

ASSESSMENT MODEL MUKA AIR TANAH PADA PERTANAMAN KELAPA SAWIT DI LAHAN BERBUKIT

ASSESSMENT OF WATER TABLE MODEL ON OIL PALM AREA IN A HILLY LAND

Iman Yani Harahap dan M. Edwin Syahputra Lubis

Abstrak Penelitian ini bertujuan menguji keragaan keluaran model muka air tanah yang dikembangkan saat ini pada pertanaman kelapa sawit dengan fisiografis berbukit. Model memerlukan data inisiasi, data masukan, dan parameter fisik tanah dan tanaman. Data inisiasi meliputi penutupan vegetasi (Indeks Luas Daun), posisi lintang geografis, kedalaman muka air tanah awal, dan kedalaman lapisan kedap air. Data masukan meliputi data cuaca harian (curah hujan, suhu, kelembapan, radiasi surya, dan kecepatan angin). Parameter fisik tanah meliputi berat volume setiap lapisan tanah dan limpasan air permukaan tanah (*run-off*). Parameter tanaman meliputi intersepsi tajuk dan batang tanaman terhadap curah hujan. Pengamatan muka air tanah harian dilakukan terhadap 3 titik sumur pantau pada suatu garis katena bukit di pertanaman kelapa sawit berumur 20 tahun dengan kelerengan 15% dan berjenis tanah *Typic Hapludult* dengan ketinggian 30 – 70 m di atas permukaan laut. Tanah pada lokasi penelitian memiliki tekstur kasar hingga halus dengan konduktivitas hidraulik tergolong cepat dan air tanah pada lokasi ini berada zona *unconfined aquifer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keluaran model lebih tinggi 3 – 4% dibanding pengamatan aktual pada area di puncak bukit, keluaran model lebih rendah 7 – 8% pada area dibanding pengamatan aktual di lereng bukit, dan keluaran model lebih rendah 7 – 7,5% dibanding pengamatan aktual pada area di kaki bukit. Laju *run-off*

yang relatif tinggi pada puncak bukit diduga mereduksi air infiltrasi sehingga mengurangi *inflow* air. Sedangkan pada area lereng dan kaki bukit, *inflow* air dari area puncak yang berasal dari run-off, meningkatkan air infiltrasi pada kedua area tersebut, sehingga pengukuran aktual lebih tinggi dari keluaran model. Penyesuaian parameter laju run-off dan gradien potensi hidrolis pada area lereng dan perbukitan dapat meningkatkan akurasi keluaran model.

Kata kunci : kelapa sawit, model muka air tanah, sumur pantau, kelerengan, puncak bukit, kaki bukit, gradien potensial hidrolis

Abstract The aim of this research is to assess performance of developed water table model on oil palm area in a hilly land. The model requires some data of initial condition, input model, and physical parameters of the soils and crops. Initial data includes leaf area index, latitude geography position, initial water table, and the deep of impermeable soil layer. Input model includes daily weather data (rainfall, temperature, solar radiation, and wind speed). Soil physic parameters includes bulk volum density at each soil layers, and run-off of the soil surface. The crop parameters includes rainfall interception of crown and stem plants. Daily water table measurement was carried out at 3 points of wells located in one line hilly catena (30 – 70 m above sea level) with slope about of 15% (top, middle, and foot). The area was the 20 years old oil palm planting area, soil type was *Typic Hapludult* with coarse to fine soil texture, hydraulic conductivity was classified as fast. The water table in this area was located in *unconfined aquifer* zone. The results showed that outputs of the model were 3 - 4% higher than the

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Irman Yani Harahap (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamsno No. 51 Medan, Indonesia
email : lyh_020464@yahoo.co.id

actual values observed on the top hill, 7–8% lower than the actual values on the middle sloping of the hill, and 7–7.5% lower than the actual values on the foot hill. The high rate of run-off at the top might have reduced the water inflow (through infiltration process) to the system, causing output values of the model were higher than the actual values. On the other hand, the water inflow from the top to the lower area might have increased the water inflow to the system, so that the actual values were higher than the output values of the water table model. Adjustments of parameters mainly run-off rate and hydraulic potential gradient on sloping and hilly physiography might increase the accuracy of the model.

Keywords : *oil palm, water table model, well, the sloping, the top of hilly, the foot of the hilly, hydraulic potential gradient.*

PENDAHULUAN

Pemodelan deterministik muka air tanah pada pertanaman kelapa sawit yang dibangun pada saat ini diparameterisasi pada lahan yang berfisiografi datar (Lubis, 2016), sehingga memiliki akurasi yang relatif tinggi untuk mendeterminasi fluktuasi muka air pada lahan yang datar. Pada lahan perbukitan, penggunaan model tersebut diduga berakurasi relatif rendah, karena *inflow* air ke sistem, sangat dipengaruhi laju *run-off*, yang pada area berlereng, laju *run-off* berhubungan dengan penutupan vegetasi dan tingkat kelerengan itu sendiri. Pemodelan hidrologis, yang mendeterminasi kelembapan tanah pada berbagai solum dan fluktuasi muka air tanah pada lapisan lebih dalam pada suatu lahan terus dikembangkan dalam upaya konservasi tanah dan air yang berkaitan dengan upaya pengelolaan lahan ramah lingkungan dan berkesinambungan pada lahan perkebunan kelapa sawit. Pada awal pemodelan, neraca air yang merupakan satu kesatuan sistem yang meliputi aspek atmosfer, vegetasi di permukaan tanah, dan kondisi fisik tanah di permukaan maupun pada lapisan yang lebih dalam, telah mampu mendeterminasi perilaku kelembapan tanah di lapisan permukaan dan lapisan-lapisan lain di bawahnya (Harahap, 1999; Rosa *et al.*, 2002; Jayakody *et al.*, 2013; dan Iwalewa *et al.*, 2016). Seperti diketahui bahwa ada korelasi yang kuat antara kondisi kelembapan tanah dengan produksi tanaman (Singh, 2012). Lubis (2016), menyatakan bahwa kondisi kelembapan tanah yang relatif tinggi menginduksi pembentukan bunga, diferensiasi jenis

kelamin bunga betina, dan mengurangi aborsi bunga, sehingga produksi kelapa sawit tinggi, sedangkan pada dan kondisi sebaliknya akan menyebabkan produksi rendah.

Pada pemodelan hidrologis selanjutnya, dikembangkan model yang mempertimbangkan muka air tanah (*water table*) pada lapisan yang lebih dalam, yang secara faktual mempengaruhi neraca air pada bagian permukaan tanah (termasuk kelembapan tanah). Pada lapisan dalam, muka air tanah secara kontinyu mempengaruhi kondisi kelembapan tanah pada lapisan di atasnya, melalui mekanisme pergerakan air kapiler (Dingman, 2015 dan Racine *et al.*, 2017). Dan sebaliknya, pada kondisi kelembapan yang tinggi, akan terjadi pergerakan air perkolasi dari bagian atas menuju permukaan air tanah, yang dapat meningkatkan muka air tanah. Pemodelan muka air tanah pada pertanaman kelapa sawit tersebut, telah dikembangkan dengan mempertimbangan berbagai aspek telah mampu mendeterminasi fluktuasi muka air tanah dengan presisi hingga 80%. Aspek-aspek yang dipertimbangkan tersebut meliputi kondisi atmosfer, vegetasi dan kelembapan tanah (Lubis, 2016). Model yang dikembangkan tersebut belum mempertimbangkan aspek pergerakan air di bawah permukaan tanah secara horizontal. Pada faktanya pergerakan horizontal tersebut, yang dikenal pergerakan *inflow* juga mempengaruhi fluktuasi muka air tanah (Tsubo *et al.*, 2005 dan Barontim *et al.*, 2012), terutama pada lahan dengan topografi yang bergelombang sampai berbukit. Pengembangan pertanaman kelapa sawit pada akhir-akhir ini, menuju lahan-lahan marginal, baik dari sisi karakter kimia tanah maupun fisik tanah, termasuk ke arah lahan topografi yang curam. Oleh karena itu model hidrologis yang mempertimbangkan pergerakan air *inflow* perlu menjadi perhatian. Penelitian ini bertujuan menguji keluaran model muka air tanah yang dikembangkan saat ini pada pertanaman kelapa sawit dengan fisiografis berbukit. Hasil penelitian ini juga diharapkan menjadi salah satu pertimbangan dalam strategi konservasi air yang dapat menjamin kebutuhan untuk pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit.

Landasan Teoritis

Analisis pergerakan air yang melalui suatu penampang, telah lama dilakukan oleh Henry Darcy, yang hukumnya dikenal dengan hukum Darcy (Darcy's Law) (Allen, 1994). Secara matematis, hukum tersebut dituliskan sebagai:

$$Q = -K A \frac{dh}{dl} \dots\dots\dots(1)$$

dimana,

- Q : debit air yang melalui penampang A sejauh dl (m³ detik⁻¹)
- A : penampang yang dilalui pergerakan air (m²)
- K : konduktivias hidraulik (m detik⁻¹)
- dh : perbedaan potensial hidraulik (m)
- dl : panjang penampang yang dilalui (m)

Pada nilai K, A, dan Q yang konstan, maka kecepatan pergerakan air di sepanjang penampang A, yang dilalui, l adalah kontan juga, sehingga kondisi tersebut dapat direpresentasikan, dengan perasamaan berikut:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \dots\dots\dots(2)$$

dimana,

- q : debit spesifik (*specific discharge*, m² detik⁻¹), yang nilainya konstan

Kondisi K dan Q yang konstan terjadi apabila debit air di puncak penampang memiliki nilai minimum tertentu.

Nilai q, tersebut dipandang dapat mem(2)perbaiki model hidrologis, pada neraca muka air tanah. Lubis (2016), telah memformulasikan neraca muka air tanah pada lapisan tanah permeabel, dengan mengasumsikan bahwa, (1) lahan berfisiografi datar, sehingga tidak ada sumber air yang berasal dari limpasan (*run-off*) dari permukaan lahan di atasnya, (2) rembesan air secara vertikal melalui lapisan kedap air pada bagian zona *saturated* sangat kecil sehingga dapat diabaikan, (3) *run-on* kearah horizontal pada lapisan di bawah permukaan tanah diabaikan. Sehingga model dinamika muka air tanah, digambarkan dalam persamaan (1) berikut,

$$WT_{(t)} = WT_{(t-1)} + \Delta h_{(t)} \dots\dots\dots(3)$$

dimana,

- WT_(t) : kedalaman muka air terhadap permukaan tanah pada waktu t (cm)
- WT_(t-1) : kedalaman muka air terhadap permukaan tanah pada waktu t-1 (cm)
- Δh_(t) : perubahan tinggi muka air tanah pada waktu t (cm)

Nilai Δh_(t) dihitung dari perubahan volumetrik air tanah,

$$\Delta h_{(t)} = \Delta Va_{(t)} / \mu \dots\dots\dots(4)$$

ΔVa_(t) : perubahan volumetrik air tanah pada waktu t (cm)

μ : porositas efektif, yang ditentukan dari selisih nilai porositas terhadap nilai kadar air pada kapasitas lapang

Perubahan volumetrik air tanah (ΔVa_(t)), ditentukan oleh (1) infiltrasi air yang masuk melalui permukaan tanah (I, cm); dan (2) kehilangan air tanah melalui penguapan permukaan tanah dan transpirasi tanaman (ET, cm) (Mc Jannet *et al.*, 2007 dan Jayakordy *et al.*, 2013).

$$\Delta Va_{(t)} = I_{(t)} - ET_{(t)} \dots\dots\dots(5)$$

Laju infiltrasi (I) tersebut , kemudian dapat dihitung sebagai fungsi dari presipitasi (P, cm), dan aliran permukaan (*run-off*, RO, cm), seperti digambarkan persamaan (6) berikut:

$$I_{(t)} = P_{(t)} - RO_{(t)} \dots\dots\dots(6)$$

Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju *run-off* adalah mengikuti U.S. Soil Conservation Service (Thomasz dan Aalega, 2015), yaitu

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \dots\dots\dots(7)$$

dimana,

- Q = *run-off* (mm)
- P = curah hujan (mm)
- S = jumlah maksimum air yang dapat diabsorpsi pada awal *run-off* (mm)
- Ia = inisial abstraksi

Inisial abtarksi (Ia) meliputi semua faktor yang menyebabkan kehilangan air sebelum terjadinya *run-off* (evaporasi, infiltrasi, intersepsi tajuk tanaman). Nilai ini berkaitan dengan karakter tanah dan vegetasi penutup tanah. Nilai Ia didekati menggunakan persamaan berikut:

$$I_a = 0,2 * S \dots\dots\dots(8)$$

Sehingga persamaan (7) di atas dapat disederhanakan menjadi persamaan (9) berikut:

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \dots\dots\dots(9)$$

Nilai S tergantung pada karakter tanah dan vegetasi penutupan tanah. Nilai S berkisar antara 0 – 100. Nilai ini tinggi pada lahan yang permukannya tertutup rapat oleh vegetasi (sekitar 99), sedangkan pada lahan yang terbuka dari vegetasi akan bernilai rendah (sekitar 35) (Ebrahiminian *et al.*, 2012).

Perubahan volumetrik air tanah, merupakan integrasi perubahan pada setiap lapisan, di bawah zona perakaran, sehingga dapat didefinisikan seperti persamaan (10) berikut:

$$\Delta V_{a(t)} = \sum_{n=1}^{n=m} \Delta V_{a_{n(t)}} \dots\dots\dots(10)$$

dimana,

n : lapisan tanah ke 1, 2, ...m

untuk lapisan n > 1, maka berlaku,

$$\Delta V_{a_{n(t)}} = Pc_{n-1(t)} - CR_{n(t)} \dots\dots\dots(11)$$

dimana,

$\Delta V_{a_{n(t)}}$: Perubahan volumetrik air tanah di lapisan ke-n, pada waktu t

$Pc_{n-1(t)}$: Perkolasi dari lapisan n-1, pada waktu t

$CR_{n(t)}$: Kenaikan air kapiler di lapisan n, pada waktu t

Perkolasi terjadi apabila kadar air pada lapisan tertentu di atas kadar air pada kapasitas lapangnya, sehingga dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Pc_{n(t)} &= \theta a_{n-1(t)} - \theta fc_{n-1}, & \theta a_{n-1(t)} &> \theta fc_{n-1} \\ Pc_{n(t)} &= 0, & \theta a_{n-1(t)} &\leq \theta fc_{n-1} \end{aligned} \dots\dots\dots(12)$$

dimana,

$Pc_{n(t)}$: Perkolasi di lapisan ke n pada waktu t

$\theta a_{n-1(t)}$: Kadar air aktual di lapisan ke n-1 pada waktu t

θfc_{n-1} : Kadar air aktual di lapisan ke n-1

Kenaikan air kapiler, merupakan fenomena yang kompleks, yang dipengaruhi sifat fisik tanah, terutama kelas tekstur, konduktivitas hidrolis, potensial matrik tanah, dan jarak relatif terhadap permukaan tanah. Untuk menyederhanakan penetapan kenaikan air kapiler, maka nilai tersebut dapat didekati berdasar persamaan (8) berikut (Dingman, 2015),

$$CR = \{ \{ \Delta h \cdot \Delta t - (Z - h) \} \cdot \theta_{u,t} \} / \Delta t \dots\dots\dots(13)$$

dimana,

CR : laju kenaikan air kapiler (cm hari-1)

Δh : perubahan kedalaman muka air tanah (cm hari-1)

Δt : perubahan waktu (hari)

Z : dalam perakaran (cm)

ht : kedalaman muka air tanah pada waktu t (cm)

$\theta_{u,t}$: Kandungan udara di atas muka air tanah ($cm^3 cm^{-3}$)

Nilai $\theta_{u,t}$ dihitung dari kadar air tanah pada kondisi aktual dan kondisi jenuh

$$\theta_u = \theta_s - \theta_a \dots\dots\dots(14)$$

dimana,

θ_u : kandungan udara ($cm^3 cm^{-3}$)

θ_s : kadar air tanah pada kondisi jenuh ($cm^3 cm^{-3}$)

θ_a : kadar air tanah pada kondisi aktual ($cm^3 cm^{-3}$)

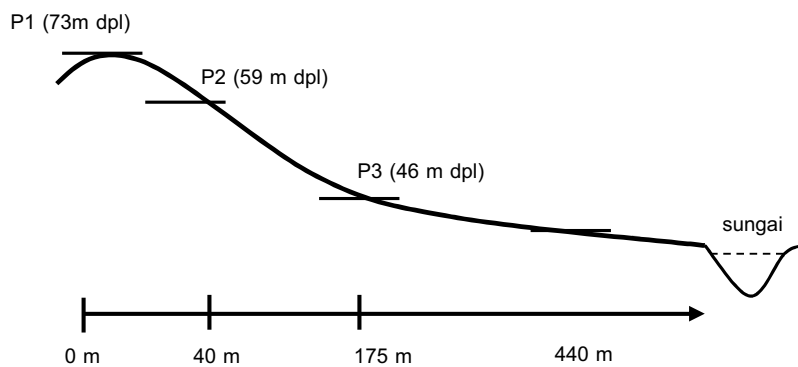
BAHAN DAN METODE

Model muka air tanah yang akan diuji menggunakan model yang dikembangkan oleh Lubis (2016). Pengujian model muka air tanah, dilakukan terhadap 3 lokasi sumur pantau pada suatu garis katena di pertanaman kelapa sawit, berumur 20 tahun dengan kelerengan 15% (Gambar 1). Tiap lokasi terdiri dari 3 titik sumur pantau yang disusun posisinya segitiga sama kaki dengan jarak 9 m x 9 m x 9 m. Posisi masing-masing lokasi sumur pantau tersebut disajikan pada Tabel 1. Penelitian ini berlangsung selama satu tahun di pertanaman kelapa sawit Kabun-Aliantan, Tandun, Riau, yang

Tabel 1. Posisi koordinat sumur pantau pada berbagai ketinggian

Table 1. The position of the wells at the some levels of catena

No.	Posisi katena	Koordinat	Ketinggian (dpl, m)	Kode
1.	Puncak bukit pertanaman	N: 00°28,052' E: 100°49,043'	73	P1
2.	Lereng bukit pertanaman	N: 00°28,037' E: 100°49,025'	59	P2
3.	Kaki bukit pertanaman	N: 00°27,921' E: 100°49,006'	46	P3



Gambar 1. Sebaran posisi sumur pantau pada garis katena fisiografi lahan

Figure 1. Position of the wells on catena line of land physiography

Tabel 2. Parameter model muka air tanah

Table 2. The parameters of water table model

Parameter model	Nilai	Satuan
1. Kadar air pada		
- titik layu permanen	0,20	cm ³ cm ⁻³
- kapasitas lapang	0,45	cm ³ cm ⁻³
- jenuh	0,60	cm ³ cm ⁻³
2. Intersepsi curah hujan oleh kanopi dan aliran batang	0,014	-
3. Koefisien pepadaman tajuk	0,32	-
4. Berat volume tiap lapisan tanah (0-20;20-50;50-100;100-200 cm)	1,18;1,34;1,26;1,07	gr cm ⁻³
5. Koefisien limpasan air permukaan (<i>Run-off</i>)	97	-
6. Porositas efektif	0,05	-
7. Kedalaman lapisan tanah	0-20; 20-50; 50-100; 100-200	cm

memiliki jenis tanah *Typic Paleudult* dengan ketinggian 30 – 70 m di atas permukaan laut dan berfisiografi datar hingga bergelombang. Tanah pada lokasi penelitian memiliki tekstur lempung berpasir dengan konduktivitas hidraulik tergolong cepat dan air tanah pada lokasi ini berada zona *unconfined aquifer*.

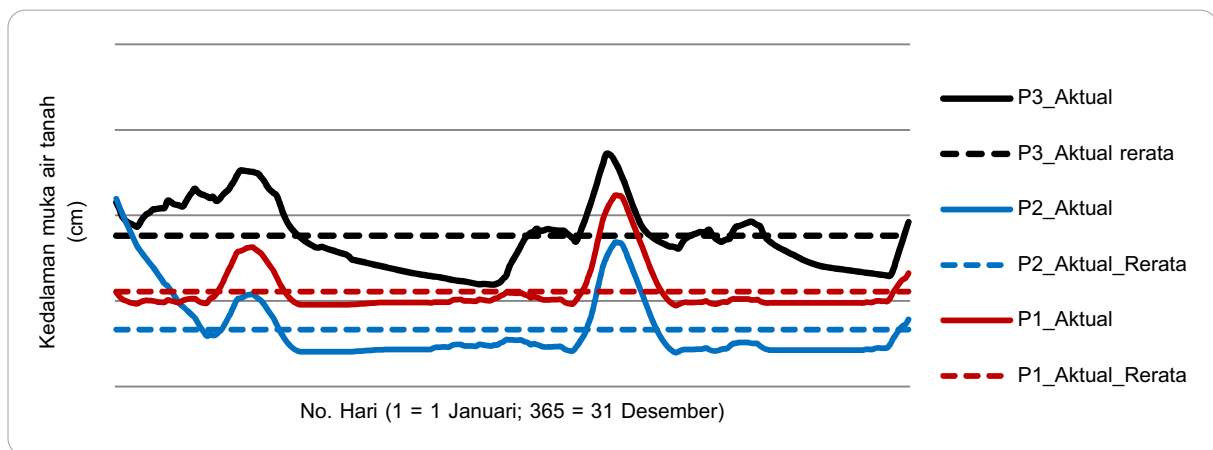
Pengujian model dilakukan dengan cara membandingkan keluaran model terhadap pengukuran aktual harian dalam bentuk grafis, rerata muka air tanah, maksimum dan minimum muka air tanah, dan waktu pencapaian maksimum dan minimum muka air tanah. Di samping itu, dilakukan juga pengujian sensitifitas parameter model dengan

meningkatkan 10% nilai-nilai parameter model. Peubah masukan model yang diperlukan adalah 1) posisi lintang geografis titik sumur, 2) nomor harian (*number julian date*), 3) penutupan tajuk tanaman (indeks luas daun), 4) unsur iklim harian, dan 5) kedalaman lapisan kedap air. Parameter model meliputi 1) kadar air titik layu permanen, 2) intersepsi curah hujan oleh tanaman, 3) koefisien pemadaman tajuk, 4) berat volume tiap lapisan tanah, 5) koefisien limpasan air permukaan, 6) porositas efektif, dan 7) ketebalan lapisan tanah. Untuk menjalankan model, juga diperlukan kondisi awal (inisial) muka air tanah.

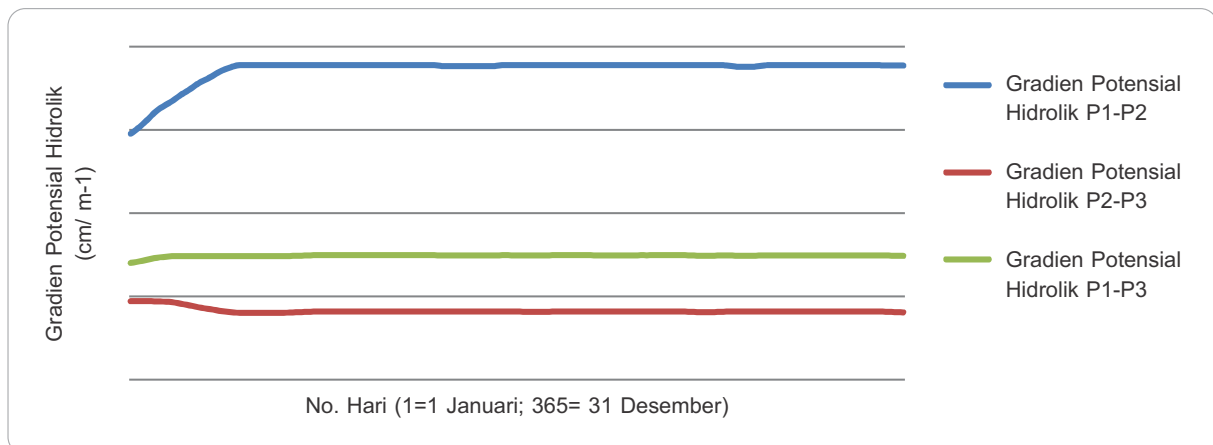
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gradien Potensi Hidrolik dan Fluktuasi Muka Air Tanah Aktual

Fluktuasi muka air tanah aktual sepanjang garis katena memiliki pola yang sama (Gambar 2). Kedalaman muka air tanah merata pada lereng bukit (P2), lebih rendah di banding pada puncak bukit (P1) dan kaki bukit (P3), yang disebabkan lapisan “impermeable” pada P2 (790 cm) lebih dalam dibanding P1 (670 cm) dan P3 (560m). Kedalaman muka air tanah pada areal berlereng tersebut



Gambar 2. Pola fluktuasi muka air tanah aktual pada puncak bukit (P1), lereng bukit (P2), dan kaki bukit (P3)
Figure 2. Patern of actual water table fluctuation at the top (P1), sloping (P2), and the foot (P3) of the hilly



Gambar 3. Gradien potensial hidrolik antara puncak-lereng (P1-P2), lereng-kaki (P2-P3), dan puncak-kaki (P1-P3) bukit

Figure 3. Hydraulic potential gradient between the top and the slope area (P1-P2), slope-the foot area (P2-P3), and the top-the foot (P1-P3) hill area

berkaitan dengan ketinggian (elevasi) permukaan tanahnya. Semakin tinggi elevasi, maka muka air tanah semakin dalam (U.S. Geology Survey., 2013). Gradien potensi hidrolik (GPH) sepanjang katena adalah konstan sesuai dengan hukum Darcy (Gambar 3). GPH P1-P2 adalah 37,75 cm m⁻¹, dan GPH P2-P3 adalah 8,15 cm m⁻¹, sedangkan GPH P1-P3 adalah 14,91 cm m⁻¹ (Gambar 3). GPH yang relatif tinggi pada P1-P2, menyebabkan debit aliran air tanah bergerak lebih besar dari puncak ke lereng dan kaki bukit, sehingga pencapaian muka air tanah maksimum lebih dulu terjadi pada kaki (P3) dan lereng bukit (P3). Karakter gerakan muka air tanah pada zona “*unconfining aquifer*” ini akibat perbedaan potensial hidrolik ini dapat dipertimbangkan dalam pemodelan muka air tanah pada area perbukitan.

Pola keluaran model muka air tanah sepanjang garis katena

Penggunaan model muka air tanah pada puncak bukit (P1), memperlihatkan bahwa muka air tanah dari keluaran model, nilainya lebih tinggi sekitar 3 – 4% dibanding pengukuran aktual, sedangkan pada lereng bukit nilai keluaran model lebih rendah sekitar 7 – 8% dibanding pengukuran aktual. Pada kaki bukit, terlihat muka air tanah keluaran model sekitar 7,0 – 7,5% lebih rendah dibanding pengukuran aktual (Tabel 3). Pola fluktuasi muka air tanah, hasil pengukuran dan keluaran model pada lokasi di puncak (P1), lereng (P2), kaki bukit (P3), disajikan pada Gambar 4. Muka air maksimum yang dicapai pada hari 225-228 Julian date, disebabkan kondisi curah hujan yang tinggi pada waktu sebelumnya, yang merupakan sumber air *recharge* yang paling utama dalam meningkatkan muka air tanah (Park dan Parker, 2008; Ramirez dan Gonzales, 2013; Subramani dan

Kaliappan, 2106). Sedangkan muka air tanah minimum, terjadi pada waktu yang beragam di antara P1, P2, dan P3. Keberagaman tersebut, disebabkan karakter *unconfined aquifer* yang kedalaman lapisan kedap (*impermeable*) airnya beragam, di samping struktur dan tekstur tanahnya juga beragam (Bisht *et al.*, 2013).

Pada pemodelan tersebut, *inflow* air yang masuk lahan pada puncak bukit (P1), terlihat berlebihan, karena model muka air tanah yang dikembangkan Lubis (2016), menggunakan parameter laju aliran permukaan (*run off*) pada lahan relatif datar. Sedangkan pada lahan di lereng (P2) dan kaki bukit (P3), pemodelan memperlihatkan *inflow* relatif lebih kecil, sehingga keluaran model umumnya lebih rendah sekitar 7-8% dibanding hasil pengukuran. Perbedaan gradien potensi hidrolik sepanjang katena menyebabkan aliran air *inflow* bergerak dari potensi hidrolik yang tinggi ke potensi hidrolik yang rendah (U.S. Geology Survey, 2013 dan Sahu, 2017). Hal tersebut juga berlaku pada pergerakan aliran air tanah dari P1 ke P2 menjadi lebih tinggi dibanding dari P2 ke P3. Kondisi ini menyebabkan puncak maksimum muka air tanah di P2 dicapai dengan cepat pada curah hujan yang tinggi. Penyesuaian parameter yang berhubungan dengan kapasitas *inflow* tersebut diduga akan meningkatkan akurasi model muka air tanah pada lahan berbukit.

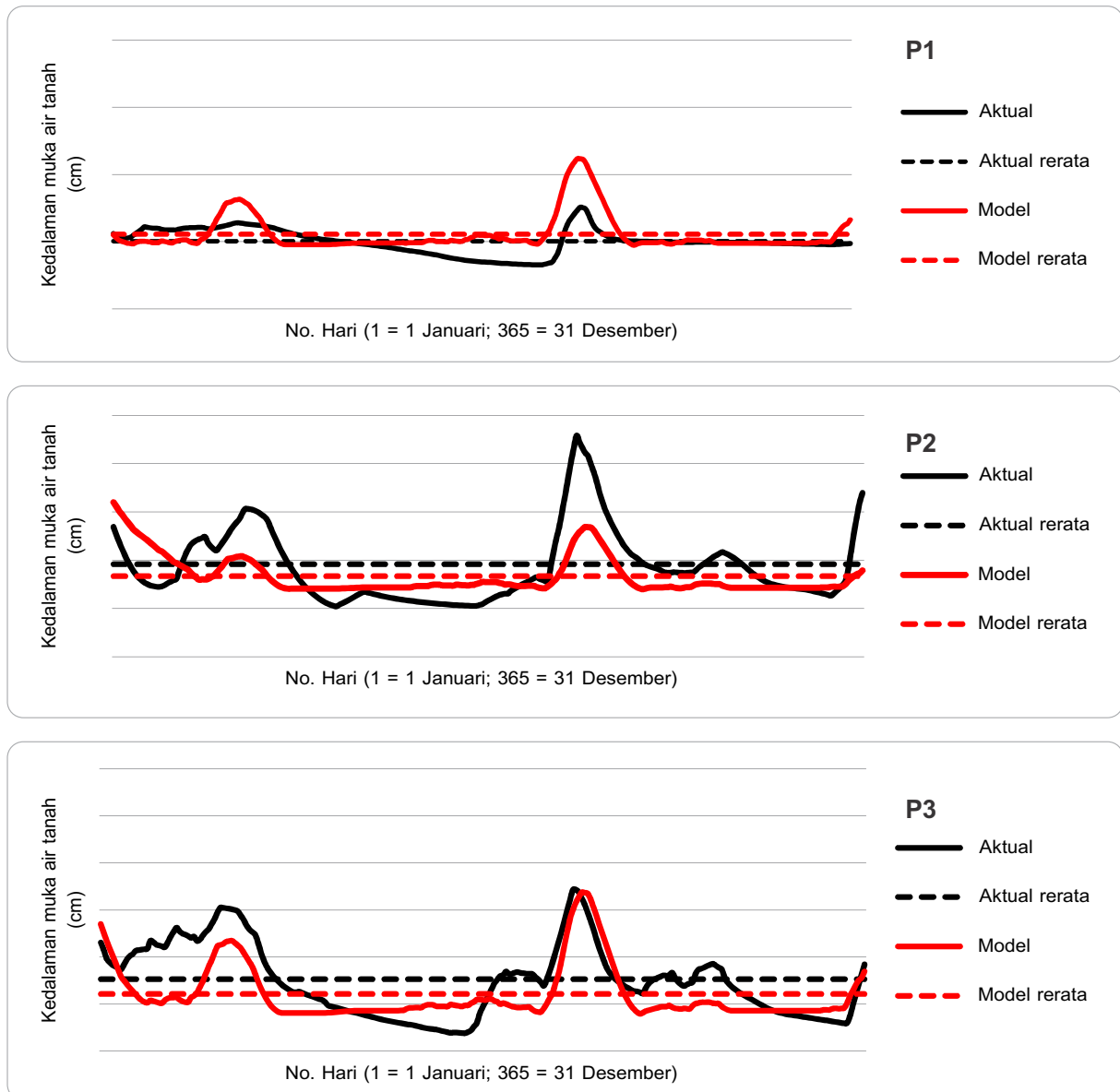
Sensitifitas model

Pengujian sensitifitas model, dilakukan melalui mengubah nilai parameter model setinggi + 10%. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa perubahan parameter limpasan air permukaan (*run off*), intersepsi curah hujan oleh tanaman, dan koefisien pemadaman tajuk, setinggi 10%, secara proporsional meningkatkan

Tabel 3. Kondisi muka air tanah aktual dan keluaran model

Table 3. Condition of actual water table and output of the model

Kondisi muka air tanah	Puncak bukit (P1)			Lereng bukit (P2)			Kaki bukit (P3)		
	Aktual	Model	Aktual-Model	Aktual	Model	Aktual-Model	Aktual	Model	Aktual-Model
Rerata (cm)	-599	-578	-21	-618	-667	49	-447	-479	32
Maksimum (cm)	-517	-363	-154	43	-463	506	-257	-263	6
Minimum (cm)	-666	-607	-59	-782	-719	-63	-561	-521	-40
Maksimum-Minimum (cm)	149	244	-95	825	101	724	304	258	46
Saat Maksimum (Julian date)	227	227	0	228	228	0	225	227	2
Saat Minimum (Julian date)	218	218	0	138	126	12	187	248	61



Gambar 4. Pola aktual dan keluaran model fluktuasi muka air tanah pada puncak bukit (P1), lereng (P2), dan kaki bukit (P3)

Figure 4. Pattern of actual water table and output of the model at the top hill (P1), the slope hill (P2), and at the foot hill (P3)

muka air tanah maksimum masing-masing 19, 12, dan 11%. Sedangkan muka air rerata relatif tidak terpengaruh (2-3%), demikian juga dengan muka air tanah minimum (0%). Sedangkan peningkatan parameter porositas efektif setinggi 10%, hanya meningkatkan muka air tanah maksimum setinggi 3%

(Tabel 4). Berdasar uji sensitifitas tersebut, terindikasi keluaran model sangat terpengaruh oleh faktor *inflow* air pada sistem, yaitu hujan efektif, dan laju limpasan permukaan. Ebrahimian *et al.* (2012), juga menyebutkan bahwa faktor *inflow* menentukan fluktuasi muka air tanah.

Tabel 1. Sensitifitas keluaran model atas perubahan nilai parameter sebesar 10 persen**Table 4.** Sensitivity of outputs model to the 10% increase of parameter values

Perubahan nilai parameter + 10% Jenis parameter	Perubahan keluaran model (%)			
	Muka air tanah Rerata	Muka air tanah Maksimum	Muka air tanah Minimum	Muka air tanah Maksimum-Minimum
Intersepsi curah hujan oleh kanopi dan aliran batang (F)	+2	+12	0	-10
Koefisien pemadaman tajuk (k)	+2	+11	0	-10
Koefisien limpasan air permukaan tanah (s)	+3	+19	0	-16
Porositas tanah efektif	0	-3	0	+3

Simulasi model

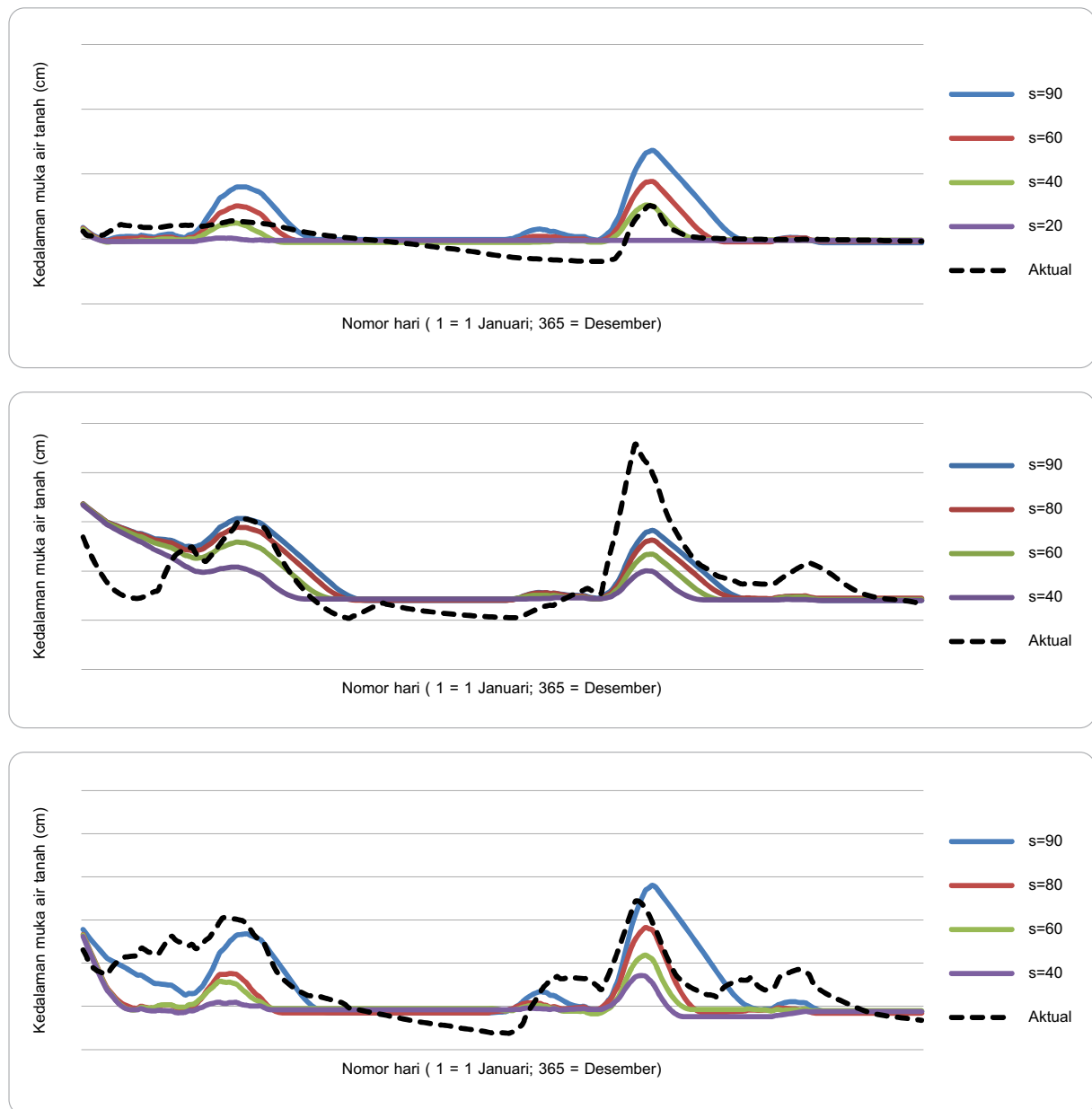
Simulasi keluaran model atas perubahan parameter-parameter yang sensitif, dilakukan untuk melihat pengaruh nilai parameter fisik dan tanaman yang mendekati hasil pengukuran aktual. Simulasi dilakukan terhadap berbagai nilai parameter limpasan air permukaan, parameter pemadaman tajuk, dan parameter intersepsi tanaman terhadap curah hujan. Hasil simulasi terhadap perubahan parameter limpasan air permukaan (*run-off*), disajikan pada Gambar 5, 6, dan 7.

Simulasi model dengan berbagai nilai parameter limpasan permukaan (*run off*), s , (Gambar 5), memperlihatkan bahwa keluaran model untuk area puncak bukit lebih sesuai terhadap hasil pengukuran aktual pada nilai s yang relatif rendah (20-40), sedangkan pada areal lereng bukit, keluaran model sesuai pada nilai s maksimum (> 90) dan pada kaki bukit, keluaran model sesuai pada nilai s moderat, yaitu antara 80 - 90. Menurut Ebrahimian *et al.* 2012, semakin tinggi nilai s , menunjukkan areal semakin ditutupi vegetasi dengan rapat, sehingga laju aliran air permukaan (*run off*) rendah, sebaliknya nilai s , yang rendah, mengindikasikan penutupan vegetasi yang terbuka, sehingga, laju aliran air permukaan semakin tinggi. Penutupan vegetasi aktual di lapangan, memperlihatkan kondisi yang sama pada areal puncak, lereng, dan kaki bukit, sehingga kondisi kelerengaan yang mempresentasikan gradien aliran air permukaan tanah pada ke-3 areal tersebut. Pada areal puncak bukit dan pada areal lereng, aliran permukaan tinggi, sedangkan pada kaki bukit, aliran air permukaan rendah.

Keluaran model muka air tanah dengan ragam nilai parameter pemadaman tajuk (k), antara 0,20

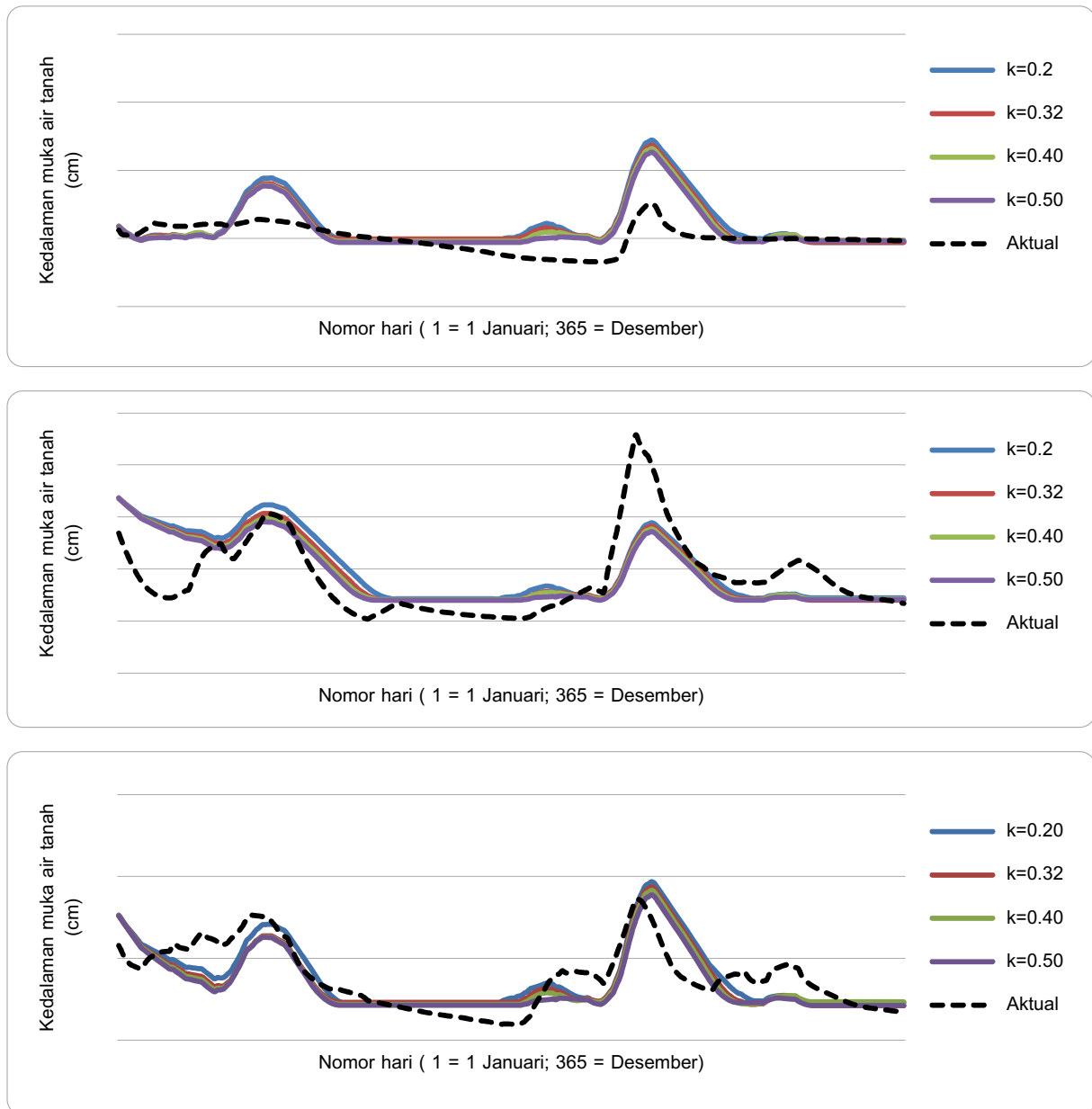
(penutupan tajuk rendah) hingga 0,50 (penutupan tajuk tinggi), menunjukkan bahwa simulasi untuk seluruh nilai k pada puncak bukit, menghasilkan keluaran model yang jauh lebih tinggi dibanding pengukuran aktual (Gambar 6). Keluaran model muka air tanah pada areal lereng, memperlihatkan simulasi untuk semua nilai k menghasilkan muka air tanah yang lebih rendah dibanding hasil pengukuran aktual, sedangkan pada areal kaki bukit, semua nilai k yang disimulasikan memperlihatkan keluaran model muka air tanah yang relatif sesuai terhadap pengukuran aktual, terutama untuk nilai k yang semakin besar ($k=0,5$). Hal-hal tersebut bahwa keluaran model relatif lebih sesuai pada areal kaki bukit, dengan topografi yang relatif datar dan simulasi nilai parameter k pada areal puncak bukit dan lereng, memperlihatkan faktor pemadaman tajuk bukan faktor utama yang mengendalikan muka air tanah.

Simulasi model keluaran muka air tanah dengan berbagai nilai parameter intersepsi curah hujan oleh tajuk tanaman (F), disajikan pada Gambar 7. Nilai parameter F yang disimulasi adalah antara 0,01 sampai dengan 0,03. Keluaran model untuk semua nilai F yang disimulasi, memperlihatkan muka air tanah pada areal puncak, lereng dan kaki bukit lebih tinggi dibanding pengukuran aktual, kecuali pencapaian aktual muka air tanah maksimum pada areal lereng lebih tinggi dibanding keluaran model. Bliss dan Comferard (2002), Jutras *et al.*, 2006, dan Marconi *et al.*, 2008, menyebutkan bahwa peningkatan kerapatan tanam vegetasi di atas suatu lahan, mempengaruhi muka air tanah pada solum tanah di bawahnya. Sedangkan, keluaran simulasi pada pertanaman kelapa sawit, muka air tanahnya lebih rendah, karena dipengaruhi gradien potensial hidrolik sepanjang garis katena.



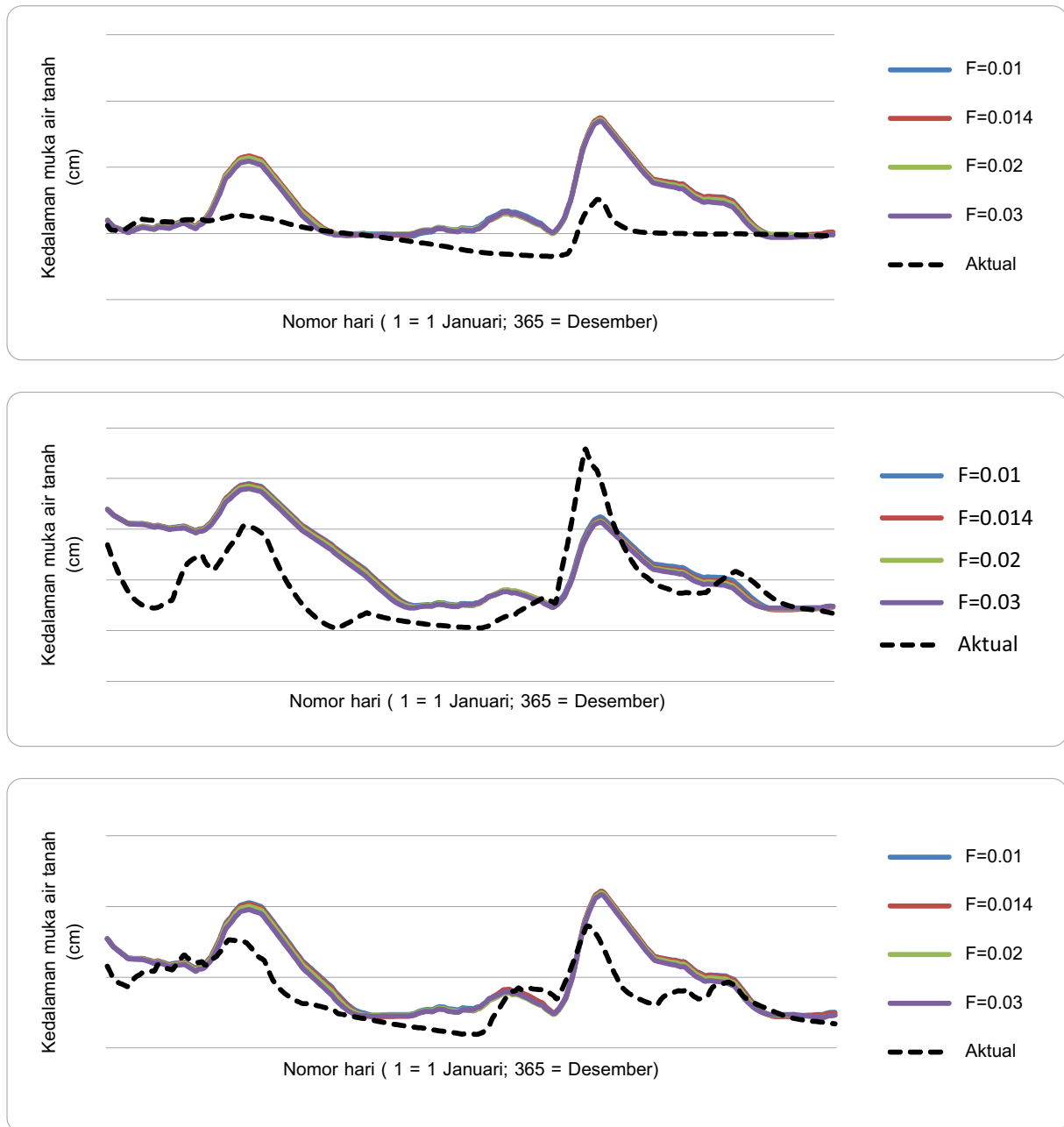
Gambar 5. Keluaran model muka air tanah dengan berbagai nilai parameter limpasan permukaan, s , terhadap pengukuran aktual pada puncak bukit (P1), lereng bukit (P2), dan kaki bukit (P3)

Figure 5. Outputs of the water table model with several values of run-off parameter, s , compared to actual values observed on the top hill area (P1), the slope hill area (P2), and the foot hill area (P3)



Gambar 6. Keluaran model muka air tanah dengan berbagai nilai parameter pepadaman tajuk, k , terhadap pengukuran aktual pada puncak bukit (P1), lereng bukit (P2), dan kaki bukit (P3)

Figure 6. Outputs of the water table model with several values of canopy extinction parameter, k , compared to actual values observed on the top hill area (P1), the slope hill area (P2), and at the foot hill area (P3)



Gambar 7. Keluaran model muka air tanah dengan berbagai nilai parameter intersepsi curah hujan, F , oleh tanaman dan muka air tanah aktual pada puncak bulkit (P1), lereng bulkit (P2), dan kaki bulkit (P3)

Figure 7. Outputs of the water table with several values of rainfall interception by plants, F , compared to actual water table on the top (P1), the sloping (P2), and the foot hill (P3)

KESIMPULAN

Keluaran model muka air tanah untuk areal di puncak bukit lebih tinggi 3 – 4% dibanding hasil pengukuran aktual, sedangkan keluaran model di lereng bukit lebih rendah 7-8% dibanding hasil pengukuran aktual, demikian juga keluaran model muka air tanah di kaki bukit lebih rendah 7-7,5% dibanding hasil pengukuran aktual. Hal tersebut disebabkan pergerakan *inflow* air di puncak bukit menuju lereng dan kaki bukit relatif lebih cepat akibat gradien potensial hidrolik sepanjang garis katena. Puncak pencapaian muka air tanah maksimum terjadi pada lereng bukit (P2), karena gradien potensial hidrolik puncak bukit ke lereng bukit (P1-P2) lebih besar dibanding gradien potensial dari lereng bukit ke kaki bukit (P1-P3). Nilai parameter laju aliran air permukaan merupakan faktor yang paling penting dalam aplikasi model permukaan air tanah pada areal berbukit dibanding parameter model lainnya. Model memperhitungkan *inflow* air di lereng dan di kaki bukit relatif lebih rendah, sehingga keluaran model muka air tanah relatif lebih rendah dibanding hasil pengukuran aktual. Sebaliknya *inflow* hasil perhitungan model di puncak bukit relatif tinggi, sehingga keluaran modelnya lebih tinggi dibanding penghitungan aktual. Deviasi penghitungan jumlah *inflow* air pada areal lereng bukit, diduga berkaitan dengan karakter gradien potensi hidrolik sepanjang garis katena. Penyesuaian parameter laju run-off dan memasukan faktor gradien potensial hidrolik ke dalam model muka air tanah diharapkan akan meningkatkan akurasi keluaran model pada areal perbukitan.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, F.R. 1994. " Henry Darcy and the Fountain of Dijon". *Ground Water*. 32(1): 23-30
- Barontim, S., M. Peli and R. Ranzi. 2012. Stream Function of a Perched Water Table in a Sloping Gradually Layered Soil: Effect of The Soil Anisotropy. EGU General Assembly, Vienna, Austria. 1195 p.
- Bisht, D., S. Jain, and M.M. Raju. 2013. Prediction of Water Table Elevation Fluctuation through Fuzzy Logic & Artificial Neural Networks. *Int Journal of Advanced Sci. and Technology*. 51: 107-119.
- Bliss, C.M. and N.B. Comerford. 2002. Forest Harvesting Influence on Water Table Dynamics in a Florida Flatwoods Landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1344-1349
- Dingman, S.L. 2015. *Capillary Rise in Physical Hydrology* 3rd Ed. Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois. 643 p
- Ebrahimian, M., A.A.B. Nuruddin, Moh. Amin B. Mohd. Soom, A. Mohd. Sood, L. J. Neng. 2012. Runoff Estimation in Step Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Method. *Pol. J. Environ. Stud* 21(5): 1191-1202
- Harahap, I.Y. dan W. Darmosarkoro. 1999. Pendugaan Kebutuhan Air untuk Pertumbuhan Kelapa Sawit di Lapang dan Aplikasinya dalam Pengembangan Sistem Irigasi. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit* 7(2) : 87 – 104
- He, X., M.J. Vepraskas, R.W. Skaggs, and D.L. Lindbo. 2002. Adapting a Drainage Model to Simulate Water Table Levels in Coastal Plain Soils. *Soil Science Society of America Journal* 66:1722-1731
- Iwalewa, T.M., Abdala S. Elamin, and S.I. Kaka. 2016. A Couple Model Simulation Assaessment of Shalow Water-table Rise in a Saudi Arabian Coastal City. *Journal of Hydro-Environment Reserach*. 12: 46-58
- Jayakody, P., P.B. Parajuli, G.F. Sassenrath, and Y. Quyang. 2013. Relationships Between Water Table and Model Simulated ET. *Groundwater*. 8 p.
- Jutras, S., A.P. Plamondon, H. Hokka, and J. Begin. 2006. Water table changes following precommercial thinning on post-harvest drained wetlands. *Forest Ecology and Management*. Vol. 235. Issues1-3:252-259
- Lubis, M.E.S., I.Y. Harahap, T.C. Hidayat, Y. Pangaribuan, E.S. Sutarta, Z.A. Rahman, Christopher Teh, and M.M. Hanafi. 2014. Changes in Water Table Depth I an Oil Palm Plantation and its Surrounding Regions in Sumatera, Indonesia. *Journal of Agronomy* 13 (3): 140-146.
- Lubis, M.E.S. 2016. Water Dynamics and Ground Water Quality Assessment I an Oil Palm Ecosystem. Ph.D Thesis, Universiti Putra Malaysia. 123 p

- Tomasz and A. Walega. 2015. Estimation of CN Parameter for Small Agricultural Watershed using Asymptotic Function. *Water* 7: 939-955
- Marconi, V., M. Antonellini, M. Laghi, A. Minchio, and D. Savelli. 2008. A water table fluctuations model in sandy soil below a coastal pine forest. *Geophysical Research* Vol 10: 1-10
- Mc Janet, D. 2007. Water table and transpiration dynamics in seasonally inundated *Melaleuca quiquenervia*, north Queensland, Australia. Research Article. CSIRO Land and Water, Australia
- Park, E. and J.C. Parker. 2008. A Simple Model for Water Table Fluctuation in Response to Precipitation. *Journal of Hydrology*. 356(3-4): 344-349
- Racine, C., S.J. Gumire, C. Paniconi, C. Dupuis, J.Lafond, C. Scudeler, and M. Camporese. 2017. Forecast model for a Water Table Control System in Cranberry Production. EGU2017-19612.
- Ramirez, J.G. and R.V. Gonzales. 2013. Modeling of Water Table Level Response Due to Extraordinary Precipitation Events: The Case of the Guadalupe Valley Aquifer. *Int. Journal of Geosciences*.4:950-958
- Rosa, J.A., A.G. Smajstra, K.L. Campbell, and S.J. Locascio. 2002. Evaluation of a computer model to simulate water table response to subirrigation. *Pesq. agropec. bras.*37 (12): 9 p.
- Sahu, P.C. 2017. Groundwater Resource Conservation and Augmentation in Hard Rock Terrain: An Integrated Geological and Geo-Spatial Approach. *Int. Journal of Conservation Sci.* 8(1):145-156
- Singh, A. 2012. Development and Application of a Watertable Model for the Assessment of Waterlogging in Irrigated Semi-arid Regions. *Water Resource Management*. 26(15): 4435-4448
- Subramani, T. and G. Kaliappan. 2016. Water Table Countour For Salem District Tamilnadu using GIS. *Int. Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Sci.* 5(3): 147-158
- Tsubo, M., Su Fukai, B. Bouman, and D. Hannpichitvitaya. 2005. Estimating Percolation and Lateral Water Flow on Sloping Land in Rainfed Lowland Rice Ecosystem. *Plant Prod.Sci.* 8(3): 354-357
- U.S. Geological Survey. 2013. Estimated Depth to Ground Water and Configuration of the Water Table. *Scientific Investigations Report* 2008-5059.5 p