

ANALISIS SISTEM DAN SIMULASI PENINGKATAN PRODUKSI PADI MELALUI PENGGUNAAN TEKNOLOGI SPESIFIK LOKASI

A. Karim Makarim¹, E. Suhartatik¹, dan Achmad M. Fagi²

¹Balai Besar Penelitian Tanaman Padi

²Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

1. PENDAHULUAN

Padi ditanam pada kondisi iklim, tanah, dan sosial-budaya yang sangat heterogen sehingga hasil padi per satuan luas juga bervariasi dari rendah, sedang, dan tinggi, bergantung pada kondisi tempat padi ditanam dan dikelola. Petani menyesuaikan budi daya dengan kondisi tersebut sehingga terbentuk sistem produksi padi pada lahan sawah irigasi, sawah tadah hujan, lahan kering (gogo), lahan lebak, dan pasang surut.

Kondisi ekosistem juga bervariasi dalam satu sistem produksi padi pada lahan sawah irigasi, lahan sawah tadah hujan, lahan kering, lahan lebak, dan lahan pasang surut. *Technical Advisory Committee* (TAC) dari *Consultative Group on International Agricultural Research* (CGIAR) mencanangkan *ecoregional initiative* agar *International Agricultural Research Centers* (IARC) memerhatikan sistem dalam perumusan program dan pelaksanaan penelitian komoditas atau sumber daya lahan. Untuk tujuan diseminasi hasil penelitian, *International Service for National Agricultural Research* (ISNAR) mendefinisikan ekoregion sebagai hamparan lahan pertanian yang memiliki kondisi biofisik, sosial, dan masalah yang sama sehingga hasil penelitian di satu lokasi dalam suatu hamparan dapat dianjurkan ke seluruh hamparan (Duiker, 1996). Hamparan demikian disebut *recommendation domain*. Hamparan dapat berada di dalam satu desa atau lintas desa dalam satu kecamatan, lintas kecamatan dalam satu kabupaten, lintas kabupaten dalam satu provinsi, bahkan lintas provinsi.

Pengembangan teknologi spesifik lokasi adalah upaya untuk meningkatkan efisiensi masukan (*inputs*), seperti pemupukan, varietas, populasi tanaman, pengendalian organisme pengganggu tanaman, dan teknik irigasi. Penelitian dan pengembangan teknologi padi spesifik lokasi pada ribuan petak percobaan tidak mudah pelaksanaannya sehubungan dengan keterbatasan tenaga peneliti dan teknisi. Penelitian dan pengembangan demikian perlu pengawasan ketat dan pengumpulan data secara akurat.

Anjuran teknologi spesifik lokasi memerlukan keputusan dari peneliti dan adopsinya adalah keputusan petani. Untuk memfasilitasi pengambilan keputusan Dhaliwal *et al.* (2001) mengembangkan *Computerized Decision Support System* (DSS), yaitu:

- Program komputer interaktif yang menggunakan metode analisis dan simulasi untuk memformulasikan alternatif pemecahan masalah kompleks dan tidak terstruktur, menganalisis dampaknya, dan memilih pemecahan masalah yang paling tepat.
- Alat untuk merakit paket teknologi di bidang biologi, pertanian, dan teknik agar inovasi teknologi dapat diaplikasikan dalam upaya optimalisasi sumber daya alam, peningkatan produktivitas dan efisiensi.

Di sektor pertanian, DSS dapat dirancang untuk digunakan oleh para ahli bidang budi daya, ilmu tanah, mekanisasi, hama dan penyakit, atau untuk mereka yang berprofesi sebagai peneliti, penyuluh, mahasiswa, dan petani.

Bagi pusat-pusat penelitian dan pengembangan yang mengupayakan agar hasil-hasil penelitiannya sampai ke pengguna, perlu mencari metode baru diseminasi teknologi inovatif pada masa yang akan datang. Oleh sebab itu, DSS harus dirancang secara sistematis dengan pertimbangan yang cukup tentang sasaran yang ingin dicapai, kondisi sosial-ekonomi petani, potensi sumber daya, dan masalah yang dihadapi (Fagi dan Kartaatmaja, 2004).

Walaupun DSS dapat digunakan untuk menganalisis dan memecahkan masalah yang tidak terstruktur, tetapi beberapa syarat yang harus dipertimbangkan dalam pengembangan DSS adalah (Dobermann and de Wit *dalam* Dhaliwal *et al.*, 2001): (a) jumlah data yang dimasukkan sesedikit mungkin; (b) rancangan DSS bersifat lentur sehingga masih bisa dioperasikan walaupun ada data yang hilang; (c) rancangan DSS bersifat generik sehingga menghasilkan rekomendasi spesifik lokasi; dan (d) untuk DSS generik dipilih indikator yang dengan cepat dapat memfokuskan kepada keperluan pengguna. RUTII.CSM telah dikembangkan di Indonesia dengan pendekatan yang komprehensif (Makarim dkk., 1996). Proses pengembangan RUTII.CSM diuraikan dalam bab berikut.

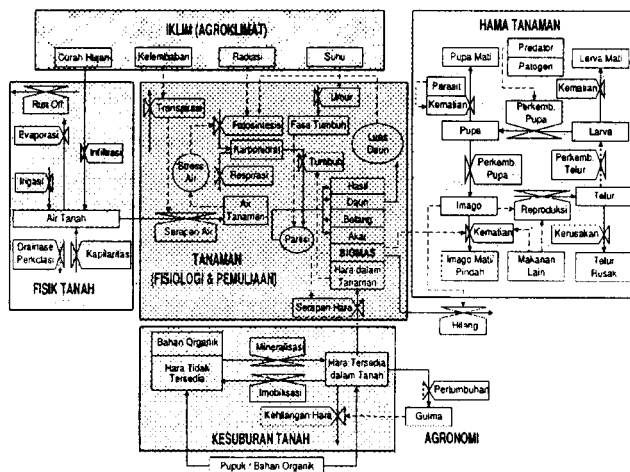
Tujuan tulisan ini adalah: (1) memopulerkan penggunaan pendekatan analisis sistem dalam pemecahan permasalahan produksi padi yang kompleks saat ini dan masa mendatang; (2) memopulerkan penggunaan model simulasi untuk pendugaan tingkat produktivitas tanaman padi secara potensial dan aktual pada berbagai lingkungan; dan (3) memperkenalkan sistem pakar untuk mendapatkan teknik budi daya padi spesifik lokasi.

2. ANALISIS SISTEM TANAMAN PADI DAN LINGKUNGAN

Pendekatan analisis sistem yang dapat digunakan untuk menggambarkan keterkaitan faktor penentu produktivitas padi beserta permasalahannya disajikan pada Gambar 1. Peubah-peubah yang berperan dalam sistem produksi padi, dalam analisis sistem dibedakan menjadi (1) peubah tidak bebas (*dependent variable*) yang biasanya dijadikan indikator (hasil gabah, bobot biomas); (2) peubah kecepatan, yaitu kecepatan berlangsungnya proses seperti fotosintesis, respirasi, perkolasi, imobilisasi hara, dan kematian imago hama; (3) peubah penggerak, yaitu menggerakkan proses seperti radiasi surya, luas daun, *partitioning*; dan (4) peubah pengaruh, yang memengaruhi kecepatan proses seperti cekaman air, hara, suhu, dan kelembapan udara.

Dalam Gambar 1 ditunjukkan bahwa hasil tanaman padi merupakan proses dari berbagai faktor yang kompleks. Gambar tersebut menjelaskan bahwa tanaman padi selama proses pertumbuhannya hingga mencapai hasil panen ditentukan oleh iklim, faktor internal tanaman, tanah, air, hama penyakit, dan pengelolaan. Oleh sebab itu, dalam upaya peningkatan produktivitas padi untuk masa sekarang dan masa mendatang diperlukan pendekatan analisis sistem secara mendalam (Bawden, 1992, Teng dan Savary, 1992, Kropff dan Lotz, 1992).

Untuk menganalisisnya, sistem tanaman-lingkungan dibagi dalam empat subsistem, yaitu: 1) internal (genetik, fisiologis, dan morfologis) tanaman; 2) edafik (fisik dan kesuburan tanah); 3) lingkungan abiotik (iklim) dan biotik (hama dan gulma); dan 4) aspek pengelolaan (agronomi). Masing-masing subsistem akan diuraikan lebih lanjut.



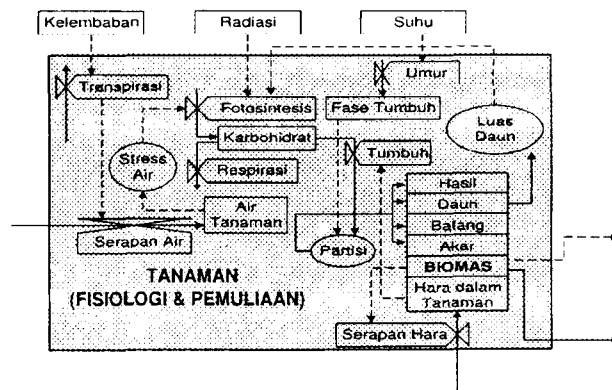
Gambar 1. Diagram sistem tanaman padi dan lingkungan (Makarim dkk., 1996)

2.1 Subsistem 1 - Internal Tanaman Padi dan Potensi Hasil

Dalam subsistem 1 (internal) (Gambar 2), sifat genetik tanaman menentukan morfologik dan fisiologik tanaman. Faktor morfologik dan fisiologik tanaman yang kini dapat direkayasa sangat menentukan potensi hasil tanaman. Sifat internal ini menentukan fotosintesis, respirasi, pola partisi karbohidrat ke bagian-bagian tanaman (daun, batang, akar, dan malai), kecepatan perubahan fase tanaman (umur tanaman), dan daya adaptasi tanaman. Sifat internal tanaman bersama dengan faktor iklim (radiasi dan suhu udara) menentukan hasil tanaman potensial atau potensi hasil (Penning de Vries *et al.*, 1989; Kropff *et al.*, 1994). Potensi hasil didefinisikan sebagai hasil tertinggi yang dapat dicapai tanaman untuk varietas dan lingkungan iklim tertentu, serta tidak terkendala oleh faktor biotik (hama, penyakit, gulma) dan abiotik (kahat hara, keracunan unsur kimia, kekeringan, rendaman, salinitas, dan sebagainya).

2.1.1 Varietas Padi Ideal

Individu tanaman merupakan sistem yang bersifat dinamik (hidup) yang komponen utamanya terdiri atas (a) daun, yang dapat mengolah sinar radiasi surya menjadi karbohidrat/energi untuk tumbuh dan berkembangnya organ tanaman lainnya atau disebut sebagai (*sources*); (b) batang, sebagai penopang tanaman, penyalur senyawa-senyawa kimia dan air dalam tanaman, dan sebagai cadangan makanan; (c) akar, penguat/penunjang tanaman untuk dapat tumbuh tegak, menyerap hara dan air dari dalam tanah untuk selanjutnya diteruskan ke organ lainnya di atas tanah; (d) malai dan gabah/produk, sebagai penampung (*sinks*) akhir energi dan substansi yang dihasilkan tanaman.



Gambar 2. Diagram subsistem 1 (internal tanaman) yang menentukan potensi hasil padi

Lama periode pengisian gabah, kecepatan akumulasi karbohidrat di *sinks*, dan besarnya kehilangan menentukan tingkat hasil akhir gabah. Proses yang berlangsung selama pertumbuhan tanaman seperti fotosintesis, respirasi, partisi, penuaan, penyerapan hara, dan air sangat menentukan akumulasi biomas dan ukuran organ-organ tanaman. Proses inilah yang menghubungkan komponen-komponen menjadi satu kesatuan atau sistem.

Dalam pandangan morfologi dan fisiologi, untuk mendukung tanaman padi berdaya hasil tinggi di masa depan, menurut Sheehy *et al.* (2001), diperlukan perbaikan faktor internal tanaman sebagai berikut: (1) bentuk dan kualitas tajuk tanaman sehingga lebih efektif menangkap radiasi surya; (2) peningkatan pemanfaatan radiasi surya yang sudah terserap tanaman menjadi energi tumbuh, produksi biomas, dan hasil gabah melalui berbagai proses di dalam tanaman (*radiation conversion factor*, RCF); (3) sifat partisi, remobilisasi, dan translokasi karbohidrat dan hara ke bagian-bagian penting tanaman selama pertumbuhannya; (4) penguatan batang tanaman padi agar mampu menopang hasil tinggi; (5) mempertahankan aktivitas perakaran tanaman lebih lama sehingga mampu menyuplai hara dan air ke bagian atas tanaman hingga fase pemasakan gabah; dan (6) menambah ukuran *sinks* (malai) tanaman dan memperpanjang waktu pengisian gabah. Dengan perbaikan berbagai sifat tersebut, tanaman padi akan mampu memberikan hasil tinggi (>10 t/ha GKG).

Perbaikan faktor internal tanaman padi pada masa mendatang perlu diupayakan dari sekarang. Varietas-varietas padi hasil tinggi yang efisien dalam penggunaan sumber, yang dengan cara budi daya dapat menaikkan hasil hingga 50% pada tahun 2050 (Mitchell dan Sheehy, 2000; Yoshida, 1981). Faktor konversi radiasi surya (FKR) yaitu bobot biomas kering bagian atas tanaman per unit intersepsi PAR perlu ditingkatkan. Varietas padi yang ada sekarang memiliki nilai FKR 2,6–2,9 g/MJ sehingga perlu ditingkatkan menjadi 3,3 g/MJ agar terjadi kenaikan hasil yang nyata.

2.1.2 Potensi Hasil Padi

Hasil padi tertinggi yang pernah dicapai telah dilaporkan oleh Yoshida (1981) untuk daerah tropis, yaitu 10–11 t/ha, sedangkan di daerah subtropis seperti di Cina, Australia, dan California (USA) mencapai 13–15 t/ha. Berdasarkan model simulasi Macros L1D dan Padi.CSM dengan menggunakan data iklim (radiasi, suhu udara maksimum dan minimum) dari berbagai lokasi di Indonesia, potensi hasil padi beragam antara 7,5–11,0 t/ha GKG, bergantung pada waktu tanam (Makarim *et al.*, 1999b) dan di IRRI Filipina 8 t/ha (Reyes dan Penning de Vries, 1989). Tingginya potensi hasil padi di daerah subtropis dibandingkan daerah tropis disebabkan oleh rendahnya suhu udara pada fase reproduktif sehingga

fase tumbuhnya, terutama fase pengisian gabah lebih lama. Varietas-varietas padi yang berumur panjang, sedang, maupun pendek (genjah) di daerah tropis memiliki fase pengisian gabah yang hampir sama (Peng *et al.*, 1994) dan lebih singkat dibandingkan dengan fase pengisian gabah di daerah subtropis yang memiliki suhu udara lebih dingin.

Radiasi surya dan komponen iklim lainnya sangat berpengaruh terhadap potensi hasil padi. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan model simulasi Macros L1D (Penning de Vries *et al.*, 1989) dan PADI.CSM (Makarim dkk., 1996), potensi hasil padi varietas IR64 di Denpasar, Bali dan Palembang, Sumatra Selatan akan turun drastis akibat berkurangnya intensitas radiasi surya selama pertumbuhan tanaman, misalnya akibat tertutup asap atau awan tebal di masa mendatang seperti disajikan dalam Gambar 3. Untuk lokasi lainnya, pengaruh penurunan radiasi surya terhadap potensi hasil padi dugaan model simulasi disajikan dalam Tabel 1.

2.1.3 Beda Potensi Hasil Antarwaktu Tanam

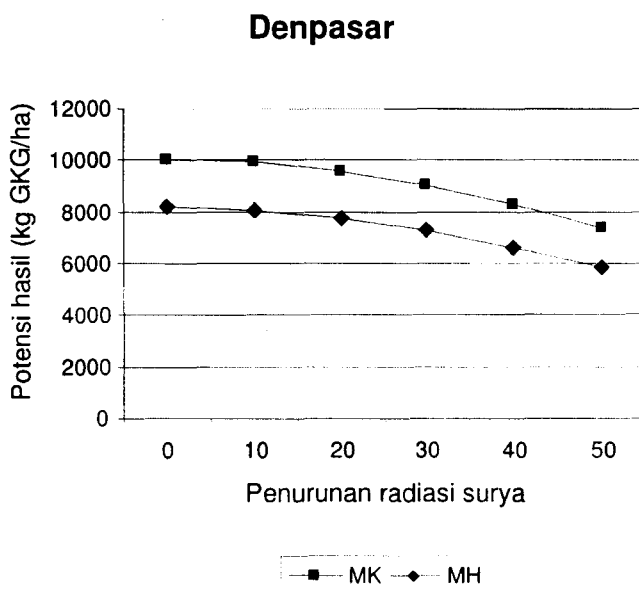
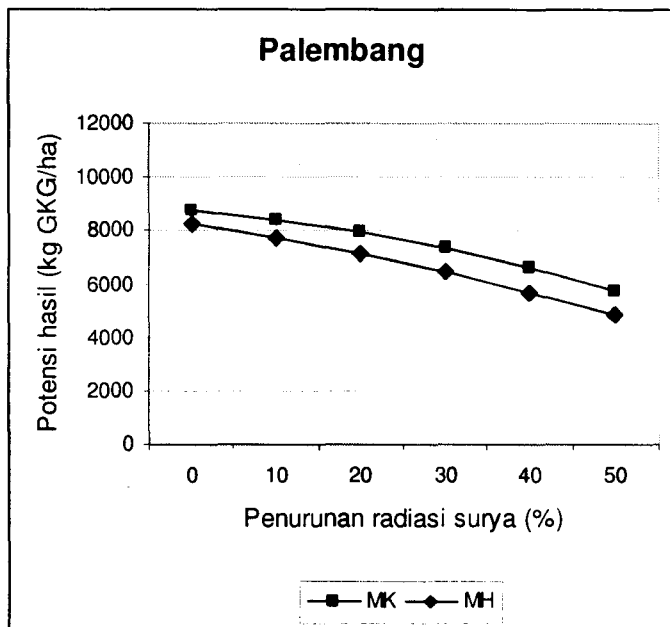
Adanya perbedaan unsur iklim dari musim ke musim atau bahkan dari waktu ke waktu akan memengaruhi potensi hasil tanaman padi. Berdasarkan tingginya potensi hasil, akan diperoleh waktu tanam yang berpeluang besar untuk mendapatkan potensi hasil tertinggi. Sebagai contoh, hasil simulasi menggunakan model simulasi Macros L1D (Penning de Vries *et al.*, 1989; Reyes *et al.*, 1989) dan PADI.CSM (Makarim *et al.*, 1996) untuk kondisi iklim Merauke disajikan dalam Gambar 4.

Pada Gambar 4 terlihat potensi hasil padi di Merauke berkisar antara 8,16 t–10,42 t/ha GKG, dengan rata-ratanya 9,10 t/ha GKG. Berdasarkan potensi hasil padi tertinggi, waktu tanam padi antara April minggu ke-4 (121 tanggal Julian) sampai Juni minggu ke-2 (181 tanggal Julian) adalah yang terbaik. Pada selang waktu tersebut potensi hasil rata-rata 10,02 t/ha GKG. Namun, pada bulan-bulan tersebut air belum tersedia di lapang.

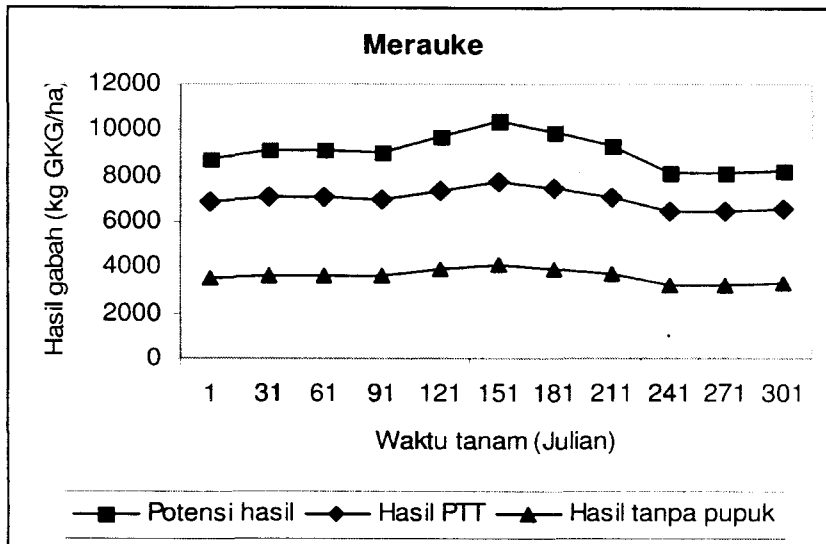
Tabel 1. Dugaan besarnya potensi hasil padi (t/ha GKG.) akibat menurunnya radiasi surya di beberapa lokasi dan musim menggunakan model PADI.CSM (Makarim dkk., 1996) dan Macros L1D

Lokasi	Musim	Penurunan radiasi surya (%)					
		0	10	20	30	40	50
Denpasar, Bali	MK	10,05	9,93	9,59	9,05	8,30	7,34
	MH	8,23	8,08	7,76	7,28	6,64	5,82
Pati, Jawa Tengah	MK	9,34	9,14	8,77	8,22	7,49	6,56
	MH	7,67	7,27	6,77	6,17	5,47	4,69
Palembang, Sumsel	MK	8,73	8,40	7,94	7,34	6,60	5,71
	MH	8,25	7,74	7,14	6,45	5,68	4,85
Lanrang, Sulsel	MK	8,56	8,12	7,57	6,91	6,15	5,29
	MH	8,55	8,40	8,11	7,65	7,01	6,18
Bogor, Jabar	MK	9,41	8,95	8,37	7,66	6,83	5,87
	MH	5,58	5,15	4,69	4,19	3,67	3,11

Sumber: Penning de Vries, 1989



Gambar 3. Pengaruh penurunan radiasi surya terhadap dugaan potensi hasil padi di Palembang, Sumatra Selatan dan Denpasar, Bali menggunakan model simulasi



Gambar 4. Dugaan besarnya potensi hasil padi, hasil PTT dan hasil tanpa pupuk untuk berbagai waktu tanam di Merauke, Papua menggunakan model simulasi PADI.CSM

Hasil padi yang dicapai petani di Merauke rata-rata 3,44 t/ha GKG (Distan Pangan dan Hortikultura Merauke, 2003; Makarim dkk., 2007). Dengan perbaikan takaran pupuk, varietas, dan tanam jarak legowo 2:1 atau dengan pendekatan Pengelolaan Tanaman dan Sumber Daya Terpadu (PTT), hasil padi di BBU Distrik Kurik, Merauke mencapai 6,0 t/ha GKG (Makarim dkk., 2007).

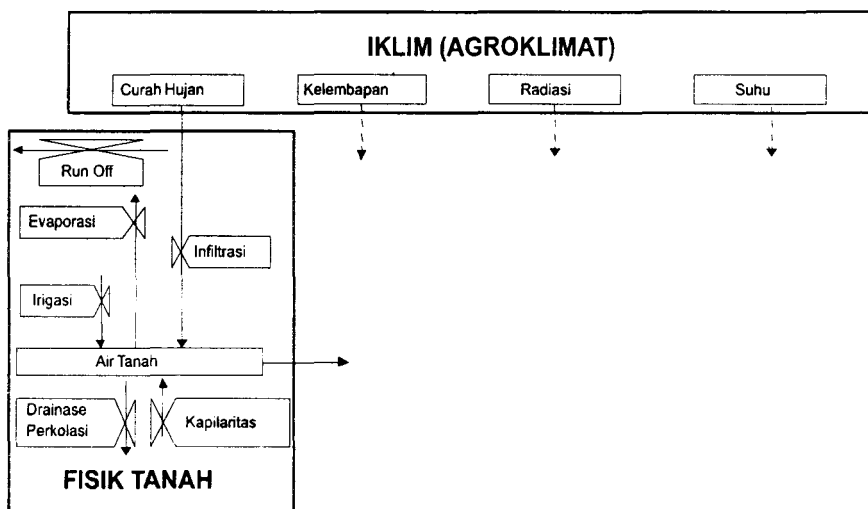
Berdasarkan model simulasi (Gambar 4), tanpa pupuk hasil padi berkisar antara 3,33 t–3,64 t/ha GKG, sedangkan dengan PTT berkisar antara 6,47 t–7,82 t/ha GKG. Hal ini menunjukkan adanya keceratan antara dugaan model PADI.CSM dan hasil aktual di lapang. Di lapangan belum atau tidak semua komponen penting PTT diterapkan. Varietas yang digunakan adalah Ciherang dan Mekongga dari benih bermutu asal BB Padi. Pupuk urea, SP36, dan KCl masing-masing diberikan 200 kg, 60 kg, dan 30 kg/ha berdasarkan rekomendasi SIPAPUKDI (Makarim, 2005).

2.2 Subsistem 2 – Fisik Tanah dan Air

Dalam subsistem fisik tanah (Gambar 5), daya mengalirkan atau menahan air bergantung pada sifat spesifik tanah. Faktor tersebut menentukan mudah tidaknya tanah mengalami kekeringan atau menyediakan air yang nilainya secara kuantitatif dinyatakan dengan pF. Tanah dengan nilai pF yang sama bisa mengandung air (% kadar air) berbeda, namun jumlah energi untuk

melepaskannya sama. Hubungan antara nilai pF dan *stress factor* (SF) atau faktor cekaman dari beberapa varietas padi berbeda, menggambarkan adanya perbedaan toleransi varietas tanaman padi terhadap kekurangan air (Makarim, 1992). SF adalah perbandingan antara hasil tanaman yang mengalami stres kekurangan air dan yang tidak mengalaminya. Penurunan hasil padi akibat cekaman kekurangan air sangat bervariasi, bergantung pada: (1) tingkat ketersediaan air dalam tanah atau pF , yang juga dipengaruhi oleh sifat fisik tanah, kecepatan infiltrasi, irigasi, perkolasi, dan drainase; (2) besarnya evapotranspirasi (penguapan air dari permukaan tanah dan tanaman) yang berbeda menurut umur tanaman; (3) daya adaptasi varietas tanaman, berupa kekuatan penyerapan air, sistem perakarannya, dan ketahanan jaringan tanaman pada tingkat ketersediaan air rendah; dan (4) fase tumbuh tanaman, kekeringan pada fase generatif seperti pada fase berbunga dan primordia dapat menyebabkan seluruh gabah hampa. Oleh sebab itu, pengairan tanaman padi selama fase awal generatif hingga pemasakan harus diupayakan cukup.

Air yang ketersediaannya dalam sistem produksi tanaman padi sangat dinamis dalam ruang dan waktu biasanya dihitung secara dinamis dan terpisah menggunakan model hidrologi yang disebut neraca air (*water balance*). Namun, dalam model RUTII.CSM (Makarim dkk., 1996), submodel air tersebut disertakan sehingga dapat menduga pengaruh perubahan ketersediaan air (kekeringan) di tanah terhadap hasil aktual dari beberapa varietas padi (Makarim, 1992). Pengaruh perubahan iklim global dan anomali iklim di masa mendatang terhadap produktivitas padi juga dapat diduga (de Rozari *et al.*, 1992).



Gambar 5. Diagram subsistem 2 (fisik tanah dan air) yang menentukan hasil aktual tanaman padi

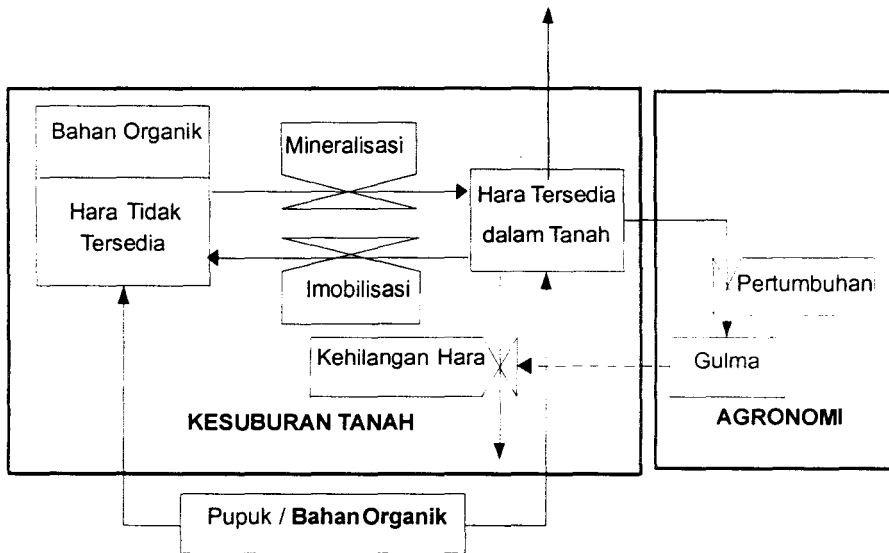
Untuk tanaman padi di lahan kering, ketersediaan air tanah jelas menentukan waktu tanam yang tepat sehingga *input* produksi yang diberikan dapat efektif meningkatkan hasil. Sebaliknya, keterlambatan waktu tanam dapat menimbulkan masalah yang akhirnya usaha pertanian menjadi tidak efisien. Identifikasi waktu tanam terbaik dengan menggunakan model simulasi dapat dilakukan.

2.3 Subsistem 3 – Kesuburan Tanah dan Pengelolaan Hara Tanaman Padi

Dalam hal subsistem kesuburan tanah, Gambar 6 menunjukkan kemampuan (kapasitas) tanah dalam menyediakan hara secara alami (*indigenous nutrient supply*) untuk diserap tanaman. Hara di dalam tanah bersifat dinamis karena selalu terjadi mobilisasi dan mineralisasi hara dari bentuk-bentuk yang sukar tersedia menjadi mudah tersedia. Di dalam tanah juga terjadi imobilisasi hara, yaitu perubahan bentuk hara yang tersedia menjadi tidak tersedia. Mobilisasi hara biasanya terjadi apabila hara tersedia di dalam tanah diserap tanaman sehingga ada penggantian hara dalam tanah dari yang sukar atau agak tersedia menjadi tersedia. Imobilisasi biasanya terjadi apabila pupuk diberikan melebihi yang diserap tanaman sehingga lama kelamaan hara yang tersedia terikat menjadi bentuk-bentuk yang kurang atau lambat tersedia. Mineralisasi adalah proses perombakan hara dari bentuk organik menjadi ion sehingga mudah tersedia bagi tanaman. Oleh karena perubahan bentuk hara di dalam tanah berlangsung secara dinamis maka kecepatan masing-masing proses menentukan apakah di dalam tanah terjadi penimbunan, pengurasan, atau keseimbangan hara (*steady state*) (Makarim dkk., 1992; Dobermann and White, 1999).

Dengan pengukuran yang cermat maka perubahan konsentrasi hara P (Ca-P, Fe-P, Al-P, organik-P, dan *occluded P*) di dalam tanah, kecepatan penyerapan hara P oleh tanaman, dan efek residu hara dari waktu ke waktu dapat dihitung. Model simulasi dinamika hara P tanah untuk tanaman padi telah disusun dan dapat menentukan strategi pemberian pupuk P untuk tanah sawah (Makarim dkk., 1992).

Model dinamika hara N dalam tanah dan kesesuaiannya dengan pertumbuhan perakaran tanaman dan pola penyerapan N memungkinkan pengelolaan hara N dapat dianjurkan dengan takaran dan waktu pemberian yang tepat pada lokasi spesifik (Makarim dkk., 1991) sehingga tanaman dapat tumbuh optimal. Dengan cara ini efisiensi pemberian pupuk N sangat tinggi (>50%) karena jumlah NH_4^+ dalam larutan tanah yang biasanya cepat hilang dapat terserap oleh tanaman, karena jumlah dan kemampuan serap akar diseimbangkan.



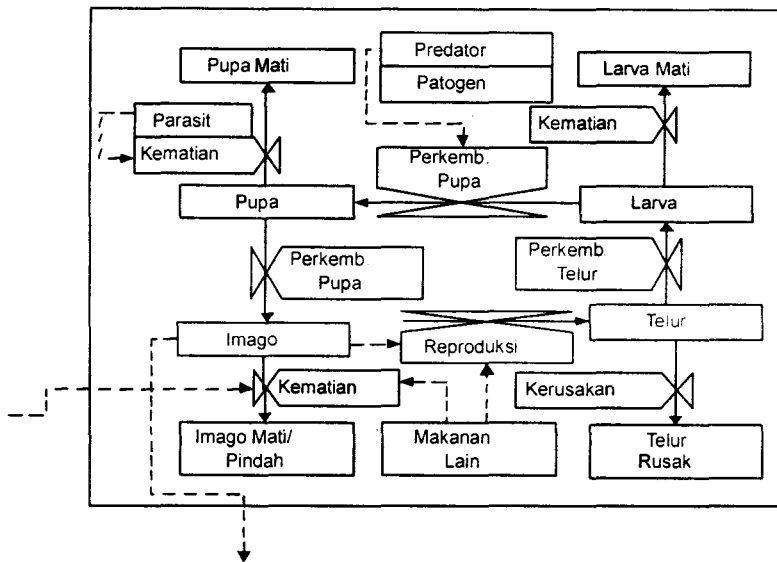
Gambar 6. Diagram subsistem 3 (kesuburan tanah dan pengelolaan hara) yang menentukan hasil tanaman padi aktual

Dalam model PADI.CSM dipertimbangkan kondisi tanah (tekstur, keracunan Fe, Al, dan kemasaman) dan daya adaptasi tanaman terhadap berbagai cekaman biotik dan abiotik karena turut menentukan efisiensi pemberian *input* produksi (Makarim dkk., 1993).

2.4 Subsistem 4 – Hama dan Penyakit Tanaman

Dalam subsistem hama dan penyakit digambarkan siklus hidup dan aktivitas hama penyakit tanaman serta faktor-faktor yang memengaruhinya yang akan berdampak besar terhadap kehilangan biomas dan hasil tanaman (Gambar 7). Ketersediaan makanan bagi hama dan inang sepanjang tahun merupakan faktor pendorong terjadinya ledakan hama. Sebaliknya, tidak adanya makanan atau inang bagi hama tertentu merupakan faktor yang dapat menekan perkembangbiakannya. Kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan udara yang tidak menguntungkan dapat menekan perkembangan hama, melalui penghambatan pertumbuhannya pada tiap stadia

Penggunaan model simulasi untuk menduga dinamika populasi hama dan tingkat kerusakan tanaman dapat membantu cara pengendalian hama dan penyakit secara efektif dan efisien. Cara ini belum banyak digunakan di Indonesia, namun pada masa mendatang penggunaan model yang dinamis akan semakin populer.



Gambar 7. Diagram subsistem 4 (hama dan penyakit) yang menentukan hasil aktual tanaman padi

3. *PRESCRIPTION FARMING*

Di atas telah dibahas faktor-faktor penentu produktivitas tanaman dan permasalahannya dalam suatu sistem dan subsistem serta contoh-contoh penggunaan model simulasi. Selanjutnya, pemanfaatan model simulasi dikembangkan dan disajikan lebih aplikatif dalam *prescription farming* (Makarim dkk., 1999b). Ciri *prescription farming* terutama adalah: (1) mendiagnosis permasalahan usaha tani; dan (2) memberikan rekomendasi utuh terbaik untuk spesifik lokasi. Ciri pertama memerlukan ketajaman dalam melihat permasalahan di lapang, seperti kahat dan keracunan hara (Fe^{2+} , Al^{3+} , dsb.), kekeringan, jenis dan intensitas hama dan penyakit, drainase buruk. Ciri kedua memerlukan sejumlah alternatif teknologi dan peruntukannya. Rekomendasi yang diberikan harus dapat memecahkan permasalahan yang telah teridentifikasi secara efisien, efektif, dan paling menguntungkan. Tujuan penerapan *prescription farming* adalah: (1) meningkatkan keuntungan petani; (2) efisiensi modal usaha tani; dan (3) ramah lingkungan dan berkelanjutan.

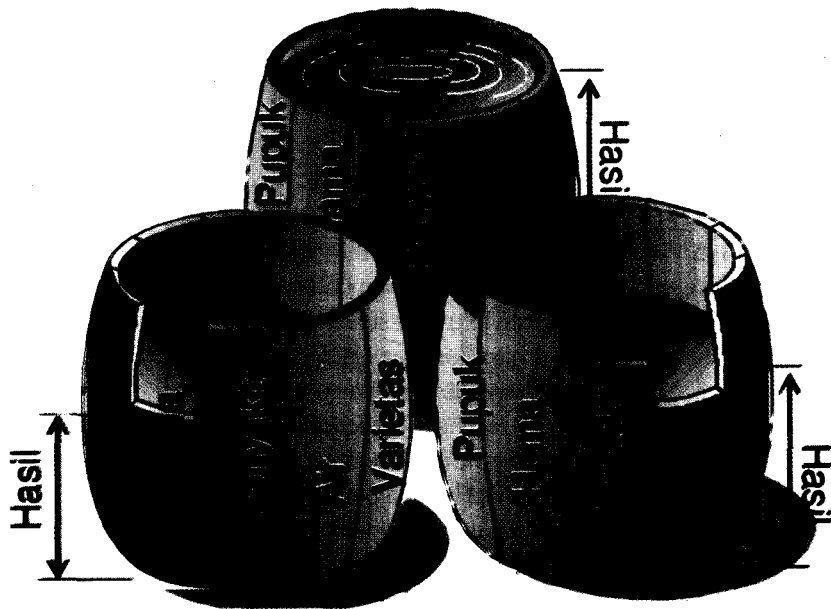
3.1 Prinsip Efisiensi *Input* Produksi

Dalam pelaksanaan *prescription farming* diperlukan pemahaman dalam meningkatkan efisiensi *input*/sarana produksi. Sebagai dasar disajikan beberapa hukum terkenal di bawah ini.

3.1.1 Hukum Minimum Leibig

Respons tanaman terhadap pemberian pupuk digambarkan dalam hukum Leibig tahun 1855 (de Wit, 1992) sebagai tong kayu berisi air, di mana tinggi permukaan air yang dapat ditampung bergantung pada tinggi papan yang terendah "Hukum Minimum" (Gambar 8). Aplikasinya, pemberian hara yang paling efektif dalam meningkatkan hasil tanaman adalah yang jumlah atau ketersediaannya paling kritis dalam tanah. Aplikasi lainnya adalah pemberian hara lain yang berada di tanah dalam jumlah yang cukup, tidak atau kurang efektif meningkatkan hasil sehingga tidak efisien. Dengan demikian, dalam upaya peningkatan efisiensi sarana produksi perlu karakterisasi lokasi/lahan pertanian, identifikasi faktor-faktor pembatas pertumbuhan tanaman, dimulai dari yang paling serius hingga yang kurang serius. Untuk hara digunakan kriteria batas kritis kahat atau keracunan hara/unsur kimia yang sebelumnya telah diketahui.

Selanjutnya, pemberian sarana produksi yang paling tepat adalah yang dapat menanggulangi masalah utama, mencukupi kebutuhan hara yang paling kritis serta dipilih sarana yang dapat menanggulangi dua atau lebih permasalahan sekaligus. Misalnya, penggunaan batuan fosfat pada lahan kering masam selain dapat menetralkan Al, juga menyediakan hara P bagi tanaman dan memiliki efek residu atau bahan organik yang dapat menonaktifkan Al, menambah hara,



Gambar 8. Hubungan konsepsi antara kendala dan tingkat hasil menurut hukum Leibig tahun 1855 (de Wit, 1992)

meningkatkan daya tahan tanah terhadap hara (KTK) dan air. Sebaliknya, sarana produksi yang diberikan untuk menanggulangi permasalahan atau hara yang tidak/kurang bermasalah, selain tidak efisien karena tanggap tanaman kurang, juga menimbulkan efek samping yang merugikan tanaman dan lingkungan. Contoh, pemberian pupuk ZA (bersifat masam) dalam jumlah berlebihan secara terus-menerus pada lahan kering masam untuk mencukupi kahat S justru akan menambah kemasaman tanah (pH tanah turun). Dengan kata lain, kesalahan pengelolaan atau pemberian *input* yang tidak sesuai dengan kondisi tanah dan kebutuhan tanaman, sangat merugikan.

3.1.2 Hukum Optimum Liebscher

Perkembangan selanjutnya dari Hukum Minimum (Leibig) adalah Hukum Optimum oleh Liebscher 1895 (de Wit, 1992) yang menyatakan bahwa faktor produksi yang paling kurang akan sangat efektif dan efisien diberikan apabila semua faktor produksi lainnya berada dalam keadaan optimum. Dengan demikian, dalam strategi peningkatan efisiensi produksi, semua faktor produksi yang diperlukan tanaman perlu dioptimalkan. Sebaliknya, semua faktor yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman (biotik dan abiotik) ditiadakan/dikurangi. Dalam menerapkan prinsip ke-2 ini perhatian terhadap efisiensi sarana produksi tidak hanya ditujukan pada pemberian pupuk, namun juga pada kondisi optimum bagi pertumbuhan tanaman. Contoh sederhana adalah merawat tanaman, kebersihan lahan, penyiangan gulma, monitoring hama penyakit tertentu atau gejala kahat hara telah terdeteksi sedini mungkin sehingga pengendaliannya lebih efisien dan mudah.

3.1.3 Hukum *Constant Activity* Mitscherlich

Selanjutnya, Mitscherlich 1924 (de Wit, 1992) mengemukakan bahwa berkurangnya tanggap tanaman terhadap penambahan hara mengikuti persamaan eksponensial negatif dan koefisien aktivitas suatu hara dalam eksponensial tidak bergantung pada ketersediaan hara lainnya (Hukum Aktivitas Tetap). Dalam aplikasinya, jumlah hara yang diperlukan tanaman untuk mencapai hasil maksimal adalah proporsional. Dalam hal ini, hasil maksimal adalah potensi hasil yang besarnya beragam menurut kondisi iklim, terutama radiasi surya dan suhu, serta sifat fisiologis tanaman. Juga tersirat bahwa pemberian pupuk sebanyak berapa pun tidak akan pernah memberikan hasil tanaman pada suatu lokasi/daerah melampaui potensi hasilnya. Potensi hasil tanaman dapat berbeda menurut tempat (lokasi wilayah) dan waktu (musim), meskipun varietas yang digunakan sama. Hal ini disebabkan oleh adanya keragaman radiasi surya, suhu maksimum dan

minimum berdasarkan tempat dan waktu. Oleh karena itu, teknologi spesifik lokasi menjadi sangat tepat untuk diterapkan dan sebagai alasan diperlukannya *prescription farming*.

3.2 Pengelolaan Hara

Pada pertanian intensif dengan produktivitas tinggi akan terjadi pergerakan hara yang cepat dalam sistem tanah-tanaman-lingkungan. Pemberian pupuk tertentu secara terus-menerus dapat menyebabkan beberapa hara tanaman termasuk hara mikro (Cu, Zn) dan S mengalami tiga kemungkinan, yaitu: (1) penimbunan hara (tidak efisien dan produktivitas tidak stabil); (2) pengurasan hara (produktivitas tanah menurun atau suboptimal); atau (3) status hara optimal dan stabil (produktivitas tinggi dan stabil). Kemungkinan yang ketiga sangat diharapkan dalam pengelolaan pertanian, sebab dapat mencapai tingkat hasil maksimal yang berkelanjutan dan efisien dalam penggunaan sarana produksi. Terjadinya ketiga kemungkinan tersebut bergantung pada ketersediaan hara, kesuburan dan fisik tanah, kondisi iklim, jenis komoditas, dan varietas yang ditanam.

Efisiensi sarana produksi belum sepenuhnya diterapkan petani, terutama N dan P yang sering diberikan secara berlebihan. Di sisi lain, hara tertentu yang dibutuhkan tanaman karena sedikit ketersediaannya kerap kali tidak diberikan. Hal ini terutama karena masih kurangnya pengetahuan, kesadaran, dan kemampuan petani, penyuluh, peneliti mengenai: (1) cara mengidentifikasi masalah utama dan prioritas penanggulangan budi daya tanaman padi spesifik lokasi; (2) menentukan macam, jumlah, cara, dan waktu pemberian pupuk dan amelioran yang tepat; dan (3) belum terbiasa menetapkan target hasil dan pendapatan. Padahal cara tersebut bermanfaat untuk: (a) menghemat penggunaan sarana; (b) mengurangi biaya sehingga dapat meningkatkan keuntungan, bahkan pada kondisi tertentu dapat menaikkan hasil tanaman; dan c) mengurangi pencemaran dan degradasi lingkungan, terutama bila membatasi penggunaan agrokimia seperti pestisida dan pupuk.

Tahapan penerapan cara peningkatan efisiensi sarana produksi, terutama pupuk, untuk tanaman padi dengan teknik *prescription farming* adalah: (1) karakterisasi lokasi/lahan dan identifikasi permasalahan prioritas; (2) menentukan target hasil dengan menggunakan sistem pakar atau cara perhitungan biasa; (3) menentukan takaran pupuk/amelioran; dan (4) memilih teknologi terbaik, yaitu paling efisien dan tersedia di daerah setempat.

3.3 Interpretasi Kondisi Fisika-Kimia Tanah

Kondisi tanah perlu dipertimbangkan dalam memilih sarana produksi dan teknologi yang diperlukan dalam penerapan *prescription farming*. Efisiensi sarana produksi akan meningkat bila faktor pembatas pertumbuhan tanaman ditiadakan. Beberapa kondisi tanah yang sering memengaruhi hasil padi sawah dan efisiensi sarana produksi diuraikan di bawah ini.

Pada kondisi sawah tergenang, reduksi dapat menyebabkan kelarutan ion Fero (Fe^{++}) dan Mn^{++} meningkat, yang pada daerah tertentu berpotensi meracuni tanaman padi atau mengurangi hasil. Hasil penelitian di Jawa dan Bali menemukan adanya hubungan kuadratik antara ion Fe yang dapat tereduksi (ppm Fe) dan hasil gabah (GKG):

$$\text{GKG (t/ha)} = 3,894 + 0,0249 \text{ Fe} - 0,00008 \text{ Fe}^2$$

Berdasarkan persamaan tersebut, bila konsentrasi Fe >300 ppm maka perkiraan penurunan hasil gabah dari optimalnya adalah sebesar 30%.

Kondisi tanah lainnya seperti pH dan C organik tanah juga nyata memengaruhi hasil gabah. Nilai pH tanah secara kuadratik memengaruhi hasil gabah dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{GKG (t/ha)} = -17,1 + 7,861 \text{ pH} - 0,6853 \text{ pH}^2$$

Nilai pH optimum diperoleh 5,74; pada pH yang lebih kecil (lebih masam) atau lebih tinggi terdapat kecenderungan penurunan hasil gabah akibat berbagai faktor yang kurang menguntungkan bagi tanaman padi sawah, termasuk kahat hara mikro pada pH tinggi.

Kandungan C organik tanah berpengaruh positif dan linier terhadap hasil gabah dengan persamaan:

$$\text{GKG (t/ha)} = 3,789 + 0,7922 \text{ C-organik}$$

Hal ini menunjukkan bahwa bahan organik tanah merupakan indikator produktivitas lahan sawah. Perubahan tanah lainnya seperti kapasitas tukar kation (KTK) tanah tidak berpengaruh nyata atau tidak langsung memengaruhi hasil gabah.

3.4 Keragaan *Prescription Farming* di Lapangan

Dalam menerapkan *prescription farming* diperlukan alat bantu seperti *Soil Test Kits* dan sistem pakar. Sistem pakar dapat menentukan kebutuhan pupuk, varietas, dan cara budi daya padi spesifik lokasi. Di bawah ini disajikan salah satu sistem pakar budi daya padi (Makarim, 2008).

3.4.1 Sistem Pakar Padi (SIPADI)

SIPADI merupakan perangkat lunak sederhana yang dapat digunakan untuk menetapkan komponen budi daya padi sawah spesifik lokasi, sesuai digunakan dalam pengembangan teknologi budi daya dengan pendekatan PTT dan *prescription farming*. Sistem pakar ini memberikan saran atau rekomendasi teknologi budi daya spesifik lokasi dan partisipatif kepada penggunanya. *Input* sebagai pertimbangan dalam penyusunan cara budi daya didasarkan pada (1) karakteristik biofisik dan sosial, ekonomi wilayah yang akan menerapkan satu sistem budi daya padi; dan (2) pilihan/keinginan petani terhadap suatu komponen teknologi. Keluaran dari SIPADI adalah paket teknologi anjuran budi daya padi spesifik lokasi dan partisipatif yang terbaik untuk wilayah setempat.

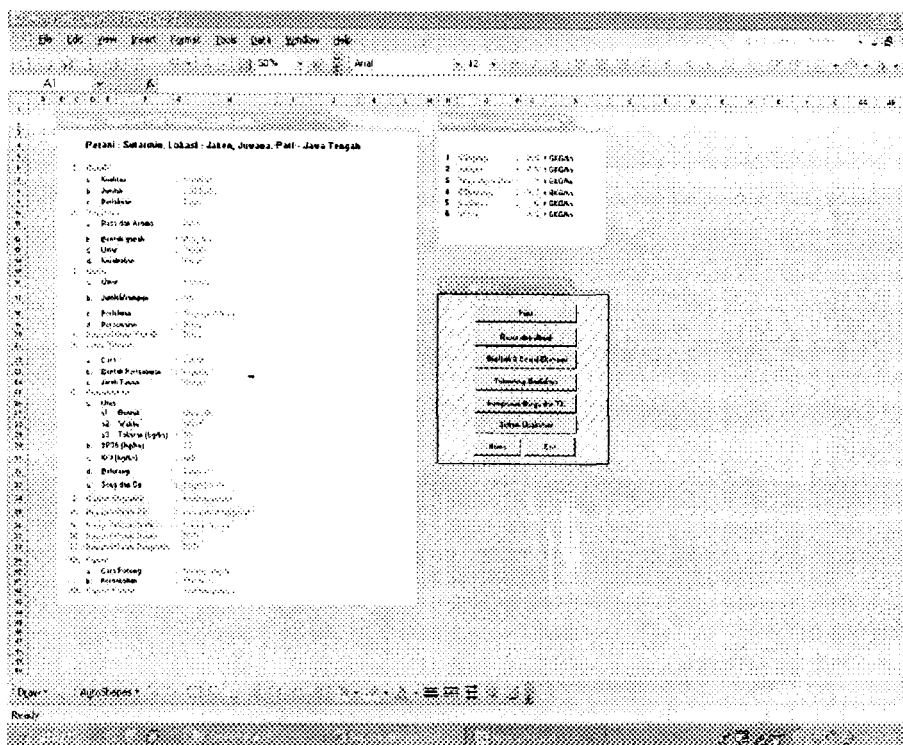
SIPADI dibuat berdasarkan prinsip: (1) menerapkan komponen teknologi budi daya baru terbaik, sesuai dengan karakteristik wilayah tertentu sehingga teknologi yang diterapkan akan efisien dan efektif; (2) menerapkan komponen teknologi yang dapat menanggulangi permasalahan setempat sehingga akan nyata dan terasa langsung manfaatnya oleh pengguna/petani; (3) memilih sebanyak mungkin komponen teknologi budi daya yang saling *compatible* sehingga akan menghasilkan efek sinergis; (4) menghindarkan penggunaan satu atau lebih komponen teknologi yang “saling berlawanan” atau “saling menghilangkan pengaruh” atau yang dapat menambah permasalahan setempat sehingga tidak terjadi pengurangan efek positif terhadap hasil tanaman; (5) pilihan atau keinginan petani setempat atas suatu komponen teknologi diperhitungkan dan dinilai sesuai dengan tingkat keinginannya sehingga ada unsur partisipatif yang dapat mempermudah adopsi dan penyebaran teknologi lebih cepat dan berkesinambungan.

Contoh *output* SIPADI terdiri atas (a) cara budi daya yang dianjurkan (Gambar 9); dan (b) perhitungan usaha tani yang akan diperoleh (Gambar 10).

3.4.2 Potensi Perbaikan Teknologi dan Produktivitas Tanaman

Berdasarkan data dari 34 lokasi atau 104 petak lahan petani di Jawa dan Bali pada MK-II 1998 (Makarim dkk., 1999b) diperoleh informasi tentang keragaan *prescription farming*. Pemberian pupuk urea oleh petani cenderung berlebihan sehingga selain tidak menaikkan hasil gabah juga menambah kepekaan tanaman terhadap hama dan penyakit. Dengan *prescription farming*, pemberian urea dapat dikurangi 15%–20%, bahkan di Jawa Timur hingga 20%–30% tanpa mengurangi hasil.

Pemberian SP36 oleh petani sering tidak tepat dan cenderung berlebihan. Sebagai contoh, kasus di Cianjur (Jawa Barat) dan Binangun (Jawa Tengah), produktivitas tanaman padi dapat dipertahankan tinggi tanpa pemberian SP36.



Gambar 9. Contoh *output* SIPADI yang berupa cara budi daya padi lengkap spesifik lokasi (Makarim, 2008)

Namun, karena petani tidak menyadarinya justru memberi SP36 secara berlebihan. Hal ini diduga erat kaitannya dengan adanya rekomendasi pupuk berimbang (dengan persepsi yang salah), tanpa mengetahui kondisi tanah yang sebenarnya sehingga pemberian SP36 secara terus-menerus menyebabkan terjadinya penimbunan hara P di dalam tanah.

Berbeda dengan penggunaan pupuk KCl yang harganya relatif lebih mahal daripada urea dan SP36, petani cenderung memberi kurang dari kebutuhan tanaman. Kebutuhan pupuk KCl di Jawa dan Bali bervariasi antara 30–85 kg/ha, sedangkan takaran pemberian oleh petani bervariasi antara 0–160 kg/ha. Hal ini menunjukkan adanya indikasi kuat bahwa petani cenderung tidak efisien dalam menggunakan pupuk, bahkan berlebihan bila harganya relatif murah atau menghindari penggunaan pupuk yang mahal harganya seperti KCl. Bila kondisi ini berlangsung lama maka keseimbangan hara tanaman menjadi terganggu sehingga penerapan prinsip Hukum Liebscher menjadi lebih sulit.

DAFTAR PUSTAKA

- Bawden, R.J. 1992. "Systems Approaches to Agricultural Development: the Hawkesbury Experience". In P.S. Teng and F. Penning de Vries (Ed.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. Elsevier Applied Science, London. Vol. 40 : 153–176.
- de Rozari, M.B., *et al.* 1992. "Socio-Economic Impacts of Climate Change". *Agromet* VII (1) : 51.
- de Wit, C.T. 1992. "Resource Use Efficiency in Agriculture". In A. Dobermann, *et al.* (Eds.), *Precision Nutrient Management in Intensive Irrigated Rice Systems. Proceeding International Symp. Maximizing Sustainable Rice Yield through Improved Soil and Environmental Management*. Khon-Kaen, Thailand. p. 133–154.
- Dhaliwal, R.B., *et al.* 2001. "Decision Support System (DSS): Information Technology in a Changing World". *IRRI Notes* 26, 2 : 5–12.
- Dinas Pertanian Tanaman Pangan dan Hortikultura Kabupaten Merauke. 2003. *Profil Pengembangan Kawasan Tanaman Pangan dan Hortikultura Kabupaten Merauke*. Pemerintah Kabupaten Merauke. 30 p.
- Dobermann, A. and P.F. White. 1999. "Strategies for Nutrient Management in Irrigated and Rainfed Lowland Rice Systems". In V. Balasubramanian, *et al.* (Ed.), *Resource Management in Rice Systems: Nutrients*. Kluwer Academic Publisher-IRRI. p. 1–26.
- Duiker, S.W. 1996. "Research in a Ecoregional Framework for Sustainable Land Use and Food Production: Report of a Symposium". Briefing Paper No. 26, Feb. 1996. ISNAR.
- Fagi, A.M. dan S. Kartaatmaja. 2004. "Teknologi Budidaya Padi: Perkembangan dan Peluang". Dalam F. Kasryno, dkk. (Ed.), *Ekonomi Padi dan Beras Indonesia*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta. p. 397–418.
- Kropff, M.J., *et al.* 1994. "Quantitative Understanding of Yield Potential". In K.G. Cassman (Ed.), *Breaking the Yield Barrier. Proc. Workshop on Rice Yield Potential in Favorable Environments*. p. 21–38.
- Kropff, M.J. and L.A.P. Lotz. 1992. "Systems Approaches to Quantify Crop-Weed Interactions and Their Application in Weed Management". In P.S. Teng and F. Penning de Vries (Ed.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. Elsevier Applied Science, 40: 265–282.
- Makarim, A.K. 1992. "Pengaruh Kekeringan pada Beberapa Fase Pertumbuhan Tanaman Terhadap Hasil dan Komponen Hasil Padi". Seminar Balai Penelitian Tanaman Pangan Bogor, 22–23 Oktober 1992. 10 p.

- Makarim, A.K. 2005. *SIPAPUKDI, Sistem Pakar Sederhana untuk Menentukan Takaran Pupuk Berimbang Spesifik Lokasi pada Tanaman Padi Sawah*. Balai Penelitian Tanaman Padi. 5 p.
- Makarim, A.K. 2008. *Sistem Pakar Padi (SIPADI) versi 3.0*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. 16 p.
- Makarim, A.K., dkk. 1991. "Dynamics of Soil Ammonium, Crop Nitrogen Uptake, and Dry Matter Production in Lowland Rice". In F.W.T. Penning de Vries, *et al.* (Ed.), *Simulation and Systems Analysis for Rice Production (SARP)*. Pudoc, Wageningen, the Netherlands. p. 214–238.
- Makarim, A.K., dkk. 1992. "Status P dan Pendugaan Keperluan Pupuk P pada Padi Sawah". *Prosiding Lokakarya Penelitian Komoditas dan Studi Khusus*. Vol. 1.3. p. 199–210.
- Makarim, A.K., dkk. 1996. "Aplikasi Analisis Sistem dan Modeling untuk Mengembangkan Lahan Marginal Wilayah Jalur Selatan Jawa Barat dan Jawa Tengah". Laporan Riset Unggulan Terpadu II Balai Penelitian Bioteknologi Tanaman Pangan. 82 p.
- Makarim, A.K., dkk. 1999a. "Penentuan Takaran Pupuk untuk Tanaman Padi Berdasarkan Analisis Sistem dan Model Simulasi". *Agronomika* 1(I): 32–39.
- Makarim, A.K., dkk. 1993. "Peningkatan Efisiensi dan Efektivitas Pemupukan N pada Padi Sawah Berdasarkan Analisis Sistem". *Prosiding Simposium Penelitian Tanaman Pangan III*. Jakarta/Bogor. p. 675–681.
- Makarim, A.K., dkk. 2007. "Model Pengembangan Lumbung Pangan di Kawasan Timur Indonesia: Merauke, Seram, Buru". Laporan Akhir. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor. 82 p.
- Makarim, A.K., dkk. 1999b. "Penggunaan sistem "prescription farming" pada pola IP padi 300". Makalah Seminar Penelitian Super-Imposed IP Padi 300. Badan Litbang Pertanian, Proyek ARMP-II. 25 p.
- Mitchell, P.L. and J.E. Sheehy. 2000. "Performance of a Potential C4 Rice: Overview from Quantum Yield to Grain Yield". In J.E. Sheehy, *et al.* (Ed.), *Redesigning Rice Photosynthesis to Increase Yield*. IRRI, Los Banos, the Philippines. p. 145–163.
- Peng, S., *et al.* 1994. "Quantitative Understanding of Yield Potential". In K.G. Cassman (Ed.), *Breaking the Yield Barrier. Proc. Workshop on Rice Yield Potential in Favorable Environments*. p. 5–20.
- Penning de Vries, *et al.* 1989. "Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops". *Simulation Monographs*. Wageningen (Netherlands). Pudoc. 271 p.
- Reyes, H.C.G. and F.W.T. Penning de Vries. 1989. "Evaluation of a Model for Simulating the Potential Production of Rice". *Philipp. J. Crop Sci.* 14: 21–32.

- Sheehy, J., *et al.* 2001. "Hindsight and Perspectives: Yield Improvements and C3 vs C4 Rice". In *Program Report for 2000*. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines. 167 p.
- Teng, P.S. and S. Savary. 1992. "Implementing the Systems Approaches in Pest Management". In P.S. Teng and F. Penning de Vries (Ed.), *Systems Approaches for Agricultural Development*. Elsevier Applied Science, London 40: 237–264.
- Utami, P.K. dan A.A. Daradjat. 1995. "Pengaruh Waktu Aplikasi dan Bentuk Pupuk N pada Padi Sawah di Sukamandi". *Risalah Seminar Hasil Penelitian Sistem Usaha tani dan Sosial Ekonomi*. p. 286–299.
- Voss, R. and J. Pesek. 1962. "Estimation of Effect Coefficients Relating Soil Test Values and Units of Added Fertilizer". *Agron. J.* 54: 339–341.
- Yoshida, S. 1981. "Fundamentals of Rice Crop Science". IRRI, Philippines. p. 84–90.