

PENERAPAN MODEL SINUS-PERKALIAN PADA RUMUSAN FUNGSI KINERJA IRIGASI UNTUK OPTIMASI DENGAN PROGRAM DINAMIK

W. Soetopo

Dosen Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. Mayjend. Haryono 167 Malang 65145
E-mail: wid131475835@yahoo.co.uk

ABSTRAK

Salah satu masalah yang mendasar dalam optimasi Program Dinamik untuk skedul irigasi adalah bahwa nilai Fungsi Tujuan kinerja irigasi berupa Produksi Tanaman baru akan muncul pada waktu panen di akhir skedul. Dalam penelitian ini dilakukan suatu pendekatan dengan model Sinus-Perkalian yang memungkinkan adanya nilai Fungsi Tujuan pada setiap tahap proses penyelesaian Program Dinamik. Fungsi Sinus digunakan untuk menyesuaikan dengan bentuk umum hubungan antara Pemberian Air dan Produksi Tanaman. Fungsi Perkalian digunakan untuk menyesuaikan dengan Persamaan Recursive pada Program Dinamik. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan dengan model Sinus-Perkalian ini berpotensi untuk terus dikembangkan.

Kata kunci: sinus, perkalian, fungsi produksi, program dinamik.

ABSTRACT

One of the basic problems in the Dynamic Programming optimization for irrigation scheduling is that values of the Objective Function for irrigation performance in the form of the crop production will show up lately in the harvest time at the end of schedule. In this research, an approach is made by using a sine-product model which enabling the manifestation of the Objective Function values at each stages of the Dynamic Programming solution process. The Sine Function is used for adjustment to the general form of the relationship between the Applied Water and the Crop Production. Meanwhile the Product Function is used for arrangement with the Recursive Equation in Dynamic Programming. The results show that the approach with the Sine-Product model is potential for further developments .

Keywords: sine, product, production function, dynamic programming.

PENDAHULUAN

Masalah optimasi alokasi air irigasi, baik secara spasial (antar petak) maupun temporal (penjadwalan/*scheduling*) selalu menarik untuk diteliti. Salah satu metode optimasi yang sering digunakan pada optimasi alokasi air irigasi adalah Program Dinamik (*Dynamic Programming*). Khususnya untuk optimasi dengan Program Dinamik, terdapat masalah-masalah yang mendasar sebagai berikut.

- Untuk suatu jenis tanaman tertentu maka nilai produksi hasil irigasi (panen) baru muncul pada akhir periode tanaman tersebut.
- Hasil produksi irigasi (panen) dipengaruhi bukan saja oleh banyaknya tingkat pemenuhan kebutuhan air, tetapi juga di antaranya oleh cara pemberian air irigasi, seperti yang ditunjukkan

Ahmad *et al.* (2004), Erdem *et al.* (2006), dan Khan *et al.* (2005).

- Satu petak irigasi dapat mengandung lebih dari satu macam tanaman (*multicrop*) dengan waktu tanam yang berbeda satu sama lain.
- Banyaknya air yang dibutuhkan oleh tanaman di suatu wilayah tertentu juga dipengaruhi oleh besarnya curah hujan lokal yang karakteristik terjadinya berbeda dengan karakteristik ketersediaan air irigasi (debit).

Penelitian ini dipusatkan pada masalah yang pertama (a) akan dicoba suatu pendekatan pada model fungsi produksi panen (fungsi kinerja irigasi) dengan struktur yang memungkinkan untuk diterapkannya optimasi dengan Program Dinamik.

Pada optimasi dengan Program Dinamik, Fungsi Tujuan dinyatakan dalam bentuk Persamaan *Recursive* yang memunculkan suatu nilai tertentu pada tiap tahap (*stage*) dan mempunyai hubungan

matematik yang cukup sederhana antar tahap. Pada tahap akhir proses recursive (optimasi) maka nilai Fungsi Tujuan ini harus sesuai dengan realitas hasil panen sebagai produksi hasil irigasi. Karenanya permasalahan dalam penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut.

1. Bagaimana agar Fungsi Produksi Panen dapat menampilkan suatu nilai tertentu pada setiap tahap proses recursive.
2. Bagaimana agar Fungsi Produksi Panen mempunyai hubungan matematik yang cukup sederhana antara tahap recursive.
3. Bagaimana agar secara keseluruhan tahap, maka Fungsi Produksi Panen dapat menampilkan nilai yang sesuai dengan nilai panen selama musim tanam.

Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut di atas, maka dalam penelitian ini akan dicoba berbagai bentuk matematik dari Fungsi Produksi Panen. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyusun suatu bentuk umum persamaan matematik dari Fungsi Produksi Panen, sehingga dapat diterapkan pada model optimasi Program Dinamik di satu sisi, dan juga sesuai dengan realitas nilai panen di lain sisi.

Karena tujuan dari penelitian ini yang mencari bentuk umum persamaan matematik dari Fungsi Produksi Panen, maka lingkup daripada penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

- a. Banyaknya petak irigasi yang dijadikan model penelitian hanya satu (1) petak. Jadi alokasi air dibatasi tidak ke arah **spasial**, tetapi hanya ke arah **temporal** (skedul/tahap).
- b. Jenis tanaman dalam petak irigasi model penelitian hanya beberapa jenis dan seragam dalam hal karakteristik kebutuhan air dan saat terjadinya panen.
- c. Data petak irigasi serta kebutuhan air irigasi per satuan luas di ambil dari hasil penelitian yang pernah dilakukan (skripsi) dengan besaran hujan dianggap tetap (deterministik).

TINJAUAN PUSTAKA

Optimasi irigasi telah menjadi pokok dari penelitian selama paling sedikit empat dekade, tetapi sejauh ini belum ada prosedur optimasi yang sesuai dan sistematis yang digunakan dalam rangka produksi pertanian (English, 2002). Pada suatu wilayah pertanian dengan lahan terbatas tetapi air berlimpah, analisa optimasi dapat dilakukan secara petak demi petak. Masalahnya menjadi semakin

kompleks apabila melibatkan banyak petak dan jenis tanaman sedangkan jumlah air terbatas. Analisis menyeluruh terhadap wilayah pertanian semacam ini biasanya menerapkan teknik-teknik program matematik (*mathematical programming*) seperti Program Linier dan Program Dinamik. Pelaksanaan irigasi konvensional berdasarkan dua spesifikasi kunci, yaitu kebutuhan air tanaman (*crop water requirement*) dan efisiensi pemberian air nominal. Berdasarkan paradigma yang baru, maka perencanaan irigasi tidak lagi berdasarkan pada spesifikasi semacam itu. Untuk menentukan strategi irigasi optimal, perlu digunakan model-model produksi tanaman (panen) dan teknik-teknik riset operasi (*operation research*).

Kumar *et al.* (2006) menyajikan suatu model kebijakan operasi optimal daripada sebuah waduk untuk irigasi dengan berbagai jenis tanaman, yang menggunakan teknik optimasi Algoritma Genetik (*Genetic Algorithm* atau *GA*). Tujuannya adalah untuk memaksimalkan jumlah panen relatif dari semua jenis tanaman di wilayah irigasi. Model ini memperhitungkan *inflow* ke waduk, curah hujan di wilayah irigasi, kompetisi kebutuhan air musiman antar berbagai jenis tanaman, dinamika kelembaban tanah di wilayah tanam, sifat heterogen dari tanah, dan tanggapan tanaman terhadap tingkat penerapan irigasi. Penerapan model optimasi Algoritma Genetik ini pada suatu kasus waduk irigasi tunggal-guna menghasilkan suatu kebijakan operasi optimal yang mirip dengan apa yang dihasilkan dengan menggunakan model optimasi program linier.

Cai *et al.* (2003) menyajikan pengembangan suatu model integrasi secara hidrologi-agronomi-ekonomi dalam suatu daerah aliran sungai irigasi merupakan pengguna air yang utama dan salinitas akibat irigasi merupakan masalah besar untuk lingkungan. Model ini merupakan integrasi dari manajemen sistem pemasok air dan sistem pertanian irigasi yang secara spasial adalah lebih besar dan lebih kompleks daripada studi-studi sebelumnya. Pada hubungan agronomi, maka produksi panen merupakan fungsi dari kelembaban tanah dan salinitas tanah. Dengan demikian bisa diperoleh kurva-kurva hubungan antara produksi panen relatif dan kelembaban tanah untuk berbagai nilai salinitas tanah.

Untuk menghindari problem optimasi nonlinier yang kompleks yang ditimbulkan oleh penetapan parameter-parameter pemberian air supaya menghasilkan suatu profil kelembaban tanah

yang optimal, Schmitz *et al.* (2002) menyarankan suatu cara alternatif yang menggabungkan model aliran bawah-tanah numerik dengan jaringan neural artifisial untuk menyelesaikan problem dalam dua langkah yang betul-betul terpisah. Langkah pertama adalah menggunakan model aliran untuk menghitung profil-profil basah. Langkah kedua adalah menerapkan jaringan neural artifisial. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa cara baru ini dapat meningkatkan efisiensi irigasi.

Jalal *et al.* (2003) telah melakukan optimasi terhadap rancangan dan operasi dari stasiun pompa irigasi. Tujuannya adalah meminimumkan enersi yang digunakan oleh stasiun pompa berdasarkan lengkung kebutuhan irigasi. Problem diselesaikan berdasarkan model program nonlinier (NLP) yang berskala besar. Penggunaan Program Dinamik sejauh ini hanya terbatas pada sistem-sistem berskala kecil.

Persamaan umum Recursive yang sekaligus juga merupakan Fungsi Tujuan untuk Program Dinamik (Mays & Tung, 1992) adalah sebagai berikut.

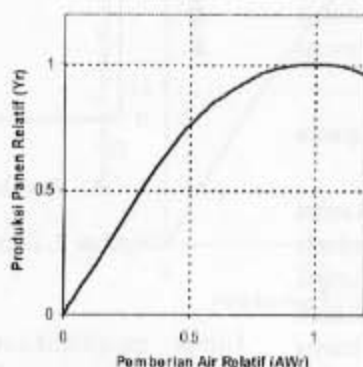
$$f_n^*(S_n) = \text{opt}_{d_n} \{ f_n(S_n, d_n) \circ f_{n+1}^*(S_{n+1}) \} \quad (1)$$

dengan f_n^* adalah Fungsi Tujuan optimal pada tahap ke- n , S_n adalah variabel status pada tahap ke- n , d_n adalah variabel keputusan pada tahap ke- n , dan \circ adalah operator aljabar (operator + atau \times misalnya).

Pada penelitian ini, maka Fungsi Tujuan di atas adalah nilai produksi panen relatif (dinotasikan sebagai Y_r), yaitu nisbah produksi panen aktual terhadap produksi panen potensial. Apabila Y_r ini dihubungkan dengan pemberian air relative (dinotasikan sebagai AW_r , yaitu nisbah antara pemberian air aktual terhadap pemberian air optimum) maka muncul **bentuk umum** dari hubungan antara pemberian air dan produksi panen (English, 2002). Pemberian air optimum adalah jumlah air yang diberikan pada tanaman yang akan menghasilkan produksi panen potensial (paling tinggi). Pemberian air yang melampaui batas optimum justru akan menurunkan produksi panen. Bentuk umum hubungan AW_r dan Y_r ini yang ditampilkan pada Gambar 1.

Grafik pada Gambar 1 di atas mewakili jenis tanaman irigasi secara umum, Kurva Bentuk Umum dianggap mulai dari titik nol. Pada AW_r rendah sampai sekitar 0.5, maka bentuknya kurang lebih linier (garis lurus). Selanjutnya kurva berbentuk garis lengkung sampai titik puncak (pada AW_r dan Y_r sama dengan 1). Selanjutnya garis lengkung akan menurun yang menggambarkan penurunan panen akibat kelebihan air yang menimbulkan kondisi-kondisi zona akar anaerobik, penyakit, dan pencucian unsur-unsur hara.

Apabila satu bulan dibagi 3 periode 10-harian, maka satu musim tanam (umumnya) dapat terdiri dari 12 periode. Setiap periode 10-harian ini juga merupakan suatu tahap pada Program dinamik. Dari hubungan AW_r - Y_r pada Gambar 1 di atas, maka Fungsi Tujuan untuk setiap periode 10-harian juga merupakan Fungsi dari AW_r , sehingga model umum dari Produksi Panen Relatif dapat ditulis sebagai berikut.



Gambar 1. Bentuk umum hubungan AW_r dan Y_r
Sumber: English *et al.*, 2002

Fungsi Produksi Tahap-i

$$= Yr_i = Fp_i(AWr_i) \quad (2)$$

Nilai AWr_i berkisar antara 0 (tak ada pemberian air) dan 1 (pemberian air penuh sesuai kebutuhan tanaman). Demikian pula dengan kisaran Yr_i antara 0 (tak ada panen) dan 1 (panen maksimum). Logikanya maka kombinasi Yr_i untuk satu musim tanam (12 periode/tahap) harus sesuai dengan nilai Yr yang ditunjukkan pada Gambar 1. Karenanya sebagai operator aljabar pada Persamaan umum Recursive (1) dipilih operator perkalian (\times) karena pada semua nilai $Yr_i=AWr_i=0$ akan menghasilkan $Yr=AWr=0$ dan pada semua nilai $Yr_i=AWr_i=1$ akan menghasilkan $Yr=AWr=1$. Maka, untuk satu musim tanam Fungsi Produksi dapat ditulis sebagai berikut.

Fungsi Produksi =

$$Yr = Yr_1 \times Yr_2 \times Yr_3 \times \dots \times Yr_n \quad (3)$$

dengan n adalah banyaknya periode/tahap selama musim tanam (=12 misalnya).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam dua bagian, yaitu (1) merumuskan Fungsi Produksi Panen yang juga merupakan Fungsi Kinerja Irigasi, dan (2) menerapkan Fungsi Kinerja Irigasi dalam suatu contoh kasus optimasi Program Dinamik.

1. Perumusan Fungsi Produksi Panen

Mengacu pada model umum pada Pers.(2) di atas, maka model Fungsi Produksi akan dimulai dari bentuk yang paling sederhana. Selanjutnya secara bertahap akan dicoba untuk menambah komponen-komponen sedemikian agar bentuk Fungsi Produksi semakin mendekati Bentuk Umum hubungan AWr - Yr yang disajikan pada Gambar 1 di atas. Percobaan akan dihentikan apabila bentuk Fungsi Produksi dianggap sudah cukup menyerupai Bentuk Umum hubungan AWr - Yr tersebut.

2. Penerapan Fungsi Kinerja Irigasi pada Contoh Kasus

Fungsi Kinerja Irigasi adalah penerapan Fungsi Produksi Panen pada model optimasi seperti Program Dinamik. Untuk menguji apakah Fungsi Kinerja Irigasi ini memang sesuai, maka dilakukan optimasi Program Dinamik pada suatu contoh kasus sederhana, yaitu operasi waduk pemasok kebutuhan irigasi untuk satu petak selama satu musim tanam. Data kebutuhan irigasi berasal dari penelitian yang

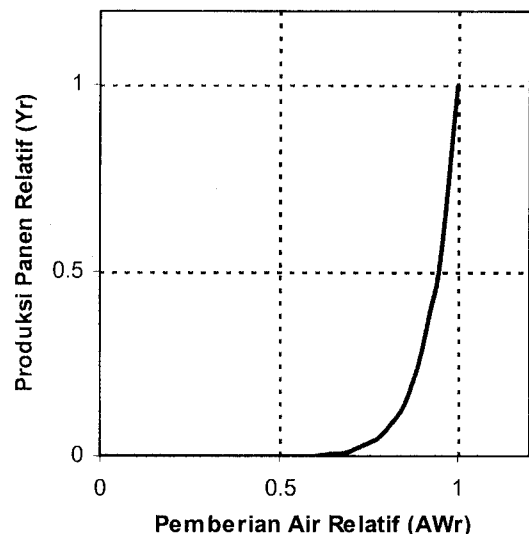
sudah dilakukan (skripsi), sementara data infow dan kapasitas waduk diasumsi.

Fungsi Produksi Panen

Bentuk Fungsi Produksi Panen yang diperhatikan adalah untuk nilai-nilai AWr di antara 0 dan 1. Sementara untuk nilai-nilai AWr di atas 1 tidak dianggap penting karena dalam tahap perencanaan, maka kelebihan air selalu dapat dialihkan ke tempat lain, sehingga tidak akan sampai mengakibatkan efek yang negatif (penurunan panen). Untuk tujuan perbandingan dengan Bentuk Umum, maka akan dilakukan pemetaan Yr dengan berbagai nilai AWr . Sebagai langkah awal perumusan dari Fungsi Produksi Panen akan dimulai dari bentuk model yang paling sederhana sebagai berikut.

$$Yr_i = AWr_i \quad (4)$$

Untuk model Pers.(4) dihitung nilai-nilai Yr (dengan menggunakan Pers.(3)) untuk berbagai nilai-nilai AWr (dalam hal ini maka nilai-nilai dari AWr_i untuk semua periode disamakan dengan AWr yang bersangkutan). Adapun pemetaan daripada Yr - AWr menghasilkan bentuk seperti pada Gambar 2 berikut.

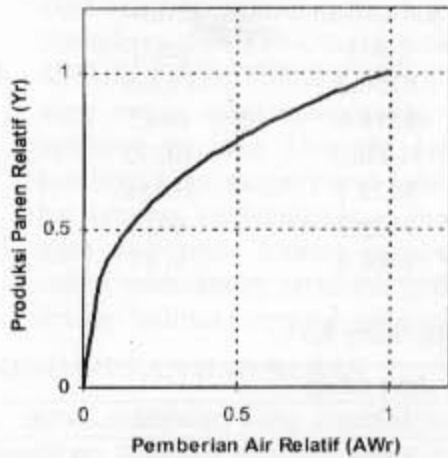


Gambar 2. Bentuk AWr - Yr untuk Pers.(4)

Untuk membalikkan arah kelengkungan kurva, sekarang dicoba model berikut.

$$Yr_i = AWr_i^{0.03} \quad (5)$$

Pemetaan Y_r-AWr menghasilkan bentuk seperti pada Gambar 3 berikut.

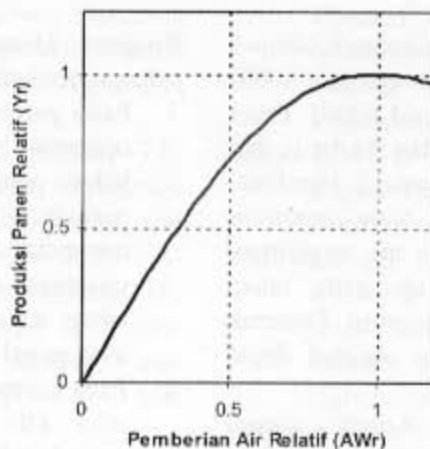


Gambar 3. Bentuk $AWr-Y_r$ untuk Pers.(5)

Arah kelengkungan kurva sudah sesuai. Pada bagian awal (AWr di bawah 0.5) masih belum lurus, sementara pada bagian akhir (titik puncak) belum merupakan busur persinggungan. Karenanya kemudian dicoba dengan memasukkan unsur fungsi sinus yang mempunyai bentuk semacam itu. Berbagai struktur model yang telah dicoba, maka yang paling mendekati Bentuk Umum adalah model berikut.

$$Y_r = \left[\sin \left\{ \left(AW_r - a \sin(AW_r \cdot 2\pi) \right) \times \left[1 - b \sin(Aw_r \pi) \right]^c \cdot \pi / 2 \right\} \right]^d \quad (6)$$

dengan parameter-parameter $a=0.06$, $b=0.25$, $c=1.3$, $d=0.15$, dan $d=0.99$.



Gambar 4. Bentuk $AWr-Y_r$ untuk Pers.(6)

Pemetaan Y_r-AWr menghasilkan bentuk seperti pada Gambar 4. Bentuk Fungsi Produksi ini sudah cukup sesuai dengan Bentuk Umum pada Gambar 1. Untuk ekstensi kurva pada $AWr > 1$, maka dalam hal ini dianggap berbentuk simetris terhadap titik puncak.

Contoh Kasus Optimasi Program Dinamik

Fungsi Produksi Panen pada Pers.(6) kini dapat digunakan sebagai Fungsi Kinerja Irigasi pada model optimasi Program Dinamik. Untuk contoh kasus ini digunakan data berikut.

Data Volume Kebutuhan selama 12 periode 10-harian (satu musim tanam) untuk suatu petak sawah diambil dari penelitian sebuah skripsi (Putuwirawan, 2007). Diasumsikan pasokan diperoleh dari sebuah waduk kecil dengan tampungan aktif 5000 m^3 . Data Volume Kebutuhan diperoleh dari simulasi acak untuk nilai antara $6000 \text{ s/d } 12000 \text{ m}^3/\text{periode}$. Waduk pada awal periode-1 dalam kondisi penuh dan harus kembali ke kondisi penuh pada akhir periode-12. Ingin dicari skedul volume air waduk untuk memaksimalkan Produksi Panen Relatif. Dalam hal ini diasumsikan bahwa tanaman di petak mengikuti Fungsi Produksi pada Pers.(6).

Untuk penyelesaian, kisaran dari variabel status (state variabel) yang dalam hal ini berupa tampungan waduk didiskritisasi menjadi unit-unit 100 m^3 . Contoh Tabel Perhitungan Program Dinamik untuk periode/tahap ke-1 adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Data Contoh Kasus

No. Periode	Volume Kebutuhan [m3]	Volume Inflow [m3]	No. Periode	Volume Kebutuhan [m3]	Volume Inflow [m3]
1	15071.6	6763	7	9350.2	11268
2	6773.8	6583	8	8515.6	6692
3	8182.9	7603	9	11030.3	10372
4	3362.7	8657	10	9035.7	10188
5	6144.8	10420	11	9725.2	6038
6	10293.7	7364	12	9906.6	9147

Tabel 2. Perhitungan Program Dinamik Periode/tahap ke-1.

		Tampungan akhir tahap						
		0	100	200	300	400	4900	5000
Tampungan awal tahap	5000	0.9959	0.995 6	0.995 3	0.995 0	0.994 7	0.967 4	0.966 4
	Maksimum	0.9959	0.995 6	0.995 3	0.995 0	0.994 7	0.967 4	0.967 4
	Keputusan	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

Tabel 3. Ringkasan Hasil Perhitungan Program Dinamik.

No. Periode	Tampungan waduk awal tahap [m3]	AWr_i	Yr_i	No. Periode	Tampungan Waduk awal tahap [m3]	AWr_i	Yr_i
1	5000	0.7805	0.9959	7	2600	0.9484	0.9998
2	0	0.9571	0.9999	8	5000	0.9620	0.9999
3	100	0.9413	0.9997	9	3500	0.9494	0.9998
4	0	1.0000	1.0000	10	3400	0.9505	0.9998
5	800	1.0000	1.0000	11	5000	0.7751	0.9956
6	5000	0.9485	0.9998	12	3500	0.7719	0.9955

Tabel perhitungan Program Dinamik tahap-1 di atas terdiri dari 1 baris (status tampungan 5000) dan 51 kolom (status tampungan 0 s/d 5000). Tabel perhitungan tahap 2 s/d 11 terdiri dari 51 baris dan 51 kolom. Tabel perhitungan tahap-12 (terakhir) terdiri dari 51 baris dan 1 kolom. *State transition (stage transformation)* dalam hal ini tergantung daripada prosentase pemberian air pada tahap berikutnya. Hasil perhitungan Program Dinamik untuk skedul operasi waduk yang optimal dapat dilihat pada Tabel 3..

Hasil Produksi Panen Relatif secara keseluruhan musim taanam = $Yr = 0.9858$.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian terhadap Fungsi Kinerja Irigasi (Fungsi Produksi Panen) untuk optimasi

Program Dinamik dapat dilakukan pembahasan sebagai berikut.

1. Pada perumusan Fungsi Kinerja Irigasi, maka operator perkalian dapat diinterpretasikan bahwa pengaruh kekurangan pasokan air di satu periode tertentu mempunyai pengaruh menentukan terhadap keseluruhan panen. Jadi misalnya $AWr_i=0$ (tak ada pasokan) di satu tahap tertentu akan menyebabkan seluruh panen akan gagal total ($Yr=0$).
2. Pada perumusan Fungsi Produksi Panen, maka nilai AWr_i dianggap seragam untuk seluruh periode/tahap. Nilai AWr_i yang bervariasi akan menyebabkan nilai produksi panen Yr yang lebih kecil.
3. Pada perumusan Fungsi Produksi Panen, maka tidak dilakukan kalibrasi dengan menggunakan

data irigasi-panen lapangan, karena penelitian ini masih dalam tahap perumusan secara umum. Data sekunder semacam itu yang cukup akurat tampaknya akan sulit untuk diperoleh.

4. Struktur Fungsi Produksi Panen pada Pers.(6) yang cukup rumit menyebabkan penyelesaian optimasi Program Dinamik dengan variabel kontinu akan sangat rumit walaupun memang hal tersebut memungkinkan. Penyelesaian dengan diskritisasi kisaran variabel status juga cukup memuaskan, terutama apabila didukung dengan fasilitas komputer yang cukup canggih.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil penelitian terhadap Fungsi Kinerja Irigasi (Fungsi Produksi Panen) untuk optimasi Program Dinamik adalah sebagai berikut.

1. Model Fungsi Produksi Panen pada Pers.(6) dapat digunakan sebagai Fungsi Kinerja Irigasi untuk menampilkan nilai pada setiap tahap proses recursive.
2. Hubungan matematik antar periode/tahap yang berupa operator perkalian adalah cukup

sederhana untuk digunakan pada tahap recursive.

3. Dimasukkannya fungsi-fungsi sinus dalam Pers.(6) dan pengaturan nilai parameter (a s/d e) menyebabkan Fungsi Produksi tersebut dapat menampilkan nilai yang sesuai dengan nilai panen selama satu musim tanam.

Untuk penelitian selanjutnya dapat dikemukakan saran-saran sebagai berikut.

1. Untuk penelitian-penelitian mendatang dapat dilakukan kalibrasi Fungsi Produksi Panen dengan data hasil panen untuk berbagai kondisi pemberian air (termasuk hujan). Data sekunder yang cukup akurat boleh jadi sulit untuk didapatkan. Kemungkinan lain adalah mendapatkan data primer lewat eksperimen langsung di lapangan yang boleh jadi akan mahal.
2. Adanya peluang untuk memperbaiki struktur Fungsi Produksi panen, misalnya dengan mempertimbangkan bahwa efek dari pemberian air relatif (AWr) terhadap tanaman yang tidak sama antara satu periode dengan periode yang lain

.DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M.D., Masih, I., & Turrall, H., 2004, *Diagnostic Analysis of Spatial and Temporal Variations in Crop Water Productivity*, Journal of Applied Irrigation Science, 39(1), 43-63.
- Cai, X., McKinney, D.C., & Lasdon, L.S., 2003, *Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management*, Journal of Water Resources Planning and Management, 129(1), 4-17.
- English, M.J., Solomon, K.H., & Hoffman, G.J., 2002, *A Paradigm Shift in Irrigation Management*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 128(5), 267-277.
- Erdem, T., Erdem, Y., Orta, H., & Okursoy, H., 2006, *Water-Yield Relationships of Potato under Different Irrigation Methods and Regimens*, Journal of Science and Agriculture, 63(3), 226-231.
- Jalal, M.M., Marino, M.A., & Afshar, A., 2003, *Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Stations*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(3), 149-154.
- Khan, M.H., Chattha, T.H., & Saleem, N., 2005, *Influence of Different Irrigation Intervals on Growth and Yield of Bell Pepper*, Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 1(2), 125-128.
- Kumar, D.N., Raju, K.S., & Ashok, B., 2006, *Optimal Reservoir Operation for Irrigation of Multiple Crops Using Genetic Algorithms*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(2), 123-129.
- May, L.W. & Tung, Y.K., 1992, *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Putuwirawan, D., 2007, *Studi Optimasi sebagai Alternatif untuk mengatasi Keterbatasan Air pada Daerah Irigasi Kalilanang*, Skripsi di Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Schmitz, G.H., Schutze, N., & Petersohn, U., 2002, *New Strategy for Optimizing Water Application under Trickle Irrigation*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 128(5), 287-297.

(Artikel diterima tgl 3/5/07, disetujui tgl 9/5/07, direvisi tgl 16/06/2007)