



## PENDUGAAN KOMPONEN KESEIMBANGAN AIR DI LAHAN SAWAH DENGAN *LINEAR PROGRAMMING*

### *ESTIMATING WATER BALANCE COMPONENTS IN PADDY FIELDS BY LINEAR PROGRAMMING*

Oleh:

**Chusnul Arif<sup>1)</sup>✉, Budi Indra Setiawan<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor  
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

Korespondensi Penulis, email: ✉chusnul\_arif@apps.ipb.ac.id,

Naskah ini diterima pada 20 September 2019; revisi pada 13 Desember 2019;  
disetujui untuk dipublikasikan pada 20 Desember 2019

#### **ABSTRACT**

*Managing water in the paddy fields, water balance analysis is usually performed to determine the effectiveness of water used. However, with limited advanced instrumentation, time and cost, some water balance components are not measured. This study proposed a novel method, Linear Programming (LP) model, to estimate non-measurable water balance components. The aims of this study were to develop LP model in estimating non-measurable water balance components such as irrigation, runoff and percolation with measured soil moisture data in non-flooded irrigation, and then to evaluate performance of the model by comparing measured and estimated soil moisture. This study was carried out based on two season field experiments of non-flooded irrigation with System of Rice Intensification (SRI) in NOSC, Sukabumi West Java during 20 August to 15 December 2011 (first season) and 22 March to 5 July 2012 (second season). The developed LP model has the objective function by minimizing the differences between total measured and estimated soil moisture. In addition, the LP model has also constraint function and initial condition that were formulated based on actual field conditions. The results showed the LP model estimated non-measurable water balance accurately with the indicators of  $R^2 > 0.85$  ( $p$  value  $< 0.01$ ) and percentage error less than 8%. Based on the estimation model results, irrigation only contributed 34-38% of inflow, while crop evapotranspiration and percolation contributed of 40-44% and 11-15%, respectively. Precipitation and runoff were the most contributors of inflow and outflow from the fields. By the current model, water use efficiency and water productivity can be determined with estimated irrigation.*

**Keywords:** *non-flooded irrigation, water balance, linear programming, paddy fields, objective function*

#### **ABSTRAK**

Dalam pengelolaan air di lahan sawah, analisis keseimbangan air biasanya digunakan untuk menganalisis efektifitas pemberian air irigasi. Akan tetapi, seringkali dengan keterbatasan peralatan, waktu, dan biaya tidak semua komponen keseimbangan air dapat diukur. Makalah ini menyajikan metode *Linear Programming* (LP) untuk menduga komponen keseimbangan air di lahan sawah yang tidak terukur. Adapun tujuan studi ini adalah mengembangkan model LP untuk menduga komponen keseimbangan air di lahan sawah seperti irigasi, limpasan dan perkolasi dengan menggunakan data perubahan kelembaban tanah khususnya untuk irigasi tidak tergenang, mengevaluasi performansi model dengan membandingkan data hasil pendugaan dan pengukuran. Studi dilakukan berdasarkan hasil eksperimen dua musim tanam budidaya padi irigasi tidak tergenang dengan *System of Rice Intensification* (SRI) di NOSC, Sukabumi Jawa Barat dari tanggal 20 Agustus - 15 Desember 2011 (musim pertama) dan 22 Maret - 5 Juli 2012 (musim kedua). Model LP yang dikembangkan memiliki fungsi tujuan untuk meminimalisir total selisih kelembaban tanah hasil pengukuran dan pendugaan model. Selain itu, model LP juga memiliki fungsi batas dan kondisi awal yang ditentukan berdasarkan kondisi aktual di lapang. Hasilnya menunjukkan bahwa model LP dapat menduga komponen keseimbangan air dengan akurat dengan indikator nilai  $R^2 > 0,85$  ( $p$  value  $< 0,01$ ) dan persen *error* dibawah 8%. Berdasarkan hasil pendugaan model, komponen irigasi berkontribusi hanya 34-38% dari total air masuk, sedangkan komponen evapotranspirasi tanaman dan perkolasi berkontribusi sebesar 40-44% dan 11-15% dari total air yang keluar. Hujan dan limpasan merupakan komponen yang paling besar berkontribusi pada air masuk dan keluar. Dengan metode ini, maka parameter yang membutuhkan data yang tidak terukur dapat ditentukan seperti efisiensi penggunaan air dan produktivitas air yang membutuhkan data irigasi dalam penentuannya.

**Kata kunci:** *irigasi tidak tergenang, keseimbangan air, linear programming, padi sawah, fungsi obyektif*

## I. PENDAHULUAN

Dalam pengelolaan air di lahan sawah yang efektif dan efisien, perlu diperhatikan beberapa faktor seperti kondisi iklim setempat, jenis dan tekstur tanah, faktor tanaman dan ketersediaan sumberdaya air. Seiring dengan perubahan iklim yang dirasakan akhir-akhir ini, kebutuhan air tanaman yang ditentukan oleh kondisi iklim menjadi sulit dan kurang akurat. Untuk menghindari kekurangan air dan kekeringan, petani umumnya mengenangi sawahnya secara terus menerus dengan tinggi genangan antara 2-5 cm. Cara ini juga diyakini efektif untuk mencegah pertumbuhan gulma pada masa vegetatif tanaman.

Akan tetapi, seiring dengan berkurangnya sumber daya air akibat perubahan iklim dan bertambahnya pemakaian air untuk keperluan industri dan domestik, cara pemberian air dengan genangan secara terus menerus tidak efektif bahkan cenderung terjadi pemborosan karena tanaman diberikan air melebihi kebutuhannya (Arif, Setiawan, Sofiyuddin, & Martief, 2013). Cara tersebut juga tidak serta merta meningkatkan produksi padi sawah bahkan untuk beberapa kasus cara tersebut menghasilkan produksi yang lebih rendah daripada cara lain, seperti dilaporkan oleh Lin, Zhu, & Lin (2011); Sato, Yamaji, & Kuroda (2011); dan Zhao, Wu, Wu, & Li (2011). Selain itu, cara tersebut juga terbukti tidak efektif karena dapat meningkatkan kehilangan air akibat perkolasi (Bouman, Peng, Castañeda, & Visperas, 2005; Tan *et al.*, 2013) maupun limpasan permukaan (*runoff*) (Liang *et al.*, 2013). Dari sisi lingkungan, cara tersebut dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca khususnya gas metan (CH<sub>4</sub>), yang merupakan salah satu gas penyebab pemanasan global (Alberto *et al.*, 2014; Yang, Peng, Xu, Luo, & Li, 2012)

Oleh sebab itu, beberapa teknologi irigasi hemat air mulai dikenalkan dan diterapkan di Indonesia. Meskipun tidak mudah diterima petani karena pemahaman selama ini bahwa menanam padi harus menggunakan air irigasi tergenang terus menerus, tetapi teknologi irigasi hemat air perlu terus disosialisasikan dan digalakkan. Salah satu contoh irigasi hemat air adalah irigasi berselang (*intermittent irrigation*) (Won, Choi, Lee, Son, & Chung, 2005). Teknologi hemat air ini biasanya dipadukan dengan budidaya alternatif seperti *System of Rice Intensification* (SRI). Berdasarkan hasil penelitian di beberapa negara, diantaranya teknologi ini mampu menghemat air 38,5% di Irak (Hameed, Mosa, & Jaber, 2011), 55,6% di Korea (Choi, Park, Park, & Lim, 2013), dan 40% di Indonesia (Sato *et al.*, 2011).

Untuk menganalisis efektifitas pemberian air irigasi khususnya irigasi berselang terhadap pemafaatan air oleh tanaman biasanya dilakukan analisis keseimbangan air (*water balance analysis*). Prinsip keseimbangan air ini menyatakan bahwa perubahan simpanan air di lahan yang biasa direpresentasikan dengan tinggi muka air maupun kelembaban tanah setara dengan jumlah air yang masuk melalui hujan dan irigasi dikurangi dengan air yang keluar dari lahan baik melalui evapotranspirasi, perkolasi, limpasan, drainase dan rembesan. Oleh sebab itu, untuk mengetahui seluruh komponen keseimbangan air tersebut perlu dilakukan pengukuran dengan menggunakan peralatan yang bermacam-macam. Hujan diukur dengan *rain gauge*, evapotranspirasi diukur dengan lisimeter, perkolasi dengan perkolasi meter (*infiltrometer*), irigasi, limpasan dan drainase dengan *water meter* maupun peralatan lainnya.

Akan tetapi, seringkali peralatan yang ada tidak tersedia karena berbagai macam kendala. Pengukuran seluruh komponen tersebut cukup rumit, membutuhkan biaya yang tidak sedikit dan memerlukan waktu dan tenaga lebih. Oleh sebab itu, ketika pengukuran peralatan pengukuran terbatas dan berbagai kendala tersebut, maka perlu dilakukan proses pendugaan komponen keseimbangan air tersebut.

Pendugaan dapat dilakukan dengan berbagai model hidrologi seperti Hydrus (Tan *et al.*, 2013; Tan, Shao, Gu, & Liu, 2015), Oryza2000 (Arora, 2006; Bouman *et al.*, 2007), SAWAH (Wopereis, Bouman, Kropff, ten Berge, & Maligaya, 1994), SWAT (Sakaguchi, Eguchi, & Kasuya, 2014) dan lain sebagainya. Model-model pendugaan tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Namun yang pasti, untuk bisa menerapkan model-model tersebut diperlukan perangkat lunak khusus yang harus dipasang terlebih dahulu bahkan fitur-fitur tambahan bisa berbayar.

Oleh sebab itu, diperlukan metode pendugaan yang lain tanpa harus memasang perangkat lunak baru, tetapi cukup dengan menggunakan aplikasi yang umumnya digunakan oleh masyarakat pada umumnya seperti MS Excel. Program Linear atau *Linear Programming* (LP) merupakan salah satu alternatif model pendugaan yang bisa diterapkan dengan menggunakan aplikasi MS Excel. LP merupakan metode kuantitatif dengan menggunakan persamaan matematika tertentu dengan setidaknya menerapkan dua fungsi, yaitu fungsi tujuan dan fungsi batasan. LP merupakan salah satu metode optimasi untuk menentukan parameter tertentu melalui proses pencarian parameter dengan batasan tertentu sehingga

didapatkan fungsi tujuan yang optimal. Dengan definisi ini, maka LP dapat digunakan untuk mencari dan menduga parameter atau komponen keseimbangan air di lahan sawah dengan fungsi tujuan dan batasan tertentu. Pada aplikasi MS Excel metode ini dapat diterapkan dengan melakukan penambahan fitur (*Add in*) Solver. Metode ini sudah diterapkan di berbagai bidang seperti bidang perdagangan saham (Soemapradja, Logahan, & Ongowarsito, 2014), dan farmasi (Zhang, Huo, Zhou, & Xie, 2010) maupun bidang industri dimana sistem input-outputnya terkontrol dengan baik. Sedangkan untuk memodelkan kejadian alam yang kompleks dan tidak terkontrol dengan baik seperti pada bidang pengelolaan air, metode ini telah diterapkan untuk menduga koefisien tanaman dengan hasil yang akurat dibandingkan dengan metode standar (Arif *et al.*, 2012). Oleh sebab itu, LP merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan sebagai solusi dalam memodelkan kejadian alam seperti keseimbangan air dalam lahan pertanian tentu dengan batasannya.

Adapun tujuan dari makalah ini adalah mengembangkan model LP untuk menduga komponen keseimbangan air di lahan sawah seperti irigasi, limpasan dan perkolasi dengan menggunakan data perubahan kelembaban tanah khususnya untuk irigasi tidak tergenang, mengevaluasi performansi model dengan membandingkan data hasil pendugaan dan pengukuran

## II. METODOLOGI

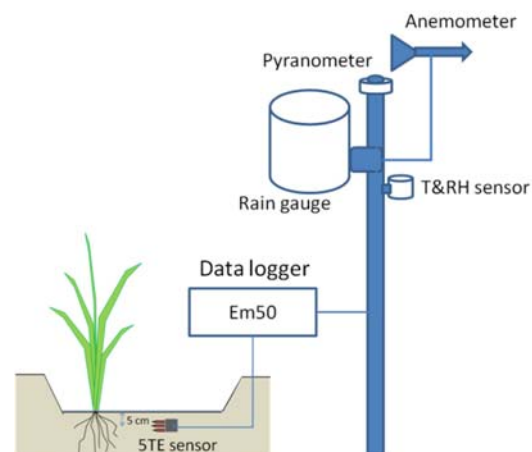
### 2.1. Percobaan Lapang

Data untuk pengembangan dan validasi model pendugaan komponen keseimbangan air di lahan sawah berdasarkan percobaan lapang di lahan percobaan milik *Nusantara Organic SRI Center* (NOSC), Nagrak, Sukabumi, Jawa Barat (Gambar 1). Percobaan dilakukan selama dua musim tanam, musim tanam pertama antara tanggal 20 Agustus sampai 15 Desember 2011 pada musim kemarau-hujan, sedangkan musim tanam kedua tanggal 22 Maret sampai 5 Juli 2012 pada musim hujan-kemarau. Terdapat 2 petak sawah percobaan, dimana ukuran tiap petak adalah  $4 \times 4 \text{ m}^2$ .

Masing-masing petak ditanami dengan padi varietas *Sintanur* dengan metode budidaya yang sama, yaitu dengan mengadopsi prinsip SRI seperti penggunaan bibit muda dengan jarak tanam  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ , dan penggunaan pupuk kompos dengan dosis  $1 \text{ kg/m}^2$ . Penelitian ini fokus pada tata kelola air yang lebih hemat, maka yang membedakan perlakuan antar petak adalah sistem irigasinya.



**Gambar 1** Lokasi Penelitian: Ukuran Masing-Masing Petak  $4 \times 4 \text{ m}^2$



**Gambar 2** Skema Pengukuran di Lapangan

Sistem irigasi yang diterapkan adalah menjaga tinggi muka air pada permukaan tanah (jenuh, macak-macak) pada umur tanaman 0-20 Hari Setelah Tanam (HST) untuk seluruh petak, kemudian setelah itu tinggi muka air dijaga 5 cm di bawah permukaan tanah untuk Petak 1, dan 10 cm di bawah permukaan tanah untuk Petak 2. Meskipun dijaga sesuai dengan rencana tersebut, tetapi pada kondisi aktualnya tinggi muka air bisa berfluktuasi karena tidak dikendalikan dengan sistem kendali otomatis, sehingga irigasi yang diberikan juga berfluktuatif.

## 2.2. Pengukuran Lapangan

Untuk pengukuran di lapangan, beberapa sensor digunakan seperti skema yang disajikan pada Gambar 2. Pada masing-masing petak dipasang sensor kelembaban tanah (5-TE) pada kedalaman kurang lebih 5 cm dan dihubungkan dengan Em50 data *logger* untuk menyimpan data pengukuran, sedangkan untuk sensor cuaca terdiri dari *rain gauge* untuk pengukuran curah hujan, *pyranometer* untuk pengukuran radiasi matahari, anemometer untuk pengukuran arah dan kecepatan angin, serta sensor untuk pengukuran suhu dan kelembaban udara yang terhubung dengan *console* untuk penyimpanan data. Interval pengukuran diset setiap 30 menit.

Data cuaca digunakan untuk menentukan evapotranspirasi acuan menggunakan persamaan Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) yang merupakan model standar FAO dalam penentuan evapotranspirasi dengan persamaan berikut ini:

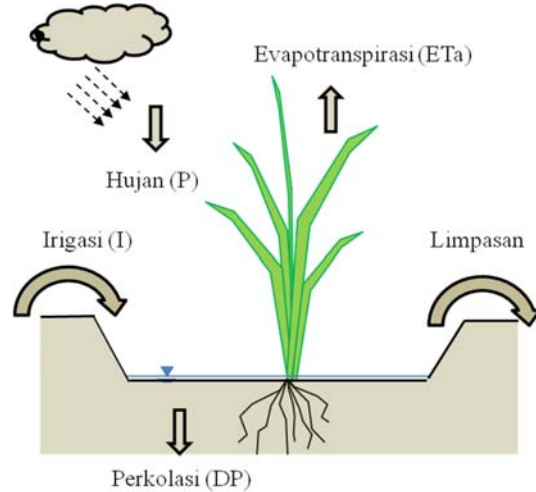
$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana  $ET_o$  adalah evapotranspirasi acuan (mm),  $R_n$  adalah radiasi net pada permukaan tanaman ( $MJ/m^2/hari$ ),  $G$  adalah fluks densitas panas dari tanah ( $MJ/m^2/hari$ ),  $T$  adalah suhu udara rata rata ( $^{\circ}C$ ),  $u_2$  is adalah kecepatan angin pada ketinggian 2 m (m/s),  $e_s$  adalah tekanan uap jenuh (kPa),  $e_a$  adalah tekanan uap aktual (kPa),  $\Delta$  adalah slope kurva tekanan uap ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ ), dan  $\gamma$  adalah konstanta psychrometrik ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ ).

## 2.3. Pengembangan Model

*Linear Programming* (LP) yang dikembangkan memiliki fungsi tujuan dan fungsi pembatas. Adapun fungsi tujuan dari LP ini adalah:

$$FT = \sum_{t=1}^n |S_o(t) - S_m(t)| \dots\dots\dots (2)$$



Gambar 3 Skema Keseimbangan Air di Lahan

Dimana FT adalah adalah fungsi tujuan,  $S_o$  adalah kelembaban tanah hasil pengukuran (dalam mm kedalaman air),  $S_m$  adalah kelembaban tanah hasil pendugaan model (mm),  $t$  adalah waktu (hari),  $n$  adalah jumlah data.  $S_m$  dihitung dengan persamaan keseimbangan air sesuai skema pada Gambar 3 berikut ini:

$$S_m(t) = S_m(t - 1) + \Delta S(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta S(t) = P(t) + I(t) - Qr(t) -$$

$$DP(t) - ETc(t) \dots\dots\dots (4)$$

Dimana  $\Delta S$  adalah selisih kelembaban tanah hasil pendugaan (mm),  $P$  adalah hujan (mm),  $I$  adalah irigasi (mm),  $Qr$  adalah limpasan,  $DP$  adalah perkolasi (mm) dan  $ETc$  adalah evapotranspirasi tanaman (mm).

LP akan mencari nilai  $I$ ,  $Qr$ ,  $DP$  dan  $ETc$  dengan fungsi pembatas berikut ini:

$$ETc_{min} \leq ETc(t) \leq ETc_{max} \dots\dots\dots (5)$$

$$Qr(t) \geq 0; I(t) \geq 0; DP(t) \geq 0 \dots\dots\dots (6)$$

Dimana  $ETc_{min}$  adalah evapotranspirasi tanaman minimum (mm),  $ETc_{max}$  adalah evapotranspirasi tanaman maksimum (mm) berdasarkan standar FAO.

Untuk bisa melakukan pendugaan, nilai parameter yang diduga harus diberikan nilai awal (*initial condition*). Adapun nilai awal yang dimasukkan pada masing-masing parameter adalah sebagai berikut:

### 2.3.1. Evapotranspirasi Tanaman

Nilai awal  $ETc$  ditentukan berdasarkan persamaan berikut ini (Allen *et al.*, 1998):

$$ETc_{ini}(t) = Kc_{ini}(t) \times ET_o(t) \dots\dots\dots (7)$$

Dimana  $ETc_{ini}$  adalah nilai evapotranspirasi tanaman awal (mm),  $Kc_{ini}$  adalah nilai koefisien tanaman awal yang ditentukan berdasarkan prosedur standar FAO (Allen *et al.*, 1998). Nilai  $Kc_{ini}$  ditentukan berdasarkan umur dan pertumbuhan tanaman padi setiap fasenya.

### 2.3.2. Perkolasi

Perkolasi merupakan fluks aliran air secara vertikal pada kondisi tanah jenuh ke dalam lampiran tanah yang lebih dalam. Perkolasi merupakan fungsi dari tekstur tanah dan nilainya berkurang seiring berkurangnya genangan air (Kalita, Kanwar, & Rahman, 1992; Kukul & Aggarwal, 2002) seperti penerapan irigasi berselang (van der Hoek *et al.*, 2001). Irigasi berselang dapat menurunkan perkolasi melalui penurunan tekanan hidrostatik, dimana semakin besar kondisi kelembaban tanah, maka semakin tinggi tekanan hidrostatik yang dapat meningkatkan laju perkolasi dan juga sebaliknya.

Untuk kondisi tergenang dengan tipe tekstur tanah yang serupa dengan tekstur tanah di lokasi penelitian, besarnya perkolasi antara 1-5 mm/hari (Bouman *et al.*, 2007; Guerra, Bhuyain, Tuong, & Barker, 1998; van der Hoek *et al.*, 2001). Oleh sebab itu, nilai awal perkolasi diberikan nilai dibawah 5 mm/hari tergantung dari kondisi kelembaban tanahnya, semakin rendah maka nilai awal perkolasi semakin kecil.

### 2.3.3. Limpasan

Pada lahan padi sawah, umumnya limpasan merupakan fungsi dari curah hujan, dimana semakin besar curah hujan maka limpasan semakin besar (Chen, Pi, & Huang, 2003). Berdasarkan hal tersebut, nilai awal limpasan diberikan ketika nilai curah hujan lebih besar dari evapotranspirasi acuan maksimal selama musim tanam, sedangkan pada saat curah hujan lebih rendah, maka diasumsikan tidak ada limpasan. Berdasarkan keterangan tersebut, maka nilai limpasan awal diberikan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$Qr_{ini}(t) = 0 \text{ apabila } P(t) < ET_{Omax} \dots\dots\dots (8)$$

$$Qr_{ini}(t) = P(t) - ET_{Omax} \text{ apabila } P(t) \geq ET_{Omax} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana  $ET_{Omax}$  adalah nilai evapotranspirasi acuan maksimum selama musim tanam (mm).

### 2.3.4. Irigasi

Irigasi hanya diberikan ketika tidak terjadi limpasan dan besarnya curah hujan tidak memenuhi kebutuhan air tanaman. Berdasarkan

hal tersebut, maka nilai awal irigasi diberikan dengan kondisi berikut ini:

$$I_{ini}(t) = 0 \text{ apabila } Qr_{ini}(t) > 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$I_{ini}(t) = ETc_{ini}(t) - P(t) \text{ apabila } Qr_{ini}(t) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

Dimana  $I_{ini}$  adalah nilai awal irigasi (mm)

Untuk pendugaan komponen keseimbangan air ini, jumlah data maksimum yang bisa diduga dalam satu proses adalah 200 data, maka pendugaan dibagi menjadi empat proses berdasarkan fase pertumbuhan tanaman, yaitu fase awal, vegetatif, tengah dan akhir musim berdasarkan standar FAO (Allen *et al.*, 1998).

## 2.4. Batasan dan Validasi Model

Secara ideal, data pendugaan keempat komponen keseimbangan air dapat dibandingkan dengan data pengukuran untuk mengevaluasi performansi dari model yang dikembangkan. Akan tetapi, karena keterbatasan peralatan yang digunakan untuk mengukur keempat parameter tersebut, maka evaluasi performansi dilakukan dengan membandingkan data pengukuran kelembaban tanah dengan data pendugaannya berdasarkan Persamaan 3 dan 4. Selain itu, pengaruh perlakuan sistem irigasi terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil produksi tidak dibahas dalam makalah ini.

Indikator perbandingan yang digunakan adalah koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan derajat signifikansi ( $p$  value). Batasan nilai  $R^2$  agar model dapat diterima adalah 0,85 (Luo, Khan, Cui, & Peng, 2009). Selain itu, model juga dapat diterima apabila jumlah air yang masuk dan keluar relative sama. Indikator yang digunakan adalah persen *error* (de) dengan persamaan berikut ini:

$$de = \frac{(Outflow - Inflow)}{Outflow} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

Dimana outflow adalah total air yang keluar lahan (mm) dan inflow adalah total air yang masuk ke lahan (mm).

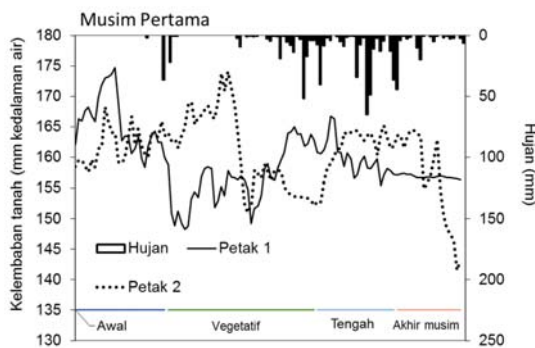
## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Kondisi Kelembaban Tanah Aktual

Kondisi aktual kelembaban tanah (dalam mm kedalaman air) pada musim pertama dan musim kedua dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Terlihat bahwa kelembaban tanah pada kedua musim baik Petak 1 dan Petak 2 sangat berfluktuatif. Meskipun sistem irigasi dijaga pada ketinggian tertentu seperti dijelaskan pada sub bab sebelumnya, akan tetapi kondisi di lapangan sangat dinamis karena faktor alam seperti hujan



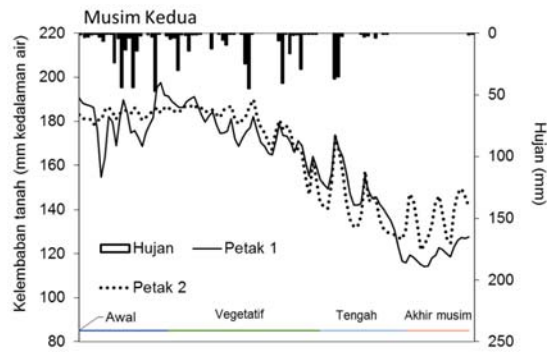
evapotranspirasi yang terjadi. Hal ini yang menyebabkan nilai kelembaban tanah tanah berfluktuatif. Selain itu, tinggi muka air dijaga secara manual oleh operator tanpa menggunakan sistem kontrol otomatis sehingga memungkinkan tinggi air di lapangan tidak sesuai dengan yang diinginkan. Pada musim pertama, Petak 2 yang seharusnya memiliki ketinggian muka air lebih rendah pada awal fase vegetatif memiliki kelembaban tanah yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa ketinggian muka air tidak dapat dijaga dengan baik pada fase ini. Hal yang serupa juga terjadi pada dua fase terakhir seperti terlihat pada Gambar 4. Kejadian hujan banyak terjadi pada setelah fase vegetatif.



**Gambar 4** Kondisi Kelembaban Tanah Aktual di Masing-Masing Petak pada Musim Pertama

Sedangkan pada musim kedua, kedua petak menunjukkan kecenderungan kelembaban tanah yang hampir sama dimana kejadian hujan banyak terjadi pada fase awal dan vegetatif (Gambar 5). Secara umum kondisi kelembaban tanah pada fase awal dan vegetatif lebih tinggi dibandingkan pada dua fase terakhir. Tingginya kelembaban tanah pada awal dan vegetatif ini sangat penting khususnya daerah perakaran dalam menyediakan air yang cukup untuk pertumbuhan akar, batang dan daun (Arif, Setiawan, & Mizoguchi, 2014). Pada musim tanam ini fase awal mulai dari 1 sampai 24 HST, sedangkan fase vegetatif selama 40 hari dari 25 – 64 HST.

Pada musim kedua ini, memasuki fase tengah dan akhir musim suplai air irigasi dapat dikurangi dengan menurunkan kelembaban tanah. Pada fase tengah musim pengurangan air diperlukan untuk menghindari dan mengurangi jumlah bulir yang tidak produktif (Arif *et al.*, 2014). Pada musim tanam ini, fase tengah musim membutuhkan waktu 23 hari dari 65 – 87 HST. Sedangkan fase akhir ditempuh dalam 18 hari dari 88 – 105 HST.



**Gambar 5** Kondisi Kelembaban Tanah Aktual di Masing-Masing Petak pada Musim Kedua

### 3.2. Pendugaan Komponen Keseimbangan Air

Tabel 1 menunjukkan rangkuman hasil pendugaan komponen keseimbangan air menggunakan model LP. Hasil validasi menunjukkan nilai yang dapat diterima baik untuk koefisien determinasi ( $R^2$ ) maupun  $p$  value.

Sesuai dengan nilai batasan model yang dapat diterima dengan  $R^2 > 0,85$  ( $p$  value  $< 0,01$ ), maka model LP dapat memenuhinya untuk seluruh petak pada kedua musim tanam yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa nilai kelembaban tanah hasil pendugaan mendekati hasil pengukuran. Hal ini juga dapat dilihat pada Gambar 6 sampai 9 dimana kecenderungan hasil pendugaan sangat mendekati dengan kecenderungan hasil pengukuran.

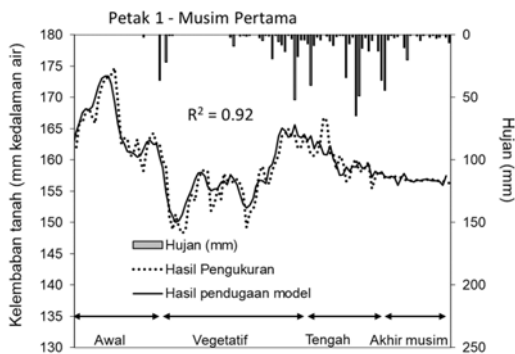
Pada petak 1 untuk musim pertama (Gambar 6), fase awal kelembaban tanah dapat diduga dengan sangat akurat dengan indikasi nilai kelembaban tanah hasil pendugaan berimpit dengan nilai kelembaban tanah hasil pengukuran. Nilai pendugaan kurang akurat ketika data kelembaban tanah hasil pengukuran berubah sangat drastis peningkatan dan penurunannya seperti terjadi pada fase vegetatif dan tengah musim. Meskipun demikian, secara umum nilai  $R^2$  pada petak ini adalah 0,92, sehingga dapat diterima (Luo *et al.*, 2009).

Berbeda dengan petak 1, pada petak kedua nilai kelembaban tanah hasil pendugaan pada fase awal agak berbeda dengan indikasi nilai pendugaan tidak berimpit dengan nilai pengukuran. Hal ini terjadi ketika terjadi penurunan nilai kelembaban tanah yang drastis dari 168 mm ke 158 mm selama 4 hari dari 9 HST (Gambar 7). Sedangkan pada fase berikutnya, kelembaban tanah dapat diduga dengan lebih akurat. Nilai  $R^2$  pada petak kedua ini adalah 0,88 yang merupakan nilai terendah dibandingkan dengan petak lain.

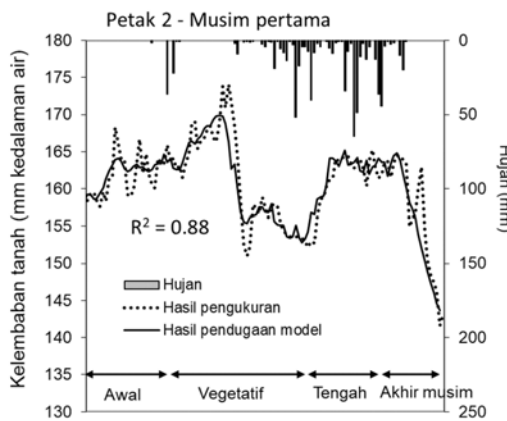
**Tabel 1** Pendugaan Komponen Keseimbangan Air di Lahan Sawah

Parameter	Perlakuan Irigasi			
	Musim Pertama		Musim Kedua	
	Petak 1	Petak 2	Petak 1	Petak 2
Validasi model:				
R <sup>2</sup>	0,92	0,88	0,97	0,94
p value	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Air masuk:				
Hujan (mm)*	626	626	551	551
Irigasi (mm)**	394,1	382,7	295,1	304,9
Total (mm)	1020,1	1008,7	846,1	855,9
Air keluar:				
Limpasan (mm)**	453,3	439,2	427,1	417,2
ETc (mm)**	452,1	454,4	356,1	355,2
Perkolasi (mm)**	117,8	130,9	125,7	122,7
Total (mm)	1023,2	1024,5	908,9	895,1
de (%)	0,31%	1,55%	6,91%	4,39%

\*pengukuran, \*\*pendugaan



**Gambar 6** Perbandingan Kelembaban Tanah Hasil Pengukuran dan Pendugaan di Petak 1 Musim Pertama

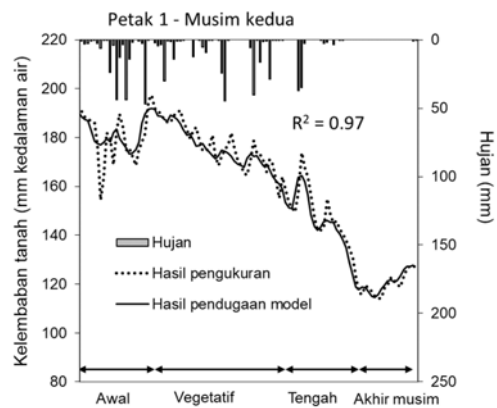


**Gambar 7** Perbandingan Kelembaban Tanah Hasil Pengukuran dan Pendugaan di Petak 2 pada Musim Pertama

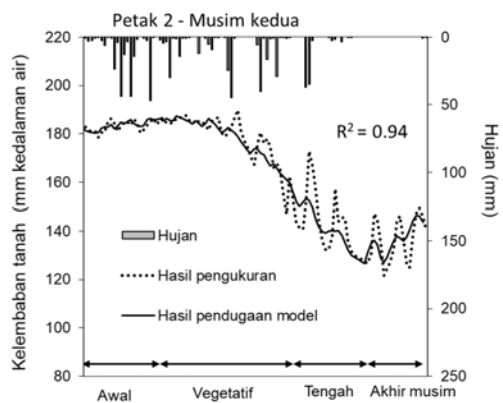
Hasil pendugaan pada petak 1 musim kedua menunjukkan kecenderungan yang sama antara pengukuran dan pendugaan model (Gambar 8). Pendugaan sangat akurat pada fase vegetatif

sampai akhir musim dimana nilai hasil pendugaan berimpit dengan hasil pengukuran. Secara umum, nilai R<sup>2</sup> pada petak 1 ini tertinggi dibandingkan petak lain sebesar 0,97. Akurasi tertinggi khususnya pada akhir musim ketika ketika kejadian hujan tidak ada.

Hasil pendugaan pada petak kedua hampir sama dengan pada petak pertama dengan akurasi yang tinggi dengan R<sup>2</sup> sebesar 0,94. Pendugaan sangat akurat pada fase awal dan vegetatif dimana nilai hasil pendugaan berimpit dengan hasil pengukuran. Akan tetapi, pada fase tengah dan akhir musim, pendugaan kurang akurat karena terjadi fluktuasi yang cukup tinggi ketika terjadi hujan. Secara umum, pendugaan kurang akurat terjadi ketika peningkatan atau penurunan kelembaban tanah sangat drastis. Ini terjadi pada semua petak. Hal ini menunjukkan bawah *overestimation* atau *underestimation* terjadi ketika perubahan kelembaban tanah sangat berfluktuatif.



**Gambar 8** Perbandingan Kelembaban Tanah Hasil Pengukuran dan Pendugaan di Petak 1 pada Musim Kedua



**Gambar 9** Perbandingan Kelembaban Tanah Hasil Pengukuran dan Pendugaan di Petak 2 pada Musim Kedua

Dengan  $p$  value  $< 0,01$  menunjukkan bahwa korelasi kelembaban tanah hasil pendugaan memiliki hubungan yang signifikan dengan hasil pengukuran. Nilai ini juga menunjukkan bahwa model LP dengan data pengukuran yang minimum tersedia dapat menduga komponen yang tidak terukur. Hal ini juga didukung dengan nilai persen error yang kurang dari 8% dari jumlah air masuk dan air keluar, yang mengindikasikan bahwa pendugaan dapat dilakukan dengan baik.

Sistem irigasi yang diterapkan adalah sistem irigasi tidak tergenang. Dari hasil pendugaan menunjukkan bahwa hujan menjadi komponen utama air yang masuk, sedangkan irigasi hanya 34-38% dari total air yang masuk. Hal ini menunjukkan bahwa tipikal iklim tropis ketika curah hujan cukup tinggi kebutuhan air irigasi dapat dikurangi khususnya untuk budidaya padi secara aerobik *non-flooding* (Bouman *et al.*, 2005).

Sedangkan untuk air yang keluar, model LP menduga bahwa komponen utama air yang keluar adalah limpasan. Komponen ini diduga sebanyak kurang lebih 45% dari jumlah air yang keluar. Sedangkan komponen evapotranspirasi tanaman dan perkolasi berkontribusi 40-44% dan 11-15% dari total air yang keluar. Apabila dibandingkan dengan irigasi tergenang, prosentase air yang keluar melalui perkolasi termasuk kecil yang mengindikasikan bahwa sistem irigasi tidak tergenang dapat mengurangi air hilang karena perkolasi disebabkan turunnya tekanan hidrostatik (Bouman & Tuong, 2001).

Dari hasil pendugaan ini menunjukkan bahwa model LP dapat menduga komponen keseimbangan air dengan data yang terbatas. Kunci keberhasilan dalam pendugaan ini adalah menentukan kondisi awal yang dipilih dan ditentukan berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Dengan metode ini, maka parameter yang membutuhkan data yang tidak terukur dapat ditentukan seperti efisiensi penggunaan air dan produktivitas air yang membutuhkan data irigasi dalam penentuannya.

#### IV. KESIMPULAN

Metode *Linear Programming* (LP) yang dikembangkan dapat menduga komponen keseimbangan air yang tidak terukur dengan akurat. Indikatornya adalah nilai  $R^2 > 0,85$  ( $p$  value  $< 0,01$ ) dan persen error dibawah 8%. Berdasarkan hasil pendugaan model, komponen irigasi berkontribusi hanya 34-38% dari total air masuk, sedangkan komponen evapotranspirasi tanaman dan perkolasi berkontribusi sebesar 40-44% dan 11-15% dari total air yang keluar. Hujan dan limpasan merupakan komponen yang

paling besar berkontribusi pada air masuk dan keluar. Hal ini menunjukkan bahwa LP dapat digunakan pada kondisi lapangan yang tidak terkontrol dengan formulasi model yang tepat.

Agar model ini dapat digunakan dengan lebih baik dan akurat, perlu penyederhanaan model, misalnya hanya untuk satu parameter keseimbangan air seperti perkolasi ataupun evapotranspirasi.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Bapak Ahmad Jatika, pemilik Nusantara Organic SRI Center (NOSC) atas perizinan lokasi penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada reviewer yang telah memberikan masukan untuk meningkatkan kualitas makalah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Alberto, Ma. C. R., Wassmann, R., Buresh, R. J., Quilty, J. R., Correa, T. Q., Sandro, J. M., & Centeno, C. A. R. (2014). Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *Field Crops Research*, 160, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.008>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.
- Arif, C., Setiawan, B. I., & Mizoguchi, M. (2014). Penentuan kelembaban tanah optimum untuk budidaya padi sawah SRI (System of Rice Intensification) menggunakan algoritma genetika. *Jurnal Irigasi*, 9(1), 29–40.
- Arif, C., Setiawan, B. I., Sofiyuddin, H. A., & Martief, L. M. (2013). Enhanced water use efficiency by intermittent irrigation for irrigated rice in Indonesia. *Journal of Islamic Perspective on Science, Technology, and Society*, 1(1), 12–17.
- Arif, C., Setiawan, B. I., Sofiyuddin, H. A., Martief, L. M., Mizoguchi, M., & Ryoichi, D. O. I. (2012). Estimating crop coefficient in intermittent irrigation paddy fields using excel solver. *Rice Science*, 19(2), 143–152. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60033-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60033-X)
- Arora, V. K. (2006). Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. *Agricultural Water Management*, 83(1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.09.004>
- Bouman, B. A. M., Feng, L., Tuong, T. P., Lu, G., Wang, H., & Feng, Y. (2007). Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach: II. Quantifying yield, water balance components, and water productivity.



- Agricultural Water Management*, 88(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.005>
- Bouman, B. A. M., Peng, S., Castañeda, A. R., & Visperas, R. M. (2005). Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agricultural Water Management*, 74(2), 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.007>
- Bouman, B. A. M., & Tuong, T. P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, 49(1), 11–30. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00128-1)
- Chen, R.-S., Pi, L.-C., & Huang, Y.-H. (2003). Analysis of rainfall-runoff relation in paddy fields by diffusive tank model. *Hydrological Processes*, 17(13), 2541–2553. <https://doi.org/10.1002/hyp.1266>
- Choi, J.-D., Park, W.-J., Park, K.-W., & Lim, K.-J. (2013). Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. *Paddy and Water Environment*, 11(1), 241–248. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0311-9>
- Guerra, L. C., Bhuyain, S. I., Tuong, T. P., & Barker, R. (1998). *Producing More Rice with Less Water from Irrigated Systems*. Manila, Philippines: International Rice Research Institute. Diperoleh dari [http://books.irri.org/DPS29\\_content.pdf](http://books.irri.org/DPS29_content.pdf)
- Hameed, K. A., Mosa, A.-K. J., & Jaber, F. A. (2011). Irrigation water reduction using System of Rice Intensification compared with conventional cultivation methods in Iraq. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 121–127. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0243-1>
- Kalita, P. K., Kanwar, R. S., & Rahman, M. A. (1992). Modeling percolation losses from a ponded field under variable water-table conditions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 28(6), 1023–1036. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1992.tb04014.x>
- Kukul, S. S., & Aggarwal, G. C. (2002). Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field. *Agricultural Water Management*, 57(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00037-9)
- Liang, X. Q., Chen, Y. X., Nie, Z. Y., Ye, Y. S., Liu, J., Tian, G. M., ... Tuong, T. P. (2013). Mitigation of nutrient losses via surface runoff from rice cropping systems with alternate wetting and drying irrigation and site-specific nutrient management practices. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(10), 6980–6991. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1391-1>
- Lin, X., Zhu, D., & Lin, X. (2011). Effects of water management and organic fertilization with SRI crop practices on hybrid rice performance and rhizosphere dynamics. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 33–39. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0238-y>
- Luo, Y., Khan, S., Cui, Y., & Peng, S. (2009). Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10333-008-0146-6>
- Sakaguchi, A., Eguchi, S., & Kasuya, M. (2014). Examination of the water balance of irrigated paddy fields in SWAT 2009 using the curve number procedure and the pothole module. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(4), 551–564. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.919834>
- Sato, S., Yamaji, E., & Kuroda, T. (2011). Strategies and engineering adaptations to disseminate SRI methods in large-scale irrigation systems in Eastern Indonesia. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 79–88. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0242-2>
- Soemapradya, T. G., Logahan, J. M., & Ongowarsito, H. (2014). Pengembangan Aplikasi Simulasi Perdagangan Saham dengan Sector Rotation dan Linear Programming. *Binus Business Review*, 5(1), 418–428.
- Tan, X., Shao, D., Gu, W., & Liu, H. (2015). Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. *Agricultural Water Management*, 150, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.005>
- Tan, X., Shao, D., Liu, H., Yang, F., Xiao, C., & Yang, H. (2013). Effects of alternate wetting and drying irrigation on percolation and nitrogen leaching in paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 11(1), 381–395. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0328-0>
- van der Hoek, W., Sakthivadivel, R., Renshaw, M., Silver, J. B., Birley, M. H., & Konradsen, F. (2001). *Alternate Wet/Dry Irrigation in Rice Cultivation: A Practical Way to Save Water and Control Malaria and Japanese Encephalitis?* (IWMI Research Reports No. 047). Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. Diperoleh dari <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/39834>
- Won, J. G., Choi, J. S., Lee, S. P., Son, S. H., & Chung, S. O. (2005). Water Saving by Shallow Intermittent Irrigation and Growth of Rice. *Plant Production Science*, 8(4), 487–492. <https://doi.org/10.1626/pp.s.8.487>
- Wopereis, M. C. S., Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., ten Berge, H. F. M., & Maligaya, A. R. (1994). Water use efficiency of flooded rice fields I. Validation of the soil-water balance model SAWAH. *Agricultural Water Management*, 26(4), 277–289. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0378-3774(94)90014-0)

- Yang, S., Peng, S., Xu, J., Luo, Y., & Li, D. (2012). Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 53–54, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.020>
- Zhang, Y., Huo, M., Zhou, J., & Xie, S. (2010). PKSolver: An add-in program for pharmacokinetic and pharmacodynamic data analysis in Microsoft Excel. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 99(3), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.01.007>
- Zhao, L., Wu, L., Wu, M., & Li, Y. (2011). Nutrient uptake and water use efficiency as affected by modified rice cultivation methods with reduced irrigation. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 25–32. <https://doi.org/10.1007/s10333-011-0257-3>