



Analisis Kebutuhan Air Tanaman Tebu Berdasarkan Model Simulasi Tanaman (Studi Kasus: Kabupaten Kediri, Jawa Timur)

Water Demand Analysis of Sugarcane Based on Crop Simulation Model (Case Study: Kediri Regency, East Java)

Astrid Yusara^{*}, Handoko, dan Bregas Budianto

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 February 2019

Received in revised from 2 May 2019

Accepted 14 May 2019

doi: 10.29244/j.agromet.33.1.30-40

Keywords:

Crop modelling

Irrigation

Planting date

Water availability

Water use efficiency

ABSTRACT

Sugarcane productivity is naturally affected by climate variables and limited by the water availability. This study simulated a water balance model to estimate sugarcane water requirement and to estimate the best planting time as well based on its optimum productivity in Kediri Regency. Water requirement was estimated by water loss of evapotranspiration following FAO No. 24, while the productivity was based on mid-maturing sugarcane growth and development. Sugarcane rainfed area in Kediri Regency needs approximately 26-128 mm water per month based on its loss by evapotranspiration. The value varied due to the growth phase. More than 60% water was used in vegetative phase for developing buds and stem elongation of about 3-9 months after planting. The highest sugarcane productivity was obtained in July-September as the best planting time shown by simulation. Moreover, water deficiency during mid-season of sugarcane growth could decrease productivity by a significant amount. The work presented here could be used as a tool to help decision makers for irrigation management and select the best planting date.

PENDAHULUAN

Komoditas gula merupakan salah satu sektor pangan yang penting dan berpengaruh pada kondisi keamanan pangan Indonesia (Vel et al., 2016). Dalam catatan sejarah, Indonesia pernah menjadi salah satu negara eksportir gula terbesar di dunia yaitu pada tahun 1930-an dengan produksi tebu mencapai 3 juta ton, dan ekspor gula sebesar 2.40 juta ton (Kementerian Pertanian, 2017). Akan tetapi, produksi gula mengalami penurunan sangat signifikan pada tahun 1980-an yang menjadikan Indonesia sebagai importir gula hingga saat ini. Pada tahun 2012, rata-rata produksi tebu berkisar 5.90 ton/ha atau sebesar 40% dari produksi tebu 80 tahun yang lalu (Toharisman dan Triantarti, 2014). Rata-rata produksi gula di Indonesia pada tahun 2010-2014 berkisar 2.21-2.59 juta ton/tahun, sedangkan besar konsumsi gula untuk kebutuhan industri dan rumah tangga 5.00-5.70 juta ton/tahun (Toharisman dan Triantarti, 2016). Kondisi defisit komoditas gula diperkirakan akan meningkat hingga

tahun 2021 dengan pertumbuhan volume impor gula sebesar 1.6% (Kementerian Pertanian, 2017).

Dari beberapa faktor yang mempengaruhi produksi gula yang dihasilkan tanaman tebu, kondisi iklim pada lahan pertanaman tebu menjadi faktor kuat yang mempengaruhi produksi gula (Toharisman dan Triantarti, 2016; Zhao dan Li, 2015), termasuk kondisi iklim. Perubahan iklim berpengaruh pada panjang periode kering dan periode basah (Loo et al., 2015), yang berpengaruh pada laju pertumbuhan tanaman tebu (Jaiphong et al., 2016; Khonghintaiong et al., 2018; Liu et al., 2016). Beberapa usaha untuk meningkatkan produksi gula adalah perluasan area tanam tebu (Muhaimin dan Sari, 2017; Sari et al., 2015; Suryani et al., 2018), dan penerapan teknik budidaya tebu yang efektif-efisien meliputi pengaturan irigasi (Olivier dan Singels, 2015), dan waktu tanam yang tepat (Ramos et al., 2016; Sari dan Wegener, 2015). Penentuan jumlah kebutuhan air irigasi dan waktu tanam yang tepat dapat dilakukan dengan analisis

^{*} Corresponding author: astrid_y@apps.ipb.ac.id

neraca air tanaman (Dobor et al., 2016; González Perea et al., 2016; Jayanti et al., 2015).

Analisis variasi kondisi neraca air tanaman terhadap produktivitas tebu dapat dilakukan dengan percobaan langsung. Akan tetapi, untuk memperoleh hasil dari percobaan tersebut membutuhkan waktu yang lama, dan biaya yang besar. Untuk mendapatkan hasil percobaan dalam waktu yang singkat, kita dapat menggunakan model simulasi tanaman (Handoko, 1994). Model simulasi tanaman merupakan model yang mensimulasikan proses pertumbuhan, perkembangan, dan respon tanaman terhadap faktor lingkungan (Craufurd et al., 2013; Rauff dan Bello, 2015). Secara sederhana, proses perkembangan dan pertumbuhan tanaman dimodelkan dengan konsep *heat unit* (Elnesr et al., 2013; Marin et al., 2017; Parthasarathi et al., 2013). Pada proses pertumbuhan tersebut, yang mempengaruhi hasil produksi dari faktor lingkungan adalah ketersediaan air untuk tanaman. Beberapa penelitian telah menerapkan model tersebut untuk mensimulasikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman tebu di beberapa wilayah Indonesia, i.e. Lampung (Pembengo dan Suwanto, 2012), dan Sleman, Jawa Tengah (Jayanti et al., 2015).

Untuk wilayah Jawa Timur, sebagai salah satu sentra produksi tanaman tebu, identifikasi kebutuhan irigasi atau penentuan waktu tanam yang tepat, belum dilakukan. Berdasarkan data BPS (2017), usaha meningkatkan produksi tebu di Kabupaten Kediri, Jawa Timur, telah dilakukan dengan meningkatkan luas area tanam sebesar 1.25% dari tahun 2015 ke 2016, namun produksi tebu mengalami penurunan 0.04%. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba menerapkan model simulasi tanaman tebu untuk: (i) menghitung kebutuhan air tanaman dalam berbagai kondisi cekaman air, dan (2) mengidentifikasi pengaruh cekaman air terhadap produksi gula di Kabupaten Kediri, Jawa Timur.

METODE PENELITIAN

Data Penelitian

Data yang digunakan berupa data sekunder, meliputi: (1) data iklim harian (curah hujan, suhu udara rata-rata, kelembaban relatif, lama penyinaran, dan kecepatan angin) Stasiun Geofisika Karang Kates tahun 2010-2015, (2) data spasial karakteristik tanah (kandungan pasir, liat, dan bahan organik) dari *Soil Grids* (<https://soilgrids.org/>) dengan resolusi grid 250 meter, dan (3) data produksi tebu di Kabupaten Kediri, Jawa Timur tahun 2011-2015 dari BPS (2017). Model simulasi tanaman disusun menggunakan data iklim dan data karakteristik tanah dengan asumsi bahwa stasiun iklim tersebut mampu mewakili kondisi iklim di seluruh lahan tebu Kabupaten Kediri. Sedangkan data produksi

tebu dikonversi menjadi nilai produktivitas gula kemudian digunakan untuk validasi hasil model. Penelitian ini mensimulasikan tanaman tebu tipe masakan tengah (umur panen 10-12 bulan).

Pemodelan Pertumbuhan dan Perkembangan Tanaman Tebu

Berbagai macam model dalam bidang pertanian telah banyak dikembangkan sehingga dapat mempermudah pengambilan keputusan dalam budidaya pertanian. Model pendugaan waktu tanam dapat menggunakan metode aritmatik dengan perhitungan *heat unit/thermal unit* (Elnesr et al., 2013). Fase pertumbuhan suatu tanaman yang dihitung menggunakan konsep akumulasi panas atau *thermal unit* (TU) berasumsi bahwa faktor panjang hari tidak berpengaruh. Perhitungan fase pertumbuhan tanaman dilakukan dengan Persamaan (1).

$$s = \frac{\sum (T_i - T_b)}{TU} \quad (1)$$

dimana s fase perkembangan tanaman, TU satuan panas ($^{\circ}\text{C}$ hari), T_i suhu rata-rata harian hari ke- i ($^{\circ}\text{C}$), T_b suhu dasar tanaman ($^{\circ}\text{C}$). Aliran biomassa dihitung berdasarkan hasil fotosintesis dari radiasi dengan pengaruh indeks luas daun. Produksi biomassa dihitung melalui Persamaan (2-4).

$$Bp = RUE \times (1 - e^{-k \text{LAI}}) \times PAR \quad (2)$$

$$d\text{LAI} = \text{SLA} \times dW_L \quad (3)$$

$$\text{LAI} = \text{LAI}_{i-1} + d\text{LAI} \quad (4)$$

dimana Bp produksi biomassa potensial ($\text{kg ha}^{-1} \text{ hari}^{-1}$), RUE efisiensi penggunaan radiasi (kg MJ^{-1}), k koefisien pemadaman, LAI indeks luas daun (*leaf area index*), PAR (*photosynthetically-active radiation*) radiasi matahari yang digunakan untuk fotosintesis ($\text{MJ}^{-1} \text{m}^{-2} \text{hari}^{-1}$), LAI_{i-1} indeks luas daun pada hari sebelum i , $d\text{LAI}$ perubahan LAI, dW_L perubahan massa organ daun ($\text{kg ha}^{-1} \text{ hari}^{-1}$), SLA (*specific leaf area*) luas daun spesifik. Perubahan biomassa ke masing-masing organ tanaman setiap harinya dipengaruhi oleh faktor defisit air (*water deficit factor*) seperti pada Persamaan (5-7).

$$dW_x = \left(\left(\eta_x (1 - k_g) Bp - (k_m W_x Q_{10}) \right) \right) wdf \quad (5)$$

$$Q_{10} = 2^{\frac{T - 20}{10}} \quad (6)$$

$$wdf = \frac{ET_a}{ET_m} \quad (7)$$

dimana dW_x perubahan massa organ x ($\text{kg ha}^{-1} \text{ hari}^{-1}$), η_x proporsi biomassa yang dialokasikan untuk organ x , k_g koefisien respirasi pertumbuhan (kg kg^{-1}), k_m koefisien respirasi pemeliharaan (kg kg^{-1}), W_x biomassa organ x (kg ha^{-1}), Q_{10} koefisien suhu, wdf faktor defisit air (*water deficit factor*), T suhu udara ($^{\circ}\text{C}$), ET_a evapotranspirasi actual (mm), ET_m evapotranspirasi

maksimum (mm). Nilai partisi biomassa tanaman tebu didapatkan dari data hasil penelitian Pembengo dan Suwanto (2012) yang telah dikalibrasi (Tabel 1).

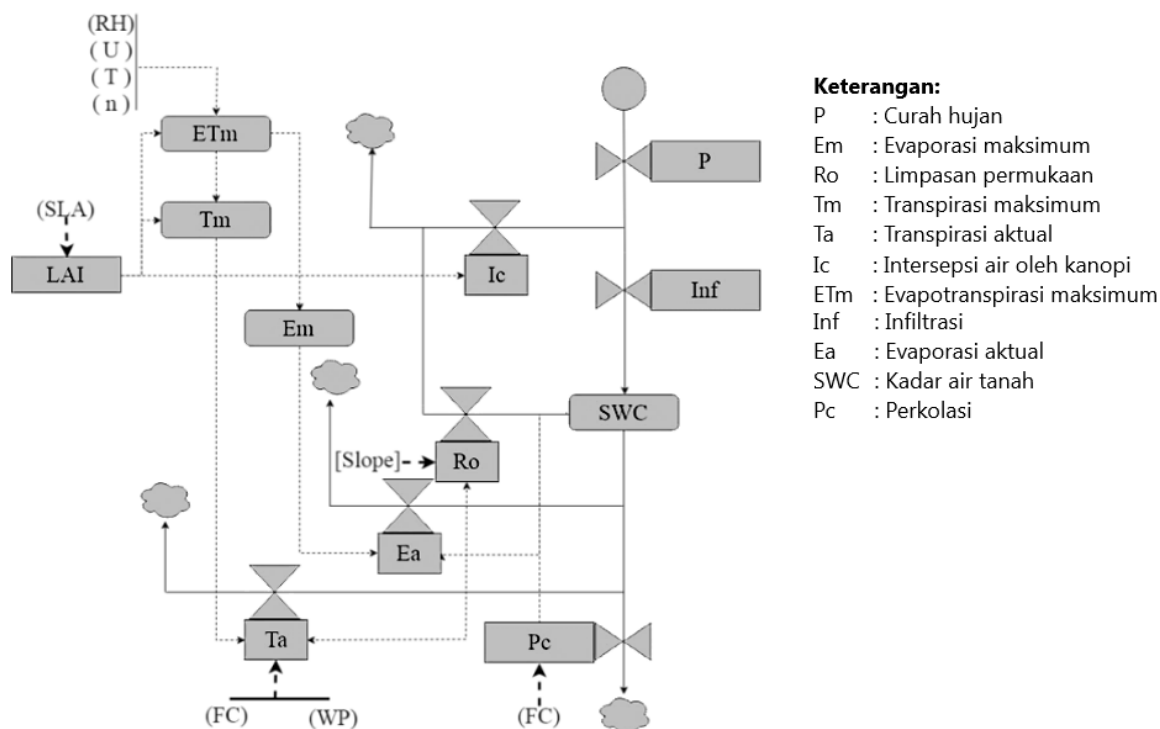
Pemodelan Neraca Air Tanaman

Selain dari kondisi iklim lokal dan jenis tanaman tebu, hasil tebu sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologi lahan pertanaman (Osorio et al., 2014). Ketersediaan air tanaman yang digunakan untuk fase pertumbuhan dan perkembangan tanaman tebu, tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah curah hujan yang

terjadi, tetapi juga kondisi kanopi tanaman dalam kemampuannya untuk menahan air hujan (Fernandes et al., 2017; Silva et al., 2016). Berdasarkan diagram forrester neraca air tanaman (Handoko, 2005) yang disajikan pada Gambar 1, indeks kanopi tanaman (LAI) akan mempengaruhi nilai intersepsi air hujan (Ic), dan transpirasi aktual (Ta). Sedangkan sifat fisik tanah berkaitan dengan lengas tanah atau *soil water content* (SWC) dan perkolasi (Pc). Perhitungan neraca air tanaman tebu pada penelitian ini hanya sebatas pada kedalaman 0-60 cm.

Tabel 1 Parameter tanaman tebu pada setiap fase pertumbuhan hasil kalibrasi. Catatan: *RUE* (*radiation-use efficiency*) efisiensi penggunaan cahaya, *pB* koefisien partisi biomassa batang, dan *pD* koefisien partisi biomassa daun.

Fase Pertumbuhan	RUE (kgMJ ⁻¹)	Koefisien Partisi
F1: Perkecambahan (Tanam-Emergence)	0.0064	$pB = -0.0003 s + 0.5593$ $pD = 0.001 s + 0.2601$
F2: Perbanyak Tunas Emergence-Anakan Maksimum	0.0120	$pB = -0.005 s + 0.5087$ $pD = 0.0051 s + 0.4186$
F3: Pertumbuhan Tunas (Anakan Maksimum-Anakan Tetap)	0.0200	$pB = 0.5 s + 0.68$ $pD = 0.0009 s + 0.28$
F4: Pemanjangan Batang (Anakan Tetap-Batang Maksimum)	0.0180	$pB = 0.12 s + 0.85$ $pD = 0.0039 s + 0.2$
F5: Kemasakan (Batang Maksimum-Panen)	0.0150	$pB = -0.0004 s + 0.8$ $pD = -0.0004 s + 0.18$



Gambar 1 Diagram forrester pada pemodelan neraca air tanaman. Bentuk lingkaran menunjukkan proses mulai, bentuk awan menunjukkan bagian massa air yang hilang (*sink*), garis nyata menunjukkan aliran massa air, garis putus-putus menunjukkan aliran informasi.

Beberapa parameter dalam perhitungan neraca air tanaman tidak didefinisikan secara langsung, namun melalui proses perhitungan. Parameter ET_m diasumsikan sama dengan evapotranspirasi potensial (ET_p). Pendugaan nilai ET_p harian menggunakan metode Penman (1948) yang disajikan pada Persamaan (8).

$$ET_p = \frac{(R_n \Delta) + (\gamma(e_s - e_a)f_1)}{(\Delta + \gamma)\alpha} \quad (8)$$

dimana ET_p evapotranspirasi potensial (mm), R_n radiasi netto (MJ m⁻²), Δ kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu (Pa/°C), γ konstanta psikrometrik (66.1 Pa/°C), e_s tekanan uap air jenuh (Pa), e_a tekanan uap air aktual (Pa), f₁ fungsi dari kecepatan angin horizontal (MJ m⁻² Pa), α kapasitas panas spesifik (2.454 MJ kg⁻¹). Data radiasi matahari diduga dari parameter lama penyinaran matahari menggunakan metode yang dikeluarkan oleh *American Society and Civil Engineers* (Jensen et al., 1990) disajikan pada Persamaan (9).

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N}\right) R_a \quad (9)$$

dimana R_s radiasi matahari (MJ m⁻² hari⁻¹), R_a radiasi ekstraterrestrial (MJ m⁻² hari⁻¹), a dan b konstanta model regresi (0.25, 0.5), n lama penyinaran matahari (jam), N lama penyinaran matahari maksimum (jam). Untuk wilayah Indonesia, lama penyinaran maksimum diasumsikan sebesar 12 jam dalam satu hari.

Karakteristik nilai kadar air tanah dapat diduga berdasarkan tekstur tanah dan kandungan bahan organik (Saxton dan Rawls, 2006), yang disajikan pada Persamaan (10-12).

$$WP = \theta_{1500t} + (0.14 \theta_{1500t} - 0.02) \quad (10)$$

$$FC = \theta_{33t} + (1.283 \theta_{33t}^2 - 0.374 \theta_{33t} - 0.015) \quad (11)$$

$$Sat = \theta_{33} + \theta_{(s-33)} - 0.097 S + 0.043 \quad (12)$$

dimana, θ kadar air tanah (%), WP kondisi titik layu permanen (*permanent wilting point*), kadar air pada tekanan 1500 kPa (%), FC kondisi kapasitas lapang (*field capacity*), kadar air pada tekanan 33 kPa (%), Sat kondisi kadar air jenuh, S kandungan pasir (*sand*) di dalam tanah (%), C kandungan liat (*clay*) dalam tanah (%), OC kandungan bahan organik (*soil organic content*) dalam tanah (%).

Kebutuhan air tanaman dapat dihitung dengan mengganti nilai air yang ter-evapotranspirasi oleh tanaman. Pendekatan umum untuk menduga evapotranspirasi tanaman di antaranya yaitu menggunakan koefisien tanaman dengan Persamaan (13).

$$ET_c = k_c \times ET_p \quad (13)$$

dimana, ET_c evapotranspirasi tanaman (mm/hari), k_c koefisien tanaman. Sedangkan, perhitungan nilai

evapotranspirasi aktual (Martel et al., 2018) disajikan pada Persamaan (14-15).

$$ET_a = K_s \times ET_c \quad (14)$$

$$K_s = \frac{\log(100 \frac{SWC - WP}{FC - WP} + 1)}{\log(101)} \quad (15)$$

dimana, ET_a evapotranspirasi aktual (mm/hari), K_s koefisien *stress*, SWC kadar air tanah aktual pada zona perakaran (mm/hari).

Validasi Model Simulasi Tanaman

Kemampuan model simulasi tanaman untuk menggambarkan hasil produksi dari tanaman dievaluasi dengan dua komponen, yaitu nilai *root mean square error* (RMSE) (Chai dan Draxler, 2014), dan plot grafik 1:1. Evaluasi dilakukan terhadap hasil produktivitas gula yang dihasilkan oleh tanaman tebu dari luasan lahan tertentu di Kabupaten Kediri (Statistik Perkebunan Indonesia oleh Direktorat Jenderal Perkebunan Kementerian Pertanian) dengan produktivitas gula hasil simulasi.

Penilaian Waktu Tanam Terbaik

Simulasi produktivitas tanaman tebu dilakukan pada bulan tanam yang berbeda-beda menggunakan data iklim tahun 2010-2015. Keluaran model simulasi untuk satu periode tanam berupa nilai produktivitas tebu, dan penggunaan air yang didasarkan pada nilai evapotranspirasi aktual digunakan untuk menilai waktu tanam terbaik. Perbandingan nilai saat bulan tanam tertentu dan bulan lainnya (Bulan Januari sampai dengan Desember) menggunakan normalisasi min-max untuk menentukan skor (nilai 0-1). Perhitungan masing-masing skor parameter menggunakan Persamaan (16).

$$Skor = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (16)$$

dimana, skor merupakan hasil normalisasi untuk melakukan penilaian waktu tanam terbaik, x nilai produktivitas tebu dan penggunaan air yang akan dinormalisasi, min nilai minimum dari setiap bulan, max nilai maksimum dari setiap bulan, i bulan ke-1,2,3,...,12.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Validasi Model Simulasi Tanaman

Model simulasi tanaman tebu menghasilkan nilai pendugaan produksi gula yang mendekati data observasi, dengan nilai RMSE sebesar 0.28. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model hanya menghasilkan *error* sebesar 28%, dan model layak digunakan untuk analisis lebih lanjut. RMSE merupakan salah satu indikator statistik yang baik untuk menganalisis besar eror yang dihasilkan suatu model, semakin kecil nilai RMSE maka kemampuan model

semakin baik. Hasil plot 1:1 (Gambar 2a) juga menunjukkan bahwa 80% nilai produktivitas gula hasil pemodelan mendekati hasil observasi. Beberapa titik cenderung terletak di bawah garis 1:1, mengindikasikan bahwa model cenderung menghasilkan nilai yang lebih rendah dari observasi (*underestimate*).

Kebutuhan Air Tanaman

Estimasi kebutuhan air tanaman dihitung berdasarkan besar air yang terkandung dalam tanaman akibat proses evapotranspirasi. Jumlah kebutuhan air tanaman tebu bervariasi selama satu musim tanam berdasarkan fase pertumbuhan tanaman. Simulasi kebutuhan air tanaman tebu dilakukan dengan perbedaan waktu tanam bulan Januari-Desember. Selain dipengaruhi oleh fase pertumbuhan, kebutuhan air tanaman dipengaruhi oleh variasi curah hujan bulanan di Kabupaten Kediri. Estimasi kebutuhan air tanaman tebu pada lahan kering Kabupaten Kediri berkisar 9-128 mm/bulan (Gambar 2b). Kebutuhan air paling besar terjadi pada fase pertumbuhan tanaman bulan ke-6 sampai ke-10 setelah tanam, yaitu sebesar 51-128 mm/bulan.

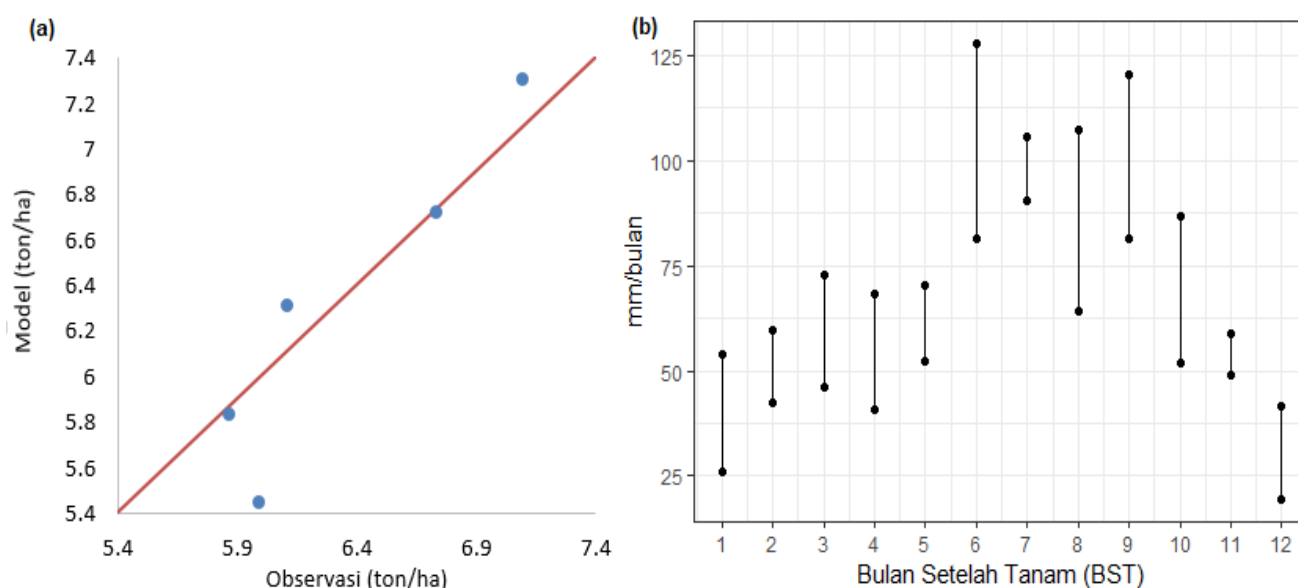
Berdasarkan pengelompokan fase pertumbuhan tanaman tebu (Tabel 1), fase perkecambahan (1-2 BST) dan fase kemasakan (11-12 BST) merupakan fase yang paling sedikit membutuhkan pasokan air. Kedua fase ini memiliki indeks luas daun yang rendah, sehingga air yang hilang akibat evapotranspirasi rendah. Jika terjadi pasokan air yang berlebihan (banjir) pada kedua fase ini, maka tunas/tanaman tebu mengalami pembusukan. Pada fase pertumbuhan tunas (3-5 BST), daun tebu mengalami pertumbuhan yang signifikan mengakibatkan peningkatan nilai

evapotranspirasi. Kebutuhan air pada fase ini mencapai 27% dari total kebutuhan air tanaman. Kemudian pada fase pemanjangan batang (6-10 BST), pertumbuhan daun tebu terus berlanjut hingga kondisi maksimum, namun dengan laju pertumbuhan yang lebih lambat. Pada fase ini, kebutuhan air lebih tinggi dibandingkan fase yang lain, yaitu mencapai 50% dari total kebutuhan air. Fase pemanjangan batang memiliki kebutuhan air paling besar karena nilai evapotranspirasi mencapai maksimum ditambah kebutuhan tanaman tebu untuk pembentukan biomassa dan penyimpanan air pada batang (da Silva et al., 2013).

Pengaruh Neraca Air terhadap Tanaman Tebu

Kondisi neraca air tanaman diidentifikasi dari selisih nilai evapotranspirasi aktual dengan nilai evapotranspirasi potensial pada lahan tebu. Jika kondisi aktual lebih rendah dari nilai potensial maka lahan tersebut diduga mengalami defisit air atau kekeringan. Simulasi penanaman tebu dilakukan pada bulan tanam Februari, Mei, Juli, dan Oktober tahun 2010. Berdasarkan hasil simulasi (Gambar 3), defisit air tanaman terjadi jika tebu ditanam pada bulan Februari, Juli dan Oktober.

Simulasi waktu tanam bulan Februari menunjukkan bahwa defisit air terjadi pada 3-10 BST. Untuk simulasi waktu tanam pada bulan Mei, besar evapotranspirasi actual mendekati nilai evapotranspirasi potensial, sehingga garis kedua parameter tersebut berhimpit. Hasil simulasi untuk bulan tanam Juli menunjukkan defisit air terjadi pada fase perkecambahan hingga perkembangan tunas tebu (1-5 BST). Sedangkan untuk hasil simulasi penanaman tebu bulan Oktober, defisit air terjadi pada 8-11 BST. Pada kondisi



Gambar 2 Hasil simulasi model pada tanaman tebu. (a) Perbandingan nilai produksi gula (ton/ha) hasil model simulasi tanaman dengan hasil observasi. (b) Estimasi rentang nilai kebutuhan air tanaman (ETc) tebu pada setiap bulan setelah tanam (BST).

lapang, defisit air terbesar pada lahan tanaman tebu di Kabupaten Kediri terjadi pada saat bulan kering, yaitu berkisar bulan Juni-November.

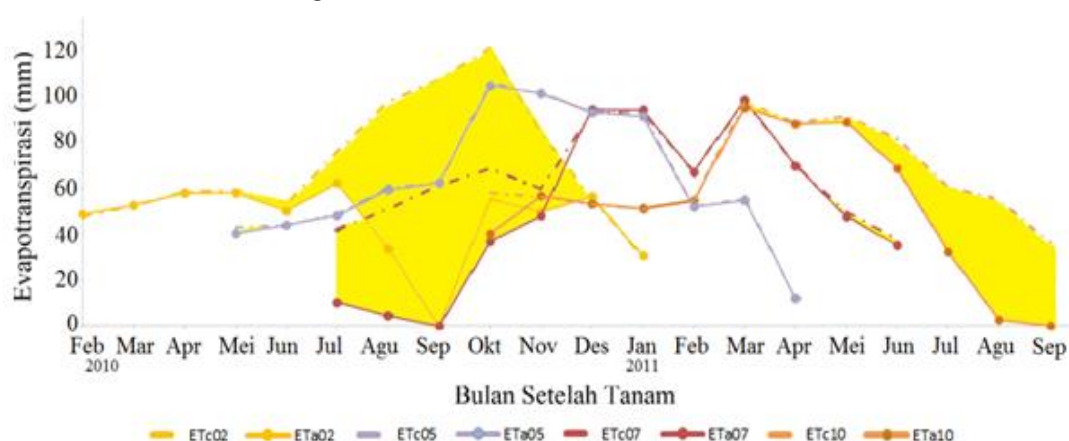
Terkait dengan kondisi cekaman air pada tanaman tebu, menunjukkan bahwa kondisi cekaman air sangat mempengaruhi nilai produktivitas terjadi pada penanaman tebu bulan Februari atau Oktober. Kondisi cekaman air terparah di lahan tadah hujan terjadi pada simulasi penanaman pada sekitar Bulan Februari dengan nilai produksi tebu 65 ton/ha. Penanaman tebu pada Bulan Februari menjadikan fase pertumbuhan batang (*elongasi*, 5-8 BST) bertepatan dengan musim kemarau, sehingga kebutuhan air untuk pengisian biomassa batang tidak maksimal dan menurunkan nilai produksi. Untuk penanaman bulan Mei, tanaman tebu tidak mengalami kondisi cekaman air, yang berarti bahwa air hujan sudah cukup memenuhi kebutuhan air tanaman tebu selama satu periode penanaman. Nilai produksi untuk penanaman tabu pada bulan Mei diperkirakan sebesar 83 ton/ha. Nilai ini masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil produksi untuk penanaman bulan Juli, yaitu sebesar 93 ton/ha (paling tinggi). Hal ini dikarenakan kondisi cekaman air untuk penanaman tebu pada bulan Juli (musim kemarau), terjadi pada fase perkembangan tunas (1-5 BST) dimana kebutuhan air tanaman masih rendah. Sedangkan fase pertumbuhan biomassa batang, bertepatan dengan musim penghujan.

Hasil simulasi pertumbuhan biomassa selama satu periode tanam, menunjukkan bahwa penurunan ketersediaan air, dapat menurunkan pertambahan biomassa tanaman, dan hal tersebut berkaitan dengan komponen neraca air tanaman (Gambar 4). Ketersediaan air untuk tanaman berkaitan dengan nilai kadar

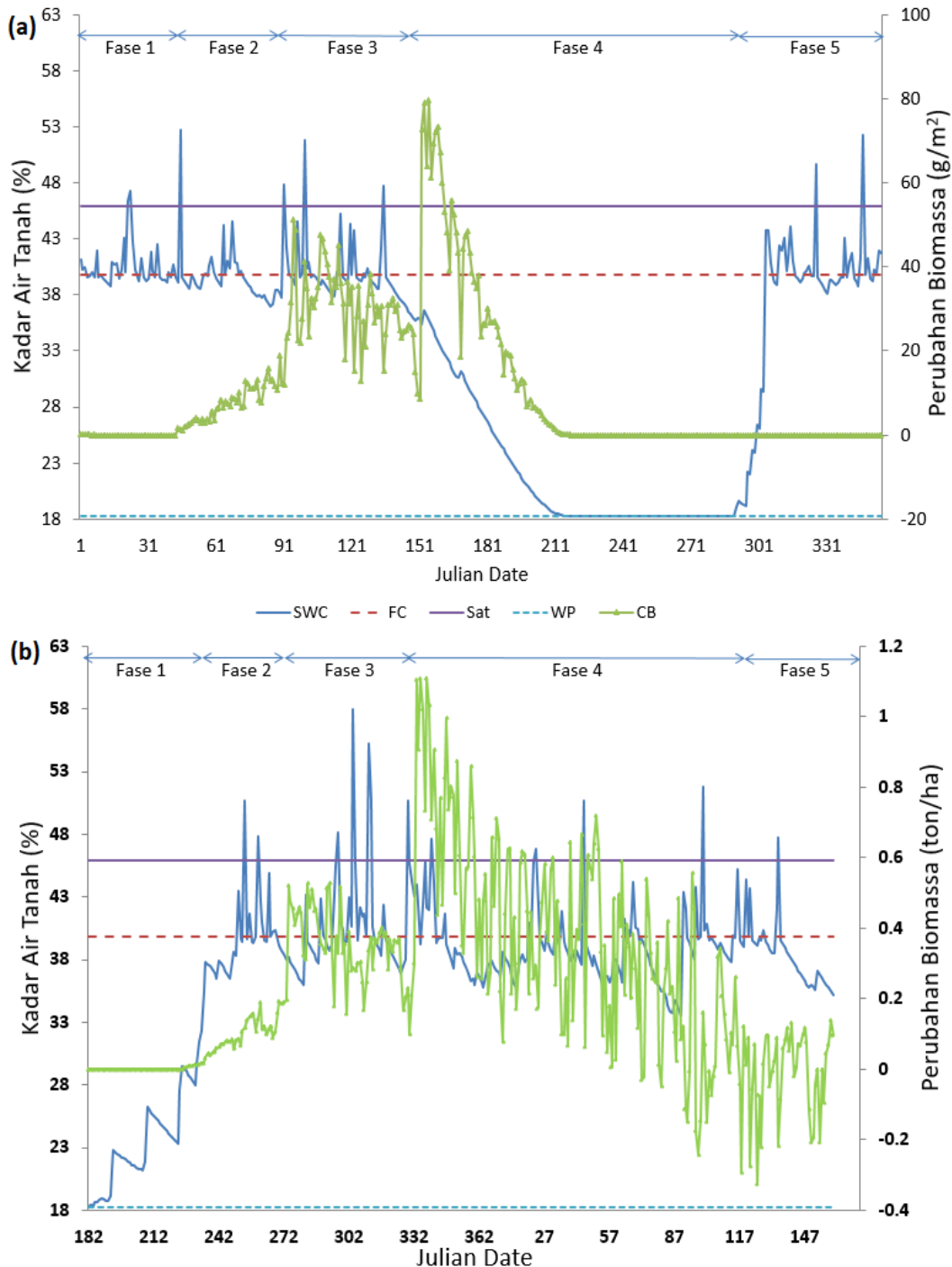
air tanah. Kadar air tanah (SWC) pada lahan tanam tebu sangat dipengaruhi oleh kejadian hujan. Ketersediaan air pada saat hari tidak hujan dihitung berdasarkan kadar air tanah hari sebelumnya yang berasal dari penambahan air hujan (P_{eff}) dan pengurangan air karena proses evapotranspirasi. Kadar air yang melebihi nilai kapasitas lapang (FC) atau dalam kondisi jenuh (Sat), mengalami perkolasi ke lapisan tanah lebih bawah selama waktu tertentu. Jumlah air tanah yang diserap oleh tumbuhan kemudian digunakan untuk fotosintesis dan menghasilkan pertambahan biomassa (CB) yang disimpan di bagian tertentu. Pertambahan biomassa bervariasi setiap hari tergantung pada proses fotosintesis yang terjadi dan ketersediaan air (Ghannoum, 2016; Mauri et al., 2017).

Produktivitas Tanaman Tebu

Efektivitas manajemen air tanah terhadap produktivitas tanaman diidentifikasi melalui nilai efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*, WUE). Berdasarkan hasil simulasi, nilai WUE berbanding lurus dengan produktivitas tebu. Gambar 5 menunjukkan nilai skor perbandingan WUE, penggunaan air, dan produktivitas tebu pada suatu periode tanam pada bulan tertentu apabila dibandingkan dengan penanaman pada bulan lainnya. Penggunaan air terbesar terjadi pada bulan tanam Januari dengan nilai produktivitas paling rendah, sehingga nilai WUE pada bulan tanam tersebut paling rendah. Skor nilai WUE kurang dari 50% dibandingkan dengan bulan tanam lainnya terjadi pada bulan tanam Desember-Maret, sedangkan nilai skor WUE lebih dari 80% pada bulan tanam Juli-September.



Gambar 3 Variasi nilai evapotranspirasi tanaman (ETc) dan evapotranspirasi aktual (ETa) selama satu periode masa tanam dengan empat skenario waktu tanam yang berbeda. Garis lurus menunjukkan ETc, sedangkan garis putus-putus menunjukkan ETa. Wilayah berwarna kuning menunjukkan besar defisit air. Garis warna kuning menunjukkan simulasi waktu tanam bulan Februari, warna abu-bulan Mei, warna merah-bulan Juli, dan warna jingga-bulan Oktober.



Gambar 4 Variasi harian besar perubahan biomassa tanaman tebu dan kadar air tanah pada lahan tebu pada dua simulasi waktu tanam yang berbeda: (a) Februari, dan (b) Juli.

Besaran nilai skor WUE pada setiap simulasi bulan tanam dapat dijadikan pertimbangan dalam waktu penanaman terbaik di Kabupaten Kediri. WUE merupakan rasio antara hasil produktivitas dengan jumlah air yang digunakan oleh tanaman selama satu periode penanaman. Perhitungan WUE dapat digunakan untuk menentukan manajemen air (irigasi) pada lahan tanaman dalam meningkatkan produktivitas tanaman. Irigasi, sebagai pendukung ketersediaan air tanaman (selain bersumber dari air hujan), lebih baik dilakukan pada waktu dan jumlah

yang tepat sehingga air digunakan secara efektif oleh tanaman (Ma et al., 2013).

Simulasi Irigasi

Informasi kebutuhan air tanaman dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pemberian irigasi pada waktu-waktu kering tanpa mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan hasil produksi (Mauri et al., 2017). Teknologi dan aplikasi irigasi dapat dilakukan bervariasi terhadap kondisi iklim selama masa pertumbuhan tanaman tebu. Pemberian air irigasi didefinisikan

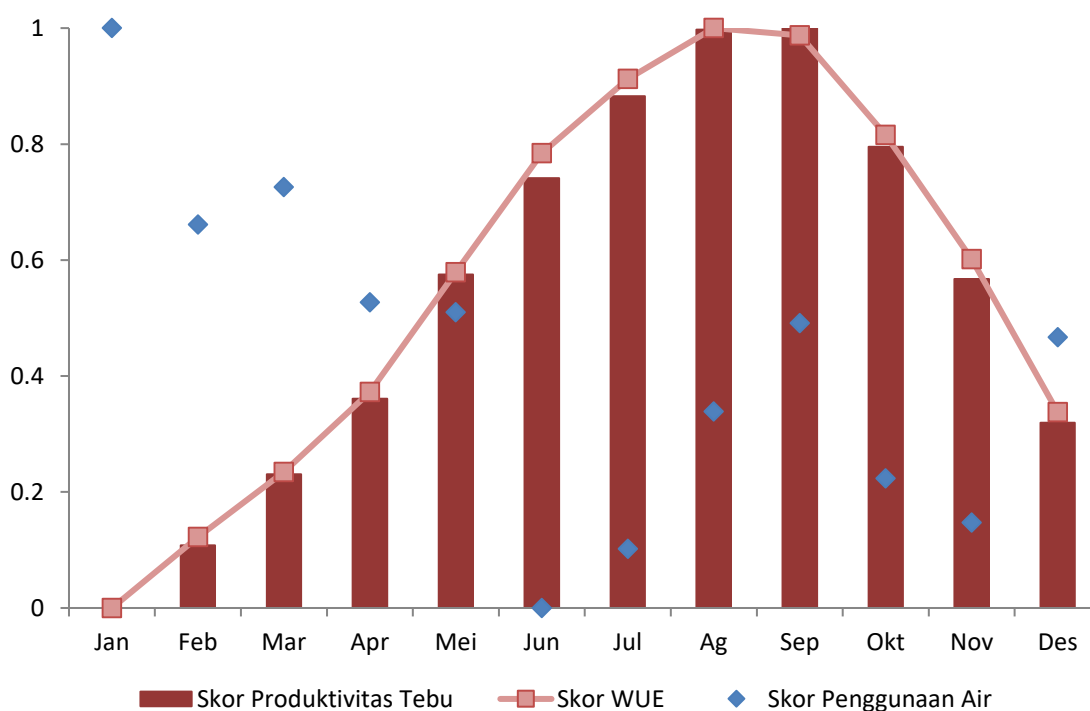
sebagai kadar air yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dari curah hujan *netto*. Pemberian air irigasi sebesar kebutuhan air tanaman disimulasikan pada berbagai bulan tanam dengan waktu kejadian cekaman air yang berbeda. Simulasi pemberian air irigasi dilakukan secara satu kali dalam satu hari, minggu, atau bulan (Tabel 2).

Pemberian irigasi harian secara umum dapat meningkatkan produktivitas tebu dibandingkan pemberian irigasi secara mingguan dan bulanan. Kondisi tanaman tebu yang tidak mengalami cekaman memiliki perbedaan nilai yang sangat rendah baik pada perlakuan irigasi harian maupun mingguan. Produktivitas tebu yang memiliki potensi terkena cekaman air di awal fase pertumbuhan mengalami penurunan saat diberikan irigasi mingguan dan bulanan. Hal ini dapat disebabkan pertumbuhan pesat akibat ketersediaan air

tanah yang tinggi di awal pertumbuhan dapat mengurangi hasil tebu saat mengalami defisit. Hasil penelitian Mauri et al. (2017) menunjukkan pertumbuhan biomassa dapat berkurang di fase pertunasan saat mengalami defisit air meskipun saat fase awal pertumbuhan kebutuhan air sudah tercukupi. Produktivitas tebu yang mengalami potensi cekaman air ada pertengahan fase memiliki produktivitas paling rendah (da Silva et al., 2013). Pada penelitian ini, pemberian air irigasi harian dapat meningkatkan nilai efisiensi pada kondisi tersebut hingga 30 kg/ha/mm. Akan tetapi, studi lain di wilayah tropis Brazil, pemberian air irigasi yang menghasilkan tanaman tebu dengan kandungan gula maksimum tidak dilakukan secara harian, namun hanya pada waktu tertentu di masa pertumbuhan tunas tebu (Dias dan Sentelhas, 2018).

Tabel 2 WUE hasil simulasi pada berbagai pemberian irigasi sebesar kebutuhan air tanaman harian (ETc harian), akumulatif mingguan (ETc mingguan), dan akumulatif bulanan (ETc bulanan).

Simulasi Irigasi	WUE (kg/ha/mm)			
	Waktu Tanam			
	Februari	Mei	Juli	Oktober
Tanpa Irigasi	185	119	114	115
ETc Harian	120	122	127	118
ETc Mingguan	117	115	127	117
ETc Bulanan	112	115	125	116



Gambar 5 Variasi nilai skor WUE, produktivitas tebu, dan penggunaan tebu yang dihasilkan selama satu periode tanam berdasarkan perbedaan bulan tanam.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil model simulasi tanaman, diketahui kebutuhan air optimal untuk tanaman tebu di Kabupaten Kediri berkisar antara 26-128 mm/bulan. Kebutuhan air tertinggi terjadi pada fase pertunasan dan pemanjangan batang, yaitu sebesar 77% dari total keseluruhan air yang dibutuhkan tanaman tebu. Potensi waktu tanam tebu terbaik di Kabupaten Kediri tahun 2011-2015 yaitu pada bulan Juli. Penanaman pada akhir dan awal tahun dapat menghasilkan nilai produktivitas yang rendah, sebab potensi kejadian defisit air yang besar pada fase pertumbuhan batang (6-10 BST) membutuhkan air dalam jumlah besar. Pemberian air berdasarkan kebutuhan air tanaman dalam skala waktu harian dapat meningkatkan produktivitas tebu lebih efektif daripada berdasarkan kebutuhan air pada skala waktu mingguan atau bulanan tetapi tidak menghasilkan perbedaan produktivitas yang signifikan. Dengan demikian, manajemen irigasi pada tanaman tebu dapat dilakukan dengan memperhatikan kebutuhan air harian dengan toleransi pada skala waktu mingguan dan bulanan.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS, 2017. Kabupaten Kediri dalam Angka 2017. Badan Pusat Statistik Kabupaten Kediri, Kediri.
- Chai, T., Draxler, R., 2014. Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development* 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Craufurd, P.Q., Vadez, V., Jagadish, S.V.K., Prasad, P.V.V., Zaman-Allah, M., 2013. Crop science experiments designed to inform crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.003>
- da Silva, V. de P.R., da Silva, B.B., Albuquerque, W.G., Borges, C.J.R., de Sousa, I.F., Neto, J.D., 2013. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management* 128, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>
- Dias, H.B., Sentelhas, P.C., 2018. Drying-Off Periods for Irrigated Sugarcane to Maximize Sucrose Yields Under Brazilian Conditions. *Irrigation and Drainage* 67, 527–537. <https://doi.org/10.1002/ird.2263>
- Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Árendás, T., Spitkó, T., Fodor, N., 2016. Crop planting date matters: Estimation methods and effect on future yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.023>
- Elnesr, M.N., Alazba, A.A., Alsadon, A.A., 2013. An arithmetic method to determine the most suitable planting dates for vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture* 90, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.010>
- Fernandes, R.P., Silva, R.W. da C., Salemi, L.F., Andrade, T.M.B. de, Moraes, J.M. de, Dijk, A.I.J.M.V., Martinelli, L.A., 2017. The influence of sugarcane crop development on rainfall interception losses. *Journal of Hydrology* 551, 532–539. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.027>
- Ghannoum, O., 2016. How can we breed for more water use-efficient sugarcane? *Journal of experimental botany* 67, 557–559. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw009>
- González Perea, R., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., Rodríguez Díaz, J.A., 2016. Optimization of Irrigation Scheduling Using Soil Water Balance and Genetic Algorithms. *Water Resources Management* 30, 2815–2830. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1325-7>
- Handoko, 2005. Quantitative Modeling of System Dynamics for Natural Resources Management. Seameo Biotrop, Bogor.
- Jaiphong, T., Tominaga, J., Watanabe, K., Nakabaru, M., Takaragawa, H., Suwa, R., Ueno, M., Kawamitsu, Y., 2016. Effects of duration and combination of drought and flood conditions on leaf photosynthesis, growth and sugar content in sugarcane. *Plant Production Science* 19, 427–437. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2016.1159520>
- Jayanti, K.D., Sudira, P., Sunarminto, B.H., 2015. Prediksi Neraca Air Untuk Menentukan Masa Tanam Tebu di Kecamatan Kalasan, Sleman. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)* 18, 109–116. <https://doi.org/10.22146/ipas.9092>
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, Manual of Practice*. American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- Kementrian Pertanian, 2017. Outlook 2017 Komoditas Pertanian Sub Sektor Perkebunan: TEBU.
- Khonghintaiong, J., Songsri, P., Toomsan, B., Jongrungrklang, N., 2018. Rooting and Physiological Trait Responses to Early Drought

- Stress of Sugarcane Cultivars. *Sugar Tech* 20, 396–406. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0564-0>
- Liu, J., Basnayake, J., Jackson, P.A., Chen, X., Zhao, J., Zhao, P., Yang, L., Bai, Y., Xia, H., Zan, F., Qin, W., Yang, K., Yao, L., Zhao, L., Zhu, J., Lakshmanan, P., Zhao, X., Fan, Y., 2016. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. *Field Crops Research* 196, 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.022>
- Loo, Y.Y., Billa, L., Singh, A., 2015. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers* 6, 817–823. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>
- Ma, Y., Feng, S., Song, X., 2013. A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 127, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.011>
- Marin, F., Jones, J.W., Boote, K.J., 2017. A Stochastic Method for Crop Models: Including Uncertainty in a Sugarcane Model. *Agronomy Journal* 109, 483–495. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0103>
- Martel, M., Glenn, A., Wilson, H., Kröbel, R., 2018. Simulation of actual evapotranspiration from agricultural landscapes in the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 15, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.010>
- Mauri, R., Coelho, R.D., Fraga Junior, E.F., Barbosa, F.D.S., Leal, D.P.V., 2017. WATER RELATIONS AT THE INITIAL SUGARCANE GROWTH PHASE UNDER VARIABLE WATER DEFICIT. *Engenharia Agrícola* 37, 268–276.
- Muhaimin, W., Sari, D., 2017. Does Sugarcane Field Expansion Increase Sugar Production? Available at SSRN 3051951.
- Olivier, F.C., Singels, A., 2015. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. *Field Crops Research* 176, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.010>
- Osorio, J., Jeong, J., Bieger, K., Arnold, J., 2014. Influence of potential evapotranspiration on the water balance of sugarcane fields in Maui, Hawaii. *Journal of Water Resource and Protection* 6, 852.
- Parthasarathi, T., Velu, G., Jeyakumar, P., 2013. Impact of crop heat units on growth and developmental physiology of future crop production: a review. *Journal of Crop Science and Technology* 2, 2319–3395.
- Pembengo, W., Suwanto, 2012. Model simulasi pertumbuhan dan produksi tanaman tebu. *Jurnal Agroteknotropika* 1, 33–45.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci* 193, 120. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Ramos, R., Isler, P., de Oliveira Florentino, H., Jones, D., Nervis, J., 2016. An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations. *African Journal of Agricultural Research* 11, 3950–3958.
- Rauff, K.O., Bello, R., 2015. A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences* 06, 1098–1105. <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>
- Sari, D., Muhaimin, W., Hanani, N., 2015. Factors influence sugarcane field expansion in Indonesia. *International Journal of Management, IT and Engineering* 5, 205.
- Sari, D., Wegener, M., 2015. Indonesian Sugar Production and Recommendations for Industry Recovery. SSRN, 260353. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2620353>
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Silva, R.W. da C., Salemi, L.F., Fernandes, R.P., de Andrade, T.M.B., de Moraes, J.M., de Camargo, P.B., Martinelli, L.A., 2016. Throughfall patterns in sugarcane and riparian forest: understanding the effect of sugarcane age and land use conversion. *Hydrological Processes* 30, 2579–2589. <https://doi.org/10.1002/hyp.10803>
- Suryani, E., Hendrawan, R., Taufik, E., Muhandhis, I., Dewi, L., 2018. The Development of System Dynamics Model to Increase National Sugar Fulfillment Ratio. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)* 10, 91–96.
- Toharisman, A., Triantarti, 2016. An Overview of Sugar Sector in Indonesia. *Sugar Tech* 18, 636–641. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0490-6>
- Toharisman, A., Triantarti, 2014. Rise and fall of Indonesian sugar industry. *International Sugar Journal* 116, 666–670.
- Vel, J.A.C., McCarthy, J.F., Zen, Z., 2016. The Conflicted Nature of Food Security Policy: Balancing Rice, Sugar and Palm Oil in Indonesia.

Anthropological Forum 26, 233–247.
<https://doi.org/10.1080/00664677.2016.1190919>

Zhao, D., Li, Y.-R., 2015. Climate Change and Sugarcane Production: Potential Impact and Mitigation

Strategies. International Journal of Agronomy, 547386 10.
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/547386>