi wilayah tersebut, maka dapat diketahui potensi irigasi wilayah tersebut. Sebagai contoh kasus Ngale, apabila penanaman tetap dilakukan pada tanggal 30 April 2006, maka konsekuensi harus dilakukan penambahan air pada saat tertentu (Estiningtyas *et al.*, 2005). Pada fase instalasi, vegetatif dan pembungaan diperlukan air yang lebih banyak dibandingkan fase pembentukan hasil, yaitu berturut-turut 55, 32, 38 dan 1 mm atau 44%, 25%, 30% dan 1% dari total air yang harus ditambahkan (Gambar 2). Volume air yang harus ditambahkan dapat dihitung dengan cara mengalikan kebutuhan air pada suatu fase tertentu dengan luas lahan yang digunakan untuk pertanaman tersebut.



Gambar 98. Skenario jumlah pemberian air pada setiap fase tanaman padi di Ngale tanggal tanam 30 April 2006 (Estiningtyas *et al.*, 2005)

State of the Art Prediksi Musim

Berbeda dengan teknologi prediksi cuaca operasional yang berkembang pesat sejak digunakannya model numerik, prediksi iklim pada umumnya masih banyak didasarkan kepada model-model empirik (statistik/stokastik). Model empirik maupun model numerik mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pengembangan model empirik biasanya melibatkan pemilihan parameter yang masih mengandung unsur subjektif sehingga untuk setiap lokasi dan waktu yang berbeda mungkin harus digunakan model dengan parameter yang berbeda pula. Di lain pihak, model numerik yang lebih objektif pada umumnya akan menghasilkan kesalahan yang berkembang semakin besar untuk prediksi yang terlalu jauh ke depan.

Pengembangan beberapa model prediksi empirik menggunakan data curah hujan runut waktu sebelum ini telah dilakukan beberapa peneliti dengan berbagai metoda seperti *fourier regression*, *fractal analysis*, *artificial neural network*, *adaptive spline threshold autoregression* (ASTAR), filter Kalman (Dupe, 1999; Haryanto, 1999; Boer *et al.*, 1999; Boer, *et al.*, 2005 dan Estiningtyas, *et al.*, 2005). Puslitbang BMKG mengembangkan paket prediksi yang menggunakan metoda antara lain : (1)ANFIS (*Adaptive*

Neuro Fuzzy Inference System), (2) Transformasi Wavelet, (3) ARIMA (*Autoregressive moving average*), dan (4) TISEAN (*Non Linear Dynamics/Time Series Analysis*).

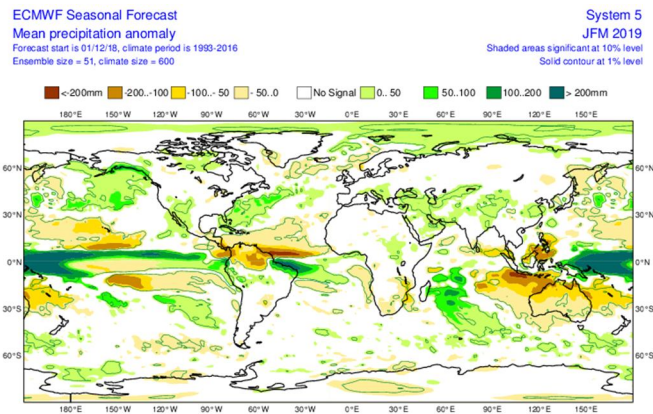
Seperti disinggung sebelumnya, model prediksi empirik cenderung menghasilkan ketelitian yang tidak konsisten karena untuk waktu dan lokasi yang berbeda mungkin diperlukan parameter yang berbeda pula untuk menghasilkan prediksi. Model runut waktu juga biasanya memerlukan data yang cukup panjang dan kontinyu. Jika stasiun pengamatan terbatas, model empirik sulit memberikan gambaran mengenai pola sebaran spasial dari parameter iklim dalam skala yang luas.

Untuk mengantisipasi variasi pola iklim yang semakin dinamis, beberapa pusat prediksi cuaca terkenal di dunia seperti NCEP (AS), ECMWF (Eropa), dan JMA (Jepang), telah mengembangkan prediksi musim (*seasonal*) dengan *lead-time* tiga hingga sembilan bulan ke depan berbasis model numerik. Perkembangan mutakhir menunjukkan bahwa prediksi musim menggunakan metoda *ensemble* yang dikoreksi melalui proses *downscaling* cukup memberikan prospek ketelitian prediksi yang lebih baik. (Palmer *et al.*, 2004).

Terdapat keyakinan yang cukup besar bahwa Global Circulation Model (GCM) juga mampu mengestimasi iklim secara kuantitatif yang dapat dipercaya di masa yang akan datang, terutama pada skala benua atau global (Randall, 2007). Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan GCM adalah terkait dengan resolusi, akurasi dan ketidakpastian. Resolusi keluaran GCM yang kasar menjadi kendala untuk digunakan langsung dalam skala lokal atau DAS. Teknik *downscaling* digunakan untuk menghubungkan keluaran GCM dengan skala global dengan skala lokal. Semua teknik *downscaling* berdasarkan asumsi bahwa keluaran GCM skala luas dapat menggambarkan iklim pada skala hidroklimatologi (Dahm *et al.*, 2016).

Akurasi atau keandalan prediksi sangat diperlukan untuk menyakinkan pengguna. Berbagai teknik statistik dapat

digunakan untuk mengetahui akurasi prediksi. Adapun ketidakpastian tidak dapat dikurangi, tetapi dapat dikuantifikasikan dengan menggunakan teknik ansambel (Surmaini et al. 2018). Contoh hasil prediksi untuk 3 bulan ke depan (Gambar 3) dapat dilihat dari situs internet. Namun demikian, informasi ini agak sulit digunakan untuk aplikasi pertanian seperti diuraikan di atas karena tidak dapat diolah lebih lanjut.



Gambar 99. Contoh produk prediksi anomali curah hujan ansambel Januari-Maret 2019 yang dikeluarkan oleh ECMWF (<http://www.ecmwf.int/>) diakses 16 Desember 2018

Pengolahan Lanjut dan Downscaling Prediksi Musim Ansambel Global

Data keluaran model prediksi *ensemble* global umumnya mempunyai resolusi ruang yang kurang baik karena memiliki ukuran grid antara 1,25° sampai 2,5°. Skala ini jelas tidak memadai untuk berbagai aplikasi. Oleh karena itu, salah satu aspek pengolahan data prediksi *ensemble* yang penting untuk pertanian

adalah *downscaling* yakni proses untuk menghasilkan data prediksi dengan resolusi ruang yang lebih tinggi atau pada lokasi spesifik dari data prediksi skala global.

Ada dua jenis metoda yang dapat digunakan : (a) *Dynamical Downscaling* (DD) dan (b) *Statistical Downscaling*. Metoda DD dilakukan menggunakan model numerik dengan data prediksi global sebagai nilai awal dan nilai batas. Ini cukup sulit dilakukan karena memerlukan sumberdaya komputasi yang besar dan ketersediaan data prediksi global secara tiga-dimensi. Oleh karena itu, metoda SD merupakan alternatif yang menarik untuk dikaji. Kajian yang dilakukan oleh Kang et al. (2007) menunjukkan bahwa SD dapat meningkatkan ketelitian prediksi curah hujan stasiun secara signifikan untuk studi kasus di Filipina dan Thailand.

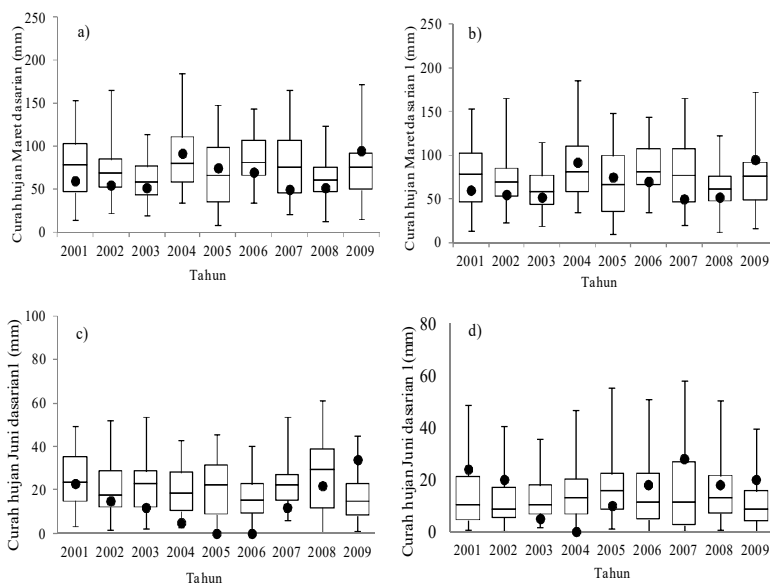
Metode SD untuk wilayah Asia Tenggara juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Juneng et al. (2010) menyatakan bahwa akurasi prediksi curah hujan lokal di wilayah timur laut semenanjung Malaysia dapat ditingkatkan dengan *downscaling* menggunakan metode *Canonical Correlation Analysis* (CCA). Kang et al. (2007) menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) untuk mencari prediktor curah hujan lokal di Filipina dan Thailand dan model regresi linier untuk mencari *men-downscale*. Vimont et al. (2010) menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA), *Maximum Covariance Analysis*, dan CCA untuk memprediksi curah hujan dengan skala propinsi di Indonesia menggunakan prediktor SPL, V 200 hPa dan 850 hPa, dan kelembaban spesifik 850 hPa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil *downscaling* paling akurat di wilayah Jawa, Bali dan Nusa Tenggara pada musim transisi September-Oktober dan cukup akurat pada MK (Mei-Agustus).

Metode SD yang lain adalah metode analog. Penggunaan metode analog dimulai oleh Zorita et al. (1995). Salah satu tujuan dari pengenalan metode ini adalah untuk memperoleh statistik iklim lokal yang konsisten dengan kondisi atmosfer skala luas (Zorita dan von Storch, 1999). Ketika metode ini diterapkan untuk

men-*downscale* prediksi iklim lokal, basis data yang digunakan idealnya harus dapat mencakup seluruh pola atau kondisi atmosfer yang mungkin muncul di masa depan. Oleh karenanya, keberhasilan aplikasi metode ini akan sangat tergantung dari ketersediaan data pengamatan yang cukup panjang.

Metode analog merupakan metode SD yang relatif mudah diaplikasikan. Kelebihan utama metode ini adalah menggunakan pola iklim dari data pengamatan sehingga struktur spasial dari iklim lokal terwakilkan dengan baik pada hasil simulasi. Oleh karena metode ini menganalogikan pola iklim skala lokal dengan pola iklim skala luas, hal penting yang perlu ditentukan adalah variabel iklim skala luas yang terbaik untuk mewakili variabel iklim lokal yang akan di analogikan. Timbal dan McAvaney (2001) mengajukan kriteria prediktor untuk metode analog sebagai berikut: a) secara realistis mampu disimulasikan oleh model sirkulasi global, b) memiliki kemampuan prediksi yang kuat terhadap variabel prediktan, dan c) memiliki keterkaitan fisis.

Surmaini et al. (2015) menggunakan metode *Constructed Analog* untuk *mendownscaling* keluaran prediksi curah hujan *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Sistem Prakiraan Iklim versi 2 (CFSv2)* untuk wilayah Jawa Barat dan Sulawesi Selatan. Gambar 4 menunjukkan bahwa *box plot* prediksi ansambel dan nilai observasinya. Sebagian besar curah hujan observasi berada dalam kisaran prediksi curah hujan ansambel, namun tidak selalu berada di sekitar nilai mediannya. Pada beberapa kejadian, nilai observasi terletak di luar kisaran prediksi ansambel, terutama pada saat curah hujan sangat rendah atau mendekati nilai 0.



Gambar 100. Sebaran dari 30 *member* prediksi curah hujan ansambel pada a) Bulan Maret dasarian 1 di Kecamatan Bunder, Kabupaten Cirebon, b) di Kecamatan Cimalaka, Kabupaten Sumedang, c) Bulan Juni dasarian 1 di Kecamatan Krangkeng, Kabupaten Indramayu dan d) Kecamatan Puturiase, Kabupaten Sidrap.

Prediksi Curah Hujan 1-2 Musim ke Depan untuk Perencanaan Pertanian

Menggunakan metode yang telah dikembangkan oleh Surmaini et al. (2015), Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi bekerjasama dengan ITB mengembangkan prediksi curah hujan operasional yang lebih spesifik untuk dimanfaatkan dalam perencanaan pertanian. Sumber data prediksi musim berbasis harian menggunakan prediksi operasional yang digunakan adalah yang dikeluarkan oleh the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System (CFS) versi 2. CFS dikeluarkan setiap hari sebanyak 4 kali sehari (pukul 0, 6, 12, dan

18) untuk 9 bulan ke depan dengan resolusi $1^\circ \times 1^\circ$ (Saha *et al.* , 2010) NCEP CFS versi 2 yang dapat diakses melalui <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data/cfsr-rfl-ts9/>.

Downscaling prediksi musim yang berbasis harian menghasilkan informasi prediksi berbagai karakteristik curah hujan sampai 6 bulan ke depan yang diperlukan untuk perencanaan strategi budidaya 1-2 musim ke depan. Informasi prediksi karakteristik curah hujan yang diperlu sektor pertanian seperti prediksi sifat hujan, prediksi curah hujan < 50 mm/dasarian, prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian, prediksi hari tanpa hujan berturut-turut, prediksi hari hujan > 5 hari berturut turut, prediksi hujan ekstrem, dan nilai onset dan tren SPI. *Update* (pemutakhiran) prediksi dilakukan 4 kali dalam setahun yaitu pada bulan Maret, Juni, September dan Desember seperti dapat dilihat pada Tabel 1. Informasi prediksi tersebut tersedia dalam bentuk peta yang dapat diunduh melalui website balitklimat dengan alamat <http://balitklimat.litbang.pertanian.go.id/>.

Tabel 34. Periode update prediksi karakterisitk curah hujan

Update ke	Rilis (Bulan)	Periode prediksi (Bulan)
1	Februari	Maret – Agustus
2	Mei	Juli-November
3	Agustus	September-Februari
4	November	Desember-Mei

Peta prediksi tersedia untuk level nasional dan seluruh provinsi di Indonesia dalam bentuk pdf. Peta tersebut dapat diakses dan didownload dengan mudah. Tampilan link untuk mengakses prediksi iklim untuk disajikan pada Gambar 5 dan 6.



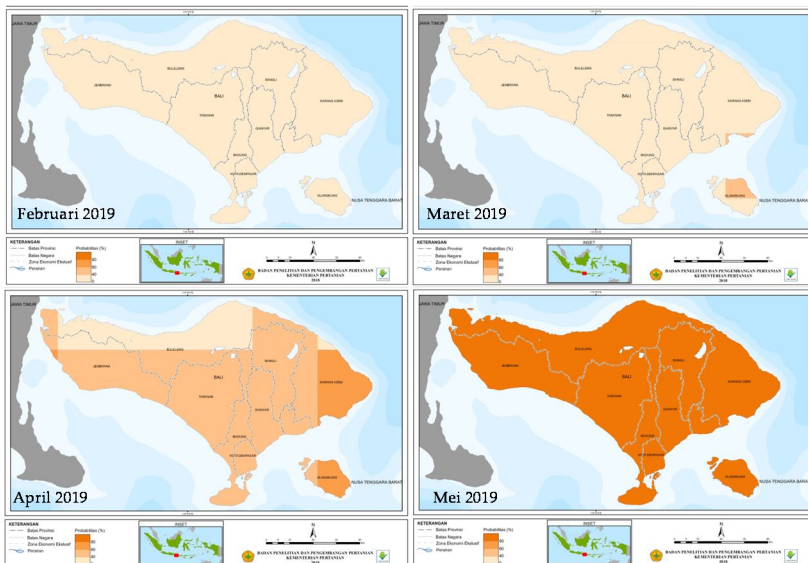
Gambar 101. Tautan untuk mengunduh prediksi iklim untuk pertanian pada website Balitklimat



Gambar 102. Tautan untuk memilih dan mengunduh peta prediksi

Salah satu contoh peta prediksi adalah prediksi hari tanpa hujan lebih dari 10 hari berturut-turut (HTH). Informasi prediksi tersebut diperlukan dalam perencanaan praktik budidaya, pemilihan komoditas, perencanaan irigasi dan lain sebagainya.

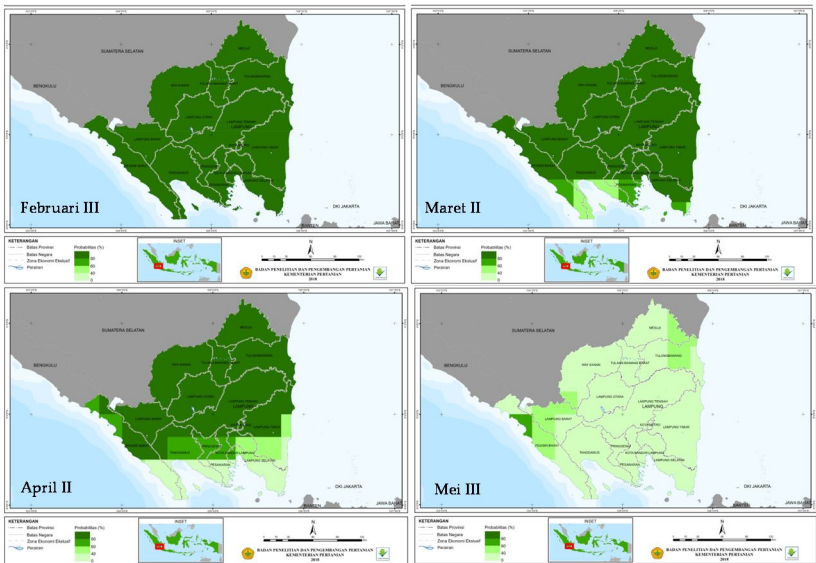
Hasil diskusi dengan stakeholder pada saat sosialisasi bahwa informasi ini sangat bermanfaat dalam menentukan target luas tambah tanam dalam program UPSUS yang sedang dilaksanakan oleh Kementerian Pertanian. Contoh prediksi HTH untuk provinsi Bali bulan Februari – Mei 2019 disajikan pada Gambar 7. Pada gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa peluang HTH mulai tinggi pada bulan April, dan pada bulan berikutnya peluangnya sangat tinggi di seluruh wilayah.



Gambar 103. Peta peluang prediksi HTH Pulau Bali untuk bulan Februari –Mei 2019

Bentuk prediksi peluang curah hujan lainnya adalah curah hujan > 50 mm/dasarian. Prediksi ini dapat juga digunakan untuk menentukan waktu untuk memulai tanam atau awal musim hujan. Peta prediksi tersedia dalam untuk setiap dasarian selama 6 bulan ke depan. Sebagai contoh untuk Provinsi Lampung periode Februari sampai Mei 2019 disajikan pada Gambar 8.

Perubahan curah hujan dasarian > 50 mm terlihat mulai rendah peluangnya di bagian selatan Lampung pada bulan Maret dasarian II. Wilayah tersebut mulai meluas pada April dasarian II. Pada Mei dasarian III seluruh Provinsi Lampung diprediksi rendah peluangnya untuk mendapatkan curah hujan > 50 mm/dasarian. Ini merupakan salah satu indikasi Provinsi Lampung sudah memasuki musim kemarau pada akhir bulan Mei 2019.



Gambar 104. Peta peluang prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian untuk Provinsi Lampung untuk dasarian Februari III–Mei III tahun 2019

Penutup

Meningkatnya kejadian iklim ekstrim mengakibatkan luas lahan pertanian yang terkena banjir dan kekeringan bertambah, sehingga luas lahan yang terkena puso pun meningkat, terutama saat kejadian El Nino. Pengembangan model prakiraan iklim sangat diperlukan untuk meningkatkan kesiapan dalam perencanaan pertanian yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Prediksi musim menggunakan metode *ensemble* yang dikoreksi melalui proses *downscaling* dapat memberikan tingkat ketelitian prediksi yang lebih baik karena menghasilkan data prediksi dengan resolusi ruang yang lebih tinggi atau pada lokasi spesifik dari data prediksi skala global. Metode yang relatif mudah diterapkan yaitu *Statistical Downscaling* (SD). Metode ini telah diaplikasikan untuk menguji ketelitian prediksi curah hujan di Asia Tenggara dan tingkat akurasi prediksi yang dihasilkan pun cukup baik. Metode SD yang lain yaitu metode analog, menggunakan pola iklim dari data pengamatan sehingga struktur spasial dari iklim lokal terwakilkan dengan baik pada hasil simulasi.

Informasi prediksi berbagai karakteristik curah hujan hingga 6 bulan ke depan, hasil *downscaling* prediksi musim berbasis harian telah dikembangkan oleh Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi bekerjasama dengan ITB menggunakan metode *Constructed Analog*. Karakteristik curah hujan tersebut meliputi prediksi sifat hujan, prediksi curah hujan < 50 mm/dasarian, prediksi curah hujan > 50 mm/dasarian, prediksi hari tanpa hujan berturut-turut, prediksi hari hujan > 5 hari berturut turut, prediksi hujan ekstrem, dan nilai onset dan tren SPI. *Update* (pemutakhiran) prediksi dilakukan 4 kali dalam setahun yaitu pada bulan Maret, Juni, September dan Desember dan dapat diunduh melalui website Balitklimat dalam bentuk peta.

Informasi prediksi selanjutnya dapat digunakan untuk perencanaan strategi budidaya 1-2 musim ke depan, pemilihan komoditas, perencanaan irigasi dan lain sebagainya. Selain itu, menurut stakeholder informasi ini sangat bermanfaat dalam menentukan target luas tambah tanam dalam program UPSUS yang sedang dilaksanakan oleh Kementerian Pertanian.

DAFTAR BACAAN

- Boer R., Notodipuro K.A, Las, I. 1999. Prediction of daily rainfall characteristic from monthly climate indicate, Paper presented at the second international conference on science and technology for the Assesment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent, 29 November-1 December 1999. Italy.
- Boer, R., Sutikno, Faqih, A. 2005. Evaluasi kinerja model *Adaptive Spline Treshold Autoregression* (ASTAR) untuk peramalan hujan sepuluh harian. Lokakarya Nasional Forum Prakiraan, Evaluasi dan Validasi, 15-17 Desember. Jakarta.
- Dahm, R.J, Singh, U.K., Lal, M., Marchand M., Weiland, F.C.S. Singh, S.K., Singh, M.P. 2016. Downscaling GCM data for climate change impact assessments on rainfall: a practical application for the Brahmani-Baitarani river basin. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 499:1-42
- Dupe, Z.L. 1999. Prediction Nino 3.4 SST anomaly using simple harmonic model. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent. 29 November-1 December 1999. Jakarta.

- Estiningtyas, W, Surmaini, E., Suciantini, Ramadhani, F. 2005. Penggunaan Metode Filter Kalman Untuk Prakiraan Curah Hujan di Sentra Produksi Pangan. Laporan Penelitian. Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi.
- Hadi, T.W., Mukid A., Mulyana, E., Surmaini, E., Wigena A.H. 2009. Pengembangan Model Prediksi Musim (*Seasonal*) untuk Mendukung Kegiatan Pertanian yang Adaptif terhadap Perubahan Iklim. Laporan Penelitian KP3I Badan Litbang Pertanian.
- Haryanto, U. 1999. Respon to climate change : Simple rainfall prediction based on southern oscillation index. Paper presented at the Second International Conference on Science and Technology for Assessment of Global Climate Change and Its impact on Indonesian Maritime Continent. 29 November-1 December 1999. Jakarta.
- Juneng, L., Tanggang, F.T., Kang, H., Lee, W. J., dan Seng, Y.K. 2010. Statistical Downscaling Forecasts for Winter Monsoon Precipitation in Malaysia Using Multimodel Output Variables. *Journal Climate*, **23**,17-36.
- Kang, K.H., Park, C.K., Solis, A.L.S. dan Stitthichivapak, K. 2007. Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand. *Geophysics Research Letter*, **34**, L15710.

- Palmer, T.N., A. Alessandri, U. Andersen, P. Cantelaube, M. Davey, M. Délecluse, M. Déqué, E. Díez, F.J. Doblas-Reyes, H. Feddersen, R. Graham, S. Gualdi, J.F. Guérémy, R. Hagedorn, M. Hoshen, N. Keenlyside, M. Latif, A. Lazar, E., Maisonnave, V. Marletto, A.P. Morse, B. Orfila, P. Rogel, J.M. Terres and M.C. Thomson. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 85: 853-872
- Randall, D. R. 2007. Climate Models and Their Evaluation, dalam Solomon S.D, Eds, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Saha S, Nadiga S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler RW, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Wang J, Hou YT, Chuang HY, Juang HMM, Sela J, Iredell M, Treadon R, Kleist D, van Delst P, Keyser D, Derber J, Ek M, Meng J, Wei H, Yang R, Lord S, van den Dool H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm JK, White G, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou S, Higgins W, Zou CZ, Liu Q, Chen Y, Han Y, Cucurull L, Reynolds RW, Rutledge G, Goldberg M. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin America Meteorology Society* 91: 1015-1057.
- Surmaini, E., Hadi, T.W., Subagyo, K. dan Puspito, N.T. 2015. Prediction of drought impact on rice paddies in west Java using analogue downscaling method. *Indones. J. Agric. Sci.* 16 (1): 21-30

- Surmaini, E. dan Susanti, E. 2016. Kekeringan Pertanian: Penyebab, Dampak dan Penanganan. Prosiding Simposium VIII Perhimp: Membangun Kapasitas Adaptasi Menghadapi Perubahan Iklim melalui *Climate Smart Agriculture*.hal 232-245.
- Surmaini, E., Hadi, T.W. Subagyo, K., Syahputra, M.R. 2018. Integrasi Prediksi Musim dengan Model Simulasi Tanaman untuk Penentuan Waktu Tanam Padi. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42 (2): 99-110
- Timbal, B., dan McAvaney, B.J. 2001. An analogue-based method to downscale surface air temperature: Application for Australia. *Climate Dynamics*, 17, 947–963.
- Vimont, D.J., D.S Battisti and R.L. Naylor. 2010. Downscaling Indonesian precipitation using large-scale meteorological fields. *Int'l. J. Climatol.* 30: 1706-1722.
- Zorita, E. and H. von Storch. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. *J. Climate* 12(8): 2474-2489.
- Zorita, E., Hughes, J., Lettenmaier, D., dan von Storch, H. 1995. Stochastic downscaling of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. *Journal of Climate*, 8, 1023–1042.

Bab 3.

Penggunaan Sistem Modeling Dampak Perubahan Iklim terhadap Pertanian untuk Proyeksi Produktivitas Tanaman Pangan

Yayan Apriyana dan Aris Pramudia

Pendahuluan

Indonesia yang terletak diantara benua Asia dan Australia dan antara Samudera Pasifik dan Samudra Hindia, secara geografis terletak di khatulistiwa dengan ribuan pulau, dapat dikatakan berada dalam posisi yang unik secara alami. Dua samudera dapat dikatakan sebagai salah satu pengendali iklim dunia dan kondisi Indonesia sangat dipengaruhi oleh karakteristik monsun (Ramage 1971, Murakami dan Matsumoto 1994; Wu dan Kirtman 2007), yang mempengaruhi baik dinamika atmosfer dan suhu permukaan laut di sekitar wilayah Indonesia. Dinamika tersebut membawa dampak luas pada berbagai sektor kehidupan manusia. Dampaknya sebagian besar terkait dengan anomali curah hujan serta peristiwa ekstrim seperti banjir dan kekeringan yang sangat berpengaruh pada sektor pertanian. Banyak laporan menunjukkan bahwa daerah yang terkena bencana iklim telah

semakin meluas dengan meningkatnya kerugian pertanian (Boer dan Las 2003). Perubahan iklim mempengaruhi pergeseran musim, seperti musim hujan semakin pendek tetapi dengan curah hujan yang lebih besar (banjir) dan musim kemarau panjang yang berdampak kekeringan

Stabilitas pangan, terutama ketersediaan makanan berfluktuasi, sangat dipengaruhi oleh variasi iklim dan cuaca (Pendleton & Lawson 1988). Hasil studi FAO (2005) menunjukkan bahwa variabilitas dan perubahan iklim mempengaruhi 11% lahan pertanian di negara berkembang yang dapat mengurangi produksi pangan dan Produk Domestik Bruto (PDB) sebesar 16%. Sementara itu, dampak variabilitas dan perubahan iklim juga dapat mengurangi produksi sereal di Asia Tenggara antara 2,5% dan 7,8% (Fischer et al., 2002). Variabilitas dan perubahan iklim dengan semua dampaknya berpotensi menyebabkan kerugian besar pada produksi tanaman pangan (20,6% untuk beras, 13,6% untuk jagung dan 12,4% untuk kedelai, seperti yang dilaporkan oleh Handoko et al., (2008). Sementara itu, permintaan pangan, terutama beras, terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Diperkirakan pada tahun 2020 populasi akan mencapai 262 juta orang dengan konsumsi beras 134 kg per kapita sehingga permintaan beras nasional mencapai 35,1 juta ton atau 65,9 juta ton gabah kering giling (Budianto, 2002).

Untuk itu diperlukan suatu teknologi yang dapat digunakan untuk menganalisis proyeksi produktivitas tanaman pangan dalam kaitannya dengan perubahan iklim. Tulisan ini membahas dampak perubahan iklim pada pertanian khususnya terhadap produktivitas tanaman pangan serta menjembatani penilaian dampak perubahan iklim dengan analisis kerentanan pangan.

Proyeksi Produktivitas Tanaman Pangan

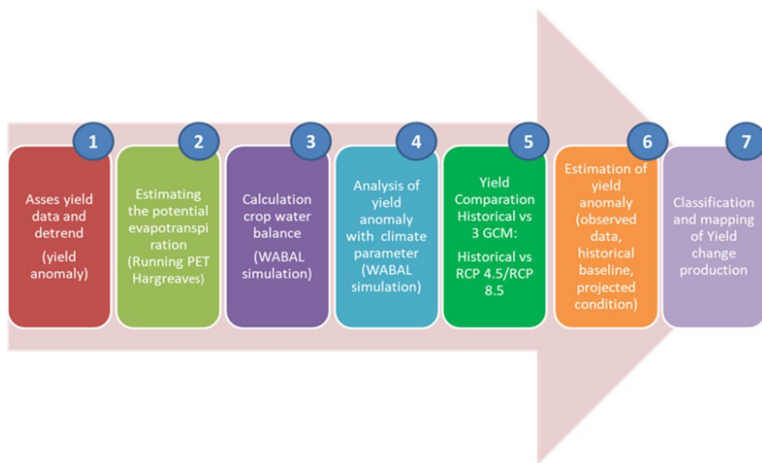
Untuk melakukan analisis proyeksi produktivitas tanaman pangan digunakan MOSAICC (*The Modelling System for Agricultural Impacts of Climate Change*). MOSAICC merupakan Sistem Pemodelan untuk menganalisis Dampak Perubahan Iklim terhadap Pertanian dari FAO dengan mengembangkan perangkat dan model online untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim pada hasil panen.

Analisis dilakukan terhadap tanaman pangan utama di Indonesia (padi pada lahan irigasi dan tadah hujan, jagung dan kedelai) dengan dukungan data luas panen, produksi dan hasil padi, jagung, dan kedelai, data iklim berupa curah hujan, suhu maksimum dan minimum, serta data iklim proyeksi yang dimodelkan dari data GCM (*Global Climate Models*). Data yang dimodelkan melalui prosedur downscaling statistik untuk memperoleh variabel iklim yang diinginkan pada lokasi yang sama dari data yang diamati.

Untuk interpretasi input baik model maupun proses, maka terlebih dahulu dilakukan perbandingan produktivitas dari data historis dengan proyeksi produktivitas yang dianalisis menggunakan proyeksi iklim dari GCM menggunakan penilaian RCP (*Representative Concentration Pathways*) yang diperoleh dari IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Tiga GCM (CANES-M2, CNRM-CM5, dan MPI-ESM-RM) digunakan, dengan periode yang berbeda (historis dan masa depan) dengan skenario (RCP 4.5 dan RCP 8.5).

Periode data iklim dan produktivitas dalam kajian ini dari tahun 1971 hingga 2000, sementara proyeksi masa depan mengacu pada periode 2010-2069. Data yang diamati meliputi periode 1981-2010 (dapat bervariasi sesuai dengan ketersediaan data di setiap stasiun). Komoditas yang dianalisis adalah Padi irigasi dan tadah hujan, Kedelai dan Jagung.

Analisis data dalam proyeksi produktivitas didahului dengan mengkaji data hasil dan menguraikannya dengan tujuan untuk menghapus tren jangka panjang dalam hasil yang sebagian besar disebabkan oleh faktor-faktor non-iklim. Dengan mengurangi tren dari hasil aktual diperoleh anomali produktivitas, yang variasinya diasumsikan karena iklim. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan evapotranspirasi potensial dengan fungsi PET Hargreaves di MOSAICC, dengan menghitung neraca air tanaman menggunakan simulasi WABAL. Analisis ini menghasilkan fungsi produktivitas, yaitu model regresi yang terbaik yang mampu memprediksi anomali produktivitas dengan menggunakan parameter keseimbangan iklim dan air. Selanjutnya dilakukan analisis korelasi dan regresi antara anomali produktivitas historis dan parameter iklim historis serta output simulasi WABAL. Analisis ini menghasilkan fungsi hasil, yaitu model regresi yang terbaik yang mampu memprediksi anomali dengan menggunakan parameter keseimbangan iklim dan air. Selanjutnya melakukan estimasi anomali produktivitas pada kondisi data historis periode 1981-2010 dan proyeksi anomali hasil pada periode 2010-2039 dan 2040-2069. Langkah berikutnya adalah membandingkan anomali produktivitas antara data yang diamati dan hasil simulasi pada kondisi data historis, dan antara kondisi data historis dan kondisi yang diproyeksikan untuk periode 2010-2039 dan 2040-2069. Langkah terakhir dari analisis ini adalah klasifikasi dan pemetaan perubahan hasil yang diproyeksikan (Gambar 1).



Gambar 105. Langkah-langkah analisis proyeksi produktivitas menggunakan Mosaicc.

Hasil Kajian Model untuk Proyeksi Produktivitas Tanaman Padi

Hasil kajian proyeksi anomali produktivitas dilakukan di sentra produksi tanaman pangan di Jawa Barat yaitu di Indramayu, Karawang, Subang, di Jawa Tengah yaitu di Grobogan, Pati, Sragen, di Yogyakarta yaitu di Sleman, Bantul dan di Jawa Timur yaitu di Jember, Banyuwangi dan Pasuruan.

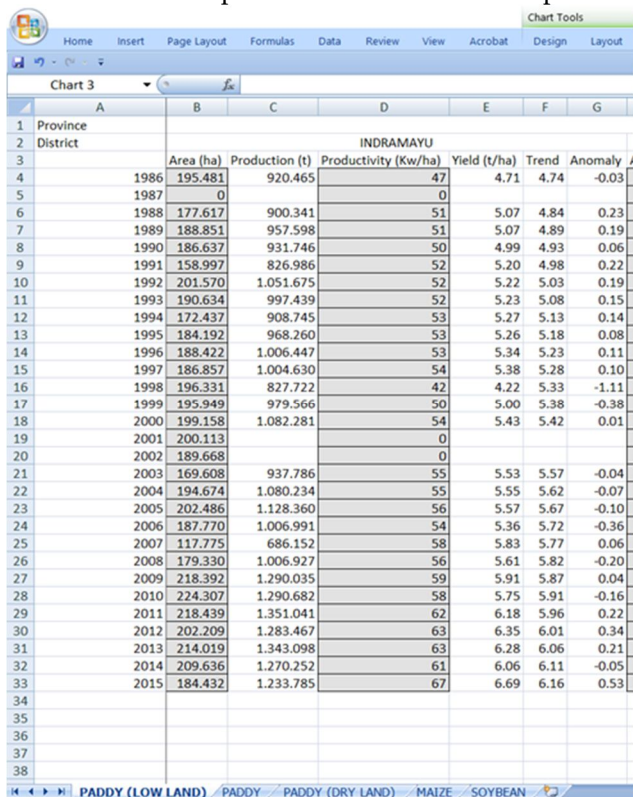
Sebagai sampel analisis dilakukan di kabupaten Indramayu, Kabupaten Indramayu merupakan kabupaten sentra produksi padi, dan kabupaten penting dalam mendukung produksi beras nasional, namun Indramayu adalah kabupaten yang paling rentan terhadap variabilitas dan perubahan iklim (Gambar 2)



Gambar 106. Peta Lokasi Kabupaten Indramayu

Data dari Kabupaten Indramayu diperoleh dari Pusat Data dan Informasi dari Kementerian Pertanian (Tabel 1). Anomali produktivitas menunjukkan adanya perubahan produktivitas akibat adanya perubahan iklim.

Tabel 35. Data untuk produktivitas dan anomali produktivitas

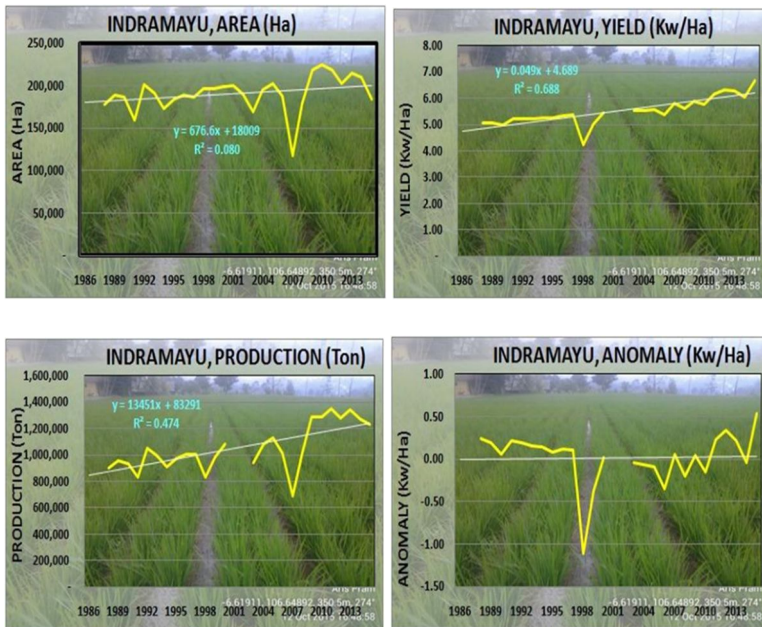


Province	Area (ha)	Production (t)	Productivity (Kw/ha)	Yield (t/ha)	Trend	Anomaly
1986	195.481	920.465	47	4.71	4.74	-0.03
1987	0		0			
1988	177.617	900.341	51	5.07	4.84	0.23
1989	188.851	957.598	51	5.07	4.89	0.19
1990	186.637	931.746	50	4.99	4.93	0.06
1991	158.997	826.986	52	5.20	4.98	0.22
1992	201.570	1.051.675	52	5.22	5.03	0.19
1993	190.634	997.439	52	5.23	5.08	0.15
1994	172.437	908.745	53	5.27	5.13	0.14
1995	184.192	968.260	53	5.26	5.18	0.08
1996	188.422	1.006.447	53	5.34	5.23	0.11
1997	186.857	1.004.630	54	5.38	5.28	0.10
1998	196.331	827.722	42	4.22	5.33	-1.11
1999	195.949	979.566	50	5.00	5.38	-0.38
2000	199.158	1.082.281	54	5.43	5.42	0.01
2001	200.113		0			
2002	189.668		0			
2003	169.608	937.786	55	5.53	5.57	-0.04
2004	194.674	1.080.234	55	5.55	5.62	-0.07
2005	202.486	1.128.360	56	5.57	5.67	-0.10
2006	187.770	1.006.991	54	5.36	5.72	-0.36
2007	117.775	686.152	58	5.83	5.77	0.06
2008	179.330	1.006.927	56	5.61	5.82	-0.20
2009	218.392	1.290.035	59	5.91	5.87	0.04
2010	224.307	1.290.682	58	5.75	5.91	-0.16
2011	218.439	1.351.041	62	6.18	5.96	0.22
2012	202.209	1.283.467	63	6.35	6.01	0.34
2013	214.019	1.343.098	63	6.28	6.06	0.21
2014	209.636	1.270.252	61	6.06	6.11	-0.05
2015	184.432	1.233.785	67	6.69	6.16	0.53

Analisis menggunakan pendekatan linier oleh perangkat lunak statistik untuk menghitung tren dan memotong jalur tren di set data. Indeks fit adalah Root Square Mean Error. Untuk menghilangkan tren produktivitas, maka disusun data anomali dengan tren nol. Seri waktu yang dihasilkan sekarang adalah hasil yang dirubah atau menghasilkan anomali produktivitas sebagai fungsi waktu.

Hasil analisis menunjukkan bahwa luas, hasil dan produksi memiliki kecenderungan meningkat. Data anomali menunjukkan bahwa pada tahun 1998 dan 2007 ada anomali yang relatif besar.

Ini karena pada tahun sebelumnya ada kejadian iklim ekstrem El Nino yang kuat (Gambar 3)



Gambar 107. Tren peningkatan luasm panen, produksi dan produktivitas padi sawah di Indramayu

Hasil analisis disajikan dalam tabel dan histogram. Untuk Padi tadah hujan hasil analisis menunjukkan bahwa semua model proyeksi iklim, menunjukkan perubahan produktivitas signifikan atau sangat signifikan pada RCP 4.5, baik skenario 1 atau skenario 2, serta pada RCP 8.5, baik skenario 1 atau skenario 2 (Tabel 2). Angka rata-rata (mean) dan standar deviasi (STD) di bawah kolom pengamatan adalah rata-rata dan STD dari data pengamatan, angka rata-rata dan STD di bawah kolom historis adalah rata-rata dan STD dari data historis, angka rata-rata di bawah kolom RCP45_10-39, RCP45_40-69, RCP85_10-39 dan RCP85_40-69 adalah rata-rata proyeksi dari masing-masing GCM. Referensi

pada kolom historis yang menggambarkan perbandingan antara data historis dengan data pengamatan. Referensi pada kolom RCP45_10-39, RCP45_40-69, RCP85_10-39 dan RCP85_40-69 Perolehan kesimpulan antara data proyeksi dengan data historis. Sebagai contoh, RCP45 40-69 pada grafik GCM CANES-M2 memiliki rata-rata anomali di atas produktivitasnya sebesar -0,609 ton / ha dan nilai ini sangat berbeda dengan rata-rata historis hasil-anomali sebesar -0,2559.

Tabel 36. Hasil Uji Signifikansi (Padi Tadah Hujan)

GCM	Parameters	OBSERVED		HISTORICAL		RCP45_10-39	RCP45_40-69	RCP85_10-39	RCP85_40-69
		Mean	Standard Dev.	Mean	Standard Dev.	Mean/Concl.	Mean/Concl.	Mean/Concl.	Mean/Concl.
CANES-M2	Values	-0.0030	0.3530	-0.2559	0.0563	-0.4624	-0.609	-0.482	-0.915
	Conclusion	Not Significant				Very Significant	Very Significant	Very Significant	Very Significant
CNRM-CM5	Values	-0.0030	0.3530	-0.2491	0.0879	-0.3559	-0.456	-0.363	-0.528
	Conclusion	Not Significant				Significant	Very Significant	Significant	Very Significant
MPI-ESM-RM	Values	-0.0030	0.3530	-0.2667	0.0595	-0.4269	-0.547	-0.448	-0.651
	Conclusion	Not Significant				Very Significant	Very Significant	Very Significant	Very Significant

Setelah diperoleh nilai rata-rata dari perubahan hasil produktivitas yang diproyeksikan dari beberapa skenario GCM, selanjutnya dibuat klasifikasi proyeksi perubahan dalam produktivitas (batas kelas interval sekitar 10% dari hasil rata-rata nasional) denga interval kelas 0,5 t / ha (Tabel 3). Rata-rata perubahan anomali hasil diklasifikasikan menjadi 6 kelas, 3 kelas untuk tren anomali positif (rendah, menengah, tinggi,) dan 3 kelas untuk anolami negatif (rendah, menengah, tinggi)

Tabel 37. Perubahan Anomali Produktivitas (a) untuk padi pada proyeksi dibandingkan dengan data historis

(t/ha)	Classification
<-1.0	High Decreasing
-1.0 to - -0.5	Middle Decreasing
-0.5 to 0	Low Decreasing
0 to 0.5	Low Increasing
0.5 to 1.0	Middle Increasing
>1.0	High Increasing

Jika hasil analisis dari tiga GCM pada emisi menengah (RCP 4.5) dan emisi tinggi (RCP 8.5), proyeksi dekat (2010-2039) dan proyeksi jauh (2040 - 2069) menunjukkan peningkatan yang rendah - peningkatan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Rendah. Jika hasil analisis satu hingga tiga GCM dalam emisi tinggi, dekat dan jauh proyeksi menunjukkan penurunan rendah - penurunan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Tengah. Jika hasil analisis satu hingga tiga GCM di bawah emisi menengah, periode proyeksi dekat dan jauh menunjukkan penurunan rendah - penurunan ekstrim, signifikan atau tidak signifikan, maka kondisi ini diklasifikasikan dalam tingkat Risiko Tinggi. Resume hasil analisis perubahan anomaly produktivitas tanaman ditunjukkan pada Gambar 4.

Result Analysis	INTERMEDIATE EMISSIONS (RCP 4.5)		HIGH EMISSIONS (RCP 8.5)	
	NEAR PROJECTION	FAR PROJECTION	NEAR PROJECTION	FAR PROJECTION
	Non Significant	Significant	Non Significant	Significant
High Increasing				
Middle Increasing		LOW RISK		
Low Increasing				
Low Decreasing				
Middle Decreasing	HIGH RISK		MIDDLE RISK	
High Decreasing				

Gambar 108. Resume klasifikasi perbedaan tanaman menghasilkan proyeksi anomali (salah satu model CANES-M2, CNRM-CM5, dan MPI-ESM-RM)

Padi Sawah Tadah Hujan

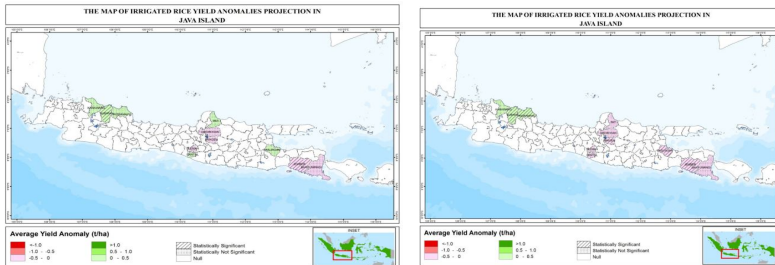
Hasil analisis produktivitas padi tadah hujan diproyeksikan terjadi perubahan produktivitas di 4 provinsi di Jawa pada emisi menengah dan tinggi baik dekat maupun jauh proyeksi di Karawang, Subang (Jawa Barat) dan Pati (Jawa Tengah), hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan peningkatan tinggi – sangat nyata, CNRM menunjukkan peningkatan rendah – tidak nyata, dan MPI menunjukkan peningkatan rendah – tidak nyata. Kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat Risiko Rendah.

Untuk Pati (Jawa Tengah) dan kabupaten Sleman (Yogyakarta) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan sedang - nyata untuk RCP 8,5, sedangkan CNRM menunjukkan penurunan rendah - nyata, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata. Dengan demikian dikategorikan pada tingkat risiko menengah.

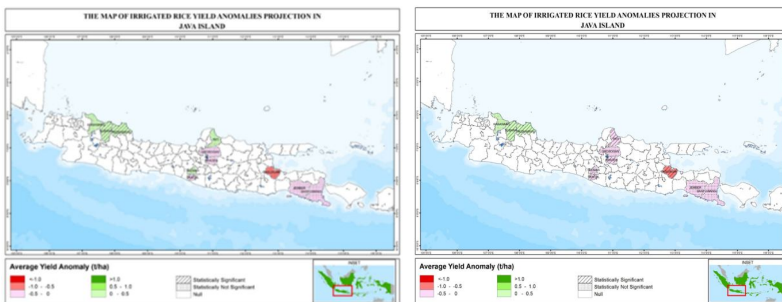
Untuk Kabupaten Indramayu (Jawa Barat), Sragen, Grobongan (Jawa Tengah), Kabupaten Bantul (Yogyakarta), Jember, Pasuruan dan Banyuwangi distric (Jawa Timur) analisis menggunakan CANESM menunjukkan penurunan tinggi - nyata, CNRM

menunjukkan penurunan Rendah - nyata, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata untuk RCP 4.5, sehingga kategori ini dikategorikan pada tingkat risiko tinggi.

Contoh hasil Analisis MPI-ESM-RM model iklim global disajikan pada gambar (5 dan 6)



Gambar 109. Peta proyeksi produktivitas padi sawah 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



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.

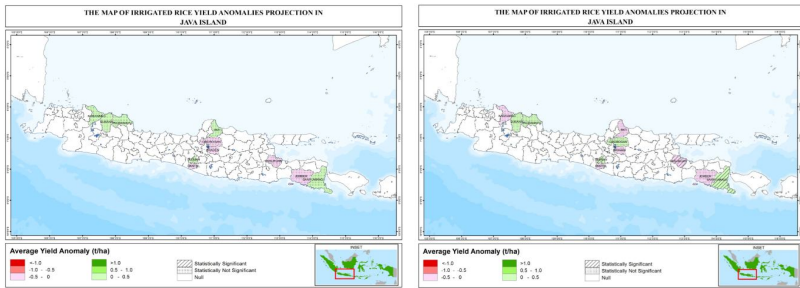
Padi Sawah Irigasi

Hasil analisis untuk hasil panen padi tadah hujan diproyeksikan perubahan hasil panen di 4 provinsi di Jawa pada emisi menengah dan tinggi baik dekat dan jauh proyeksi di Karawang dan Subang (Jawa Barat), Pati (Jawa Tengah), Sleman dan Bantul distric (Yogyakarta) dan Banyuwangi (Jawa Timur), hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan peningkatan tinggi – sangat nyata, CNRM menunjukkan peningkatan rendah - nyata, dan MPI menunjukkan peningkatan rendah - nyata. Kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko rendah.

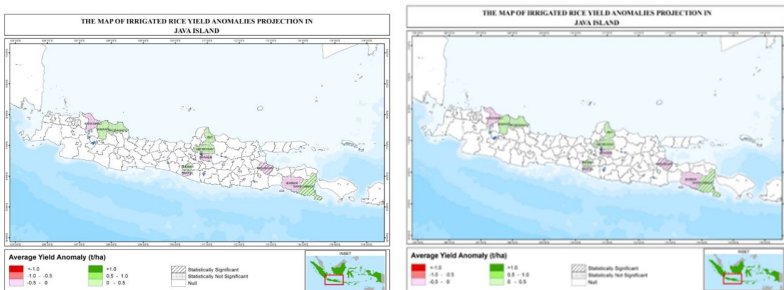
Untuk Kabupaten Pati dan Sragen (Jawa Tengah) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan sedang - nyata untuk proyeksi jauh RCP 8,5, CNRM penurunan rendah - nyata, proyeksi jauh RCP 8,5 dan MPI menunjukkan proyeksi penurunan rendah - nyata, RCP 8,5 jauh , kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko menengah.

Selanjutnya, untuk Indramayu distric (Jawa Barat), Grobogan distric (Jawa Tengah), Jember dan Pasuruan distric (Jawa Timur) hasil analisis menggunakan CANES menunjukkan penurunan tinggi - nyata, CNRM menunjukkan Low Decreasing -significant, dan MPI menunjukkan penurunan rendah - nyata untuk RCP 4.5, kondisi tersebut dikategorikan pada tingkat risiko tinggi.

Contoh hasil Analisis model iklim global MPI-ESM-RM disajikan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 111. Peta proyeksi produktivitas akan menghasilkan perubahan produktivitas padi sawah irigasi di Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta dan Jawa Timur untuk emisi menengah (RCP 4.5), (a) proyeksi dekat dan (b) proyeksi jauh. Model iklim global MPI-ESM-RM.



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

Penutup

Fungsi produktivitas adalah rumus estimasi anomali produktivitas berdasarkan parameter iklim keluaran dan keseimbangan air dari sistem model Mosaicc. Ada beberapa parameter yang memiliki korelasi tertinggi, yaitu evapotranspirasi aktual, defisit air, kebutuhan air total, dan kelebihan air. Parameter

dominan yang paling mempengaruhi hasil adalah evapotranspirasi aktual.

Proyeksi perubahan hasil ditentukan dengan perbedaan antara anomali produktivitas yang diproyeksikan dan anomali produktivitas data historis. Perubahan tersebut tergantung dengan lokasi. Kami mengklasifikasikan wilayah negara dalam tiga kategori: risiko rendah (peningkatan hasil panen), risiko menengah (penurunan hasil panen berdasarkan RCP 8.5) dan risiko tinggi (penurunan hasil berdasarkan RCP 4.5).

Hasil klasifikasi dan analisis, di Kabupaten Grobogan dan Jember termasuk berisiko tinggi untuk baik untuk padi tadah hujan maupun irigasi.

DAFTAR BACAAN

- Boer R. and I. Las. 2003. National Rice Production System In Global Climate Policy Perspective. Pp. 215-234. In Bambang S. et al. (Ed). Rice Technology Policy and Rice Innovation: Book Two. Proceedings of the Scientific Meeting of Rice Plant Research and Development Division, 2003. Sukamandi.
- Budianto J. 2002. Challenges and opportunities of rice research in the perspective of agribusiness. In: B. Suprihatno et al. (Eds.). Rice policy and technological innovation. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor. p. 1-17.
- FAO. 2005. "Impact of Climate Change and Diseases on Food Security and Poverty Reduction". Special event background document for the 31st session of the committee on world food security. Rome, 23-26 May 2005.
- Fischer G, Shah M, Velthuisen HV. 2002. Climate Change and Agricultural Vulnerability. IIASA. Luxemburg, Austria.
- Handoko I, Sugiarto Y, Syaukat Y. 2008. Linkages of Climate Change and Strategic Food Production. Independent Trade and Development Policy Review by Kemitraan / Partnership Indonesia. SEAMEO BIOTROP. Bogor.
- Murakami T, and Matsumoto J. 1994: Summer monsoon over the Asian continent and western North Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 62, 69-87.
- Pendleton JW, and Lawson TL. 1989. Climatic Variability and Sustainability of Crop yields in the humid tropics. International Symposium on Climatic Variability and Food Security in Developing Countries 5 – 9 Februari 1987. New Delhi. IRRI: 54 – 58.

- Ramage CS. 1971: Monsoon Meteorology. International Geophysics Series, Vol. 15, Academic Press, 296pp.
- Wu R and Kirtman BP. 2007. Roles of the Indian Ocean in the Australian Summer Monsoon-ENSO Relationship. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies¹ and George Mason University. 4041 Powder Mill Road, Suite 302 Calverton, Maryland 20705.

EDITOR DAN KONTRIBUTOR

Editor:

Irsal Las, adalah Purnabakti sebagai peneliti utama di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Lahan Pertanian. Jl. Tentara Pelajar No.12 Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16114.

Istiqlal Amin, adalah Purnabakti sebagai peneliti utama di bidang Kesuburan Tanah (Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan), pada kelompok peneliti di Balitklimat. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16114.

Hermanto, adalah Purnabakti sebagai pustakawan muda di Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (PUSLITBANGTAN), Jl. Merdeka No.147, RT.1/RW.5, Menteng, Bogor Bar., Kota Bogor, Jawa Barat 16111

Penulis:

Aris Pramudia, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Armi Susandi, adalah lektor di bidang Sains Atmosfer di Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB). Jl. Tamansari 64 Bandung, Jawa Barat 40116.

Budi Kartiwa, adalah peneliti muda di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Dede Dirgahayu, adalah peneliti madya di bidang pemodelan pertumbuhan tanaman padi, pada kelompok peneliti di Lembaga Antariksa Nasional. Jl. Pemuda Persil No.1, Rawamangun, Jakarta Timur 13220.

Didi Sopandie, adalah guru besar di di bidang Fisiologi Tanaman, Institut Pertanian Bogor (IPB). Jl. Raya Dramaga Kampus IPB Dramaga Bogor, Jawa Barat 16680.

Eleonora Runtunuwu, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Elsa Rakhmi Dewi, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Elza Surmaini, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Erni Susanti, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Haris Syahbuddin, adalah kepala Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian (BBP2TP) dan peneliti madya di Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. Jl. Tentara Pelajar No.10, Ciwaringin, Bogor Tengah, Kota Bogor, Jawa Barat 16124

M Noor, adalah peneliti utama di bidang kesuburan tanah dan biologi tanah, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Lahan Rawa, BBSDLP. Jl. Kebun Karen PO BOX 31, Loktabat Utara, Banjarbaru, Kalimantan Selatan 70712.

Muhammad Syakir, adalah peneliti utama di bidang penelitian Budidaya Tanaman Cengkeh, pada kelompok peneliti di Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Perkebunan. Jl. Tentara Pelajar 1, Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu Bogor 16111.

Nani Heryani, adalah peneliti madya di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Parwati, adalah Kepala Bidang Diseminasi dan peneliti di bidang Remote Sensing dan Geo Information System, pada kelompok peneliti di Lembaga Antariksa Nasional. Jl. Pemuda Persil No.1, Rawamangun, Jakarta Timur 13220.

Suciantini, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Tri Nandar Wihendar, adalah peneliti di bidang Konservasi Tanah dan Hidrologi, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Trikoesoemaningtyas, adalah lektor di bidang Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman, di Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (IPB). Jl. Meranti, Babakan, Dramaga, Bogor, Jawa Barat 16680

Woro Estiningtyas, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Yayan Apriyana, adalah peneliti madya di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

Yeli Sarvina, adalah peneliti muda di bidang Agroklimat dan Pencemaran Lingkungan, pada kelompok peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi Bogor. Jl. Tentara Pelajar No.1A Kampus Penelitian Pertanian, Cimanggu, Bogor, Jawa Barat 16111.

INDEKS

- Agroekosistem 8, 113, 125
- Agrometeorologi 10, 11, 16
- Akumulasi compatible osmolytes 56
- Aliran mantap 121, 122
- Aliran permukaan 113, 120-125
- Analisis spasial 15, 261
- Anomali iklim 77-81, 84, 92, 163, 223, 266
 - curah hujan 341-345, 357, 359, 364, 365, 369-370, 400
- Antesis 52, 53, 54, 55, 199, 202, 205, 209
- Anther 52, 205
- Asimilasi CO₂ 58, 64
- Asimilasi Nitrogen 45
- Asimilat 44, 53, 55, 59, 191, 203, 206, 313
- Asuransi Indeks Iklim 340, 341, 355-359, 361
- Asuransi Pertanian 149, 335, 339, 340, 341, 353-359, 361
- Belalang kembara 168-170
- Biometologi indeks 15
- Block máxima 158
- CCA (Cannonical Corellation Analysis) 285, 299, 305
- CCTV 242, 243
- Cekaman Abiotik 40, 56, 60, 69, 135, 186, 187, 205, 206, 208, 214
 - adaptasi tanaman 56, 59, 60, 187, 192, 193, 194, 197
 - fisiologi 69, 214
 - heat stress 47-51
 - toleransi tanaman 56, 57, 192, 194, 195, 205, 211
- Cell membrane thermostability 59

Citra 19, 26
 landsat 289, 327, 332, 333-337
 modis 281, 282, 286, 288, 289, 295, 327, 328, 332, 333, 334
 radar 11, 327, 328, 331, 332, 336, 337
 spot 327, 332, 334, 335
 Climate Change 24, 47, 156, 186
 Climate Modeling 24
 Constructed Analog 388, 394
 Daerah Aliran Sungai (DAS) 113, 119, 120, 121, 122, 123, 125,
 147, 262, 266,
 Daerah Irigasi 113, 125, 128, 130
 Daerah Tangkapan Air 122-125
 Data TRMM 281, 282, 285, 286, 289, 290, 297, 298, 299, 301, 305
 Dehydration avoidance 191
 Dehydration tolerance 191, 192
 Dipole Mode Index (DMI) 342
 Drought escape 191
 Drought recovery 192
 Downscaling 15, 251-252, 278, 284-285, 385-387
 dynamical 15, 278, 387,
 statistical 15, 18, 278, 387-388, 394
 ansambel 278-284, 286-289
 Efisiensi Penggunaan Air 46, 99, 106, 207
 Ekinoks 361
 El Niño 24, 137, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 283, 284, 297, 300
 Emisi gas rumah kaca 40, 156, 186
 Energy balance 101
 ENSO 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 8, 86
 modoki indeks 357-358, 363
 EOF 285, 297, 298, 299
 Evaporasi 15, 54, 65, 96, 98, 100, 101-104, 120, 122, 125, 202, 314,
 Evapotranspirasi 45, 96, 98-104, 107, 113, 114, 120-122, 125-128,
 135, 345

aktual 100, 114, 120, 122, 125
 potensial (ETP) 102, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 128
 tanaman 96, 100, 126, 127
 Fase Pemasakan 55, 105
 Fase Reproduksi 52, 53, 55, 204
 Fase Vegetatif 44, 54, 55, 58, 290, 295, 296, 307, 328, 332, 46
 Fast fourier transform 25, 26
 Fenologi 51-53, 163, 188, 191, 207
 Fotorespirasi 41, 44, 58
 Fotosintat 49, 315
 Fotosintesis 41, 43-47, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 64, 65, 68, 97, 99, 135,
 162, 163, 189, 203, 211, 310, 311, 318, 319, 321
 Generalized Extreme Value (GEV) 158
 Generalized Pareto Distribution (GPD) 158
 Genotipe 48, 53, 54, 57, 187, 192, 199, 202, 203, 204, 205, 207, 211
 Geostatistika 26
 GIS 174, 175, 177, 179, 180, 213, 232, 234
 Global Circulation Model 17, 178, 179, 248, 249, 251, 252, 256,
 257
 Global Warming 10, 162, 163, 186, 344, 345, 352
 Heat Tolerant Index 201
 Hidrometeorologi 152-154
 Hormon Endogen 202
 HSPs 58, 62, 63, 189, 190
 Iklim ekstrim 18, 20, 24, 42, 43, 136, 152, 155-159, 162, 223, 248,
 340, 342
 Iklim mikro 187, 308, 309, 312, 313, 314, 316, 320, 323
 Indeks global 358, 364, 372, 375
 Indeks kecukupan air 86, 87, 90
 Indeks kekeringan 9, 15
 Indeks panas 15
 Indeks pertanian 227, 228

Indeks Vegetasi (EVI) 76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 8, 86, 87, 88, 90, 92
 Indian Ocean Dipole 76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 8, 86, 87, 88, 90, 92
 Irigasi 10-13, 15, 19, 24, 66, 67, 78, 87, 90, 92, 96, 97, 99, 105, 111, 127, 147, 209, 228, 248, 314, 354
 Irigasi Otomatik 106, 107, 109
 ITCZ 359, 361
 Kalman Filter 26
 Kebutuhan Air Tanaman 12, 15, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 107, 111, 126, 286
 Kekeringan agronomis 135
 Kekeringan hidrologis 135
 Kekeringan meteorologis 135, 147
 Kemampuan adaptasi 351, 352
 Kerentanan 53, 81, 160, 180, 181, 238, 351, 352, 354
 Key area 358, 364
 Kultivar 44, 50, 113, 202, 203, 204, 209
 La Nina 3, 26, 144, 155, 163, 165, 223, 283, 342, 348, 350
 Laju Fotosintesis 58, 64, 319, 321
 Madden julian oscilation (MJO) 342
 Metabolit sekunder 60, 61
 Meteorologi pertanian 8-11, 13, 15, 17, 18-21, 156
 Migrasi 172, 176
 Mitigasi 46, 186, 213, 223, 230, 327, 340
 Model Prediksi Curah Hujan 260, 266, 267, 269, 270, 275, 276, 278, 279, 285
 Model Simulasi 17, 207, 213, 254, 255
 Monsoon 138, 223
 break 138, 143
 MOSAICC 402, 403, 404
 Mulsa 308, 314, 315
 NDVI 328

Neraca Air 9, 12, 15, 18, 87, 107, 113, 114-116, 118-122, 125, 128
 Neural network 261, 262, 264, 266
 Nilai reflektansi 332, 329
 Non linier least square²⁵
 Numerical weather prediction 172, 249
 OLR 285
 Onset 17, 81, 82, 86, 104, 138, 224
 Ontogeni 17, 81, 82, 86, 104, 138, 224,
 OPT 139, 180, 181, 229, 314, 341, 342, 350
 outbreak 162, 163
 Overlay 31, 33, 36, 298, 291
 Oxygen evolving complex⁵⁷
 Partisi asimilat. 59, 206
 POT 158
 Pemuliaan 57, 68, 186, 198, 199, 200, 203, 204, 206-210
 Penginderaan Jauh 19, 176, 281,-284, 326-332, 336, 337
 resolusi spasial 24, 285, 290, 327, 328, 329, 331-334, 336
 resolusi temporal 281, 290, 327, 331, 332, 334, 335, 336
 Pola hujan
 equatorial 80, 84
 monsunal 81
 pergeseran 162
 Permeabilitas 59, 65, 195, 196, 317
 Pola tanam 20, 78-80, 113, 128, 224-226, 228, 242, 244, 248, 319,
 320, 346-348
 Potensial osmotik 46, 192, 195
 Prakiraan iklim 9, 16, 17, 18, 20, 160
 Prediksi iklim 10, 21, 25, 148, 178, 180, 234, 242, 248, 249, 251,
 253, 254, 256, 257, 260, 348
 Prediksi probabilistic 248, 251, 253, 254, 256, 257
 Presipitasi 40, 41, 46, 104, 113, 120, 171, 356
 Representative Concentration Pathways 402, 407-414

Respirasi 44, 47, 53, 58, 64, 196, 319, 346
 RMSE 27-29
 R-Skill 27-29
 R-Square 27, 29
 Rumah kaca 40, 156, 186, 201, 308, 312, 313, 316, 317, 318
 Sadewa 19
 Salinitas 43, 56, 66-69, 162, 186, 193-196, 211, 212, 214, 342
 Satelit 11, 19, 26, 32, 232, 249, 281, 282, 284-286, 327-336, 357
 Sea surface temperature 268, 271, 273, 289, 290, 297, 299, 300,
 305
 SI katam terpadu 24, 149, 230, 232, 233, 234, 235, 236, 238, 239,
 240-244
 Soil water balance 101
 Spikelet 53-56, 187, 200, 203, 204, 208, 209
 Tingkat kehijauan vegetasi 282, 284
 Time lag 358
 Transpirasi 45, 46, 56, 61, 86, 90, 96-104, 135, 187, 188, 192, 199,
 318, 319, 341
 Universal kriging 26
 Variabilitas iklim 8, 10, 24, 25, 40, 76, 77, 79, 187, 223, 254
 Varietas unggul 186, 210, 212, 287
 Viabilitas polen 52, 202
 WABAL 403
 Wereng 163, 165-168, 172, 179, 180, 210, 236, 344, 350
 Zona agro-ekologis 42

GLOSARIUM

- El Niño

Fenomena perubahan iklim secara global yang diakibatkan oleh pemanasan suhu permukaan air laut Pasifik bagian timur.

- ENSO (El Niño Southern Oscillation)

Variasi angin dan suhu permukaan laut di wilayah tropis belahan timur Samudra Pasifik yang ireguler dan berkala.

- Indeks kecukupan air

Nisbah evapotranspirasi aktual dan evapotranspirasi tanaman dan persentase kehilangan hasil.

- IOD (Indian Ocean Dipole)

Perbedaan suhu permukaan laut antara dua daerah di Samudera Hindia bagian barat dan di Samudra Hindia bagian timur.

- Pola hujan equatorial

Wilayahnya memiliki distribusi hujan bulanan bimodial dengan dua puncak musim hujan maksimum dan hampir sepanjang tahun masuk dalam kriteria musim hujan.

- Pola curah hujan musunal

Wilayah yang mempunyai perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dan periode musim kemarau.

- Variabilitas iklim

Fluktuasi unsur iklim yang terjadi secara tiba-tiba namun tidak berlangsung lama.

- Agrometeorologi

Ilmu yang melakukan pengaturan dan rekayasa terhadap berbagai sumber daya yang ada seperti air, tanah, dan udara dalam rangka mendukung kegiatan pertanian

- Anther

Kepala sari yang mengandung serbuk sari (polen)

- Anthesis

Fase saat bunga mulai mekar atau terbuka dan terjadi secara bersamaan dengan masaknya organ produksi jantan dan betina

- Asimilasi Nitrogen

Pembentukan senyawa nitrogen organik seperti asam amino dari senyawa nitrogen anorganik yang hadir di lingkungan

- Asimilat

Hasil fotosintesis tanaman

- Asuransi Pertanian

Perjanjian antara petani dan pihak perusahaan asuransi untuk mengikatkan diri dalam pertanggungan risiko usaha tani

- Cekaman Abiotik

Segala kondisi perubahan lingkungan yang mungkin akan menurunkan atau merugikan pertumbuhan atau perkembangan tumbuhan dengan contoh komponen sebagai berikut air, udara, cahaya matahari, tanah, topografi, dan iklim

- Climate Modeling

Representasi matematis dari sistem iklim berdasarkan prinsip fisika, biologi dan kimia

- Closed Circuit Television (CCTV)

Sebuah sistem TV dimana sinyal tidak didistribusikan secara publik namun dipantau, terutama untuk keperluan pengawasan dan keamanan

- Daerah Aliran Sungai (DAS)

Suatu kawasan yang dibatasi oleh titik-titik tinggi di mana air yang berasal dari air hujan yang jatuh, terkumpul dalam kawasan tersebut

- Daerah Irigasi (DI)

Kesatuan lahan yang mendapat air dari satu jaringan irigasi, meliputi bangunan bendung, saluran-saluran primer dan sekunder termasuk bangunan bangunan utama dan pelengkap

saluran pembawa dan saluran pembuang

- Daerah Tangkapan Air (DTA)

Suatu kawasan yang berfungsi sebagai daerah penadah air yang mempunyai manfaat penting untuk mempertahankan kelestarian fungsi sumber air di wilayah daerah

- Dipole Mode Index (DMI)

Ukuran gradien suhu muka laut zonal anomali di katulistiwa Samudera Hindia

- Efisiensi Penggunaan Air (Water Use Efficiency, WUE)

Cara sederhana untuk mengetahui apakah hasil tanaman dipengaruhi oleh pasokan air

- ENSO Modoki Indeks

Fenomena laut atmosfer di Samudera Pasifik yang menunjukkan adanya anomali suhu permukaan laut (SPL) yang dihitung dari rata-rata SPL pada tiga wilayah, yaitu wilayah A (165°BT - 140°BB , 10°LS - 10°LU), B (110°BB - 70°BB , 15°LS - 5°LU), and C (125°BT - 145°BT , 10°LS - 20°LU)

- Emisi Gas Rumah Kaca

Gas rumah kaca yang dihasilkan oleh aktivitas yang ada dan salah satunya terdiri dari karbondioksida

- Eskalasi

Kenaikan atau pertambahan (volume, jumlah, dan sebagainya)

- Evapotranspirasi Potensial (ETP)

Nilai yang menggambarkan kebutuhan lingkungan, sekumpulan vegetasi, atau kawasan pertanian untuk melakukan evapotranspirasi yang ditentukan oleh beberapa faktor, seperti intensitas penyinaran matahari, kecepatan angin, luas daun, temperatur udara, dan tekanan udara

- Fast Fourier Transform

Suatu algoritme untuk menghitung transformasi Fourier diskrit (Discrete Fourier Transform, DFT) dengan cepat dan efisien

- Fotorespirasi

Respirasi pada tumbuhan yang dibangkitkan oleh penerimaan cahaya yang diterima oleh daun

- Fotosintat

Produksi asimilasi karbon dioksida selama fotosintesis

- Fotosintesis

Suatu proses biokimia pembentukan zat makanan seperti karbohidrat yang dilakukan oleh tumbuhan, terutama tumbuhan yang mengandung zat hijau daun atau klorofil

- Generalized Extreme Value (GEV)

Distribusi nilai ekstrim umum (GEV) adalah keluarga dari distribusi probabilitas berkelanjutan yang dikembangkan dalam teori nilai ekstrim untuk menggabungkan keluarga Gumbel,

Fréchet dan Weibull yang juga dikenal sebagai distribusi nilai ekstrim tipe I, II, dan III.

- Generalized Pareto Distribution (GPD)

Dalam statistik, Generalized Pareto Distribution adalah distribusi probabilitas berkelanjutan. GPD sering digunakan untuk memodelkan ekor distribusi lain.

- Genotipe

Komposisi pewarisan individu dengan atau tanpa ekspresi fenotip dari satu atau beberapa sifat. Klasifikasi gen dari komposisi tersebut dinyatakan dalam satu rumus. Genotip terutama ditentukan dari penampakan keturunan atau kerabatnya

- Global Circulation Model (GCM)

Model sirkulasi umum (GCM) adalah jenis model iklim . Ini menggunakan model matematis dari sirkulasi umum atmosfer planet atau lautan. Ini menggunakan persamaan Navier-Stokes pada bola berputar dengan istilah termodinamika untuk berbagai sumber energi (radiasi , panas laten)

- Global Warming

Meningkatnya temperatur suhu rata-rata di lapisan atmosfer, laut dan daratan di permukaan bumi

- Hidrometeorologi

Ilmu yang mempelajari tentang hubungan antara unsur-unsur meteorologi dengan siklus hidrologi

- Hormon Endogen

Hormon tanaman yang dihasilkan oleh tanaman itu sendiri

- ITCZ

Inter Tropical Convergence Zone atau daerah konvergensi ekuator merupakan zona yang berada di antara dua cekungan ekuatorial yang memiliki tekanan udara yang sangat rendah dari daerah sekitarnya

- Iklim Mikro

Iklim dalam satu wilayah spesifik dalam satu area yang lebih luas

- Indeks Vegetasi (EVI)

Salah satu parameter yang digunakan untuk menganalisa keadaan vegetasi dari suatu wilayah

- Kebutuhan Air Tanaman

Jumlah air yang dibutuhkan oleh tanaman pada suatu periode untuk dapat tumbuh dan produksi secara normal

- Key Area

Wilayah yang kondisi curah hujannya sangat dipengaruhi oleh indikator iklim global

- Kultivar

sekelompok tumbuhan yang telah dipilih/diseleksi untuk suatu atau beberapa ciri tertentu yang khas dan dapat dibedakan secara jelas dari kelompok lainnya, serta tetap mempertahankan ciri-ciri

khas ini jika diperbanyak dengan cara tertentu, baik secara seksual maupun aseksual

- Madden Julian Oscillation (MJO)

Variasi intraseasonal (30-90 harian) di daerah tropis, yang umumnya berakibat pada anomali angin, suhu muka laut, perawan dan intensitas hujan

- Mitigasi

Serangkaian upaya untuk mengurangi resiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana

- Model Simulasi

Suatu model *tiruan* dari suatu proses atau sistem tertentu. Model simulasi harus mempunyai karakteristik yang serupa dengan proses (sistem) yang sesungguhnya

- Modis

Sensor multispektral yang memiliki jumlah 36 band yang mempunyai resolusi spasial yang berbeda-beda mulai dari 250 m (band 1-2), 500 m (band 3-7), 1000 m (band 8-36) dengan panjang gelombang mulai dari 0,620-14,385 μm

- Data TRMM

Data TRMM adalah data precipitasi (hujan) yang didapat dari satelit meteorologi TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) dengan sensornya PR (*Precipitation Radar*), TMI (*TRMM Microwave Imager*), dan VIRS (*Visible and Infrared Scanner*), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), dan LIS (*Lightning Imaging Sensor*)

- Neraca Air (Water Balance)

Neraca masukan dan keluaran air disuatu tempat pada periode tertentu, sehingga dapat untuk mengetahui jumlah air tersebut kelebihan (surplus) ataupun kekurangan (defisit)

- Nilai Reflektansi

Rasio energi yang dipantulkan dengan total energi yang mengenai suatu permukaan per unit area

- Onset

Seberapa cepat efek dari suatu interaksi terjadi dan menentukan seberapa penting tindakan yang harus dilakukan untuk menghindari akibat dari suatu reaksi

- Ontogeni

Mendesripsikan asal usul dan perkembangan organisme sejak dari telur yang dibuahi ke bentuk dewasanya.

- Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)

Hewan atau tumbuhan baik berukuran mikro ataupun makro yang mengganggu, menghambat, bahkan mematikan tanaman yang dibudidayakan. Berdasarkan jenis seranganya OPT dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu hama, vektor penyakit, dan gulma

- Outbreak OPT

Meledaknya populasi Organisme Pengganggu Tanaman

- Permeabilitas

Salah satu parameter petrofisik yang berupa kemampuan batuan untuk dapat meloloskan fluida. Satuan permeabilitas yang umum digunakan ialah Darcy. Aliran fluida dalam media berpori berdasarkan Hukum Darcy diturunkan secara empiris.

- **Potensial Osmotik**

Zat cair dalam vakuola dan bagian-bagian sel lainnya yang mengandung zat-zat terlarut di dalamnya, artinya zat cair tersebut adalah suatu larutan dan potensial airnya (seandainya dikeluarkan dari sel adalah potensial larutan atau potensial osmotik yang nilainya lebih rendah daripada potensial air murni.

- **Prakiraan Iklim**

Penggunaan ilmu dan teknologi untuk memperkirakan kondisi rata-rata cuaca berdasarkan waktu yang panjang untuk suatu lokasi di bumi untuk waktu yang akan datang

- **Prediksi Iklim**

Suatu proses memperkirakan secara sistematis tentang kondisi rata-rata cuaca berdasarkan waktu yang panjang untuk suatu lokasi di bumi untuk waktu yang akan datang

- **Prediksi Probabilistik**

Suatu proses memperkirakan secara sistematis suatu peluang kejadian

- **Presipitasi**

Setiap produk dari kondensasi uap air di atmosfer. Ia terjadi ketika atmosfer (yang merupakan suatu larutan gas raksasa) menjadi jenuh dan air kemudian terkondensasi dan keluar dari larutan tersebut (terpresipitasi). Udara menjadi jenuh melalui dua proses, pendinginan atau penambahan uap air

- Respirasi

Proses mobilisasi energi yang dilakukan jasad hidup melalui pemecahan senyawa berenergi tinggi (SET) untuk digunakan dalam menjalankan fungsi hidup. Dalam pengertian kegiatan kehidupan sehari-hari, respirasi dapat disamakan dengan pernapasan

- Sea Surface Temperature (SST)

Suhu air yang dekat dengan permukaan laut. Arti sebenarnya dari permukaan bervariasi sesuai dengan metode pengukuran yang digunakan, namun antara 1 milimeter (0,04 inci) dan 20 meter (70 kaki) di bawah permukaan laut

- Si Katam Terpadu

Sistem Informasi mengenai Kalender Tanam Terpadu yang berisikan informasi Estimasi waktu dan luas tanam padi dan palawija, Estimasi wilayah rawan banjir kekeringan serta serangan OPT, rekomendasi varietas, kebutuhan benih, pupuk dan alat mesin pertanian, Info tanam - BPP, Kalender tanam rawa, Monitoring online kondisi tanaman pangan, Standing crop padi sawah seluruh Indonesia, Prediksi curah hujan dan musim bersumber dari IRI dan IFAD, Peta prediksi curah hujan bulanan tingkat kabupaten (BMKG), Informasi penyedia Alsintan. Informasi tersedia untuk lahan sawah irigasi dan lahan rawa pada level kecamatan seluruh Indonesia

- Spikelet

Cabang bulir perbungaan rumput, umumnya mengandung beberapa bunga rumput yang disebut floret.

- Statistic Downscaling

Proses dua langkah yang terdiri dari pengembangan hubungan statistik antara variabel iklim lokal (misalnya, suhu udara permukaan dan curah hujan) dan prediktor skala besar (misalnya, bidang tekanan) dan penerapan hubungan tersebut ke output dari eksperimen model iklim global untuk mensimulasikan karakteristik iklim lokal di masa depan.

- Teknik Downscaling

Metode untuk mendapatkan informasi iklim atau perubahan iklim beresolusi tinggi dari model iklim global resolusi yang relatif kasar (GCMs)

- Tingkat Kehijauan Vegetasi (TKV)

Merupakan cerminan tingkat kehijauan vegetasi yang dapat digunakan sebagai parameter kondisi kekeringan. Nilai TKV dapat berubah disebabkan oleh kondisi ketersediaan air yang ada akibat pergantian musim. Kondisi TKV yang rendah dapat berakibat lanjut pada penurunan produksi pangan, terjadi kebakaran, dan lain sebagainya. Untukantisipasi akibat buruk tersebut, perlu dilakukan upaya pemantauan TKV

- Transpirasi

Hilangnya uap air dari permukaan tumbuhan

- Varietas Unggul

Galur hasil pemuliaan yang mempunyai satu atau lebih keunggulan khusus seperti potensi hasil tinggi, tahan terhadap hama, tahan terhadap penyakit, toleran terhadap cekaman lingkungan, mutu produk baik, dan atau sifat-sifat lainnya serta telah dilepas oleh pemerintah

- Viabilitas Polen

Daya hidup alat penyebaran dan perbanyakan generatif dari tumbuhan berbunga yang ditunjukkan dengan gejala pertumbuhan atau gejala metabolisme

- Zona Agro-Ekologis

Suatu wilayah berdasarkan keadaan fisik lingkungan yang hampir sama, dimana keragaman dan hewan dapat diharapkan akan berbeda dan tidak nyata. Komponen utama agroekologi adalah iklim, fisiografi atau bentuk wilayah, dan tanah. Iklim merupakan kondisi rata-rata cuaca dalam jangka waktu yang panjang, fisiografi, berkaitan dengan bentuk wilayah, dan tanah merupakan media utama dalam melakukan kegiatan pertanian. Ketiga komponen tersebut bersatu padu dalam menciptakan suatu produk yang melimpah dan berkualitas, serta bermanfaat

HANDBOOK

IKLIM PERTANIAN

INDONESIA

Seiring dengan perkembangan isu perubahan iklim dan makin besarnya dampak perubahan iklim yang dirasakan sektor pertanian terutama terhadap produksi pertanian dan ketersediaan pangan, informasi iklim menjadi isu penting dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Hal ini dapat dilihat dari meningkatnya permintaan terhadap informasi dan teknologi adaptasi seiring dengan kerugian yang disebabkan oleh bencana akibat kejadian iklim ekstrim. Pada tahun 1997/1998, Indonesia mengalami deraan iklim yang buruk berupa kejadian *El Niño* yang diikuti oleh *La Niña* sehingga menimbulkan kerugian cukup besar pada sektor pertanian. Hal tersebut menjadi titik ungit penyebab berkembang pesatnya teknologi adaptasi terhadap kejadian iklim ekstrim dan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya kemampuan adaptasi terhadap kejadian iklim ekstrim.

Buku ini menggambarkan perkembangan aplikasi klimatologi dan meteorologi di sektor pertanian untuk meningkatkan ketahanan (*resilience*) melalui berbagai upaya adaptasi terhadap perubahan iklim. Buku ini terdiri dari empat bagian yaitu model, peran, strategi dan teknologi. Model menguraikan tentang meteorologi pertanian dan basis data iklim serta model perubahan iklim dan pertanian cerdas iklim. Pada bagian peran dikupas tentang dampak cekaman abiotik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman serta variabilitas iklim dan dinamika waktu tanam padi. Bagian strategi diuraikan tentang antisipasi dan perbaikan tanaman untuk adaptasi, teknologi inovasi sistem informasi kalender tanam terpadu sebagai upaya adaptasi perubahan iklim, pemanfaatan prediksi musim untuk pengelolaan risiko pertanian, prediksi iklim untuk pertanian, dan dinamika pertumbuhan padi dan curah hujan berdasarkan data modis dan TRMM. Bagian teknologi diinformasikan berbagai inovasi yang dihasilkan oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian berupa analisis hubungan anomali curah hujan dengan ENSO Modoki Indeks pada kondisi *El Niño* dan *La Niña* untuk mendukung pengembangan model prediksi curah hujan di Indonesia, prediksi curah hujan untuk pengelolaan pertanian, serta penggunaan sistem modeling untuk proyeksi produktivitas tanaman pangan yang diharapkan mampu mendukung upaya untuk perencanaan pertanian yang tahan terhadap keragaman dan perubahan iklim.

Semoga buku ini menjadi jendela informasi tentang perkembangan dan teknologi aplikasi informasi iklim pada sektor pertanian, sehingga semakin meningkatkan pemahaman dan kesadaran masyarakat khususnya bagi pengambil kebijakan, terhadap pentingnya upaya adaptasi sektor pertanian menghadapi perubahan iklim.



Sekretariat Badan Litbang Pertanian
Jl. Ragunan No. 29 Pasar Minggu, Jakarta 12540
Telp. (021) 7806202, Fax. (021) 7806644
Website : www.litbang.pertanian.go.id
email : iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Pertanian

ISBN 978-602-344-254-6



9 786023 442546