

Pemodelan Tanaman Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.) Berbasis Efisiensi Penggunaan Radiasi surya, Ketersediaan Air dan Nitrogen

(Crop Modeling of Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.) based on Radiation Use Efficiency, Water and Nitrogen available)

Gusti Rusmayadi¹, Handoko², Yonny Koesmaryono², Didiek Hadjar Goenadi³

¹ Staf Pengajar pada Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat (Unlam)

² Staf Pengajar pada Departemen Geomet FMIPA-IPB

³ Peneliti Utama pada Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia

ABSTRACT

A number of crop growth simulation models have been developed using the radiation use efficiency (RUE) concept to predict crop growth and yield in various environments. These models generally calculate daily biomass production as the product of the quantity of radiation intercepted and RUE. Besides that biomass production was determined by water and nitrogen available factor. So, this research was carried out to quantify the RUE, biomass and leaf area index on *Jatropha* under rainfall condition, four levels of nitrogen fertilizer (N) and two and three population densities (P) planted twice. The experiments used a systematic Nelder fan design with 9 spokes and 4 – 5 rings were conducted at SEAMEO-BIOTROP field experiment in 2007. Data from the first experiment were used for parameterization and calibration and the second experiment data for model validation. Based on parameterization, we found that RUE can prediction above ground biomass accumulation of *Jatropha* were 0.94 ($r=0.83$) g MJ⁻¹ to 1.3 ($r=0.75$) g MJ⁻¹. Water availability was between $\psi=-30$ kpa and $\psi=-1.5$ MPa for field capacity and wilting point, respectively. Nitrogen demand of root, stem, leaf and grain N were ($N_{dem_r}=0.75$), ($N_{dem_s}=0.60$), ($N_{dem_l}=2.53$), and ($N_{dem_g}=2.41$), respectively. Validation showed that model can simulate crop growth and development of *Jatropha*.

Keywords: Crop modeling, *Jatropha*, RUE, water and nitrogen available

PENDAHULUAN

Penanaman jarak pagar dianjurkan untuk lahan marginal dan kebutuhan air tanamannya relatif sedikit, oleh karena itu penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan air hujan di lahan kering untuk produksi tanaman jarak. Menurut Sukarin *et al.* (1987) dan Aker, (1997) variabilitas iklim curah hujan mengendalikan penggunaan air pada kondisi air yang terbatas dalam produksi jarak pagar.

Jarak pagar merupakan tanaman yang dapat menyimpan air pada daun dan akarnya selama musim kering (Prihandana dan Hendroko, 2007) dan termasuk tanaman *succulent* yang daunnya menutup dimusim kering, jadi tanaman ini memiliki adaptasi yang sangat baik dan luas di wilayah-wilayah kering dan semi kering (Heller, 1996). Namun, kekeringan dapat

membatasi nitrogen (N) yang dapat diserap tanaman, melalui pengurangan laju mineralisasi N. Hujan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kehilangan N dari tanah melalui pencucian dan denitrifikasi. Pada tanah alkalin tinggi, N dapat hilang karena volatilisasi (Matthews, 2002).

Variabilitas iklim juga mempengaruhi efisiensi penggunaan radiasi (RUE) dan pengaruh defisit air tanah dapat dihubungkan secara langsung dengan RUE, pertumbuhan tanaman dan hasil (Demetriades-Shah *et al.* 1992; Arkebauer *et al.* 1994). RUE juga bervariasi menurut umur dan nitrogen daun spesifik (SLN) (Muchow & Davis, 1988; Sinclair & Horie, 1989). Efisiensi penggunaan radiasi surya (RUE) (ϵ , g MJ⁻¹) dipergunakan secara luas dalam analisis pertumbuhan tanaman dan produksi biomasa dalam beberapa model simulasi tanaman dengan lingkungan berbeda (Monteith, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978; Jones & Kiniry, 1986; Muchow *et al.* 1990; Sinclair, 1991; Sinclair & Muchow, 1999; Brisson *et al.* 2003; Kemanian *et al.* 2004). Pada simulasi, radiasi yang diintersepsi selama periode tertentu dikalikan dengan RUE untuk memprediksi produksi bahan kering (Lecoeur & Ney, 2003). Sinclair & Horie (1989) menunjukkan RUE berbeda dalam spesies dan bervariasi di antara spesies tergantung tingkat kejenuhan cahaya pada laju fotosintesis dan kandungan nitrogen daun. Selain itu, variabilitas iklim dan defisit air yang terjadi pada kondisi lapang langsung menurunkan RUE akibat penurunan aktifitas fotosintesis (Demetriades-Shah *et al.* 1992; Arkebauer *et al.* 1994). Pengukuran RUE sangat membantu memahami konsekuensi kekeringan bagi tanaman dan variasinya menurut umur (Muchow & Davis, 1988).

Pemodelan hasil tanaman dengan kondisi defisit air dapat menjelaskan perilaku tanaman pada kondisi lapangan umumnya, karena kapasitas pertukaran gas dari daun dan RUE tergantung pada pengaruh fisiologis defisit air tanah. Oleh karena itu, menurut (Arkebauer *et al.* 1994) perhitungan neraca air tanah harian dapat dihubungkan langsung dengan RUE, pertumbuhan tanaman dan hasil.

Tanaman jarak memerlukan nitrogen dalam jumlah besar dibandingkan dengan unsur hara lainnya. Komponen minyak jarak pagar yang terbesar adalah trigliserida yang mengandung asam lemak oleat dan linoleat yang melibatkan banyak nitrogen. Ketersediaan nitrogen dalam keperluan praktis lebih tergantung pada perubahan antara bahan organik dari aplikasi permupukan. Ketersediaan ini penentu utama dari vigor tanaman dan karena dari permintaan dan penggunaan air. Dalam variabilitas suplai air, peningkatan tingkat suplai nitrogen dapat berakibat positif atau negatif

pada hasil (Taylor *et al.* 1988). Tanaman tergantung pada pelepasan nitrogen dari dekomposisi bahan organik untuk menyediakan mineral nitrogen yang dapat diambil dari dalam tanah (Seligman *et al.* 1986).

Dalam keperluan praktis, permasalahan yang muncul adalah menyesuaikan suplai nitrogen dengan curah hujan dan terhadap hasil potensial. Ini berarti, tanaman tidak dapat merespon terhadap suplai nitrogen cukup kalau kebasahan melebihi dari kondisi normal. Dalam kondisi yang kering melebihi dari kondisi normal, keperluan nitrogen rendah, dan pada tingkat tinggi dapat menekan hasil pada kondisi keterbatasan air. Situasi ini muncul karena nitrogen menstimulasi pertumbuhan awal dan meningkatkan penggunaan air selama fase vegetatif sehingga air tidak cukup pada saat pengisian biji (Storrier, 1962).

Tanaman jarak pagar dikenal sebagai tanaman yang rakus unsur hara, dengan demikian setelah panen raya perlu diberikan pemupukan dengan dosis yang sesuai untuk menggantikan hara yang telah digunakan. Air pengairan yang merupakan media transportasi nutrisi dari tanah keseluruhan organ tanaman, juga merupakan faktor penentu pada proses pengisian biji. Dengan demikian kekurangan nutrisi (P dan K) dan air pengairan terutama pada saat proses pengisian biji diduga akan menghasilkan biji yang kopong (unfilled seeds) (Heliyanto, 2007; Purlani, 2007).

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui efisiensi penggunaan radiasi surya Jarak Pagar kemudian mengintegrasikan efisiensi penggunaan radiasi, ketersediaan air, dan nitrogen ke dalam suatu model simulasi tanaman. Model yang dibuat terdiri dari empat submodel, yaitu perkembangan, pertumbuhan tanaman, neraca air dan neraca nitrogen.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Pupuk Urea sesuai perlakuan diberikan $\frac{1}{2}$ dosis saat tanam dan 90 HST. SP-36 dan KCI masing-masing sebesar 20 g/pohon (Hambali *et al.* 2006) diberikan saat tanam. Populasi IP-1P digunakan sebagai benih. Fungisida, furadan, dan insektisida untuk pemeliharaan tanaman. Alat yang digunakan adalah sensor radiasi solarimeter portabel dan kadar air tanah portabel tipe 303 Digital Multimeter.

Metode

Percobaan disusun menurut Nelder *Fan Design* (Mark, 1983). Setiap plot terdiri dari 9 *spoke* dan 4 *ring* (percobaan pertama) serta 9 *spoke* dan 5 *ring* (percobaan kedua). Nitrogen yang diberikan adalah W1N0 (0 g Urea/pohon), W1N1 (20 g Urea/pohon), W1N2 (40 g Urea/pohon), dan W1N3 (60 g Urea/pohon). Setiap *ring* ditempatkan populasi tanaman W1P1 (17 698 tanaman/ha atau 1.7 tanaman/m²), W1P2 (3 246 tanaman/ha atau 0.32 tanaman/m²) dan pada percobaan kedua, W2P1 (17 698 tanaman/ha atau 1.7 tanaman/m²), W2P2 (3 246 tanaman/ha atau 0.32 tanaman/m²) serta W2P3 (1 314 tanaman/ha atau 0.13 tanaman/m²). Pada percobaan pertama dan kedua, masing-masing biji dan bibit ditanam 18 April dan 12 Mei 2007 serta dipanen 22 dan 20 Oktober 2007.

Efisiensi Penggunaan Radiasi

Efisiensi penggunaan radiasi (ϵ) diperoleh berdasarkan metode akumulasi biomassa (g MJ⁻¹; Monteith, 1977) yang merupakan nisbah antara akumulasi bahan kering di atas tanah (AGB) (W , g m⁻²) dan intersepsi radiasi (Q_{int} , MJ m⁻²) dari proporsi radiasi yang ditransmisikan ke permukaan tanah (I_t) dengan radiasi di atas kanopi (I_0).

$$\epsilon = W/Q_{\text{int}} \quad \text{dan} \quad Q_{\text{int}} = 1 - (I_t/I_0)Q_s \quad (1)$$

Q_s : radiasi surya di stasiun klimatologi (MJ m⁻² hari⁻¹). Biomassa tanaman diukur bersamaan dengan radiasi yang diintersepsinya (Tollenaar & Bruulsema, 1988; Tollenaar & Aguilera, 1992; Muchow & Sinclair, 1994; Lindquist *et al.* 2005).

Pemodelan Tanaman Jarak

Struktur model terdiri dari empat sub-model yang disusun untuk kondisi iklim di Indonesia. Sub-model tersebut adalah (1) perkembangan, (2) pertumbuhan, (3) neraca air, dan (4) nitrogen. Model dengan resolusi harian memerlukan masukan cuaca harian curah hujan, radiasi surya, suhu, kelembapan, dan kecepatan angin. Inisialisasi model adalah kadar air tanah, sifat fisik tanah dan parameter tanaman.

Sub-model perkembangan mensimulasi perkembangan sejak semai sampai masak fisiologis. Jarak Pagar adalah tanaman hari netral (ICRAF, 2003) sehingga laju perkembangan dan kejadian fenologinya didekati dengan *degree-day* yang menggunakan data suhu harian dan waktu (Baskerville

& Emin, 1969). Kejadian fenologi diberi skala 0 – 1 dan dihitung mulai semai sampai masak fisiologis.

Fase perkembangan (s) masing-masing kejadian fenologi dihitung sebagai berikut (Handoko, 1994):

Periode Perhitungan Fase Perkembangan (s)

$$\text{Semai (S) – Tanam (T) : } s = 0.25 (\bar{T} - To_1)/TU_1, \quad \bar{T} > To_1 \quad (2.1)$$

$$\text{T - Kuncup Bunga (KB) : } s = 0.25 + 0.25 (\bar{T} - To_2)/TU_2 \quad \bar{T} > To_2 \quad (2.2)$$

$$\text{KB – Bunga Mekar (BM) : } s = 0.50 + 0.25 (\bar{T} - To_3)/TU_3 \quad \bar{T} > To_3 \quad (2.3)$$

$$\text{BM – Masak Fisiologis (MF) : } s = 0.75 + 0.25 (\bar{T} - To_4)/TU_4 \quad \bar{T} > To_4 \quad (2.4)$$

1, 2, 3 dan 4 menyatakan periode antara kejadian fenologi, \bar{T} : suhu udara rata-rata, To : suhu dasar Jarak Pagar, dan TU: *thermal unit (degree-day)* ($d^{\circ}C$).

Submodel pertumbuhan mensimulasi aliran biomassa aktual hasil fotosintesis ke organ tanaman daun, batang, akar dan biji serta kehilangannya berupa respirasi, dan perkembangan luas daun untuk menduga ILD. Produksi biomassa potensial, B_b ($kg \ ha^{-1}d^{-1}$) merupakan hasil kali RUE dengan intersepsi radiasi (Q_{int}). ε , ($kg \ MJ^{-1}$) menurut Monteith (1977) dan Hukum Beer untuk menghitung intersepsi radiasi sbb:

$$B_b = \varepsilon(1 - e^{-kILD})Q_s \quad \text{dan} \quad \varepsilon = W/Q_{int} \quad (3)$$

$$Q_{int} = (1 - \tau)Q_s \quad \text{dan} \quad \tau = e^{-kILD} \quad (4)$$

τ : proporsi radiasi surya yang ditransmisikan tajuk tanaman, k : koefisien pepadaman dan ILD: indeks luas daun. Produksi biomassa potensial tersebut menganggap air bukan faktor pembatas. Produksi biomassa aktual (B_a , $kg \ ha^{-1}d^{-1}$) mempertimbangkan ketersediaan air (f_w), dari nisbah antara transpirasi aktual (T_a) dan maksimum (T_m):

$$f_w = T_a/T_m \quad \text{dan} \quad B_a = f_w \bullet B_b \quad (5)$$

Biomassa aktual dibagi antara daun, batang, akar dan akan berkurang melalui respirasi pertumbuhan (R_g , $kg \ ha^{-1}d^{-1}$) dan pemeliharaan (R_m , $kg \ ha^{-1}d^{-1}$) yang dihitung berdasarkan suhu udara dan massa masing-masing organ (McCree, 1970). Penambahan biomassa organ x (dW_x , $kg \ ha^{-1}d^{-1}$) diperoleh dari selisih antara alokasi bahan kering ke organ tanaman dan respirasi sbb.

$$dW_x = \eta_x B_a - R_g - R_m = \eta_x(1 - k_g)B_a - k_m W_x Q_{10} \quad (6)$$

$$Q_{10} = 2^{(T-20)/10}$$

η_x : adalah proporsi biomassa yang dialokasikan ke organ x (daun=L, batang=S, akar=R dan biji=G), k_m dan k_g : koefisien respirasi pemeliharaan dan pertumbuhan serta W_x : organ x (kg ha^{-1}). Alokasi η_x berdasarkan fungsi dari fase perkembangan tanaman(s):

$$\eta_S = 0,225 + 0,49s, \eta_L = 1,0682 - 0,21s, \eta_R = 1 - \eta_S - \eta_L, \eta_G = 0 \quad s \leq 0.75 \quad (7.1)$$

$$\eta_L = 0, \eta_R = 0, \eta_G = 1 \quad s > 0.75 \quad (7.2)$$

Dalam model, ILD menentukan jumlah radiasi dan curah hujan yang diintersepsi tanaman serta transpirasi dan perubahan ILD ($dILD$) dihitung dari s_A luas daun spesifik (ha kg^{-1}), dW_L perubahan massa daun ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

$$dILD = s_A \cdot dW_L \quad (8)$$

Submodel neraca air mensimulasi komponen neraca air kadar air tanah (KAT), transpirasi, evaporasi, intersepsi tajuk dan perkolasi. Asumsi model tidak terjadi limpasan permukaan.

Jumlah air yang diintersepsi tajuk tanaman (I_c) tergantung oleh curah hujan (P) dan ILD (Zinke, 1967). Infiltrasi (I_s) didapat dari selisih P dan I_c :

$$I_c = \min(ILD, P), \quad \text{untuk } 0 < ILD \leq 3$$

$$I_c = \min(1.27, P), \quad \text{untuk } ILD > 3 \quad (9)$$

$$I_s = P - I_c \quad (10)$$

Perkolasi dari tiap lapisan tanah $m\{P_c(m)\}$ terjadi apabila KAT melebihi kapasitas lapang $\{\theta_{fc}(m)\}$ yang dihitung dengan metode jungkitan, yaitu:

$$P_c(m) = |\theta(m) - \theta_{fc}(m)|, \quad \theta(m) > \theta_{fc}(m) \text{ dan } P_c(m) = 0, \theta(m) \leq \theta_{fc}(m) \quad (11)$$

Evapotranspirasi potensial (ETp) menurut Penman (1948) merupakan evapotranspirasi maksimum (ETm). Evaporasi maksimum (Em) sebanding dengan transmisi energi radiasi surya melalui tajuk tanaman dihitung menurut Hukum Beer.

$$ETm = ETp = \left\{ \Delta Q_n + \gamma \int (u)(e_s - e_a) \right\} / \{ \lambda(\Delta + \gamma) \} \quad (12)$$

$$Em = ETm \left(e^{-kILD} \right)$$

$$Tm = \left(1 - e^{-kILD} \right) ETm \quad (13)$$

Δ adalah landaian kurva antara tekanan uap air jenuh dan suhu udara (PaK^{-1}), Q_n : radiasi neto (Wm^{-2}), γ : tetapan psikrometer, $f(u)$: fungsi aerodinamik ($\text{MJ m}^{-2}\text{Pa}^{-1}$), $(e_s - e_a)$: defisit tekanan uap air (Pa) dan λ : panas spesifik penguapan (2.454 MJ kg^{-1}).

Evaporasi tanah aktual (Ea) dihitung dengan metode Ritchie (1972) yang terdiri dari dua tingkat evaporasi. Ea adalah fungsi waktu pada tahap-2 (t_2) dan Em :

$$\text{Tahap 1: } \quad Ea = Em \quad \quad \quad \Sigma Em < U \quad \quad \quad (14)$$

$$\text{Tahap 2: } \quad Ea = \alpha t_2^{0.5} - \alpha(t_2 - 1)^{0.5} \quad \quad \quad \Sigma Em \geq U \quad \quad \quad (15)$$

t_2 adalah jumlah hari setelah terjadinya evaporasi tahap-2.

Transpirasi aktual (Ta) adalah fungsi Tm dan KAT pada lapisan tanah (m). Akar mengambil air dari lapisan teratas kemudian lapisan berikutnya apabila $Ta < Tm$, sampai $Ta = Tm$ dengan laju penyerapan air sebesar $Tr(m)$ (mm) (Handoko, 1994):

$$f_w(m) = \left\{ \theta(m) - \theta_{wp}(m) \right\} / \left\{ 0.4 \left[\theta_{fc}(m) - \theta_{wp}(m) \right] \right\}, \quad \theta_{fc}(m) \geq \theta(m) > \theta_{wp}(m) \quad (15.1)$$

$$f_w(m) = 1, \quad \quad \quad \text{untuk } \theta(m) > \theta_{fc}(m)$$

$$f_w(m) = 0, \quad \quad \quad \text{untuk } \theta(m) < \theta_{wp}(m) \quad \quad \quad (15.2)$$

$$Tr(m) = f_w(m) Tm, \quad \quad \quad \text{untuk } Ta < Tm \text{ dan}$$

$$Tr(m) = 0, \quad \quad \quad \text{untuk } Ta \geq Tm \quad \quad \quad (16)$$

$f_w(m)$ adalah fungsi kadar air tanah (KAT) pada lapisan tanah m , θ : KAT, θ_{fw} : KAT pada kapasitas lapang (KL) dan θ_{wp} : KAT pada titik layu permanen (TLP).

Perhitungan neraca air pada hari t dilakukan pada tiap lapisan tanah. Karena evaporasi terjadi pada lapisan permukaan ($m=1$) maka dibagi menjadi 2 lapisan:

$$\text{Lapisan atas} \quad \quad \quad : \theta_t(1) = \theta_{t-1}(1) - Pc_t(1) + Is_t - Ea_t \quad \quad \quad (17.1)$$

$$\text{Lapisan bawah } (m > 1): \theta_t(m) = \theta_{t-1}(m) - Pc_t(m-1) - Pc_t(m) - Tr_t(m) \quad \quad \quad (17.2)$$

Submodel neraca nitrogen mengadopsi model nitrogen tanaman gandum (Handoko, 1992). Selama pertumbuhan, sumber utama nitrogen dari lapisan-lapisan tanah dan dibagi ke organ tanaman. Sumber kedua dari mobilisasi selama pelayuan.

Kebutuhan nitrogen dari organ x ($Ndem_x$) selama S sampai BM tergantung pada laju pertumbuhan (dW_x), konsentrasi nitrogen [$Nact_x$] dan maksimum [$Nmax_x$]:

$$Ndem_x = 0.01dW_x [Nmax_x], \quad [Nact_x] < [Nmax_x]$$

$$Ndem_g = 0 \text{ untuk lainnya} \quad (18.1)$$

Kebutuhan nitrogen tanaman ($Ndem_T$) merupakan jumlah kebutuhan individual organ:

$$Ndem_T = \sum Ndem_x \quad (18.2)$$

Sesudah anthesis, kebutuhan nitrogen organ vegetatif menjadi nol, dengan demikian kebutuhan tanaman dicurahkan menjadi kebutuhan biji ($Ndem_g$) sbb:

$$Ndem_T = Ndem_g = Wg \left\{ [Nmax_g] - [Nact_g] \right\} 10^{-1} \quad (19)$$

Akar menyerap nitrogen dari lapisan permukaan dan ke bawahnya sampai $Ndem_T$ terpenuhi dan setiap lapisan (1) dari aliran massa dan serapan aktif. Aliran massa adalah aliran air ke akar $\{T_r(1)\}$ dan konsentrasi nitrat dalam tanah $\{NO_{3c}(1)\}$:

$$Nup_{mf}(1) = T_r(1)NO_{3c}(1) \quad (20.1)$$

Pada lapisan 1, $NO_{3c}(1)$ dihitung dari nisbah ketersediaan nitrogen $\{NO_3(1)\}$ dan kandungan air $\theta(1)$, sedangkan serapan aktif dihitung menurut Michaelis-Menten:

$$NO_{3c}(1) = NO_3(1)/\theta(1)$$

$$Nup_{at}(1) = W_r \sigma_n NO_3(1) / [K_m + NO_3(1)] \quad (20.2)$$

$W_r(1)$ adalah berat akar di lapisan 1 ($kg\ ha^{-1}$), σ_n : serapan nitrogen per satuan berat akar ($kg\ N\ kg^{-1}\ d^{-1}$) dan K_m : konsentrasi setengah jenuh ($1\ kg\ N\ ha^{-1}\ mm^{-1}$). Nilai K_m diturunkan dari percobaan lapangan Prince dan Burton (1956) dan σ_n : $0.01\ kg\ N\ kg^{-1}\ d^{-1}$ dari percobaan larutan nitrogen (Woodend *et al.* 1986) oleh Handoko (1992). Total nitrogen yang diserap diseluruh profil (Nup_T) adalah:

$$Nup_T = \sum Nup(1) \quad (21.1)$$

$$Nup(1) = Nup_{mf}(1) + Nup_{at}(1), \quad Ndem_T > 0, \quad \text{dan}$$

$$Nup(1) = 0, \text{ untuk lainnya} \quad (21.2)$$

Selama pelayuan, nitrogen labil dimobilisasi diantara organ dan nitrogen struktural dari jaringan mati. Pelayuan daun dan batang memobilisasi nitrogen (dN_{moby}) sebagai hasil laju pelayuan (D_y) dan konsentrasi nitrogen [$Nact_y$] di atas suatu konsentrasi minimum [N_{min}]:

$$dN_{moby} = D_y \{ [Nact_y] - [N_{min}] \} 10^{-2} \quad (22)$$

Jumlah (Nup_T) dan ($\sum dN_{moby}$) disekat pada masing-masing organ menurut kebutuhan relatifnya ($Ndem_x/Ndem_T$). Selama pengisian biji, nitrogen dimobilisasi dari daun dan batang. Kebutuhan nitrogen ditentukan oleh berat biji (Wg), konsentrasi nitrogen aktual [$Nact_g$] dan maksimum, [$Nmax_g$]= 3%. Kemudian, tanaman menyerap nitrogen dari tanah jika kebutuhan tidak terpenuhi oleh mobilisasi berupa peningkatan nitrogen biji dN_g . Jika pemberian nitrogen ($\sum dN_{moby} + Nup$) melebihi kebutuhan biji ($Ndem_g$), maka kelebihanannya hilang ke biji dan sisanya dalam jaringan mati.

$$Ndem_g = Wg \{ 3 - [Nact_g] \} 10^{-2} \quad (23.1)$$

$$\begin{aligned} dN_g &= \sum dN_{moby} + Nup, & \text{untuk } Ndem_g > 0, \\ dN_g &= 0 & \text{untuk } Ndem_g = 0 \\ &= Ndem_g & \left(\sum dN_{moby} + Nup \right) > Ndem_g \end{aligned} \quad (23.2)$$

Nitrogen tanah dipengaruhi oleh amonifikasi, nitrifikasi dan pencucian. Laju amonifikasi harian dalam masing-masing lapisan $\{dNH_4(1)\}$ dihitung sebagai fungsi nitrogen organik $\{O_n(1)\}$ ($kg \ ha^{-1}$), kelembapan tanah dan temperatur udara (Q_{10}) sbb:

$$\begin{aligned} dH4(1) &= Q_{10} k_{am} O_n(1), & \theta(1) &\geq \theta_{wp}(1) \\ dH4(1) &= 0, & \theta(1) &< \theta_{wp}(1) \end{aligned} \quad (24)$$

Dalam banyak lapisan, laju nitrifikasi ($dNO_{3p}(1)$) tergantung pada NH_4^+ $\{NH_4(1)\}$. k_{nit} adalah konstanta laju nitrifikasi.

$$dNO_{3p}(1) = k_{nit} NH_4(1) \quad (25.1)$$

Laju nitrifikasi aktual $\{dNO_{3p}(1)\}$ dihitung dari nilai potensial $\{dNO_{3p}(1)\}$ diterapkan untuk pengaruh kelembapan tanah $\{f_\theta(1)\}$, temperatur (Q_{10}) dan pH $\{f_pH(1)\}$ yang merupakan laju relatif nitrifikasi (jarak 0 - 1) antara pH 5 sampai 8.

$$dNO_{3a}(1) = q \, dNO(1) \max \{f_{\theta}(1), f_{pH}(1)\} \quad (25.2)$$

$$f_{\theta}(1) = \{-0.038 + 1.02\theta(1)\} / \theta_{fc}(1) \quad (\text{Stanford dan Epstein, 1974}) \quad (25.3)$$

Nitrogen tercuci dari masing-masing lapisan ($L_{NO_3}(1)$) dengan perkolasi air ($P_c(1)$) menggunakan pendekatan Burn (1980) seperti berikut:

$$L_{NO_3}(1) = P_c(1) NO_3(1) / \{\theta_{fc}(1) + P_c(1)\} \quad (26)$$

Parameterisasi dan Kalibrasi

Parameter adalah karakteristik dari model yang bersifat konstan selama masa simulasi. Nilai parameter diperoleh dengan garis regresi dan persamaan lainnya Parameter cuaca ditetapkan dari referensi. Parameter RUE (ϵ , gMJ^{-1}) menurut Monteith (1977). Suhu dasar (T_0) sebesar $10^\circ C$. Satuan panas (TU, $^\circ C$ hari) dari percobaan ke-satu yaitu S-E (190), E-KB (1 202), KB-BM (460), dan BM-MF (1 364) melalui hubungan suhu udara rata-rata (\bar{T}) dengan suhu dasar (T_0).

Luas daun spesifik (s_A , $ha \, kg^{-1}$) didapat dari nisbah antara luas daun (LA) dengan berat daun (LW). Koefisien pepadakan (k) menurut Monsi-Saeki (1953):

$$s_A = LA/LW \quad \text{dan} \quad I = I_0 - e^{-kL} \quad (27)$$

I dan I_0 adalah radiasi yang jatuh pada lapisan daun dalam tajuk dan lapisan daun teratas, L : luas daun atau ILD. Koefisien respirasi pertumbuhan (k_g) dan pemeliharaan (k_m) ditetapkan sebesar 0.14 dan 0.015 (McCree, 1974).

Parameter tanah KL, $\psi = -30$ kpa dan TLP, $\psi = -1,5$ MPa. Parameter penguapan, yaitu $U = 12$ dan $\alpha = 0.05$ (Handoko, 1994). Konstanta laju amonifikasi (k_{am}) dengan nilai $96 \cdot 10^{-6} \, \text{hari}^{-1}$ dan laju nitrifikasi (k_{nit}) = $0.05 \, \text{hari}^{-1}$ diturunkan oleh Handoko (1992) dari penelitian Burns (1980) dan (Kumar *et al.* 1989). Konsentrasi nitrogen maksimum akar ($N_{dem_r} = 0.75$), batang ($N_{dem_s} = 0.60$), daun ($N_{dem_l} = 2.53$), dan biji ($N_{dem_g} = 2.41$) diturunkan dari data percobaan pertama.

Kalibrasi adalah mengubah beberapa atau banyak parameter sampai antara nilai sebenarnya dengan model tidak nyata perbedaannya.

Validasi dan Tampilan Model

Validasi dilakukan secara grafis dan uji berpasangan. Pengujian grafis menurut *trend* waktu dan garis 1:1 (Jones & Kiniry, 1986; Carberry & Muchow 1992). Uji berpasangan menurut Steel & Torrie, (1991):

$$D_i = p_i - m_i; D = \sum D_i / n; SE = \sqrt{(\sum D_i^2 - (\sum D_i)^2 / n) / n(n-1)}; t = D / SE \quad (28)$$

D_i dan D adalah rata-rata antara perediksi (p) dan pengukuran (m), SE : galat baku dari perbedaan dan t -student. Perbedaan antara model dengan pengukuran nyata apabila ($P < 0.05$) dan tidak nyata apabila ($P > 0.05$). Tampilan model ditulis dengan menggunakan software Microsof® Visual BASIC™ versi 6.0.

Pengamatan

Pertumbuhan yang diamati adalah biomassa, ILD dan biji. Contoh destruktif diambil pada fase E, KB, BM, MF dan ditimbang kering oven 60°C selama 48 jam. Nitrogen total akar, batang, daun dan biji dianalisis dengan metode Kjeldhal.

Nilai pF 2.54 = 36.28% dan pF 4.2 = 27.48% (% volume) dengan bobot isi 1.42 g cm⁻³, laju permeabilitas 2.13 cm jam⁻¹ (lambat), N total 0.18% (rendah), pH 5.6 (agak masam), nisbah C/N sebesar 9.3, dan bahan organik sebesar 2.92%.

Unsur iklim selain curah hujan (mm hari⁻¹) diambil dari stasiun Branang-Siang sekitar 1 km dari lokasi percobaan, yaitu radiasi surya (MJ m⁻² hari⁻¹), suhu udara (°C), kelembapan nisbi (%), dan kecepatan angin (m s⁻¹). Proporsi intersepsi radiasi diukur pada ketinggian 5 cm di atas tanah dan tempat terbuka.

Kandungan air tanah diukur selang 7 hari pada kedalaman 20 cm dan 40 cm. Evapotranspirasi tanaman termasuk evaporasi tanah serta intersepsi kanopi tanaman, diukur berdasarkan KAT pada saat $t-1$ dan t serta curah hujan (Angus & van Herwaarden, 2001; Chen *et al.* 2003):

$$ETa_t = SWC_t - SWC_{t-1} + R_t - D_t \quad (29)$$

ETa_t : evapotranspirasi tanaman (mm) pada saat t ; SWC : KAT rata-rata seluruh profil (mm); R : curah hujan (mm); D : drainase (mm), yang pada percobaan ini tidak diukur dan diabaikan berdasarkan Payne *et al.* (2001), demikian pula dengan limpasan permukaan karena lahan percobaan relatif datar.

Kandungan amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-) dianalisis dengan metode Kjeldhal pada saat fase E, KB, BM dan MF. Contoh tanah diambil pada kedalaman 0-20 dan 20-40 cm seberat 30 g diekstrak dengan 80 ml 2.5 N KCl.

HASIL DAN PEMBAHASAN

RUE ditentukan oleh nitrogen tanaman dan kerapatan populasi. RUE gandum meningkat sebesar 10% dengan pemupukan N dibandingkan tanpa pemupukan (Gallagher & Biscoe, 1978). RUE lebih tinggi pada populasi padat (W1P1) seperti yang didapat oleh Kemanian *et al.* (2004) pada tanaman Barley walaupun tidak berbeda nyata dengan kisaran 1.23 – 1.13 g MJ^{-1} . Kumar *et al.* (1996) memperoleh RUE Jarak kepyar (*Ricinus communis* L.) bervariasi antara 0.79 – 1.19 g MJ^{-1} karena pengaruh indeks kekeringan.

Tabel 1. Estimasi parameter RUE, N tanaman, KAT rata-rata percobaan I dan II

Perlakuan	R U E			Fraksi Q_{int}	N tanaman, MF (kg ha ⁻¹)	KAT I (mm)	KAT II (mm)
	Estimasi	Galat baku	r				
W1N0	0.58	0.26	0.85	0.41	139.23	272.4	349.7
W1N1	0.66	0.39	0.76	0.44	220.74	260.0	350.7
W1N2	0.94	0.45	0.83	0.45	226.25	272.5	341.7
W1N3	0.90	0.53	0.77	0.43	239.73	258.6	349.8
W1P1	1.30	0.78	0.75	0.43	349.48	264.3	350.5
W1P2	0.24	0.14	0.76	0.44	59.81	275.2	355.3

Validasi Pemodelan Pertumbuhan dan Perkembangan Tanaman Jarak Pagar

Data percobaan lapang W1N0–W1N2 untuk parameterisasi dan kalibrasi model. Data percobaan W1N3 digunakan untuk validasi model. Kemudian, data percobaan ke-dua digunakan sebagai validasi model selanjutnya.

Validasi model Jarak Pagar dengan percobaan pertama dan kedua

Prediksi model dibandingkan dengan perlakuan W1N3, yaitu: Fase perkembangan tanaman (Gambar 1), AGB dan biji (Gambar 2), Indeks luas daun (ILD) (Gambar 3), Kandungan air tanah (Gambar 4), evapotranspirasi (Gambar 5), nitrogen tanah dan tanaman (Gambar 6 dan 7).

Tampilan tersebut memperlihatkan model tanaman jarak tanggap terhadap lingkungan yang bervariasi sebagaimana yang ditunjukkan oleh data percobaan pertama. Validasi model selanjutnya

dilakukan secara grafis dan uji berpasangan antara data percobaan ke-dua dengan model. Uji berpasangan disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Uji berpasangan dengan t-student

	Peubah	Satuan	t	$t_{0.05}$	Perbedaan
I.	Submodel Perkembangan				
	Fase perkembangan	hari	1.04	2.13	tn
II.	Submodel Pertumbuhan				
	AGB	t ha ⁻¹	2.13	2.35	tn
	ILD	unitless	-0.29	1.86	tn
III.	Submodel Neraca Air				
	Kadar air tanah (0-100cm)	mm	-0.35	1.73	tn
	ETa	mm	-1.51	1.73	tn
IV	Submodel Nitrogen				
	N- tanaman, AGN	t ha ⁻¹	0.92	2.35	tn
	N- tanah	t ha ⁻¹	1.59	2.35	tn

Perkembangan tanaman

Pengujian grafis fase perkembangan disajikan pada Gambar 1 dan menunjukkan model mampu memprediksi periode fase perkembangan tanaman baik pada percobaan pertama maupun percobaan kedua. Penelitian yang dilakukan di Indonesia pada tanaman gandum dan sawit dengan perlakuan nitrogen dan air juga menunjukkan hasil yang sama (Handoko, 2007; Djufri *et al.* 2000).

Pertumbuhan tanaman

Pengujian grafis AGB dan ILD disajikan dalam Gambar 2 dan 3. ILD percobaan kedua terlihat lebih besar dari percobaan pertama yang diduga disebabkan oleh KAT yang lebih besar pada percobaan kedua (Tabel 1).

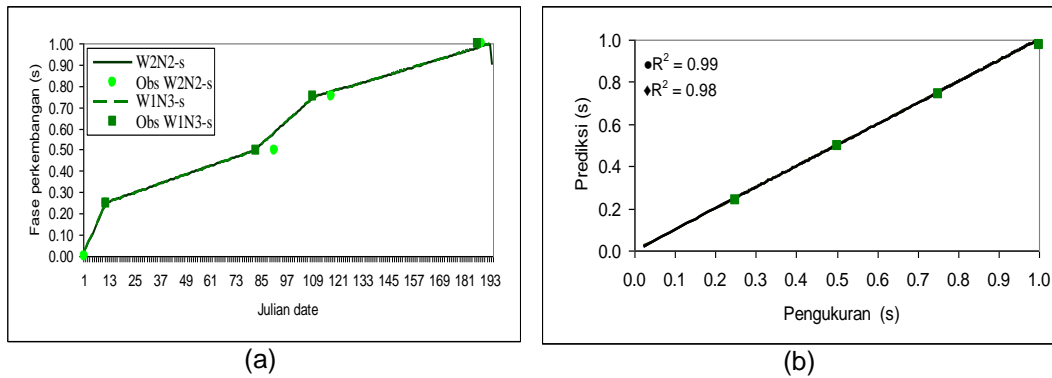
Neraca air

Pengujian grafis KAT disajikan pada Gambar 4. Model mampu mensimulasi perubahan kadar air tanah dengan kandungan air tanah yang berbeda pada W1N3 dan W2N2. Pengurangan KAT setelah bunga mekar (BM) akan diikuti oleh peningkatan evapotranspirasi. Pengujian grafis evapotranspirasi aktual (ETa) model neraca air disajikan dalam Gambar 5.

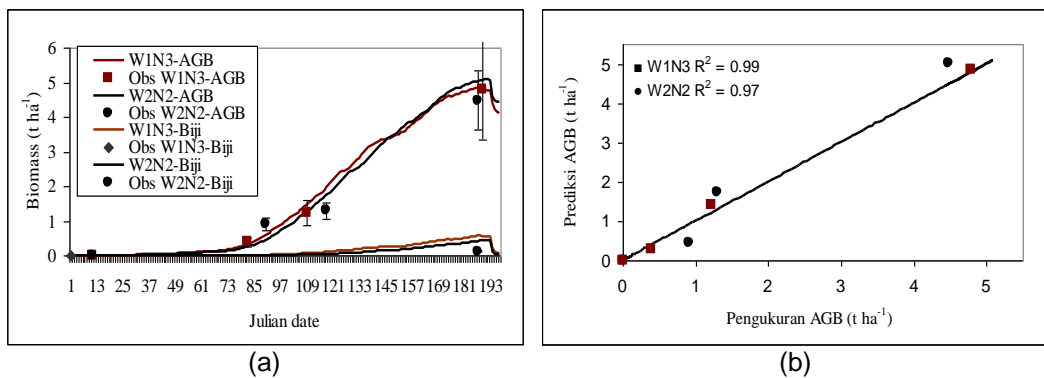
Nitrogen tanah dan tanaman

Pengujian grafis nitrogen tanah dan nitrogen tanaman (AGN) disajikan dalam Gambar 6 dan 7. Model nitrogen tanggap terhadap pemberian nitrogen, yaitu perlakuan W1N3 dan W2N2. Kandungan nitrogen W1N3 pada akhir pertumbuhan lebih rendah dibandingkan W2N2, yang diduga kandungan air tanah W1N3 lebih rendah dibandingkan W2N2 (Tabel 1). Kepekaan model terhadap

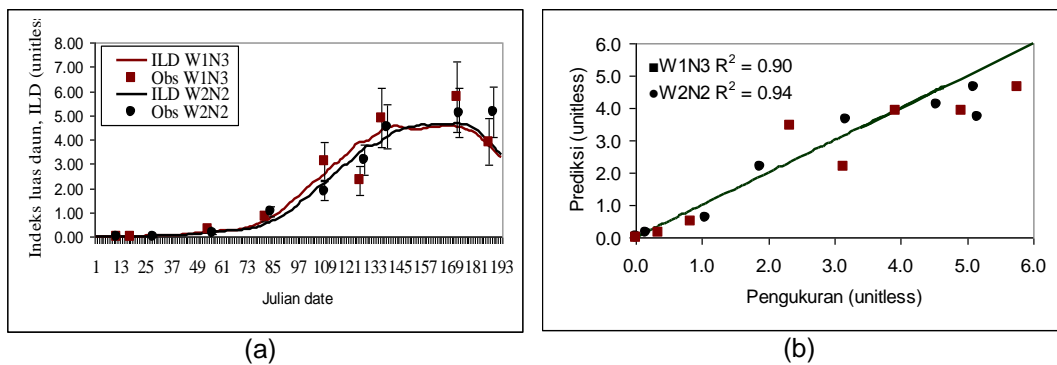
nitrogen penting karena nitrogen dapat mempengaruhi ILD dan RUE yang berperan dalam fotosintesis (Arkebauer *et al.* 1994).



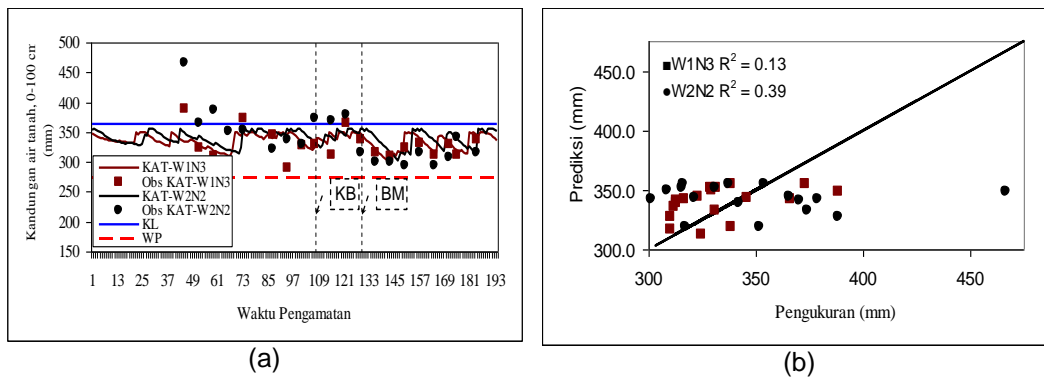
Gambar 1. Hasil prediksi dan pengukuran fase perkembangan tanaman selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



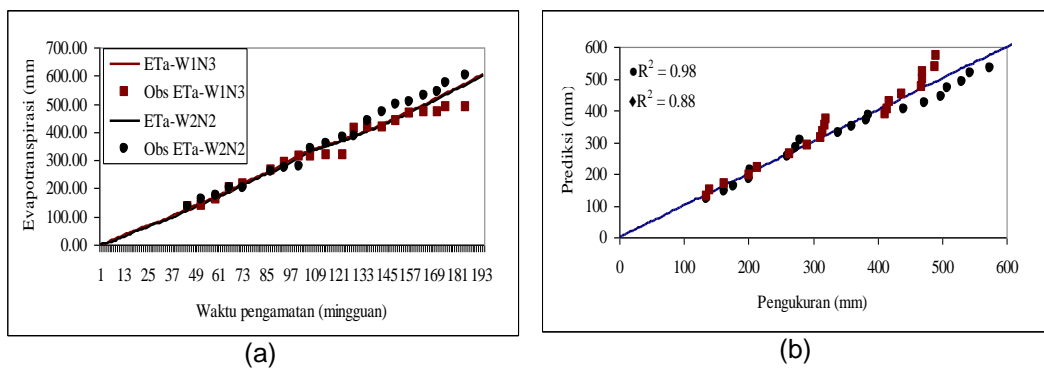
Gambar 2. Hasil prediksi dan pengukuran AGB dan biji selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



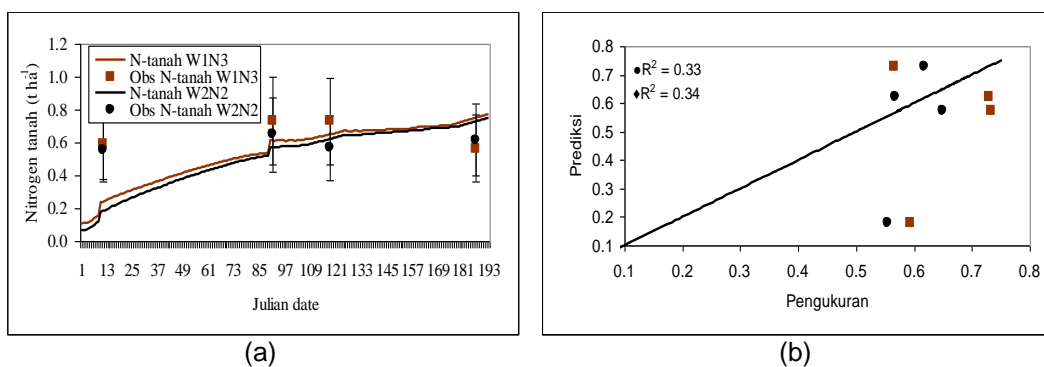
Gambar 3. Hasil prediksi dan pengukuran ILD selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



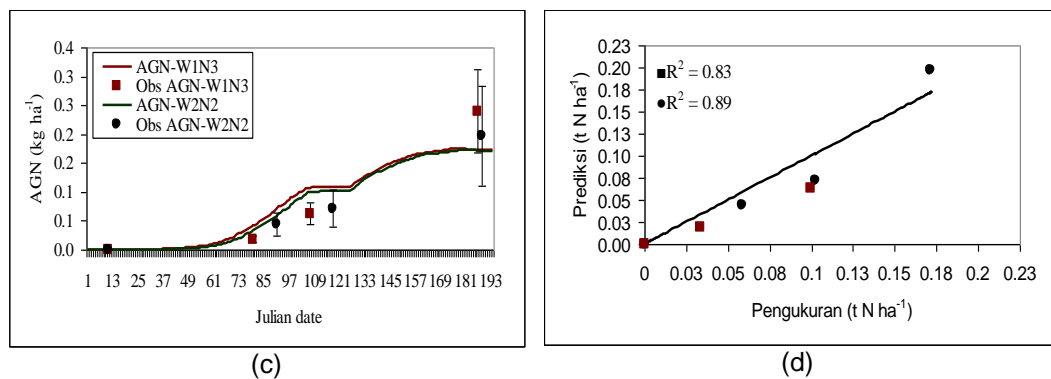
Gambar 4. Hasil prediksi dan pengukuran kadar air tanah selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



Gambar 5. Hasil prediksi dan pengukuran evapotranspirasi kumulatif selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



Gambar 6. Hasil prediksi dan pengukuran N tanah selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).



Gambar 7. Hasil prediksi dan pengukuran AGN selama periode pertumbuhan (a) dan perbandingan dengan garis 1:1 (b).

Validasi model telah dilakukan dengan menggunakan data percobaan pertama yang tidak digunakan dalam membangun model dan juga data percobaan kedua. Model yang disusun terdiri dari 4 submodel yaitu submodel perkembangan, pertumbuhan, neraca air dan neraca nitrogen ternyata dapat mensimulasi perkembangan tanaman, biomassa dan ILD, kandungan air tanah dan evapotranspirasi, dan nitrogen tanah dan tanaman. Walaupun demikian, pada model neraca air dengan peubah kadar air tanah dan neraca nitrogen dengan peubah nitrogen tanah perlu ditelaah lebih jauh, karena plot 1:1 antara hasil simulasi dan pengukuran masih belum sangat baik.

Hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Model neraca air mensimulasi kandungan air tanah dengan asumsi lahan datar sehingga tidak terjadi limpasan permukaan. Model mensimulasi kandungan air tanah berdasarkan kandungan air tanah, perkolasi, infiltrasi permukaan, evaporasi aktual dan laju penyerapan air oleh akar. Model tidak memperhitungkan sifat fisik tanah lainnya seperti porositas tanah yang memperhitungkan tingkat kejenuhan air tanah.

Selain itu, model neraca nitrogen mensimulasi nitrogen tanah dengan asumsi juga tidak terjadi limpasan permukaan. Model mensimulasi nitrogen tanah berdasarkan amonifikasi, nitrifikasi dan pencucian yang dipengaruhi oleh suhu udara, pH tanah dan kelembapan tanah. Komponen lain yang terlibat dalam penguraian nitrogen tanah tidak diperhitungkan seperti peran mikroba tanah, fiksasi nitrogen dari udara dan tambahan nitrogen dari air hujan.

Secara keseluruhan model terbukti mampu mensimulasi dinamika air, nitrogen dan pergerakannya ke tanaman yang selanjutnya berperan dalam pertumbuhan tanaman, walaupun tidak semua komponen sistem dilibatkan dalam pemodelan. Oleh karena itu, model tanaman Jarak Pagar ini dapat diaplikasikan dalam manajemen tanaman dan pengambilan keputusan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Efisiensi penggunaan radiasi surya sangat dipengaruhi oleh nitrogen tanaman dan kerapatan populasi.

Validasi model yang berbasis efisiensi penggunaan radiasi surya, ketersediaan air dan nitrogen terbukti menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan dengan baik terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, nitrogen tanah dan tanaman.

Saran

Validasi model dengan curah hujan pola Monsoon pada lokasi percobaan telah dilakukan oleh karena itu disarankan pengujian model lebih lanjut pada wilayah dengan pola curah yang berbeda untuk membuktikan bahwa model dapat diterapkan pada kondisi lingkungan yang beragam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh DIPA SEAMEO-BIOTROP tahun 2007. Kami mengucapkan terimakasih kepada SEAMEO-BIOTROP, Laboratorium SEAMEO-BIOTROP, asisten lapangan dan beberapa mahasiswa Departemen Meteorologi FMIPA-IPB atas bantuan teknis dalam pengelolaan tanaman, pengukuran dan pengambilan contoh tanah dan tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Aker CL. 1997. Growth and reproduction of *Jatropha curcas*. Di dalam: G.M. Gübitz, M. Mittelbach & M. Trabi, *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas*. Dbv-Verlag, Graz: 2-18.
- Angus AF & van Herwaarden JF. 2001. Increasing Water Use and Water Use Efficiency in Dryland Wheat. *Agron. J.* 93:290–298.
- Arkebauer TJ, Weiss A, Sinclair TR & Blum A. 1994. In defence of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah *et al.* (1992). *Agric. For. Meteorol.* 68:221-227.
- Brisson N *et al.* 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18:309-332
- Carberry PS, Muchow RC & Mccown RL. 1992. A simulation model of kenaf for assisting fibre industry planning in Northern Australia. IV. Analysis of climatic risks. *Australian Journal of Agricultural Research.* 44:713-730.
- Chen C, William AP, Richard WS & Michael AS. 2003. Yield and Water-Use Efficiency of Eight Wheat Cultivars Planted on Seven Dates in Northeastern Oregon. *Agron. J.* 95:836–843.

- Dalla-Tea F & Jokela EJ. 1991. Needle-fall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *For. Sci.* 37:1298--1313.
- Demetriades-Shah TH, Fuchs M, Kanemasu ET & Flitcroft. 1992. A Note Caution Concerning the Relationship between Cumulated Intercepted Solar Radiation and Crop Growth. *Agric. Forest Meteorol.* 58:193-207.
- Djufry F, Handoko & Koesmaryono Y. 2000. Model fenologi tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* L.). *Jurnal Agromet Indonesia.* 15:33-42.
- Gallagher JN & Biscoe PV. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 91:47-60.
- Hambali E *et al.* 2006. *Jarak Pagar, tanaman penghasil biodiesel.* Jakarta. Penebar Swadaya.
- Handoko I. 1992. Analysis an simulation of water-nitrogen interactions of the wheat crop. Melbourne [disertasi]. The University of Melbourne.
- Handoko. 1994. *Dasar Penyusunan dan Aplikasi Model Simulasi Komputer untuk Pertanian.* Bogor. Geomet FMIPA-IPB.
- Heliyanto B. 2007. Benih Kopong dan Beberapa Kemungkinan Faktor Penyebabnya. *Infotek Jarak Pagar (Jatropha curcas L).* 2(2):5.
- Heller J. 1996. *Physic Nut (Jatropha curcas L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops 1.* Rome. IPGRI.
- ICRAF. 2003. *Jatropha curcas.* Agro-forestry Database.
- Jones CA & Kiniry JR. 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model Of Maize Growth And Development.* Texas A&M University Press, College Station, Texas, USA. 194pp.
- Puslitbangbun. 2008. Respon Jarak Pagar terhadap Pemupukan. *Infotek JP.* 3(5). Bogor: 19.
- Kermanian AR, Stöckle CO & Huggins DR. 2004. Variability of Barley Radiation-Use Efficiency. *Crop Sci.* 44:1662–1672.
- Kiniry JR. 1994. A note caution concerning the paper by Demetriades-Shah *et al.* (1992). (Discussion). *Agric. For. Meteorol.* 68:229-230.
- Kumar V P (1996). Radiation and water use efficiencies of rainfed castor beans (*Ricinus communis* L.) in relation to different weather parameters. *Agric. For. Meteorol.* 81:241-253.
- Lecoeur J & Ney B. 2003. Change with time in potential radiation use efficiency in field pea. *Eur. J. Agron.* 19:91–105.
- Lindquist JL *et al.* 2005. Maize Radiation Use Efficiency under Optimal Growth Conditions. *Agron. J.* 97:72–78.
- Mark WB. 1983. Spacing Trials Using the Nelder Wheel. Presented at the Workshop on Eucalyptus in California, June 14-16, 1983, Sacramento, California; p81-85.
- Matthews R. 2002. Crop Management. *In Crop–Soil Simulation Models.* eds (R. Matthews and W. Stephens) CAB *International.* p 29-53.
- Monteith JL. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B.* 281:277--294.

- Monteith JL. 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass (Discussion). *Agric. and Forest Meteorol.* 68:213-230.
- Muchow RC & Sinclair TR. 1986. Water and nitrogen limitation in soybean grain production. II. Field and model analysis. *Field Crops Res.* 15:143-156.
- Muchow RC & TR Sinclair. 1994. Nitrogen response of leaf photosynthesis and canopy radiation use efficiency in field-grown maize and sorghum. *Crop Sci.* 34:721-727.
- Muchow RC & Davis R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18:17-30.
- Payne WA, Rasmussen PE, Chen C & Ramig RE. 2001. Assessing simple wheat and pea models using data from a long-term tillage experiment. *Agron. J.* 93:250-260.
- Prihandana R dan Hendroko R. 2007. *Energi hijau*. Jakarta. Penebar Swadaya.
- Purlani E. 2007. Fenomena buah jarak pagar berbiji kopong. Infotek Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L). 2(4). Bogor:13.
- Puslitbangbun. 2006. Deskripsi Jarak Pagar Improved Population-1. Infotek Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L). 1(7). Bogor; 26.
- Sinclair TR & Horie T. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29:90-98.
- Sinclair TR. 1991. Canopy carbon assimilation and crop radiation-use efficiency dependence on leaf nitrogen content. In: Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy. Wisconsin: Crop Science Society of America, Special Publication No. 19, 95±107.
- Steel RGD & Torrie JH. 1991. *Prinsip dan Prosedur Statistika: Suatu pendekatan biometrik*. Jakarta. PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Storrier RR. 1962. The availability of water mineral nitrogen in a Wheat soil from southern New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* 2: 185-192.
- Sukarin W, Yamada Y & Sakaguchi S. 1987. Characteristics of physic nut, *Jatropha curcas* L. as a new biomass crop in the Tropics. *Jpn. Agric. Res. Quart.* (Japan) 20(4):302-303.
- Takeda Y. 1982. *Development Study on Jatropha Curcas (Sabu Dum) Oil as a Substitute for Diesel Engine Oil in Thailand*. Interim Report of the Ministry of Agriculture, Thailand.
- Tollenaar M & Aguilera A. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agron. J.* 84:536-541.
- Tollenaar M & Bruulsema TW. 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agron. J.* 80:580-585.