

IKLIM DAN TANAMAN PADI: TANTANGAN DAN PELUANG

Irsal Las¹, H. Syahbuddin¹, E. Surmaini¹, dan Achmad M. Fagi²

¹Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian

²Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan beras terus meningkat sejalan dengan penambahan jumlah penduduk yang besarnya sekitar 1,27% per tahun. Pada tahun 2020, jumlah penduduk akan mencapai 262 juta jiwa dengan perkiraan konsumsi beras 134 kg per kapita, maka kebutuhan beras nasional 35,1 juta ton atau 65,9 juta ton GKG. Kebutuhan beras akan lebih banyak lagi bila konsumsi beras 156 per kapita per tahun (Budianto, 2002; Sudaryanto dkk., 2001). Bahkan sejak lama Hasse (1984) membuat perkiraan yang lebih menggetarkan (Tabel 1), bahwa untuk mencapai ketahanan pangan berkelanjutan, pada tahun 2020 dan seterusnya, maka hasil padi rata-rata harus mencapai 7,2 t/ha GKG, padahal saat ini hasil padi bera mencapai rata-rata 4,7 t/ha GKG, dan hasil maksimum 6,5 t/ha GKG.

Ancaman yang sangat serius juga muncul dari variabilitas dan perubahan iklim, laju konversi lahan sawah yang makin tidak terkendali serta degradasi sumber daya lahan dan air. Oleh sebab itu, situasi perberasan menuju tahun 2020 dan seterusnya akan sangat kritis, kecuali: (a) ada terobosan inovasi teknologi baru, baik untuk lahan sawah irigasi maupun lahan tadah hujan, dan lahan suboptimal lainnya; (b) optimalisasi sumber daya lahan melalui investasi dalam mentransformasi lahan suboptimal pertanaman padi dari kurang/tidak sesuai menjadi sesuai; dan (c) pencetakan lahan sawah baru.

Tabel 1. Hasil padi maksimum yang dapat dicapai dan hasil padi menunjang keberlanjutan ketahanan pangan pada tahun 2020

Status saat ini dan harapan ke depan	Luas (%)	Hasil (t/ha GKG)
Ekosistem tanaman padi ¹		
• Sesuai (optimal)	72	
• Tidak sesuai (suboptimal)	28	
Hasil maksimum yang dicapai (1984)		6,5
Hasil rata-rata nasional (1984)		4,6
Hasil rata-rata agar ketahanan pangan berlanjut		7,2

¹Ekosistem yang sesuai = lahan sawah irigasi, ekosistem yang kurang sesuai sampai tidak sesuai (suboptimal) = lahan sawah tadah hujan, lahan kering, dan lahan rawa pasang surut.

Sumber: dimodifikasi dari Hasse, 1984

Tabel 2. Neraca lahan sawah irigasi pada periode 1981-2002

Wilayah	Konversi (ha)	Pencetakan baru (ha)	Selisih (ha)
Jawa	1.169.203	536.248	- 632.955
Luar Jawa	1.021.468	2.824.210	1.802.742
Indonesia	2.190.671	3.360.458	1.169.787

Untuk memenuhi kebutuhan beras secara mandiri dan berlanjut, produksi padi harus terus ditingkatkan. Peningkatan produksi padi dapat dicapai melalui (a) peningkatan produksi dari perluasan areal tanam; (b) peningkatan produksi dari perluasan intensitas tanam; (c) peningkatan produksi dari kenaikan hasil per hektar, dan (d) pengurangan kehilangan hasil akibat cekaman biotik dan abiotik dan cara panen. Peningkatan produksi padi melalui peningkatan areal panen dan peningkatan area tanam menghadapi tantangan konversi lahan sawah menjadi lahan nonpertanian. Neraca lahan sawah irigasi periode 1981–2002 diperlihatkan pada Tabel 2.

Konversi dan pencetakan sawah baru berlangsung bersamaan. Di Jawa, konversi berlangsung lebih cepat dari pencetakan sawah baru (perubahan dari lahan tadah hujan dan lahan sawah irigasi nonteknis menjadi sawah irigasi teknis), sebaliknya di luar Jawa. Secara keseluruhan luas lahan sawah baru bertambah 1,170 juta ha. Lahan sawah baru yang umumnya berada di luar Jawa banyak yang ditelantarkan karena salah konstruksi bangunan irigasi, lokasi terpencil (belum ada penduduk) atau tanah bermasalah (masam atau berpasir).

Tidak seperti pada periode 1969–1984 (periode pemacuan laju kenaikan hasil) dan periode 1985–1996 (periode pertambahan laju kenaikan produksi), peningkatan produksi padi pada periode 1997 sampai sekarang (periode pelandaian laju kenaikan produksi) menghadapi kondisi perberasan yang semakin kompleks. Sejak IMF ikut menentukan kebijakan di Indonesia, sejak tahun 1997 tata niaga beras lebih terbuka bagi beras impor.

Indonesia tergolong negara penghasil dan konsumen beras terbesar ketiga di dunia yang setidaknya satu di antara parameter iklimnya sering kurang ideal bagi maksimalisasi produksi padi (Huke, 1976), sesuai dengan potensi produksi yang sebenarnya. Parameter iklim yang paling menentukan adalah curah hujan, karena menentukan ketersediaan air bagi tanaman. Oldeman *et al.* (1975–1982) menjadikan curah hujan sebagai dasar dalam menentukan klasifikasi iklim di Indonesia.

Fenomena variabilitas dan perubahan iklim dunia secara langsung akan memengaruhi iklim di Indonesia, antara lain berupa kejadian iklim ekstrim (anomali iklim) *El-Nino* dan *El-Nina* yang semakin meningkat frekuensi dan intensitasnya menyebabkan kejadian kekeringan dan banjir. Perubahan iklim juga menyebabkan pergeseran dan perubahan pola curah hujan dan musim, yang mengacaukan musim dan pola tanam serta luas areal tanam dan panen. Pemanasan global

yang disebabkan oleh emisi CO₂ (karbondioksida), CH₄ (metan) dan N₂O (nitrogen oksida) serta gas-gas rumah kaca (GRK) lain dapat menurunkan produksi padi, karena suhu yang lebih tinggi akan meningkatkan respirasi dan mengurangi stok karbohidrat yang dihasilkan oleh fotosintesis (Las dkk., 1986; IRRI, 2004). Pengaruh tidak langsung perubahan iklim adalah terjadinya perubahan ekobiologi hama dan penyakit tanaman padi. Makalah ini mengulas dan membahas berbagai faktor iklim dan air terhadap pertumbuhan tanaman dan produksi padi.

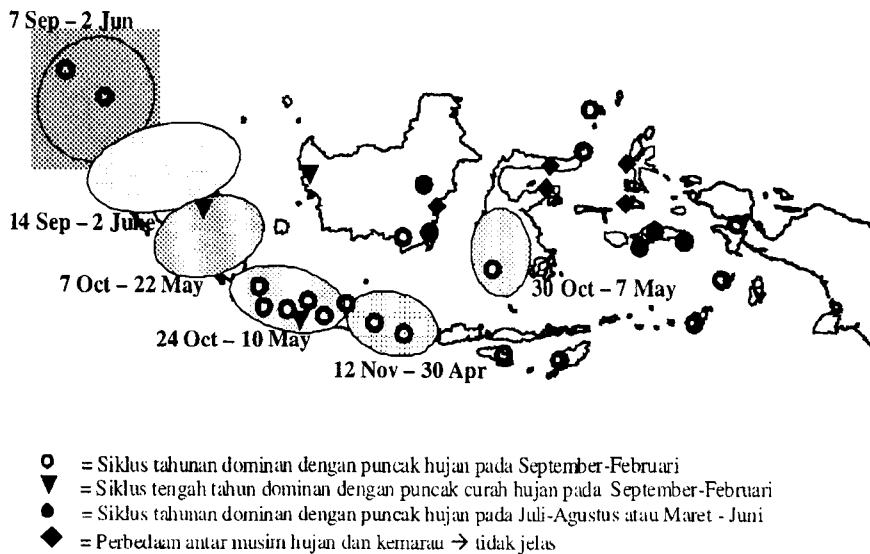
2. POSISI INDONESIA DALAM PETA GEOGRAFI PADI ASIA DAN VARIABILITAS IKLIM

Indonesia terletak di daerah sekitar khatulistiwa pada posisi antara 6° LU dan 11° LS dan terdiri atas sekitar 17.000 pulau di antara laut dan dua samudra yang menyebabkan suhu dan kelembapan udara selalu tinggi, sehingga dikategorikan sebagai daerah beriklim *humid tropic* yang isothermik. Hanya sebagian kecil daerah, seperti sebagian Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur, yang beriklim mirip semi-arid dengan curah hujan dan kelembapan udara yang relatif rendah.

Keragaman iklim Indonesia dipengaruhi oleh sirkulasi udara di atasnya, yaitu sirkulasi meridional (Hadley) dan zonal (Walker). Di Samudra Atlantik terdapat fenomena ENSO (*El-Nino South Oscillation*), dan di Samudra India ada fenomena *Indian Ocean Dipole* (IOD). Selain itu, terdapat udara dari barat ke timur yang dikenal dengan *Madden Julian Oscillation* (MJO). Perbedaan musim di Indonesia terjadi karena adanya sirkulasi Hadley yang bergerak dari utara ke selatan mengikuti pergerakan matahari. Sirkulasi ini memengaruhi keragaman iklim antarmusim.

Variabilitas iklim didefinisikan sebagai bentuk variasi iklim berdasarkan ruang maupun waktu. Berdasarkan ruang, Indonesia, yang terletak di daerah tropis dan khatulistiwa terbagi atas tiga subregion iklim (Eguchi, 1983). Pertama, subregion satu puncak musim hujan pada periode September–Februari yang terjadi di Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara. Kedua, subregion dua puncak musim hujan dalam setahun dengan jumlah maksimum hujan terjadi selama September–Februari. Pola ini terdapat di Sumatera dan Kalimantan bagian barat. Ketiga, subregion dengan satu atau dua puncak musim hujan dengan jumlah maksimum curah hujan tahunan selama Maret–Juli, yang terdapat di Kalimantan bagian timur, Sulawesi, dan Maluku (Gambar 1).

Dampak perbedaan daerah iklim ini akan berakibat pada perbedaan onset (awal musim hujan) masing-masing wilayah. Daerah iklim muson merupakan daerah dengan variasi iklim yang didominasi oleh pengaruh pergerakan uap air dari belahan bumi utara ke selatan atau sebaliknya. Pergerakan massa uap air



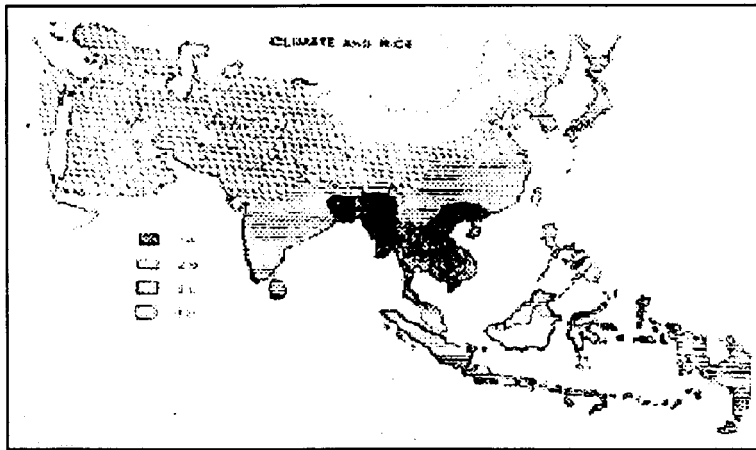
Gambar 1. Distribusi onsets musim hujan di wilayah Indonesia (Naylor *et al.*, 2006)

ini sering disebut garis muson. Naylor *et al.* (2006) menggambarkan terdapat perbedaan onsets antara beberapa provinsi di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, dan Sulawesi sebagai akibat pergerakan garis muson dengan perbedaan onsets sekitar 1–2 bulan.

2.1 Hubungan antara Iklim dengan Adaptasi Padi

Tanaman padi dapat tumbuh pada berbagai keadaan/tipe iklim. Grist (1974) menunjukkan bahwa padi tersebar luas dan tumbuh baik di daerah yang terletak antara 45°LU sampai 40°LS. Vergara (1976) menambahkan bahwa padi sering dijumpai tersebar dari dataran rendah hingga ketinggian 3.000 m di atas permukaan laut (m dpl).

Ciri komponen iklim yang optimal untuk pertumbuhan padi adalah suhu relatif tinggi, musim pertanaman (*growing season*) sedang sampai panjang, cahaya matahari cukup, air cukup dan terdistribusi rata hampir sepanjang musim pertanaman, suhu kering pada periode pengisian sampai kematangan gabah (Huke, 1976). Idealnya, kondisi ini berlangsung terus dari tahun ke tahun. Kenyataannya, kondisi iklim demikian tidak pernah ada, sehingga perlu upaya penyesuaian, baik pola tanam maupun teknologi, termasuk pemilihan wilayah di mana padi bisa ditanam. Huke (1976) mengelompokkan wilayah pertanaman padi global berdasarkan status iklim (Gambar 2).



Gambar 2. Wilayah pertanian padi berdasarkan status iklim (Huke, 1977)

- 1A = asal tanaman padi; padi ditanam bertahun-tahun tanpa modifikasi iklim oleh manusia.
- 2B = wilayah pertanian padi penting dengan setidaknya-tidaknya satu parameter iklim sering kurang ideal untuk keberhasilan pertanian.
- 3C = wilayah penyebaran tanaman padi, terpencar-pencar luas; iklim harus dimodifikasi untuk pertanian sekali (dalam setahun)
- 4D = wilayah pertanian padi yang tidak penting (iklim tidak mendukung perluasan pertanamannya)

2.1.1 Wilayah I » 1A

Padi berasal dari wilayah ini, maka manusia pertama kali mendomestikasi padi di wilayah ini tanpa memodifikasi iklim. Iklim tidak sepenuhnya ideal, tetapi selalu pada kisaran sedang dengan variabilitas yang bisa diadaptasi oleh tanaman. Jadi, iklimnya tidak optimum tetapi aman, hasil padi tidak spektakuler, tetapi tanaman padi jarang gagal.

2.1.2 Wilayah II » 2B

Padi tersebar ke wilayah ini dan kemudian menjadi wilayah produsen padi yang penting. Tanaman padi tumbuh optimal karena setidaknya salah satu parameter iklimnya sangat sesuai. Parameter yang utama adalah pemanfaatan curah hujan secara efektif dan efisien. Wilayah ini adalah produsen padi berkualitas relatif baik. Masalah yang dihadapi adalah biaya produksi untuk pengelolaan tanah, pemupukan, pengairan, dan pengendalian organisme pengganggu tanaman.

2.1.3 Wilayah III » 3C

Sekitar separuh produksi padi di Asia dan 45% dari produksi beras dunia berasal dari wilayah ini. Tanaman padi tumbuh tanpa modifikasi iklim mikro. Faktor pembatas di wilayah ini adalah tanaman padi tumbuh tanpa pengaturan air atau tadah hujan. Hama, penyakit, dan biaya energi merupakan masalah utama. Variabilitas parameter iklim yang menentukan keberhasilan panen adalah curah hujan.

2.1.4 Wilayah IV » 4D

Wilayah pertanian padi yang tidak penting karena parameter iklimnya tidak mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

Indonesia berada di wilayah II, dengan curah hujan sebagai parameter iklim utama yang memengaruhi hasil dan produksi padi. Angin pasat Tenggara dan angin pasat Barat Laut menentukan curah hujan, tetapi intensitas dan distribusinya sulit diprediksi, suatu ciri spesifik dari iklim muson. Perubahan iklim dan pemanasan global akan mengacaukan angin pasat tenggara dan angin pasat Barat Laut. Ditambah dengan makin singkatnya frekuensi anomali iklim *El-Nino* dan *La-Nina*, iklim padi di Indonesia akan semakin tidak menentu. Klasifikasi iklim dan sebarannya pun akan berubah.

Seperti terlihat pada Gambar 1, manusia mampu mengatasi variabilitas dan dinamika iklim sehingga bisa menanam padi di mana saja. Akibatnya, pertanyaan tentang “apa iklim tanaman padi”, iklim tropika atau subtropika, iklim arid, semi arid atau basah, iklim dataran rendah atau dataran tinggi, menjadi tidak relevan. Sistem produksi padi akibat modifikasi unsur iklim lebih relevan digunakan dalam praktik.

2.2 Iklim dan Sistem Produksi Padi

Tipe ekosistem tempat padi ditanam berkembang dengan atau oleh upaya manusia untuk memodifikasi parameter iklim utama, yaitu curah hujan. Regim air adalah determinan atau penentu tipe kultivar dan teknik budi daya. Kenyataannya, kondisi pertanian berkenaan dengan regim air berada pada gradien yang kontinu, sehingga sulit menentukan definisi ekosistem tanaman padi secara tepat. Di kawasan yang berada di sekitar khatulistiwa, radiasi matahari, suhu, kelembapan, panjang hari dan lama penyinaran tidak merupakan faktor pembatas utama. Oleh karena itu, untuk tujuan praktik atau operasional budi daya, pengenalan tipe ekosistem pertanian padi lebih relevan daripada tipe iklim itu sendiri.

IRRI (1989) mengelompokkan ekosistem pertanian padi seperti berikut:

- Ekosistem padi lahan kering (padi gogo) – padi ditanam di hamparan yang tidak dibatasi galengan pada tanah yang drainase alaminya baik, permukaan tanah tidak tergenang air. Hasil gabah bervariasi tergantung pada curah hujan. Pada daerah yang bergelombang teknik konservasi tanah dan air harus diterapkan untuk menekan erosi dan menahan air hujan.
- Ekosistem padi sawah tadah hujan – padi ditanam di hamparan yang dibatasi galengan untuk menahan air hujan sampai tergenang; genangan air <50 cm selama lebih dari 10 hari berturut-turut, tetapi genangan (dangkal) dipertahankan hampir sebagian dari masa tanam. Hamparan pertanian tidak mempunyai akses ke fasilitas irigasi, tetapi adakalanya mempunyai fasilitas penampung air atau tandon air (embung). Kekurangan air karena curah hujan tidak dapat diprediksi, diatasi dengan sistem gogorancanah.
- Ekosistem padi sawah irigasi – padi ditanam di hamparan yang dibatasi galengan untuk menahan air hujan dan air irigasi. Karena adanya fasilitas irigasi, padi ditanam 2 kali, bahkan 3 kali dalam setahun. Akibat dari fasilitas irigasi, hasil padi sawah irigasi lebih tinggi daripada hasil padi dari ekosistem lahan kering dan sawah tadah hujan. Intensifikasi produksi padi difokuskan pada ekosistem padi sawah irigasi, yang berarti bahwa petani padi sawah irigasi menerima insentif produksi lebih besar daripada petani dari ekosistem lainnya.
- Ekosistem padi air dalam (lebak) dan pasang surut. Pada ekosistem padi air dalam, padi ditanam pada musim kemarau, pada musim hujan lahan tertutup genangan air, sehingga tidak dapat ditanami. Berdasarkan kedalaman genangan, ekosistem lebak dibedakan menjadi lebak dangkal, lebak tengahan, dan lebak dalam. Pada musim kemarau padi ditanam di lahan lebak dangkal dan lebak tengahan.

Pada ekosistem pasang-surut, padi ditanam di lahan yang terpengaruh oleh pasang-surutnya air laut. Lahan pasang-surut dikelompokkan berdasarkan tipe genangan/luapan (luapan A,B,C,D) dan berdasarkan tipologi lahan (potensial, sulfat masam, gambut, salin).

2.2.1 Musim Tanam

Angin yang bertiup secara tetap, disebut angin pasat (*tradewind*) dan angin musim (*muson wind*), berpengaruh terhadap posisi zone konvergensi lintas tropika (*inter-tropical convergence zone/ITCZ*) yang menentukan fluktuasi dan karakterisasi iklim dan cuaca. Perbedaan yang besar antara pulau dan kepulauan juga terjadi karena perbedaan topografi dan bentuk lahan (*landform*).

Musim tanam (musim hujan dan musim kemarau) adalah pedoman yang digunakan secara luas oleh penyuluh, peneliti, praktisi, dan petani dalam budi daya padi dan penentuan pola tanam berbasis padi.

Musim Hujan. Dari bulan sekitar September sampai Maret angin pasat Timur Laut dan angin pasat Barat Laut berturut-turut bertiup dari Samudra Pasifik, dan dari Laut Cina Selatan serta Teluk Bengal. Karena pada periode September–Maret matahari menuju dan berada di bagian selatan bumi, terbentuk pusat tekanan rendah di Australia, maka angin pasat Barat Daya (*south-west*) bertiup dari Samudra Hindia melewati Indonesia. Pada periode ini ITCZ umumnya berada di atas wilayah Indonesia yang menyebabkan kelembapan dan curah hujan tinggi, walaupun tidak lagi terlalu tepat dan semakin kering. Periode September–Maret disebut periode musim hujan.

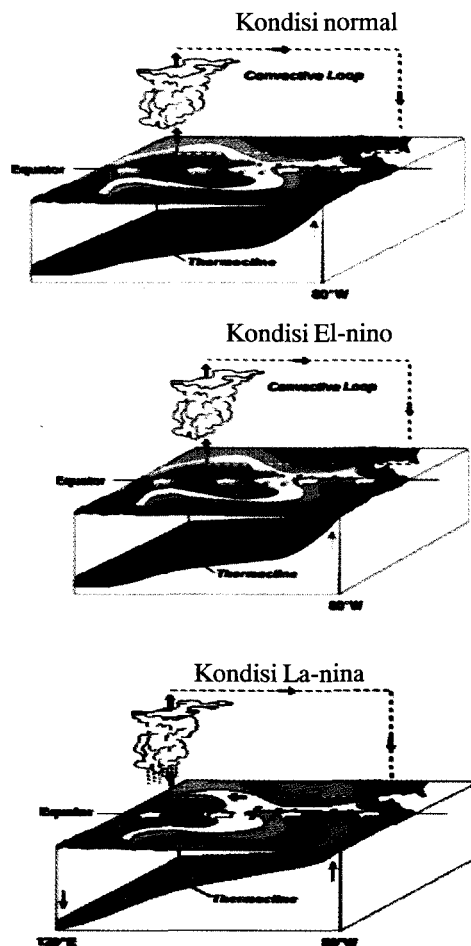
Musim Kemarau. Dari bulan April sampai Agustus angin pasat dari Tenggara yang kering bertiup dari arah Australia ke Sumatera, Jawa, dan Nusa Tenggara ZKLT terdesak ke arah utara Indonesia. Pantai Barat Sumatera masih menerima hujan yang cukup, karena angin tertahan dan terangkat ke puncak Bukit Barisan. Angin pasat Barat Daya yang lembap bertiup ke bagian Utara Sumatera dan Kalimantan dari Samudra Hindia dan Teluk Bengal. Dari Samudra Pasifik bertiup angin pasat Timur Laut ke arah Papua. Selama bulan April–Agustus kelembapan udara di seluruh Indonesia relatif seragam. Pada saat itu hujan masih turun di Sumatera bagian utara dan Kalimantan, kecuali Kalimantan Timur. Secara umum curah hujan lebih rendah dari periode September–Maret, maka periode April–Agustus disebut musim kemarau.

2.2.2 Anomali Iklim

Sirkulasi angin timur yang bertiup sepanjang khatulistiwa di Samudra Pasifik dari sekitar Peru ke arah Papua ditentukan oleh suhu muka laut Samudra Pasifik. Penyimpangan sirkulasi angin karena penyimpangan suhu muka laut mengakibatkan anomali iklim yang di kenal dengan *El-Nino* dan *La-Nina*. *El-Nino* adalah pertanda dari curah hujan di bawah normal atau kemarau panjang yang menyebabkan kekeringan. *La-Nina* adalah pertanda curah hujan di atas normal yang memicu kejadian banjir.

El-Nino. Arti *El-Nino* dalam bahasa Spanyol adalah anak laki-laki. Istilah ini digunakan oleh para nelayan di Amerika Selatan selama berabad-abad. *El-Nino* adalah penyimpangan iklim dan cuaca yang disebabkan oleh naiknya suhu permukaan laut di khatulistiwa Samudra Pasifik sampai $\pm 3^{\circ}\text{C}$ dari suhu rata-ratanya sekitar 24°C . Kejadian ini berlangsung setiap 3–5 tahun sekali. Proses alami terjadinya *El-Nino* dan *La-Nina* diilustrasikan pada Gambar 3.

Menurut Boer (1999), gejala *El-Nino* mulai tampak dengan menurunnya tekanan udara di Tahiti lebih rendah daripada tekanan udara di Darwin, sehingga massa air panas di kawasan Samudra Pasifik Bagian barat mengalir ke arah Timur dengan bantuan arus khatulistiwa. Akibatnya terjadi akumulasi massa air panas di Samudra Pasifik bagian Timur dan permukaan air lautnya naik lebih tinggi dari kawasan Barat. Kondisi ini mengakibatkan konveksi di Samudra Pasifik bagian Timur dan subsidensi di atas kawasan maritim Indonesia. Subsidensi ini akan menghambat pembentukan awan konveksi sehingga jumlah hujan turun di bawah normal di beberapa wilayah Indonesia.



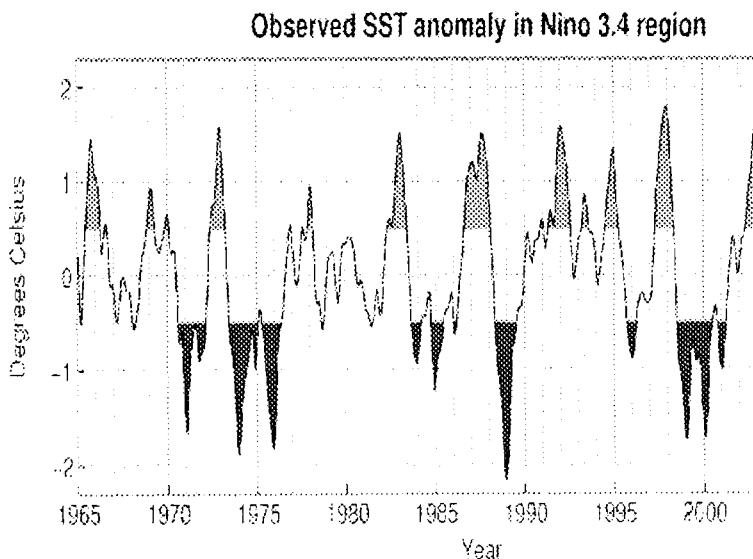
Gambar 3. Proses terjadinya *El-Nino* (<http://www.ucmp.berkeley.edu/>)

Indikasi *El-Nino* dengan intensitas sedang sampai kuat adalah suhu muka laut di *El-Nino* 3.4 lebih dari $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Contoh intensitas *El-Nino* lemah adalah yang terjadi pada tahun 1963/64 dan 1968/69, *El-Nino* sedang sampai kuat pada tahun 1957/58, 1965/66, 1972/73, 1982/83, 1986/87, 1991/92, 1994/95, 1997/98, dan 2002/03. Anomali suhu muka laut di lokasi Nino 3.4 periode 1965–2003 diilustrasikan dalam Gambar 4.

La-Nina. Proses alami terjadinya *La-Nina* adalah sebaliknya dari proses *El-Nino*. Pendinginan terjadi pada permukaan laut Samudra Pasifik. Angin Timur yang berbenturan dengan angin Barat mengangkat massa air panas lebih banyak dan lebih luas, sehingga hampir di seluruh Indonesia hujan turun dengan intensitas di atas normal. *La-Nina* dengan intensitas sedang sampai kuat adalah apabila suhu muka laut di lokasi *El-Nino* 3.4 di bawah 1°C .

3. DINAMIKA IKLIM DAN TANAMAN PADI

Dinamika iklim dan tanaman padi pada skala mikro diekspresikan dalam musim tanam (musim hujan dan musim kemarau) dan dalam bentuk anomali iklim (*El-Nino* dan *La-Nina*). Pengaruh dinamika iklim pada skala makro dipresentasikan dalam bentuk total produksi tahunan dan tidak dipisahkan antara produksi musim hujan dan musim kemarau.



Gambar 4. Anomali suhu muka laut di wilayah *El-Nino* 3.4 periode 1965–2003 (<http://meteora.ucsd.edu/>)

Intervensi manusia terhadap dinamika iklim menghasilkan ragam budi daya. Pembangunan dam dalam sistem irigasi sungai (*run off - the river system*) dan waduk dalam sistem irigasi waduk (*reservoir system*) adalah intervensi berupa investasi yang mahal, tetapi sangat efektif dan efisien dalam penggunaan sumber daya air. Pengaruh dinamika iklim pada skala mikro dengan intervensinya dalam bentuk teknik budi daya diekspresikan dalam produktivitas atau hasil per satuan luas.

3.1 Pengaruh Dinamika Iklim pada Skala Makro

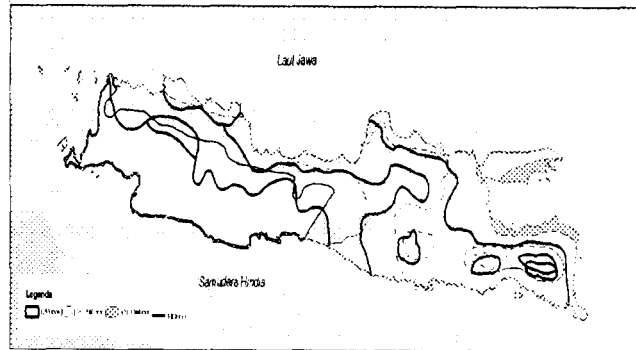
3.1.1 Sumbangan Pulau-pulau Penghasil padi terhadap Produksi Nasional

Pulau Jawa adalah penyumbang terbesar (57%) produksi padi nasional, diikuti oleh Sumatera (24%), Sulawesi (9%), Kalimantan (5%), dan Bali, NTB, NTT (4%). Di antara tiga provinsi di Jawa, Jawa Barat adalah penyumbang terbesar (20%), kemudian Jawa Tengah (19%), dan Jawa Timur (18%).

Dilihat dari besar dan luas defisit air, yaitu selisih antara evapotranspirasi potensial dengan evaporasi aktual menurut Thornthwaite, iklim Jawa Barat lebih basah daripada Jawa Tengah dan Jawa Timur. Hampir semua sentra produksi di Jawa (sekitar 30%) sebenarnya berada pada wilayah defisit air (Gambar 5). Perbukitan dan pegunungan, bahkan di antara gunung-gunung masih aktif, pada bagian tengah Pulau Jawa, yang membentang dari barat sampai ke timur adalah hulu sungai-sungai besar dan sedang, dan tak terhitung jumlah sungai-sungai kecil yang berhulu di perbukitan dan pegunungan tersebut. Topografi, bentuk lahan dan sungai sedang dan besar memungkinkan pembangunan waduk skala kecil, sedang dan besar untuk irigasi. Ketersediaan air untuk pengairan yang lebih terjamin karena dam dan waduk itu menjadikan Pulau Jawa sebagai gudang beras Indonesia.

Konsekuensi dari ketergantungan produksi padi nasional terhadap pulau Jawa dalam jangka panjang adalah:

- a) Pulau Jawa dihuni oleh lebih separuh penduduk Indonesia, kepemilikan tanah akan semakin sulit dan konversi lahan sulit dihindari.
- b) Kerusakan daerah aliran sungai (DAS) atas dan tengah akibat pembukaan lahan di DAS hulu dan tengah untuk pertanian mengancam ketersediaan air untuk irigasi karena erosi dan sedimentasi sungai dan waduk.
- c) Kekeringan karena *El-Nino* dan banjir saat *La-Nina* akan membuat produksi padi Indonesia sangat fluktuatif. Dampak *El-Nino* lebih besar terhadap wilayah yang berada di selatan khatulistiwa.



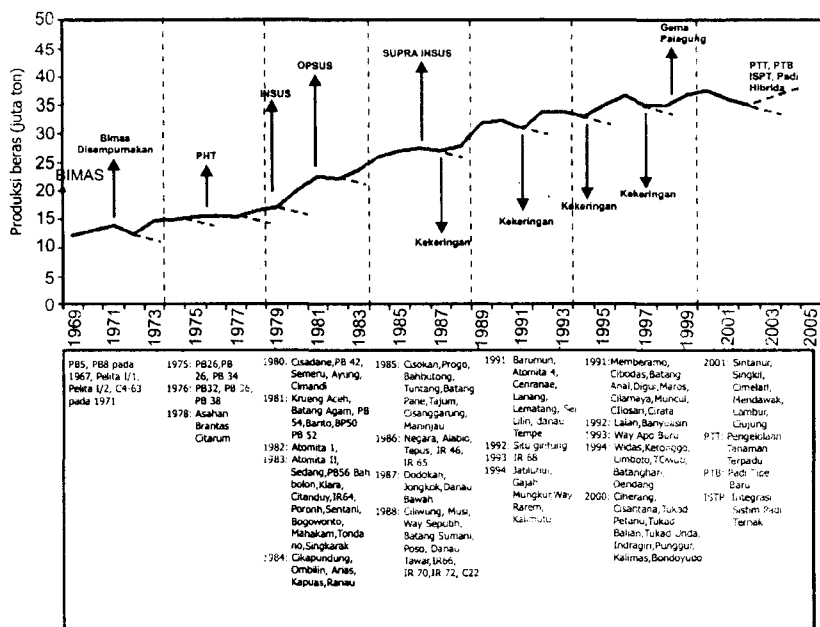
Gambar 5. Defisit air Pulau Jawa (evapotranspirasi potensial evapotranspirasi aktual dalam setahun)

3.1.2 Pengaruh *El-Nino* terhadap Produksi Padi

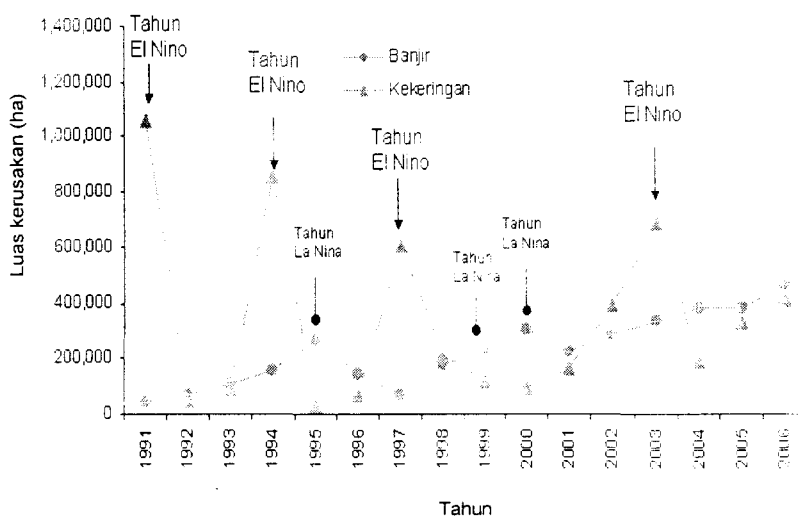
Pada periode 1969–2004 produksi beras bersifat fluktuatif (Gambar 6), pertanaman padi dilanda delapan kali kekeringan, terutama disebabkan oleh adanya *El-Nino*. Setiap kali terjadi kekeringan kurva produksi padi cenderung mandai, tetapi terpacu kembali oleh rekayasa kelembagaan, yaitu Bimas (disempurnakan), Insus, Opsus, Supra Insus, dan inovasi teknologi berupa pelepasan dan penanaman varietas unggul baru padi. Gema Palagung (Gerakan Mandiri Padi, Kedelai, dan Jagung) yang komponennya adalah PMI (perbaikan mutu intensifikasi, IP 300, dan IP 200), tidak mampu memacu kenaikan produksi, khususnya produksi padi secara spektakuler karena krisis moneter. Program PMI yang tiada lain adalah 10 jurus paket D Supra Insus diikuti oleh koreksi terhadap komponen teknologi melalui SUTPA (Sistem Usaha Tani Berbasis Padi Berlandaskan Agrobisnis), kemudian PTT (Pengelolaan Tanaman Terpadu), memacu kenaikan produksi padi sampai mencapai sekitar 54 juta ton pada tahun 2004.

Kejadian kekeringan menyebabkan kerusakan yang lebih besar dibandingkan kejadian banjir karena dampaknya yang lebih luas dan waktunya lebih lama. Tingginya tingkat kerusakan lahan sawah akibat kekeringan terjadi pada tahun-tahun *El-Nino* 1991, 1994, 1997, dan 2003. Sebaliknya, kerusakan lahan sawah akibat banjir terluas terjadi pada tahun *La-Nina* 1995, 1999, dan 2000 (Gambar 7).

Pada kondisi normal, waktu tanam padi sawah musim hujan di Jawa adalah awal Oktober sampai awal Desember. Pada periode tersebut tanah cukup lembap untuk persiapan tanam dan pertumbuhan akar tanaman padi. Namun pada kondisi *El-Nino* musim hujan mundur sampai dua bulan yang menyebabkan tertundanya panen. Naylor *et al.* (2007) menyimpulkan bahwa penurunan produksi padi Indonesia pada saat *El-Nino* disebabkan oleh a) mundurnya musim hujan yang menyebabkan mundurnya awal tanam musim hujan sehingga



Gambar 6. Kurva produksi padi periode 1969–2004 berfluktuasi karena kekeringan, rekayasa kelembagaan dan inovasi teknologi (Fagi dkk., 2002)



Gambar 7. Kerusakan lahan sawah akibat kekeringan dan banjir di Indonesia

terjadinya paceklik dan b) mundurnya musim tanam yang tidak dapat dikompensasi oleh peningkatan luas tanam pada musim kemarau atau musim hujan berikutnya. Konsekuensinya, setiap kenaikan suhu laut pada equatorial Samudra Pasifik 1°C yang berlangsung secara gradual sampai bulan Agustus, luas areal tanam padi Indonesia akan turun 1,0 juta ha (Naylor *et al.*, 2002).

3.2 Pengaruh Dinamika Iklim pada Skala Mikro

3.2.1 Parameter Iklim dan Tanaman Padi

Pengaruh dinamika iklim pada skala makro adalah resultante dari pengaruh parameter iklim pada skala mikro, seperti dalam formula berikut:

$$\partial\theta/\theta = \partial A/A + \partial I/I + \partial Y/Y - \partial L/L$$

di mana:

$\partial\theta/\theta$ = laju kenaikan produksi

$\partial A/A$ = laju kenaikan produksi dari perluasan area tanam (luas baku)

$\partial I/I$ = laju kenaikan produksi dari perluasan areal panen (intensitas tanam)

$\partial Y/Y$ = laju kenaikan hasil per hektare

$\partial L/L$ = laju penurunan kehilangan hasil

3.2.2 Interelasi Parameter Iklim

Parameter iklim yang berpengaruh terhadap tanaman padi, adalah curah hujan, sinar matahari, lama penyinaran (*sunshine hour*), kelembapan relatif, dan suhu. Interelasi antara parameter iklim terlihat pada Tabel 3. Curah hujan berkorelasi negatif dengan sinar matahari. Curah hujan tinggi berarti tutupan awan (*cloudiness*) padat. Sebab itu, makin panjang lama penyinaran atau tutupan awan jarang, makin cerah cahaya matahari ($r = 0,676^{++}$ dan $0,716^{--}$ pada musim hujan dan musim kemarau). Makin cerah sinar matahari, makin rendah kelembapan. Kelembapan berkaitan erat dengan curah hujan, suhu, dan kondisi hidrologis permukaan tanah. Suhu pada siang hari berkorelasi positif dan nyata dengan suhu malam hari dengan koefisien korelasi pada musim hujan dan musim kemarau berturut-turut $0,816^{++}$ dan $0,732^{--}$.

Informasi di atas dapat memprediksi apa yang akan terjadi terhadap keseluruhan parameter iklim kalau iklim berubah seperti perkiraan. Perubahan iklim akan mengurangi curah hujan, maka sinar matahari makin cerah dan suhu siang hari akan makin panas, demikian pula suhu pada malam hari. Sinar matahari yang cerah baik untuk fotosintesis, tetapi suhu yang tinggi, terutama suhu malam, akan memacu respirasi. Keseimbangan antara laju fotosintesis dan laju respirasi menentukan hasil padi.

Tabel 3. Hubungan antar komponen iklim di Kebun Percobaan IRRI, Los Banos, Filipina (14°LU) pada 1975–1976

Parameter iklim	Koefisien korelasi	
	Musim hujan	Musim kemarau
Curah hujan vs sinar matahari	- 0,346**	- 0,441**
Sinar matahari vs lama penyinaran	0,676**	0,716**
Sinar matahari vs kelembaban	- 0,602**	- 0,493**
Suhu siang vs suhu malam	0,816**	0,732**

Sumber: Fagi, 1977

3.2.3 Pengaruh Iklim terhadap Hasil Padi pada Kondisi Normal

Berdasarkan data dalam Tabel 3, pengetahuan tentang pengaruh salah satu dari parameter iklim terhadap hasil padi telah memberi gambaran tentang pengaruh parameter iklim lain terhadap hasil padi, karena adanya interelasi antara parameter-parameter iklim tersebut. Curah hujan dapat berpengaruh langsung dan tidak langsung terhadap hasil padi. Pengaruh langsung adalah melalui ketersediaan air bagi tanaman padi, sedangkan pengaruh tidak langsung adalah melalui kelembaban, dan suhu, dan intensitas cahaya matahari. Kelembaban berpengaruh terhadap perkembangan hama dan penyakit.

Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap hasil varietas padi IR28 dan IR26 dipelajari di Kebun Percobaan IRRI (IRRI Farm) di Los Banos, Filipina. Los Banos terletak pada 14°LU, beriklim tropik basah, jenis tanah Maahas Clay (*isotheimic clayed mixed Aquic Tropudaf*). Padi IR28 dan IR26 ditanam setiap bulan, mulai Januari 1974. Tanaman dipupuk 30, 60, dan 90 kg N/ha pada musim hujan dan 30, 60 dan 120 kg N/ha pada musim kemarau, pada berbagai waktu pemberian N.

Hubungan korelasi terbesar dan sangat nyata diperoleh antara radiasi matahari dengan hasil padi, terutama antara hasil padi dengan total energi radiasi matahari pada 30–45 hari sebelum panen. Periode 30–45 hari sebelum panen adalah fase reproduktif dari akhir pembungaan (100% berbunga) sampai kematangan gabah (Fagi, 1977). Jadi, yang menentukan keberhasilan tanaman padi menyerap sinar matahari secara efektif untuk fotosintesis adalah pada stadia pengisian gabah bukan waktu tanam, tetapi pada periode 30–45 hari sebelum panen (Tabel 4). Padi yang ditanam pada musim hujan bisa dipanen pada musim kemarau atau sebaliknya.

Pengaruh radiasi matahari pada 45 hari sebelum panen terhadap hasil gabah IR28 dan IR26 pada empat takaran pupuk N dan waktu panen terlihat pada Gambar 8 dan 9. Kesimpulan yang bisa ditarik dari kedua gambar tersebut adalah:

- Hasil IR26 dan IR28 pada semua takaran pupuk N makin rendah dengan makin rendahnya radiasi matahari pada 45 hari sebelum panen; peningkatan

Tabel 4. Jadwal tanam dan panen varietas IR28 dan IR26 pada musim kemarau dan musim hujan. IRRI Farm, 1975/76

Periode musim kemarau		Periode musim hujan	
Waktu tanam	Waktu panen	Waktu tanam	Waktu panen
Januari	April ^{1,2}	Juli	Oktober ¹
	Mei ²		November ²
Februari	Mei	Agustus	November
	Juni		Desember
Maret	Juni	September	Desember
	Juli		Januari
April	Juli	Oktober	Januari
	Agustus		Februari
Mei	Agustus	November	Maret (awal)
	September		Maret (akhir)
Juni	September	Desember	April (awal)
	Oktober		April (akhir)

¹ IR28, ² IR26,

Sumber: Fagi, 1977

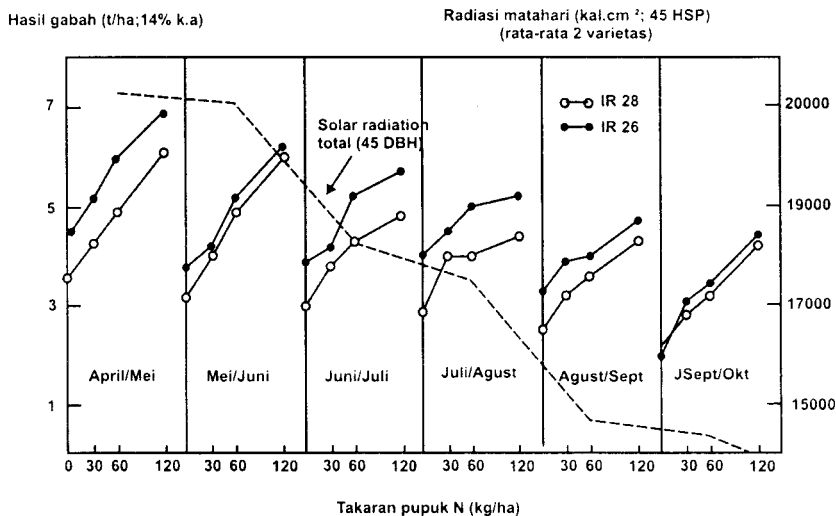
takaran pupuk sampai 120 kg N/ha pada musim kemarau (panen pada musim hujan) tidak dapat memacu kenaikan hasil pada radiasi matahari yang rendah.

- Hasil IR26 umumnya lebih tinggi daripada IR28, tetapi pada radiasi matahari yang sangat rendah (<10.000 kal/cm, 45 HSP) justru hasil IR28 lebih tinggi daripada IR26. Diperkirakan bahwa IR28 mempunyai kemampuan menyimpan hasil fotosintesis di pelepah daun; stok karbohidrat di pelepah daun disalurkan ke gabah saat radiasi matahari sangat rendah, atau *source* dari IR26 tidak mampu mengisi sink saat radiasi matahari sangat rendah. Pada saat radiasi matahari >12.000 kal/cm, 45 HSP, hasil IR26 terpacu lagi sehingga lebih tinggi dari hasil IR28 pada semua takaran pupuk N.
- Waktu tanam yang paling baik untuk menghasilkan gabah sekitar 6,0 t/ha (IR28) dan 7,0 t/ha (IR26) adalah bulan Januari (panen bulan April untuk IR28 dan bulan Mei untuk IR26); dengan takaran pupuk yang sama. Tanam pada bulan Januari berarti meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk N.
- Hasil IR28 dan IR26 pada musim kemarau rata-rata lebih tinggi dari hasil musim hujan pada semua takaran pupuk N; suhu tinggi pada musim kemarau memacu respirasi, tetapi radiasi surya yang tinggi mampu memacu fotosintesis lebih besar dari respirasi.
- Hubungan korelasi antara parameter iklim: radiasi matahari, lama penyinaran, suhu maksimum, suhu minimum, akumulasi suhu rata-rata harian, kelembapan dengan hasil IR28 dan IR26 dan komponen hasilnya (malai/rumpun, gabah/malai, jumlah gabah hampa, bobot 100 butir gabah) juga dihitung; hubungan korelasi yang tinggi, nyata dan konsisten hanya antara hasil gabah dengan radiasi matahari, baik pada musim kemarau

maupun musim hujan. Hubungan korelasi antara komponen hasil dengan parameter iklim tidak konsisten (Fagi, 1977). Tampaknya ada interaksi antara waktu tanam dengan parameter iklim yang bervariasi dan pertumbuhan tanaman padi yang menentukan komponen hasil dan hasilnya.

Efisiensi pemanfaatan radiasi surya oleh tanaman adalah perbandingan antara energi output (penumpukan senyawa organik) serta energi yang dipakai untuk itu, dengan total energi input (radiasi surya) yang diterima tanaman, di mana untuk berbagai jenis tanaman pertanian diperkirakan efisiensi tersebut berkisar antara 4%–20% (Monteith, 1977). Dari beberapa penelitian di Jepang dan Filipina diperoleh kisaran efisiensi penumpukan energi dalam bahan kering tanaman padi 2%–3% (IRRI, 1977, 1978). Di Indonesia, Las dkk. (1982, 1983, 1986) mendapatkan efisiensi pemakaian radiasi surya pada tanaman padi berkisar antara 2,3%–2,7% dan efisiensi penumpukan energi surya pada beras 0,21%–0,25%.

Beberapa faktor klimatik yang memengaruhi efisiensi pemanfaatan radiasi surya antara lain: (a) lintang dan musim; (b) keawanan dan kandungan aerosol atmosfer; (c) komposisi spektral radiasi surya; (d) konsentrasi CO₂ di lingkungan tanaman; dan (e) kuantum cahaya yang dibutuhkan dalam proses fotokimia. Faktor tanaman dan lingkungan lainnya yang berpengaruh adalah: (a) posisi dan susunan daun; (b) ILD; (c) struktur dan kadar/jenis pigmen daun; (d) ketersediaan air dan hara (Monteith, 1973; Wareing & Cooper, 1971).



Gambar 8. Tanggapan varietas IR28 dan IR26 yang ditanam pada berbagai waktu tanam dan musim hujan dipengaruhi oleh radiasi matahari selama 45 hari sebelum panen. IRRI Farm. 1975-1976 (Fagi, 1977)

Di Indonesia, pertanaman padi dijumpai sepanjang tahun. Ketersediaan air lah yang memungkinkan pertanaman padi terus-menerus itu. Ketersediaan air saja tidak cukup menjamin keberhasilan tanaman padi menghasilkan gabah sesuai dengan harapan petani atau sasaran produksi dari pemerintah. Pada kondisi di mana parameter iklim yang tak dapat diatur oleh manusia, teknik budi daya seperti pemupukan dan waktu pemberian pupuk tidak dapat merangsang peningkatan hasil padi, selama belum ada varietas yang mampu beradaptasi terhadap keragaman faktor iklim.

Dalam pengembangan padi hibrida, peranan suhu udara di Indonesia yang ditentukan oleh keragaman tinggi tempat dari permukaan laut sangat menentukan. Suhu udara sangat menentukan keselarasan pembungaan antara bunga betina (CMS) dengan restorer sebagai faktor yang sangat menentukan *seed set* atau perolehan benih hibrida. Keselarasan pembungaan tersebut sangat terkait dengan akumulasi bahang (panas) atau *degree days* yang sangat terkait dengan suhu rata-rata dan kebutuhan dasar tanaman.

Oleh sebab itu, suhu udara rata-rata masing-masing lokasi untuk produksi benih padi hibrida akan menentukan selisih waktu tanam antara CMS dan restorer. Sebagai contoh, selisih waktu tanam antara CMS dan galur restorer untuk mencapai keselarasan pembungaan berdasarkan akumulasi bahan pada fase semai-keluar bunga di Sukamandi berkisar antara 2–12 hari, di Muara 9–19 hari, dan di Kuningan 2–20 hari (Las dkk., 2007). Ketidakpastian waktu pembungaan inilah yang menyebabkan produksi benih padi hibrida sangat rendah.

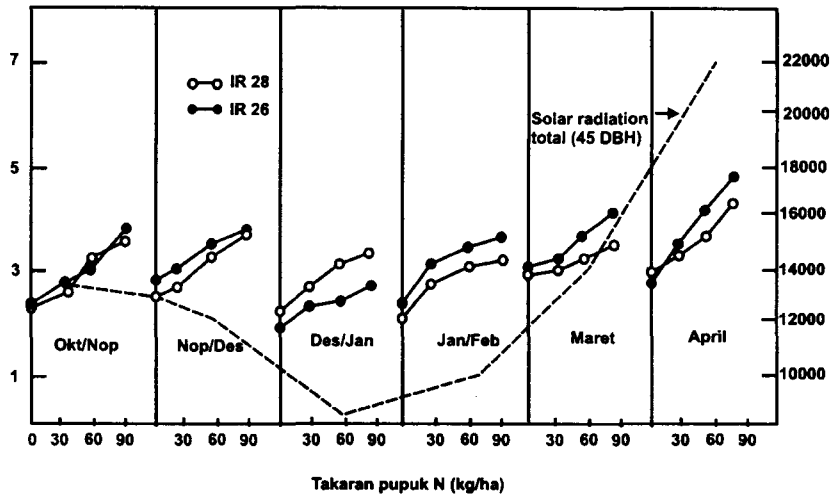
3.2.4. Pengaruh Iklim terhadap Hasil Padi pada Kondisi Tidak Normal

Analisis terhadap produksi padi pada tahun 1951–2005 di Kabupaten Ciparay, Kabupaten Bandung, menunjukkan bahwa keterlambatan penanaman musim hujan sampai bulan April menyebabkan penurunan produktivitas. Pada peluang melampaui 0,6 pada tahun normal, hasil padi mencapai 4,4 t/ha. Sebaliknya pada tahun *El-Nino*, produksi turun 1,4 t/ha menjadi sekitar 3 t/ha, sedangkan pada tahun *La-Nina* hasil meningkat 1,1 t/ha menjadi 5 t/ha (Gambar 10).

Kejadian iklim ekstrem telah menimbulkan banyak kerugian pada sektor pertanian. Sebagai ilustrasi, kejadian banjir dan kekeringan yang terjadi di Kecamatan Ciparay, Kabupaten Bandung. Kerugian yang diderita petani akibat banjir lebih tinggi daripada kekeringan, karena banjir yang umumnya berlangsung lebih dari 5 hari menyebabkan padi tidak dapat dipanen. Rata-rata pendapatan petani pada kondisi normal adalah Rp2,2 juta/tahun, jika banjir pada musim hujan Rp1,3 juta/tahun, dan jika kekeringan pada musim kemarau Rp1,9 juta/tahun (Gambar 11). Apabila kejadian iklim ekstrem ini dapat diantisipasi lebih awal, maka kerugian yang ditimbulkan oleh kejadian ini dapat ditekan.

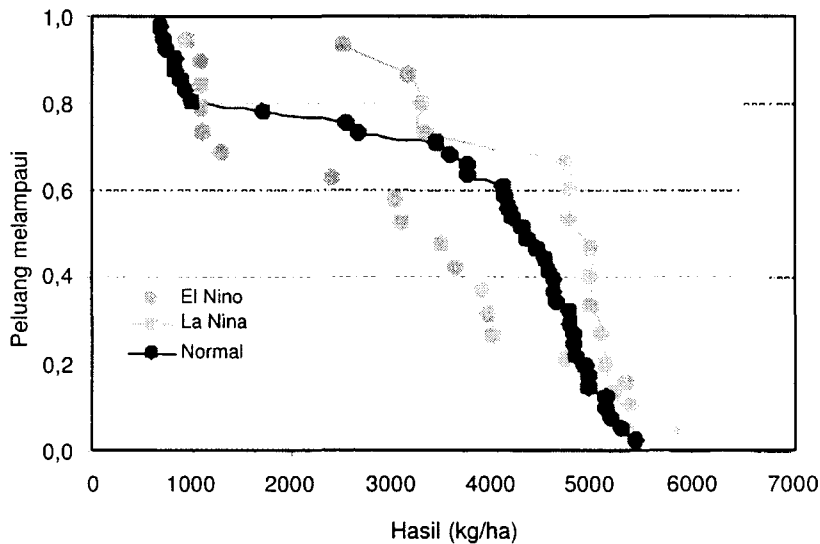
Radiasi matahari (kal.cm^{-2} ; 45 HSP)
(rata-rata 2 varietas)

Hasil gabah (t/ha ; 14% k.a)

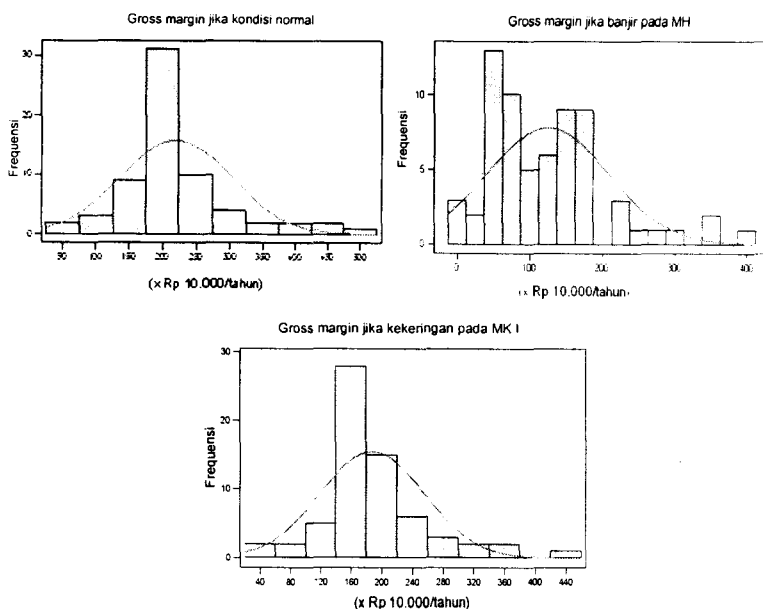


Gambar 9. Tanggapan varietas IR28 dan IR26 yang ditanam pada berbagai waktu tanam dan musim kemarau dipengaruhi oleh radiasi matahari selama 45 hari sebelum panen. IRRI Farm, 1975–1976 (Fagi, 1977)

Produksi padi



Gambar 10. Hubungan hasil padi dengan kejadian iklim ekstrem di Kecamatan Ciparay, Kabupaten Bandung (Surmaini dkk., 2006)



Gambar 11. Pendapatan petani padi pada kondisi normal, banjir, dan kekeringan (Surmaini dkk., 2006)

3.3 Perubahan Iklim dan Tanaman Padi

3.3.1 Perubahan Iklim

Perubahan iklim mengemuka dalam *Symposium on Climate and Rice* di IRRI pada 24–27 September 1974. Huke (1976) mensintesis makalah-makalah yang berkenaan dengan indikator dari perubahan iklim. Inti dari sintesis itu adalah:

- Pada periode 1890–1945 suhu udara di belahan bumi Utara (*Northern hemisphere*) naik rata-rata $0,9^{\circ}\text{C}$, diikuti oleh iklim yang nyaman. Sejak saat itu budi daya pertanian meluas ke wilayah yang sebelumnya tidak ditanami karena dingin. Pergeseran wilayah pertanian berlangsung pada periode 1930–1950.
- Pada tahun 1950, ada pendapat lain bahwa suhu udara semakin turun. Pada tahun 1970 dilaporkan bahwa suhu turun rata-rata $0,5^{\circ}\text{C}$. Walaupun turunnya suhu dianggap tidak mengkhawatirkan dipandang dari berbagai perspektif, tetapi bermakna penting. Pola curah hujan juga berubah akibat dari penurunan suhu.

Akibat dari kontroversi penyebab terjadinya perubahan iklim (pemanasan global atau pendinginan global) pada tahun 1970-an sampai awal tahun 1980-an, maka perubahan iklim masih dianggap sebagai wacana dan perdebatan akademis.

Dewasa ini komunitas dunia yang terwakili dalam PBB (Perserikatan Bangsa-Bangsa) meyakini bahwa perubahan iklim disebabkan oleh pemanasan global. Konsensus berkembang bahwa suhu bumi terus meningkat karena konsentrasi gas CO_2 , CH_4 , N_2O , dan GRK lain di atmosfer juga meningkat. Fakta di Cina bahwa pertanaman padi bergeser ke Utara, karena suhu yang makin panas membuat iklim di Cina bagian Utara makin cocok untuk memperoleh hasil padi yang tinggi (Hijmans, 2007).

Perubahan iklim ditandai tidak hanya suhu yang semakin tinggi, tetapi juga curah hujan yang semakin berkurang dan tidak menentu. Pergeseran pertanaman padi dari Cina bagian Selatan ke Utara, karena ketersediaan air irigasi yang semakin krisis di bagian Selatan (Barclay, 2007). Huke (1976) berpendapat bahwa perubahan iklim tidak terlalu berpengaruh terhadap produksi padi di zone 1 dan 3, tetapi berpengaruh nyata di zone 2. Indonesia berada di zone 2 (Gambar 2).

Runtuwunu dan Syahbuddin (2007) membuktikan terjadinya pergeseran pola curah hujan selama 128 tahun di salah satu stasiun iklim di Jawa Barat, di mana pola hujan A (berdasarkan klasifikasi Oldeman) tidak mengalami perubahan, dengan jumlah bulan basah menurun 2 bulan, pola hujan B1 menjadi pola B2 pada tahun normal, dan pola hujan C2 menjadi D3 pada tahun kering. Dampak langsung dari perubahan pola hujan tersebut mengakibatkan penurunan periode tanam. Pada tahun basah, lahan yang awalnya dapat ditanami padi tiga kali berkurang menjadi dua kali setahun. Pada tahun normal, terutama pada masa tanam kedua diperlukan teknologi irigasi untuk tetap mempertahankan periode tanam dua kali setahun. Sedangkan pada tahun kering, berdampak lebih serius.

3.3.2 Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Hasil Padi

Budi daya padi sawah sering dituduh sebagai penyumbang terhadap perubahan iklim melalui emisi gas CO_2 , CH_4 , dan N_2O , tetapi budi daya padi itu sendiri akan terkena dampak negatif dari perubahan iklim. Begitu pentingnya peranan padi dalam sistem pangan, maka masalah ini harus dipecahkan, tidak hanya dari sisi dampak intensifikasi produksi padi terhadap emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O (teknologi mitigasi), tetapi juga yaituantisipasi dampak perubahan iklim terhadap hasil dan produksi padi (teknologi antisipasi).

Perubahan kualitas dan komposisi udara, hujan asam, dan “awan coklat Asia” akan menghasilkan bioklimat baru bagi sistem produksi pertanian umumnya, dan bagi sistem produksi padi khususnya. Ciri utama bioklimat baru, antara lain adalah konsentrasi CO_2 di udara makin tinggi, suhu makin panas, dan iklim ekstrem (*El-Nino/La-Nina*) akan lebih sering terjadi. IRRI mensintesis pengaruh parameter iklim, pada kondisi iklim yang berubah, terhadap hasil dan produksi padi. Secara singkat sintesis itu diuraikan berikut ini:

- Naiknya konsentrasi CO₂ menimbulkan dampak positif terhadap biomassa padi, tetapi pengaruh bersihnya terhadap hasil padi bergantung pada penurunan hasil akibat kenaikan suhu udara. Untuk setiap 75 ppm kenaikan konsentrasi CO₂, hasil padi akan naik 0,5 t/ha, tetapi hasil padi akan turun 0,6 t/ha untuk setiap kenaikan suhu 1°C. Hasil penelitian dengan menggunakan FACE (*free-air CO₂ enrichment*) menunjukkan bahwa kenaikan hasil karena naiknya konsentrasi CO₂ tidak sebesar dari penelitian yang menggunakan sistem tertutup (*enclosure chamber*).
- Kenaikan suhu dan kejadian cuaca ekstrem adalah salah satu indikator dari perubahan iklim (Mirza, 2003). Pada tanaman padi suhu tinggi ekstrem sangat penting pada periode pembungaan. Ekspose tanaman terhadap suhu tinggi ekstrem pada stadia pembungaan dalam beberapa jam mengurangi viabilitas tepung sari, dan menyebabkan kehilangan hasil. Sterilitas gabah naik cepat pada suhu lebih dari 35°C (Osada *et al.*, 1973, Mitsui *et al.*, 1976), dan peningkatan CO₂ bersamaan dengan suhu tinggi dapat memperburuk keadaan, karena turunnya pendinginan tanaman melalui transpirasi.
- Kenaikan suhu malam adalah penyebab utama dari naiknya suhu global sejak pertengahan abad ke-20 (Kukla dan Karl, 1993). Hasil padi berkorelasi negatif dengan suhu malam (Peng *et al.*, 2004). Alasan dari korelasi negatif ini adalah variasi radiasi matahari, kehilangan akibat respirasi atau pengaruh diferensial dari suhu malam vs. suhu siang terhadap pertumbuhan anakan, pengembangan luas daun, pemanjangan batang dan pengisian gabah (Peng *et al.*, 2004; Sheehy *et al.*, 2005).
- Pemanasan akan mengakselerasi banyak proses mikrobiologi dalam sistem tanah-genangan air yang konsekuensinya adalah pada siklus N dan C. Kenaikan suhu tanah dapat juga menaikkan kehilangan CO₂ autotrop dari tanah karena respirasi akar, eksudat akar dan pergantian akar-akar halus. Tanaman padi yang tumbuh pada suhu tanah tinggi dapat mengubah partisi C dan N-nya dibanding dengan yang tumbuh pada suhu tanah rendah (Lynch dan St. Clair, 2004).
- Pengkayaan konsentrasi CO₂ dan perubahan suhu dapat juga berpengaruh terhadap evolusi spesies gulma dan kompetisi antara spesies gulma golongan C₃ dan C₄ (Ziska, 2000). Hal yang sama dapat terjadi pada dinamika populasi hama dan penyakit tanaman, juga terhadap konsep PHT pengendalian hama terpadu. Secara rinci IRRI (2004) memperkirakan:
 - a) Kenaikan suhu dapat menekan populasi spesies musuh alami hama padi,
 - b) Redistribusi dari hama/penyakit, dominasi spesies hama/penyakit tertentu,
 - c) Seleksi biotipe hama/patotipe penyakit dengan virulensi yang berbeda.

- d) Pengaruh diferensial pengaruh terhadap keseimbangan antara hama/penyakit dengan musuh alaminya,
- e) Perubahan ketersediaan pangan yang menyebabkan pergeseran hama/penyakit, dan
- f) Perubahan interaksi kompetitif antara tanaman dan gulma.

Semua itu dapat menyebabkan menghilangnya beberapa spesies hama/penyakit dan sebarannya, dan potensi penyebaran yang lebih luas dari hama/penyakit sekunder dan spesies yang masih bertahan (menyesuaikan dengan kondisi iklim yang baru).

Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer mempunyai pengaruh positif terhadap produksi biomas, tetapi pengaruhnya terhadap penurunan produksi padi berhubungan dengan peningkatan suhu udara. Setiap kenaikan 75 ppm konsentrasi CO₂ produksi padi meningkat 0,5 t/ha, tetapi hasil akan turun 0,6 t/ha setiap kenaikan suhu 1°C (Sheehy *et al.*, 2005). Hasil penelitian (Matthews *et al.*, 1997) menunjukkan bahwa berdasarkan simulasi tanaman, kenaikan suhu rata-rata 1°C akan menurunkan produksi 5–7% padi. Penurunan hasil tersebut disebabkan oleh berkurangnya pembentukan sink, pendeknya periode pertumbuhan, dan meningkatnya respirasi (Matthews dan Wassmann, 2003).

Konsekuensi yang paling pasti dari perubahan iklim global adalah kenaikan muka air laut antara 10–86 cm pada tahun 2100 (IPCC, 2001). Daerah pesisir yang merupakan daerah pertanian padi paling produktif akan terkena dampak dari kenaikan muka air laut. Salinitas akan menjadi lebih luas dan parah. Perubahan salinitas dari <3,0 mmhos/cm (lahan dengan kesesuaian tinggi) menjadi 3,1–5,0 mmhos/cm (kesesuaian sedang) sampai 5,1–8,0 mmhos (kesesuaian marginal) akan menurunkan hasil dan produksi padi. Selain itu, naiknya suhu muka laut mengakibatkan kerusakan sistem hidrologi yang berpengaruh terhadap pertanian padi di daerah pesisir (Wassmann *et al.*, 2004).

3.3.3 Antisipasi Dampak Negatif Perubahan Iklim melalui Rekayasa Genetik

Indonesia menghadapi konsekuensi serius dari perubahan iklim karena posisinya dalam peta geografi (Gambar 2). Ketahanan dan kemandirian pangan yang bertumpu pada padi akan sangat terganggu karena pengaruh negatif dari pemanasan global terhadap hasil dan produksi padi. Sementara produksi padi dituntut lebih banyak untuk memenuhi kebutuhan beras yang terus meningkat.

Kenaikan suhu, terutama suhu malam, yang memacu laju respirasi, harus diimbangi oleh kenaikan laju fotosintesis untuk memanfaatkan radiasi matahari yang tinggi pada siang hari. Untuk mendorong efisiensi fotosintesis tanaman padi ditempuh dengan mengubah pola fotosintesis padi dari C₃ menjadi C₄. Pada

suhu udara yang panas tanaman jagung (C_4) memberi hasil 50% lebih tinggi dan meningkatkan dua kali lipat efisiensi penggunaan air dibanding tanaman C_3 (padi). Tanaman C_4 menggunakan pupuk N lebih efektif dari tanaman C_3 (Tabel 5). Perubahan sistem fotosintesis dari tanaman padi menjadi tanaman C_4 dengan memindahkan gen-gen jagung untuk mencapai secara simultan kenaikan hasil, toleransi terhadap suhu tinggi, dan efisiensi penggunaan air dan pupuk N pada kondisi iklim yang berubah, perlu diupayakan.

Peneliti IRRI optimis bahwa padi C_3 dapat direkayasa secara genetik dengan melihat hal-hal berikut:

- Pola fotosintesis C_4 terjadi pada 45 lineage yang terpisah, dan sekitar 10.000 spesies C_4 telah diklasifikasi,
- Gen pengendali C_4 pada tanaman jagung dapat dimasukkan dengan berhasil ke dalam tanaman padi,
- Terbukti bahwa spesies padi liar mempunyai sifat C_4 ,
- Sindron C_3 dan C_4 tidak terpisah secara tegas seperti dugaan sebelumnya,
- Enzim C_4 tidak dijumpai khusus pada tanaman C_4 , tetapi tanaman C_3 juga mempunyai enzim C_4 , tetapi produksinya sangat sedikit atau hampir tak terdeteksi,
- Dugaan bahwa gen pengendali C_4 timbul dari serangkaian gen yang telah ada ditanaman C_3 , perlu modifikasi pola ekspresi dan sifat kinetik dan enzim,
- Pola C_4 berkembang baik pada lokasi tertentu dari tanaman C_3 , yaitu pada jaringan hijau di ikatan vaskular. Gabah padi diduga menggunakan sebagian dari pola C_4 ,
- Jagung, tanaman C_4 utuh, mempunyai bagian-bagian jaringan C_3 , kalau sel mesofil tidak berdekatan dengan ikatan sel pelepah, terutama pada pelepah daun dan sekam,
- Padi liar ternyata mempunyai banyak bentuk anatomis dari tanaman C_4 ,
- Padi liar juga mengandung peralihan C_3 - C_4 .

Dari uraian di atas jelas bahwa proses evolusi telah dan sedang berlangsung yang mengubah pola fotosintesis C_3 ke pola fotosintesis C_4 , atau sebaliknya. Parameter iklim sangat berpengaruh dalam proses evolusi. Rekayasa genetik

Tabel 5. Perbandingan efisiensi penggunaan air, efisiensi penggunaan radiasi matahari dan efisiensi penggunaan N-fotosintesis antara jagung tanaman C_4 dan padi tanaman C_3

Jenis Tanaman	Efisiensi Penggunaan air (g BK/kg H ₂ O)	Efisiensi Penggunaan radiasi (g BK/MJ)	Efektivitas Penggunaan N-Fotosintesis (Nm CO ₂ 5 ⁻¹ mmol ⁻¹ N)
Jagung (C_4)	2,9	3,3	0,74
Padi (C_3)	1,6	2,2	0,26
C_4/C_3 nisbah	1,8	1,5	2,8

¹ Data diperoleh dalam sidang IRRI Board of Trustees,
Sumber: IRRI komunikasi personal

diharapkan dapat mempercepat proses perubahan pola fotosintesis tanaman padi C_3 menjadi C_4 .

4. IKLIM DAN KETERSEDIAAN AIR UNTUK PERTANIAN

Pola curah hujan, intensitas hujan dan distribusi hujan adalah data yang digunakan untuk merumuskan tipe iklim dan zona agroklimat. Fluktuasi spasial dan temporal yang perlu diketahui adalah variasi datang dan berakhirnya musim hujan, kaitannya dengan pola tanam berbasis padi dan teknologinya. Variasi, karakteristik dan pola curah hujan di sentra-sentra produksi padi di Indonesia sangat besar karena topografi, bentuk lahan dan kedudukannya dalam peta geografi yang sangat luas.

4.1 Zona Agroklimat

Oldeman *et al.* (1975, 1977, 1979, dan 1980) menggolongkan zona agroklimat berdasarkan jumlah bulan basah (curah hujan >200 mm per bulan) dan bulan kering (curah hujan <100 mm per bulan) sebagai dasar dalam memprediksi potensi produksi tanaman. Batasan jumlah curah hujan itu berdasarkan asumsi bahwa a) evapotranspirasi, walaupun bervariasi dalam setahun umumnya sekitar 200 mm per bulan, dan b) kehilangan air karena perkolasi dan limpasan permukaan (*seepage*) sekitar 100 mm per bulan. Deskripsi zona agroklimat diperlihatkan pada Tabel 6. Tanpa melihat daya pegang tanah terhadap air (*water holding capacity*) dan dalamnya muka air tanah, zone agroklimat D1 sampai E3 adalah yang paling kritis, karena curah hujannya yang minimal.

Di sentra produksi padi, kisaran curah hujan tahunan rata-rata berkisar 1500–2000 mm. Sebagian terbesar air hujan berasal dari musim hujan. Tetapi walaupun musim hujan, adakalanya distribusi hujan tidak merata, sehingga ketersediaan air tidak memenuhi kebutuhan pada stadia pertumbuhan kritis yang menyebabkan hasil tidak optimal. Ada juga sentra produksi yang terletak di dataran rendah dengan drainase jelek. Di sentra produksi demikian penanaman padi terancam banjir dan gagal panen kalau hujan di atas normal. Kekeringan dan banjir akan lebih parah kalau DAS rusak, sehingga terjadi sedimentasi di sungai-sungai dan waduk dan mengurangi debit air.

Pada lahan kering berlereng di bagian pluvial dan pada lereng-lereng berteras dari suatu toposekuen, di mana air tanah cukup dalam dan curah hujan adalah satu-satunya sumber air, padi gogo sering menderita cekaman air pada fase reproduktif. Masalah kekurangan air lebih parah kalau curah hujan di bawah normal, terutama di zona agroklimat D dan E, padi ditanam di tanah *Oxisols*, *Ultisols*, dan *Andepts*, dan varietas padi berumur dalam ditanam terlambat

Tabel 6. Zona Agroklimat dan deskripsinya (Oldemat *et al.*, 1975; 1977; 1979; dan 1980).

Zona agroklimat	Deskripsi
A	Bulan basah lebih dari 9 bulan berturut-turut
B1	Bulan basah lebih 7 sampai 9 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2 bulan
B2	Bulan basah lebih 7 sampai 9 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2 sampai 4 bulan
C1	Bulan basah lebih 5 atau 6 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2 bulan
C2	Bulan basah lebih 5 atau 6 bulan berturut-turut, bulan kering 2 atau 3 bulan
C3	Bulan basah lebih 5 atau 6 bulan berturut-turut, bulan kering 3–5 bulan
D1	Bulan basah lebih 3 atau 4 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2 bulan
D2	Bulan basah lebih 3 atau 4 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2–3 bulan
D3	Bulan basah lebih 3 atau 4 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 3 sampai 5 bulan
D4	Bulan basah lebih 3 atau 4 bulan berturut-turut, bulan kering lebih dari 5 bulan
E1	Bulan basah kurang dari 3 bulan berturut-turut, bulan kering kurang dari 2 bulan
E2	Bulan basah kurang dari 3 bulan berturut-turut, bulan kering 2 dan 3 bulan
E3	Bulan basah kurang dari 3 bulan berturut-turut, bulan kering 3 sampai 5 bulan

Di dataran pantai dan dataran banjir (*flood plains*) pada bagian freatik dengan air tanah dangkal atau regim air basah, banjir sapuan (*flashflood*) sering terjadi kalau musim hujan lebih basah dari keadaan normal. Kekeringan singkat pada tanah Vertisols atau tanah yang mempunyai ciri vertik dapat merusak akar tanaman padi dan menurunkan hasil gabah.

Di lahan irigasi di mana pola tanamnya padi-padi dan padi-palawija, tanaman yang menyaingi padi untuk mendapat air adalah kedelai, kacang panjang, jagung dan tebu. Tanaman tebu irigasi yang masa tumbuhnya 12–18 bulan kalau tanaman singgang (*ratoon*) digunakan, adalah pesaing langsung tanaman padi untuk mendapat air irigasi. Tanaman tebu irigasi seluas sekitar 200 000 ha, umumnya berada di Pulau Jawa. Walaupun tanaman palawija dan sayuran beririgasi tidak luas dibanding dengan padi sawah irigasi, tanaman tersebut penting di pulau Jawa, terutama pada tahun-tahun kering.

4.2 Neraca Air Lahan Sawah

Secara sederhana neraca air (*water balance*, dan sekarang dikenal pula dengan istilah *water budget*) mempelajari keseimbangan antara air yang masuk dan air yang keluar dari suatu sistem, seperti petakan sawah dengan luasan tertentu. Dengan menguasai prinsip neraca air diharapkan para pengguna air dapat memperkirakan jumlah air yang dibutuhkan untuk sistem budi dayanya pada suatu petakan tertentu. Kuantifikasi neraca air untuk padi sawah telah dilakukan oleh Kampen, 1970; Mizutani *et al.*, 1989; dan Watanabe, 1992.

Air yang masuk ke dalam petakan sawah disebut input faktor seperti, curah hujan, air irigasi dan atau air rembesan atau aliran air samping (*seepage*). Input

faktor biasanya diberi tanda positif. Air atau uap air yang hilang dari lahan sawah disebut output faktor, seperti evapotranspirasi, infiltrasi pada lapisan dalam atau perkolasi (*deep percolation*) dan air limpasan (*outflow runoff*). Output faktor biasanya bertanda negatif.

Secara umum neraca air padi sawah pada petak sawah pertama berdasarkan volumetrik air dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta S_{i1} = H_{(i-1)1} + \theta_{pi} - \theta_{qi} \quad (1)$$

di mana perubahan volume air yang terdapat pada petakan sawah pertama pada waktu ke i (ΔS_{i1}) juga dipengaruhi oleh tinggi muka air pada satu waktu sebelumnya $i-1$ ($H_{(i-1)1}$).

Nilai θ_{pi} dan θ_{qi} masing-masing merupakan volume air masuk dan keluar petakan sawah pada waktu ke i yang dihitung menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\theta_{pi} = CH_i + I_i + As_i \quad (2)$$

$$\theta_{qi} = ETc_i + Pd_i + L_i \quad (3)$$

Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air, maka kehilangan air melalui evapotranspirasi, perkolasi dan limpasan harus ditentukan secara lebih detail. Dengan demikian, volume air yang keluar dari satu petakan sawah dapat diimbangi dengan tepat oleh volume air yang masuk dalam petakan sawah tersebut. Nilai dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$ETc = ETo * Kc \quad (4)$$

Selanjutnya untuk menentukan kebutuhan air irigasi real time atau penjadwalan kebutuhan irigasi tanaman dengan aplikasi air berfrekuensi tinggi, maka nilai harus dihitung berdasarkan nilai basal koefisien tanaman yaitu:

$$ETc = ETo * Kcb \quad (5)$$

Nilai Kcb dipengaruhi oleh nilai koefisien tanaman (Kc) dan koefisien evaporasi (Ke). Kedua nilai tersebut memiliki hubungan linear berbanding terbalik. Semakin besar tanaman atau masa tanam maka nilai Kc akan semakin besar dan sebaliknya dengan nilai Ke (Allen *et al.*, 1998). Jika ketersediaan data iklim cukup lengkap, sebaiknya nilai ETo dihitung menggunakan metode Penman-Monteith (FAO, 1992). Namun demikian, bila ketersediaan data iklim terbatas hanya pada data temperatur dan extraterrestrial radiasi nilai ETo dapat

dihitung menggunakan metode Hargreaves et al. (1985). Namun demikian, nilai rata-rata maksimum kehilangan air ke udara melalui *ETc* di seluruh wilayah Indonesia tidak lebih dari 4,0 mm/hari (konsultasi pribadi dengan Dr. Istiqlal Amien).

Selain perhitungan di atas, untuk menentukan kebutuhan dan memperbaiki efisiensi pemanfaatan air irigasi dibutuhkan peralatan yang sederhana, murah dan mudah dioperasikan berdasarkan pendekatan meteorologi (Stanhill, 2002; Strangeways, 2001). Penggunaan Pan evaporimeter klas A untuk menduga kebutuhan air irigasi dapat menggantikan perhitungan berdasarkan metode Penman-Monteith, seperti yang disarankan oleh FAO (Allen et al., 1998). Akan tetapi sebaliknya, jika ingin menerapkan sistem usaha tani dengan teknologi tinggi dan memiliki jaringan stasiun iklim otomatis yang sangat baik, maka kebutuhan air dan peningkatan efisiensi penggunaan air irigasi dapat dilakukan berdasarkan perhitungan menggunakan metode Penman-Monteith.

Pada hamparan sawah yang sangat luas, terdiri atas beberapa petakan dan membentuk sekuensial pembagian air, di mana air yang disalurkan dari satu petakan pertama ke petakan berikutnya hingga petakan ke n dianggap sebagai volume air limpasan baik yang disalurkan melalui saluran tertentu atau melewati pematang sawah (L_{in}), maka persamaan (1) menjadi:

$$\Delta S_{in} = L_{in} + H_{(i-1)n} + \theta_{pi} - \theta_{qi} \quad (6)$$

Untuk mendapatkan nilai tinggi air limpasan pada petakan ke n , maka nilai L_{in} dibagi dengan luasan areal petakan ke $n-1$.

Pada lahan sawah bukaan baru atau pada lahan sawah tadah hujan dengan sifat fisik yang hampir sama, dapat dipastikan akan terdapat periode kering pada lapisan permukaan setelah pemberian air irigasi, terutama pada saat pengisian biji. Pada saat terdapat suplai air baik melalui irigasi maupun hujan, maka aliran air tanah akan bergerak ke lapisan yang lebih dalam. Ketika infiltrasi atau perkolasi nol dan kehilangan air tanah tinggi baik melalui evaporasi maupun transpirasi maka pergerakan aliran air tanah akan sebaliknya, yaitu dari lapisan yang lebih dalam (zona jenuh) ke permukaan (zona tidak jenuh) (Ahmad dkk., 2002; Syahbuddin dan Yamanaka, 2006), baik melalui gerakan kapiler pori tanah maupun akibat peranan akar tanaman dalam memompa air ke lapisan permukaan. Kedua proses yang terjadi secara simultan tersebut merupakan karakteristik tanah yang mengalami perlakuan irigasi secara intensif.

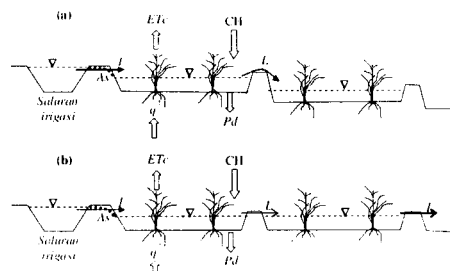
Konsekuensi kedua proses tersebut (pergerakan air ke bawah dan ke atas) akan berdampak terhadap perhitungan neraca air lahan sawah, terutama pada lapisan permukaan atau zona perakaran padi. Sumbangan aliran air dari zona jenuh/phreatic/ saturated/groundwater ke lapisan permukaan cukup signifikan dan tidak diabaikan. Penelitian di India pada lahan sawah di Pindi Bhattian,

menunjukkan suplai air tanah dari subsoil (kedalaman 2 m) mencapai 3.93 cm/hari, sedangkan suplai air dari *phreatic surface* mencapai 5,24 cm/hari pada saat infiltrasi nol (tidak ada suplai air irigasi atau hujan) (Ahmad dkk., 2002). Sedangkan pada lahan kering, suplai air dari lapisan tanah dengan kedalaman 120 cm berkisar antara 0,92-1,07 mm/hari saat musim kering (Syahbuddin, 2006). Pada saat terjadi suplai air melalui irigasi dan atau curah hujan, persamaan (2) tidak mengalami perubahan. Akan tetapi ketika periode kering maka persamaan (2) menjadi:

$$\theta_{p_i} = q^{\uparrow}_{i-1} + As_i \quad (7)$$

di mana $q^{\uparrow}_{i-1}$ adalah suplai air dari subsoil atau phreatic zone pada satu satuan waktu sebelumnya. Skematik komponen neraca air lahan sawah seperti terlihat pada Gambar 12, masing-masing untuk lahan sawah di daerah dataran dan di daerah berlereng.

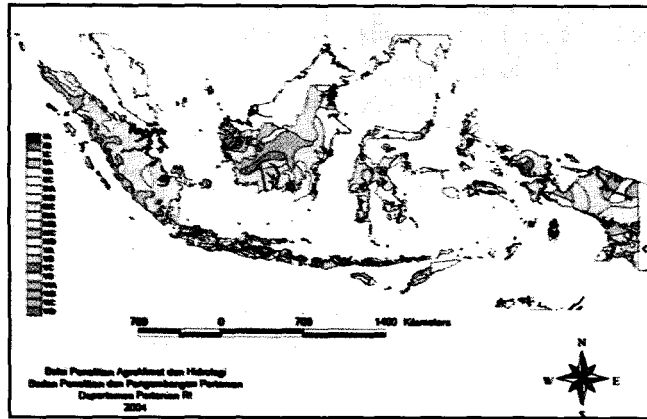
Prinsip perhitungan neraca air di atas selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan kondisi surplus dan defisit air suatu hamparan lahan sawah. Atau dengan perkataan lain, prinsip neraca air dapat digunakan untuk mengetahui tingkat rawan kekeringan hamparan sawah.



Gambar 12. Skematik komponen neraca air lahan sawah daerah berlereng (a) dan daerah datar (b)

5. ATLAS SUMBER DAYA IKLIM DAN KALENDER TANAM

Keragaman spasial iklim Indonesia diilustrasikan oleh karakteristik hujan di wilayah Indonesia Bagian Barat lebih basah dibanding Indonesia Bagian Timur, perbedaan intensitas dan lama penyinaran dalam suatu wilayah maupun antar wilayah. Adapun keragaman secara temporal antara lain terlihat dari fluktuasi curah hujan antara musim hujan dan musim kemarau, perbedaan suhu udara, kelembapan dan anasir iklim lainnya antara siang dan malam. Boerema (1941) mengidentifikasi 153 pola curah hujan di Indonesia, Oldeman membaginya menjadi 13 zona atau tipe agrolimat (Olderman *et al.*, 1975; 1977; 1979; dan 1980), sedangkan BMG memilah wilayah Indonesai atas 220 zona musim. Terdapat 21 pola agoklimat berdasarkan enam kelompok jumlah curah hujan tahunan (Gambar 13).



Gambar 13. Peta wilayah hujan Indonesia (Balitklimat, 2004)

Runtunuwu (2006) dan Syahbuddin (2007) menunjukkan terjadinya pergeseran pola curah hujan selama 128 tahun di salah satu stasiun iklim di Jawa Barat, di mana pola hujan A (berdasarkan klasifikasi Oldeman) tidak mengalami perubahan dengan jumlah bulan basah menurun 2 bulan, pola hujan B1 menjadi pola B2 pada tahun normal, dan pola hujan C2 menjadi D3 pada tahun kering. Dampak langsung dari perubahan pola hujan tersebut mengakibatkan penurunan periode tanam. Pada tahun basah, lahan yang awalnya dapat ditanami padi tiga kali berkurang menjadi dua kali setahun. Sementara tahun normal, terutama pada masa tanam kedua diperlukan teknologi irigasi untuk tetap mempertahankan periode tanam dua kali setahun. Sementara pada tahun kering, berdampak lebih serius, di mana lahan yang dapat ditanami padi sekali setahun. Kegagalan 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.

Keterlambatan awal tanam selain disebabkan oleh musim kemarau yang panjang (kekeringan klimatologis) juga dipengaruhi oleh keterlambatan pemanfaatan ketersediaan air yang digelontorkan ke lahan sawah pada tahun normal. Keterlambatan pemanfaatan ketersediaan air selama 1–2 bulan untuk tanaman musim rendeng tidak hanya merupakan pemborosan penggunaan air tetapi juga menyebabkan tanaman musim gadu mengalami kekurangan air (terkait jadwal penggelontoran air).

Pola tanam yang diterapkan selama ini tidak optimal ditinjau dari pemanfaatan sumber daya iklim seperti curah hujan, radiasi surya, dan suhu, sebagaimana diilustrasikan pada (Gambar 14), berdasarkan pengamatan luas areal tanam dalam periode 1988–2004 dan pengamatan iklim dalam periode 2001–2004. Pola tanam tanaman pangan dari tahun ke tahun sering sangat

bervariasi, namun pada umumnya pola tanam pangan di Jawa adalah: padi rendeng (MH, Oktober/November–Januari/Februari)–padi gadu (MK I, Maret/April–Juni/Juli) dan palawija/bera (MK II, Juli/Agustus– November/Desember).

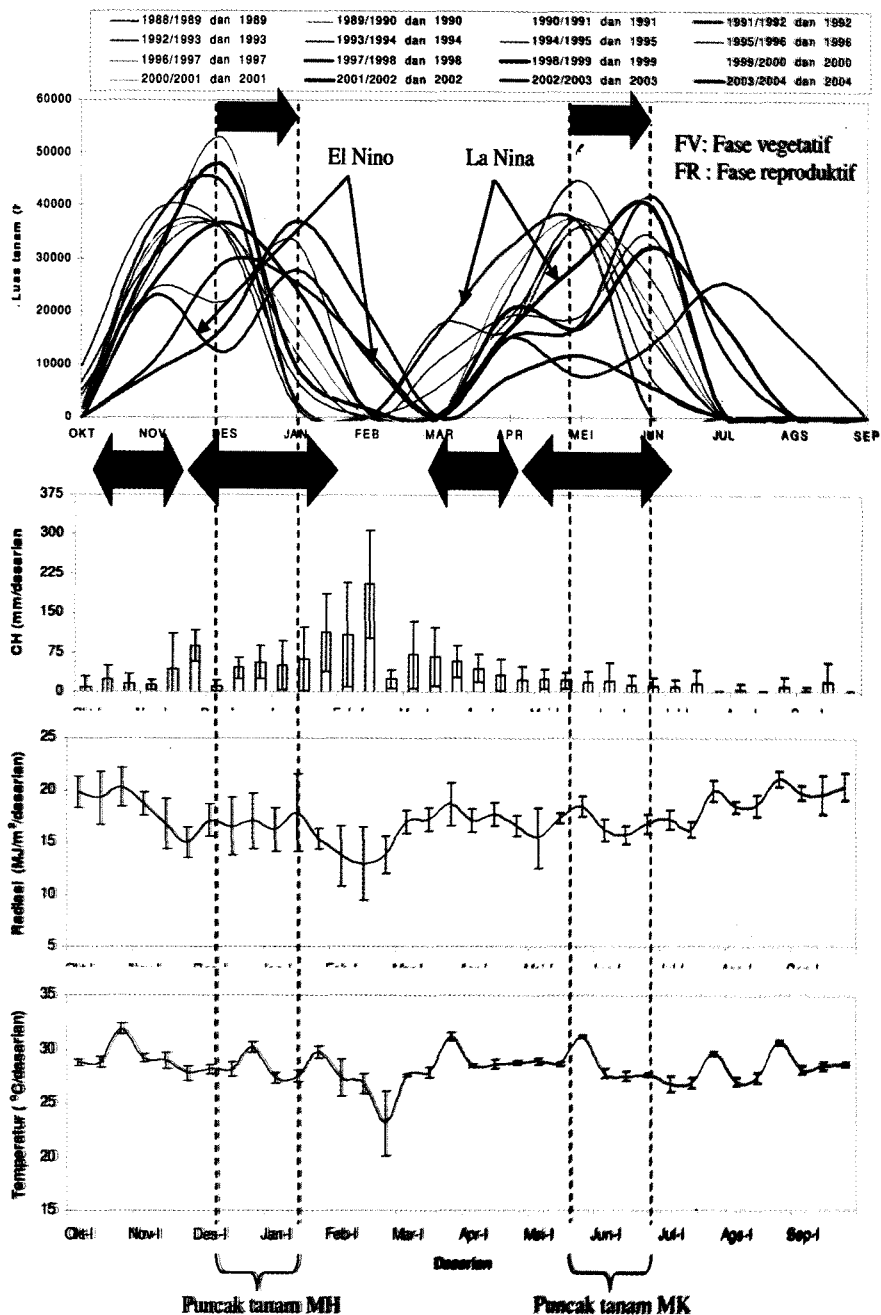
Pada musim rendeng, fase reproduktif tanaman justru sebagian besar jatuh pada saat penutupan awan makin luas, radiasi surya dan suhu rendah, padahal kebutuhan energi tanaman pada fase tersebut lebih besar. Sebaliknya pada musim gadu, fase pembentukan anakan tanaman bersamaan dengan penurunan intensitas radiasi surya dan fase reproduktif jatuh pada saat radiasi surya dan suhu maksimal, tetapi ketersediaan air di waduk telah mengalami penyusutan. Pada musim gadu, jumlah anakan tanaman berkurang dan luas areal panen menyusut akibat kekurangan pasokan air.

Menghadapi melemahnya kekukuhan sifat iklim yang cenderung berubah secara cepat dalam waktu 1–2 tahun diperlukan alat bantu yang dapat digunakan untuk mengantisipasi perubahan iklim, guna meminimalkan risiko iklim bagi pertanian. Salah satunya adalah dengan menyusun peta/atlas kalender tanam, seperti yang telah dihasilkan oleh Badan Litbang Pertanian dan diluncurkan oleh Menteri Pertanian pada tanggal 20 Agustus 2007 (Gambar 15). Atlas tersebut disusun dalam tiga kondisi iklim yaitu: Tahun Basah (bila $CH > 115\%$ dari rata-rata normalnya), Tahun Normal (bila $85\% < CH < 115\%$ dari rata-rata normal), dan Tahun Kering ($CH < 85\%$ dari rata-rata normal). Secara bertahap atlas kalender tanam akan dibuat untuk seluruh Indonesia.

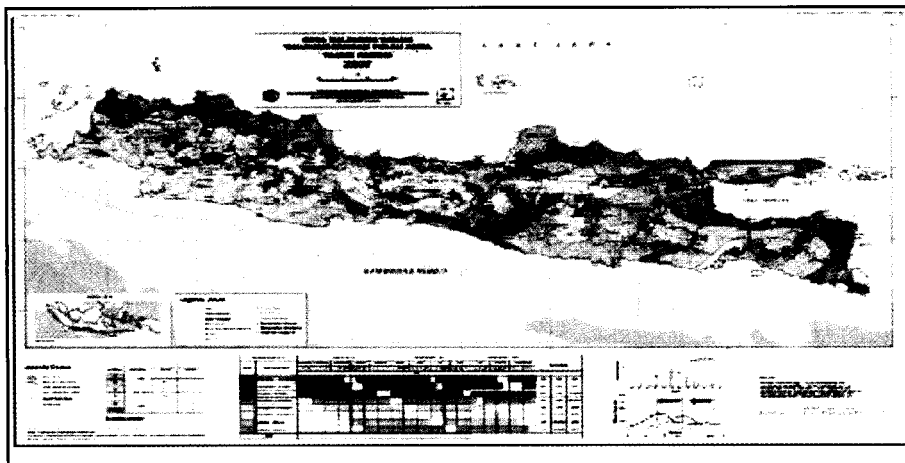
Manfaat atlas kalender tanam adalah sebagai pedoman (1) menentukan waktu tanam per kecamatan berdasarkan kondisi iklim (basah-kering-normal), (2) menentukan pola tanam berdasarkan potensi sumber daya air, (3) menetapkan strategi penyediaan dan distribusi sarana produksi, dan (4) perencanaan budi daya dan pengelolaan tanaman untuk menghindari/mengurangi risiko iklim. Sedangkan keunggulannya, yaitu (1) integrasi informasi spasial dan tabular, (2) lebih operasional dan disusun pada tingkat kecamatan, (3) dinamis dan mudah diperbarui (*update*), dan (4) sederhana.

6. PENUTUP

Seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, pada tahun 2020 kebutuhan beras diproyeksikan sebesar 35,1 juta ton atau setara dengan 65,9 juta ton GKG. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut apabila tidak ada penambahan lahan sawah baru, hasil padi rata-rata harus mencapai 7,2 t/ha GKG. Di lain pihak, ancaman yang sangat serius juga muncul dari variabilitas dan perubahan iklim. Untuk mencapai target produksi diperlukan terobosan inovasi teknologi baru, baik untuk lahan sawah irigasi maupun lahan tadah hujan dan lahan suboptimal lainnya, dan optimalisasi sumber daya lahan melalui transformasi lahan pertanian padi suboptimal dari kurang/tidak sesuai menjadi sesuai.



Gambar 14. Fluktuasi dan pergeseran puncak realisasi tanam bulanan di wilayah PJT II (Jawa Barat) serta kondisi iklim yang diamati pada stasiun Sukamandi periode 2001–2005 (Syahbuddin, 2007)



Gambar 15. Peta kalender tanam Pulau Jawa skala 1:1000.000 (tahun kering)

Faktor penentu utama keberhasilan pertanaman padi di Indonesia adalah ketersediaan air untuk menjamin pertanaman padi terus-menerus. Tetapi ketersediaan air saja tidak cukup untuk menghasilkan gabah sesuai dengan harapan petani atau sasaran produksi dari pemerintah.

Namun di lain pihak wilayah Indonesia juga sangat rentan terhadap penyimpangan iklim. Kejadian iklim ekstrem seperti *El-Nino* dan *La-Nina* yang menyebabkan kekeringan dan banjir berdampak terhadap penurunan produksi padi dan puso padi sawah.

Pada awal tahun 1970-an perubahan iklim masih dianggap sebagai wacana dan perdebatan akademis belaka. Dewasa ini komunitas dunia yang terwakili dalam PBB meyakini bahwa perubahan iklim disebabkan oleh pemanasan global akibat emisi CO₂ (karbondioksida), CH₄ (metan), N₂O, serta gas-gas rumah kaca (GRK) lain dapat menurunkan produksi padi. Perubahan iklim juga ditandai dengan meningkatnya suhu udara dan curah hujan yang semakin berkurang dan tidak menentu. Perubahan iklim ini berdampak terhadap penurunan produksi dan pergeseran wilayah tanam pertanaman padi. Di lain pihak kemajuan teknologi prakiraan dengan menggunakan GCM dapat memberikan prediksi kondisi iklim jauh ke depan, sehingga strategi adaptasi dan mitigasi dapat dilakukan untuk mengurangi dampak perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, dkk. 2002. "Sustainable use of groundwater for irrigation: a numerical analysis of the subsoil water fluxes". In *Irrig. and Drain.* 51: 227–241.
- Allen, R.G., *et al.* 1998. "Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirement". FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Rome, Italy.
- Barclay, A. 2007. "High and Dry". *Rice Today*, October–December 2007, Vol. 6 /No. 4, p. 28–29.
- Boer, R. 1999. "Perubahan Iklim, *El-Nino* dan *La-Nina*". Makalah dalam Pelatihan Dosen-Dosen Perguruan Tinggi Indonesia Bagian Barat dalam Bidang Agroklimatologi. BIOTROP. Bogor.
- Boerema, J. 1941. "Rainfall Types in Indonesia". *Verh* 34. Indonesia.
- Budianto, J. 2002. "Tantangan dan Peluang Penelitian Padi dalam Perspektif Agrobisnis". Dalam B. Suprihatno dkk. (Ed.), *Kebijakan Pemberasan dan Inovasi Teknologi*. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor. p. 1–17.
- Fagi, A.M. 1977. "Environmental Factors Affecting Fertilizer Nitrogen Efficiency in Flooded Tropical Rice". MSc. Thesis, Univ. of the Philippines at Los Banos, Philippines. 155 p.
- Fagi, A.M., dkk. 2002. "Anomali Iklim dan Produksi Padi: strategi dan antisipasi penanggulangan". Balai Penelitian Tanaman Padi. Sukamandi.
- FAO. 1996. "Technical Background Document 1–5, I". The World Food Summit, 13–17 November 1996. Rome, Italy.
- Hasse, P.R. 1984. "Potential of Organic Materials for Soil Improvement". In *Organic Matter and Rice*. IRRI, Los Banos, Philippines. p. 35–42.
- Hijmans, R. 2007. Relocating rice production in Cina. *Rice Today* 4(6): 26–27.
- Huke, R. 1976. "Geography and Climate of Rice". *Proc. Climate and Rice*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Banos, Philippines. p. 31–50.
- IRRI (International Rice Research Institute) 2004. "IRRI's Environmental Agenda: an Approach Toward Sustainable Development". IRRI, Los Banos, Philippines, 35 p.
- IPCC. 2001. "Climate Change 2001- The Scientific Basis". Contribution of Working Group I to the Third assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kampen, J. 1970. "Water Losses and Water Balance Studies in Lowland Rice Irrigation". PHD Thesis. Cornell University. Ithaca, NY.
- Kukla, G. and T.R. Karl. 1993. "Night-Time Warming and the Greenhouse Effect". *Environ. Sci. Technol.* 27: 1468–1474.
- Las, I. 1982. "Efisiensi Radiasi Surya dan Pengaruh Naungan Fisis terhadap Padi Gogo". Thesis-FPS-IPB. Bogor.

- Las, I. 1983. "Radiasi Surya dan Naungan pada Padi Gogo". Penelitian Pertanian 1(3).
- Las, I., dkk. 1986. "Efisiensi Penggunaan Air dan Energi Surya untuk Pertumbuhan Padi Gogo". Penelitian Pertanian 1(6).
- Las, I., dkk. 2007. "Pengaruh Iklim terhadap Pertumbuhan dan Sinkronisasi Pembungaan Beberapa Galur Padi Hibrida". Jurnal Tanah dan Iklim No. 2/4, 2007.
- Lynch, J.P. and S.B. St. Clair. 2004. "Mineral Stress: the Missing Link in Understanding How Global Climate Change Well Affect Plants in Real World Soils". Field Crops Res. 90: 101–115.
- Matthews, R.B., *et al.* 1997. "Simulating the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia and Evaluating Options for Adoption". Agric. Syst. 54:399–425.
- Matthews, R.B. and R. Wassmann. 2003. "Modelling the Impacts of Climate Change and Methane Emission Reductions on Rice Production: a Review". European Journal of Agronomy 19: 573–598.
- Mirza, M.M.Q. 2003. "Climate Change and Extreme Weather Event: can Developing Country Adopt?". Climate Policy 3: 233–248.
- Mitsui, T., *et al.* 1976. "High Temperature Induced Spikelet Sterility of Japonica Rice of Flowering in Relation to Air Temperature, Humidity and Wind Relocivity Conditions". Japan. J. Crop Sci 66: 449–455.
- Naylor, R.L., *et al.* 2002. "El-Nino Southern Oscillation Climate Data Predict Rice Production in Indonesia". (E-mail: roz@standford.edu).
- Naylor, R.L., *et al.* 2007. "Assessing Risks of Climate Variability and Climate Change for Indonesian Rice Agriculture". PNAS 104(19): 7752–7757.
- Oldeman, L.R. 1975. "Agroclimatic Map of Java & Madura". Cent. Res. Inst. For Agric. Contr. No 17.
- Oldeman, L.R. and D. Syarifuddin. 1977. "Agroclimatic Map of Sulawesi". Cent. Res. Inst. For Agric. Contr. No 30.
- Oldeman, L.R., *et al.* 1979. "The Agroclimate Map of Sumatera and Kalimantan". Contr. Cent. Res. Inst. Agric. No. 52.
- Oldeman, L.R. 1980. "The Agroclimate Map of Bali, Nusatenggara, and Irian Jaya". Contr. Cent. Res. Inst. Agric. No. 61. Bogor. CRIA.
- Osada, A., *et al.* 1973. "Abnormal Occurrence of Empty Grains of Indica Rice Plants in the Dry, Hot Season in Thailand". Proc. Crop Sci. Soc. Japan 42: 103–109.
- Peng, S.B., *et al.* 2004. "Rice Yields Decline with Higher Night Temperature from Global Warming". Proc. NaH. Academy of Science 101: 9971–9975

- Runtunuwu, E. 2006. "Assessing Global Climate Variability and Change Under Coldest and Warmest Periods at Different Latitudinal Regions". IJAS, Litbang Pertanian.
- Sheehy, J.E., *et al.* 2005. "Searching for New Plants for Climate Change". J. Agric. Met. 60: 463–468.
- Sudaryanto, T. dkk. 2001. "Medium and Long-Term Prospect of Rice Supply and Demand in Indonesia. Workshop in Medium and Long-Term Prospect of Rice Supply and Demand in the 21st Country". IRRI, Los Banos, Philippines, 3–5 Dec. 2001.
- Syahrudin, H. 2007. "Revitalisasi pola tanam tanaman pangan dalam menyikapi perubahan iklim". Bahan Rapim Badan Litbang Pertanian, Deptan, Oktober 2006. 12 p.
- Zinka, L.H. 2000. "The Impact of Elevated CO₂ on Yield Loss from a C₃ and C₄ Weed in Field-Grown Soybean". Global Change Biol. 6: 899–905.
- Stanhill, G. 2002. "Is the Class a Evaporation Pan Still the most practical and Accurate Meteorological Method for Determining Irrigation Water Requirements". Agricultural and Forest Meteorology 112: 233–236.
- Strangeways, I. 2001. "Back to Basics: the 'Met.Enclosure'". Part 7. Evaporation. Weather 56: 419–427.
- Surmaini E., dkk. 2006. "Pemanfaatan Informasi Iklim untuk Menunjang Usaha tani Tanaman Pangan". Jurnal Tanah dan Iklim 24: 40–53.
- Syahrudin, H. 2006. "An Experimental Investigation on Water Budget Between Atmospheric Boundary Layer and Soil at Kototabang, West Sumatera, Indonesia". Doctoral Dissertation. Kobe University, Japan. 185 p.
- Vergara, S.B. 1976. "Physiological and Morphological Adaptability of Rice Varieties to Climate". In Climate and Rice. IRRI, Philippines.
- Wassmann, R., *et al.* 2004. "Sea Level Rise Affecting Vietnamese Mekong Delta: Water Elevation in Flood Season and Implications for Rice Production". Climatic Change 66 (1): 89–107.
- Watanabe T. 1992. Water Budget in Paddy Fields. In Koga K (Ed). Soil and Water Engineering for Paddy Field Management Murty VVN. Proceedings of the International Workshop, Asian Institute of Technology. Bangkok, January 12–13, 1992.