

PENGEMBANGAN MODEL EMPIRIS PENENTUAN KEBUTUHAN AIR IRIGASI PENYIAPAN LAHAN PADI SAWAH HEMAT AIR

Chusnul Arif^{1*}, Moh Yanuar J Purwanto¹, Satyanto Krido Saptomo¹, Sutoyo¹,
Arien Heryansyah², Hanhan A Sofiyuddin³

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University

²Departemen Teknik Sipil, Universitas Ibnu Khaldun

³Balai Teknik Irigasi, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR

*chusnul_arif@apps.ipb.ac.id

Pemasukan: 10 September 2023 Perbaikan: 9 Nopember 2023 Diterima: 14 Nopember 2023

Intisari

Saat ini, dalam KP-01 penentuan kebutuhan air irigasi untuk penyiapan lahan (KA IPL) sawah masih didasarkan pada persamaan *Van de Goor & Zijlstra* (VGZ) dengan asumsi debit konstan. Metode ini praktis dalam perencanaan tetapi cenderung boros dalam implementasinya. Oleh sebab itu, tujuan makalah ini mengembangkan model empiris penentuan KA IPL yang lebih hemat air dengan penerapan irigasi berselang (*intermittent*). Model dikembangkan dari penerapan genangan pada periode dan ketinggian air tertentu untuk tiga tekstur tanah yang berbeda. Model empiris dikembangkan dari persamaan VGZ dengan menambahkan konstanta sebagai faktor irigasi berselang dan tekstur tanah (disebut model MVGZ). Kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan selama 2 musim tanam di DI Cihea, Jawa Barat. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai konstanta untuk model MVGZ dengan tekstur tanah berat, sedang dan ringan berturut-turut 0,79, 0,76, dan 0,73. Dengan konstanta tersebut didapatkan akurasi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99. Hasil validasi lapangan menunjukkan bahwa model MVGZ tersebut mendekat hasil pengukuran dengan penghematan air sebesar 28-34% dibandingkan dengan model VGZ. Oleh sebab itu, model MVGZ ini dapat diterapkan untuk penentuan KA IPL yang lebih hemat air.

Kata Kunci: Irigasi berselang, Hemat air, Padi sawah, Perubahan iklim, DI Cihea

Latar Belakang

Perubahan iklim telah berdampak pada berbagai bidang termasuk kegiatan pertanian. Hal ini ditandai dengan kenaikan suhu yang belum pernah terjadi sebelumnya telah mengakibatkan peningkatan kejadian kekeringan, banjir, pola curah hujan yang tidak teratur, gelombang panas, dan kejadian ekstrim lainnya di seluruh dunia (Arora, 2019). Dengan meningkatnya kejadian kekeringan, penggunaan air irigasi terus meningkat, tetapi tidak dibarengi dengan kenaikan produksi (Lu dkk., 2019). Dengan fenomena ini, usaha adaptasi dan mitigasi menjadi penting khususnya untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan.

Oleh sebab itu, dalam konteks pengelolaan air irigasi, perlu dikembangkan teknologi atau metode pengelolaan yang lebih efektif dan efisien.

Menurut FAO dan beberapa riset lainnya, pertanian merupakan bidang yang menggunakan air paling besar dibandingkan bidang lain khususnya industri dan perkotaan (FAO, 2002; Gordon dkk., 2010; Scanlon dkk., 2007). Penggunaan terbesar air irigasi dalam pertanian adalah untuk budidaya padi sawah (Gheewala dkk., 2014). Hal ini wajar karena umumnya padi sawah menggunakan sistem genangan secara terus menerus, termasuk dalam penentuan kebutuhan air irigasi penyiapan lahan (KAIPL).

Menurut Kriteria Perencanaan (KP-01) tentang Perencanaan Jaringan Irigasi tahun 2013, KAIPL ditentukan dengan persamaan *Van de Goor & Zijlstra* (VGZ) dengan asumsi laju air irigasi konstan selama 30 ataupun 45 hari. Dalam KP-01 tersebut nilai kebutuhan air untuk penjernihan sebesar 250 mm dan 300 mm untuk tanah berstruktur berat tanpa retak-retak maupun yang retak-retak. Apabila dibandingkan dengan KAIPL beberapa negara seperti China, Jepang, Korea dan Philipina, nilai tersebut cenderung lebih besar (Kung dan Atthyodhin, 1968). Hasil studi perbandingan dengan model Cropwat 8.0, metode tersebut juga masih lebih besar (Anggraeni dan Kalsim, 2013). Selain itu, dalam KP-01 juga belum memperhatikan jenis tekstur tanah di Indonesia yang beragam.

Dengan perkembangan teknologi usaha tani pada pengolahan tanah melalui mekanisasi dapat mempercepat waktu penyiapan lahan. Teknologi pemberian air irigasi yang lebih hemat juga terus berkembang, salah satunya dengan irigasi berselang (*intermittent*). Metode ini mampu menghemat air berkisar antara 22 – 76% (de Avila dkk., 2015). Metode ini juga sudah mulai diterapkan di Indonesia dengan penghematan sebesar 26% (Arif dkk., 2012) sampai 40% (Sato dkk., 2011). Dalam mengakomodasi faktor jenis tanah dan irigasi berselang dengan waktu penyiapan lahan yang lebih pendek, maka perlu pengembangan model penentuan KAIPL yang dimodifikasi dari model sebelumnya. Oleh sebab itu, tujuan dari penelitian ini adalah a) Mengembangkan model empiris penentuan KAIPL berdasarkan faktor jenis tanah dan irigasi berselang, b) Membandingkan hasil perhitungan model dengan pengukuran lapangan.

Metodologi Studi

a. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap, tahap pengembangan model dan pengukuran lapangan. Pengukuran lapangan dilakukan di lahan padi petani di DI Cihea, Kab. Cianjur, Jawa Barat dengan jenih tanah berat selama 2 musim tanam, yaitu 7-29 Juli 2022 (23 hari) dan 3-29 November 2022 (27 hari).

b. Pengembangan Model Empiris

Penentuan KAIPL didasarkan pada irigasi *intermittent* 5 harian yang lebih hemat air, dengan periode pengolahan tanah lebih singkat melalui mekanisasi. Untuk ketinggian air selama periode penyiapan lahan dikondisikan antara 3-5 cm di atas permukaan air tanah (Tabel 1).

Tabel 1. Skenario tinggi genangan pada periode KAIPL

Periode	Tinggi genangan	Unit	Hari ke-
Genangan awal	5	cm	1-2
		cm	3-4
Pembajakan	3	cm	5-7
		cm	8-9
Penggaruan	3	cm	10-12
		cm	13-14
Perataan	3	cm	15
Genangan Tanam	3	cm	15-45*

* setiap 5 hari dikondisikan tinggi genangan 3 cm

Dari skenario di atas, kebutuhan air irigasi dihitung dengan persamaan keseimbangan air berikut ini:

$$IR = \Delta WL + S_f - Re - (E_o + P) \quad (1)$$

Dengan Keterangan:

- IR : Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan, mm/hari
- E_o : Evaporasi air terbuka yang diambil 1,1, ET_o selama penyiapan lahan, mm/hari
- P : Perkolasi (mm/hari)
- Re : Hujan efektif (mm/hari)
- S_f : Kebutuhan air untuk penjenuhan (didasarkan pada kondisi awal kelembaban tanah) dan penggenangan, mm/hari
- ΔWL : Perubahan tinggi muka air (selisih tinggi muka air yang dikehendaki dengan tinggi muka air awal), mm/hari

Nilai S_f didasarkan pada tekstur tanah dan dua kondisi awal tanah (bera dan tidak bera) dengan kriteria berikut ini:

- a. Jenis tanah berat: porositas 0.60
- b. Jenis tanah sedang: porositas 0.45
- c. Jenis tanah ringan: porositas 0.30
- d. Kondisi bera: 75% pengisian untuk penjenuhan
- e. Kondisi tidak bera: 25% pengisian untuk penjenuhan
- f. Kedalaman solum: 30 cm
- g. Tinggi genangan awal: 50 mm

Adapun nilai E_o dan P disesuaikan dengan interval pada KP-01 yang berkisar antara 5 – 11 mm/hari dengan waktu penyiapan lahan 20 – 45 hari. Dengan berbagai kondisi tersebut didapatkan 468 kombinasi nilai IR. Dari kombinasi tersebut akan diplotkan pada persamaan empiris dari modifikasi persamaan VGZ berikut ini:

$$IR = \frac{Me^{akf}}{(e^{akf}-1)} \quad (2)$$

Dengan Keterangan:

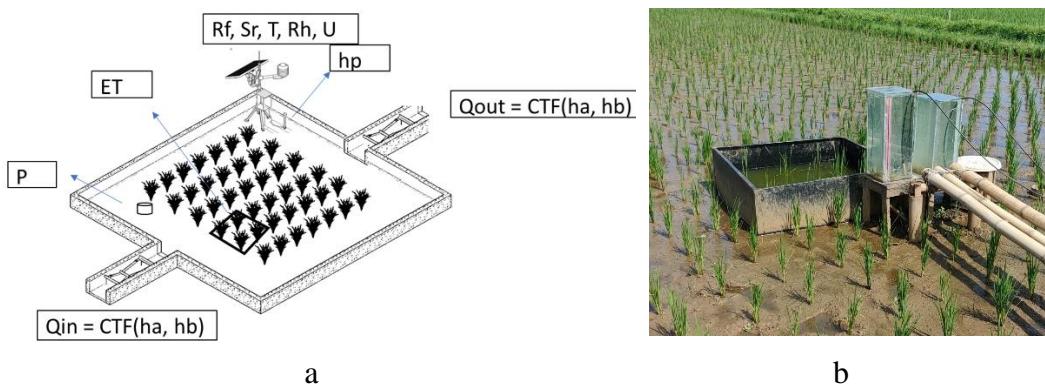
- IR : Kebutuhan air irigasi persiapan lahan (mm)
- M : Akumulasi Nilai Evaporasi (E) dan Perkolasi (P), dengan E sebesar 1.1 ET (evapotranspirasi)

- Kf : MT/Sf
 T : jangka waktu penyiapan lahan, (hari)
 A : Faktor irigasi berselang dan tekstur tanah

Nilai "a" ini akan ditentukan dengan optimasi parameter dengan model linear programing. Metode ini pernah digunakan untuk pendugaan komponen keseimbangan air pada lahan padi sawah sebelumnya (Arif dan Setiawan, 2019). Nilai "a" tersebut ditentukan dengan indikator nilai R^2 (koefisien determinasi) tertinggi antara persamaan 1 dan 2 pada masing-masing tekstur tanah.

c. Pengukuran Lapangan dan Perbandingan Model

Beberapa peralatan digunakan untuk mengukur beberapa parameter, diantaranya sensor tinggi muka yang dipasang pada *inlet*, *outlet*, lahan (lysimeter), dan perkolasai sesuai skema pada Gambar 1.



Gambar 1. a) Skema pengukuran lapangan b) Dokumentasi pengukuran dengan lysimeter

Untuk penentuan evapotranspirasi, parameter yang diukur meliputi beberapa parameter cuaca diantaranya suhu udara, kelembaban udara, radiasi matahari, kecepatan angin menggunakan *automatic weather station* (AWS). Data-data tersebut kemudian digunakan untuk menentukan evapotranspirasi potensial dengan model standard FAO berikut ini (Allen dkk., 1998):

$$ET_p = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (4)$$

Dengan Keterangan:

- ET_p : evapotranspirasi potensial (mm/hari)
 Δ : kurva kemiringan tekanan uap (kPa/°C)
 G : flux panas tanah (MJ/m² hari),
 e_s : tekanan uap jenuh (kPa)
 u : kecepatan angin (m/s)
 R_n : radiasi netto ekivalen evaporasi (mm/hari)
 T_{mean} : suhu rata-rata harian (°C)
 γ : konstanta psychometrik (mb/°C)

Nilai evaporasi (E) ditentukan sebesar 1,1 ET_p sebagaimana ketentuan di KP-01. Kemudian, total irigasi pada model empiris, VGZ dan pengukuran lapangan dibandingkan.

Hasil Studi dan Pembahasan

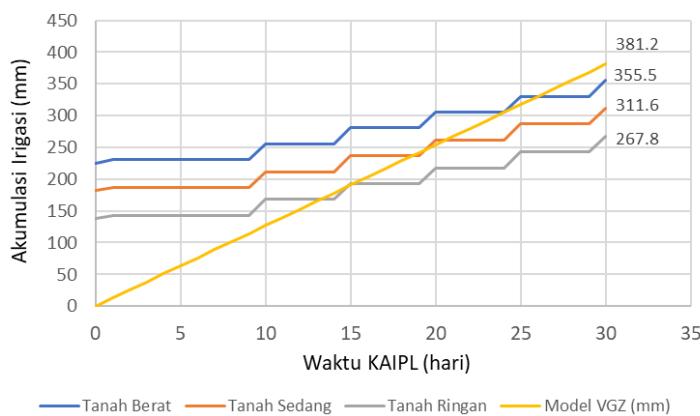
a. Perbandingan KAIPL model VGZ dan neraca air

Tabel 2 menunjukkan kebutuhan air irigasi untuk KAIPL antara model yang dikembangkan dengan model VGZ (KP-01) untuk periode 30 hari untuk jenis tanah berat. Dari Tabel 1 tersebut nilai kebutuhan air irigasi berkisar antara 0,92 – 1,80 l/det (setara 7,95 – 15,52 mm/hari) dengan kombinasi nilai evaporasi dan perkolasikan dari 5 – 11 mm/hari. Sedangkan model VGZ kebutuhan air irigasi berkisar 1,28 – 1,92 l/det (setara dengan 11,08 – 16,49 mm/hari). Hal ini menunjukkan model yang dikembangkan lebih kecil daripada model VGZ yang selama ini digunakan dalam KP-01. Nilai penghematan air yang diperoleh berkisar 6 – 28% tergantung dari kondisi awal tanahnya. Kondisi tanah tidak bera dapat menghemat air lebih banyak daripada kondisi tanah awal bera (tanah retak).

Tabel 2. Perbandingan IR Model yang dikembangkan dan VGZ untuk waktu KAIPL 30 hari

M Eo + P (mm/hari)	Model yang dikembangkan				Model VGZ			
	Sf = 226 mm (mm)	Sf = 109 mm (l/det)	Sf = 300 mm (mm)	Sf = 250 mm (l/det)	Sf = 300 mm (mm)	Sf = 250 mm (l/det)	Sf = 300 mm (mm)	Sf = 250 mm (l/det)
5,0	11,85	1,37	7,95	0,92	12,71	1,47	11,08	1,28
5,5	12,35	1,43	8,45	0,98	13,00	1,50	11,38	1,32
6,0	12,85	1,49	8,95	1,04	13,30	1,54	11,69	1,35
6,5	13,35	1,55	9,45	1,09	13,60	1,57	12,00	1,39
7,0	13,85	1,60	9,95	1,15	13,91	1,61	12,32	1,43
7,5	14,35	1,66	10,45	1,21	14,21	1,65	12,64	1,46
8,0	14,52	1,68	10,62	1,23	14,53	1,68	12,96	1,50
8,5	14,68	1,70	10,78	1,25	14,84	1,72	13,29	1,54
9,0	14,85	1,72	10,95	1,27	15,17	1,76	13,63	1,58
9,5	15,02	1,74	11,12	1,29	15,49	1,79	13,97	1,62
10,0	15,18	1,76	11,28	1,31	15,82	1,83	14,31	1,66
10,5	15,35	1,78	11,45	1,33	16,15	1,87	14,66	1,70
11,0	15,52	1,80	11,62	1,34	16,49	1,91	15,01	1,74

Tingginya nilai kebutuhan air irigasi model VGZ disebabkan tingginya nilai kebutuhan air untuk penjenuhan awal dan penggenangan (nilai S_f). Nilai S_f (di dalam KP-01 disebut nilai "S") belum memperhatikan jenis tanah secara detail. Di dalam KP-01 nilai S_f hanya ditentukan sebesar 250 mm untuk tekstur tanah tanpa retak dan 300 mm untuk tekstur tanah retak. Apabila dibandingkan dengan negara lain seperti Philipina, nilai tersebut lebih besar (Cabangon dan Tuong, 2000).

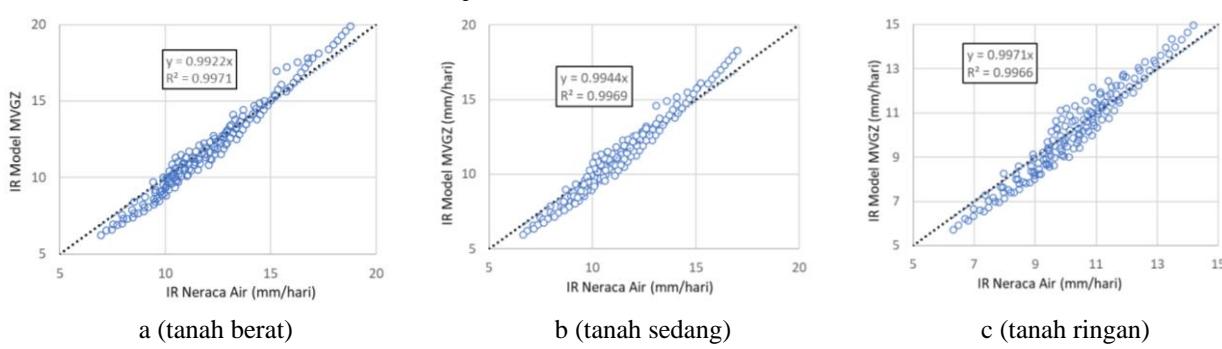


Gambar 2, Perbandingan irigasi akumulatif antara model VGZ dan yang dikembangkan untuk jenis tanah berat, sedang dan ringan,

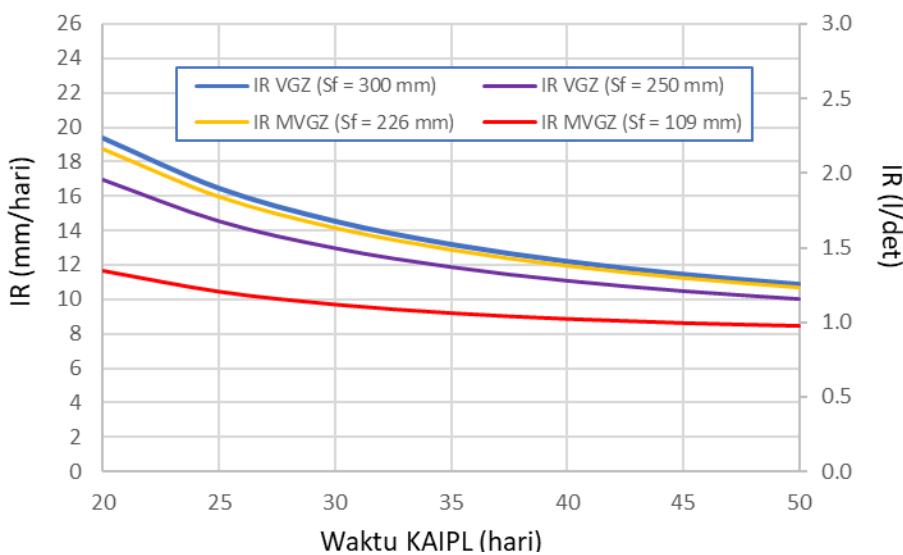
Dalam KP-01, nilai KAIPL untuk padi sawah hanya mengenal satu kondisi jenis tanah, sehingga nilainya sama untuk semua jenis tanah. Sedangkan realitasnya, jenis tanah padi sawah di Indonesia sangat beragam. Gambar 2 menunjukkan perbandingan akumulasi irigasi pada persiapan lahan antara model VGZ dengan model yang dikembangkan dengan berbagai jenis tanah. Hasilnya menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dapat menghemat air 6,7 – 29,7%, dengan tanah ringan membutuhkan irigasi yang paling kecil dibandingkan kedua jenis tanah yang lain. Akumulasi model VGZ bertambahnya terus dengan debit yang konstan dan melebihi nilai evaporasi dan perkolasasi. Kelebihan air ini akan terakumulasi dan berpotensi menjadi limpasan, sehingga perlu dikurangi agar penggunaan air irigasi lebih efisien (Ebrahimian dkk., 2020).

b. Penentuan koefisien model VGZ modifikasi (model MVGZ)

Gambar 3 menunjukkan perbandingan hasil penentuan IR dengan persamaan 1 dan 2 untuk menentukan koefisien “a” pada persamaan 2. Dengan metode *linear programming* diperoleh nilai “a” sebesar 0,79, 0,76, dan 0,73 untuk jenis tekstur tanah berat, sedang dan ringan. Dengan nilai tersebut diperoleh nilai R^2 mendekati 1 (0,99) yang berarti bahwa persamaan model VGZ modifikasi, yang selanjutnya disebut model MVGZ, dapat digunakan untuk penentuan kebutuhan air irigasi penyiapan lahan. Dalam hidrologi, nilai R^2 minimal yang dapat diterima umumnya di atas 0,6 (Gaviria dan Carvajal-Serna, 2022; Kim dkk., 2009).



Gambar 3. Hasil validasi penentuan koefisien model modifikasi VGZ (MVGZ) dengan model neraca air

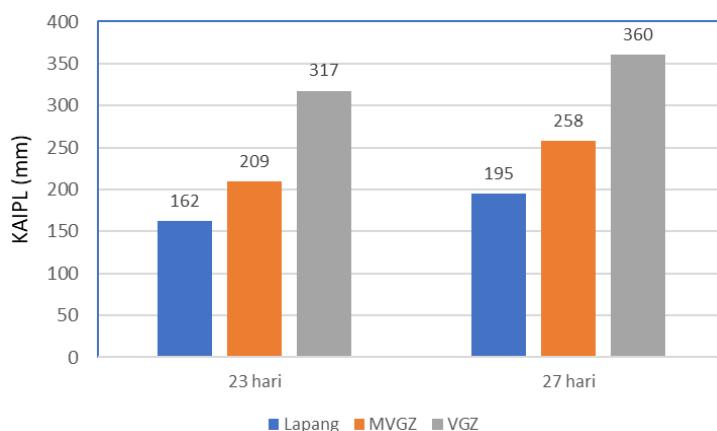


Gambar 4. Perbandingan tren model VGZ dan MVGZ untuk tanah berat dengan nilai Evaporasi dan Perkolasi 8 mm/hari

Berdasarkan koefisien yang didapatkan perbandingan trend antara model VGZ dan MVGZ yang disajikan pada Gambar 4. Nilai S_f sebesar 300 mm dan 226 mm digunakan model VGZ dan MVGZ untuk tanah dengan kondisi awal retak-retak, sedangkan nilai S_f sebesar 250 mm dan 109 mm untuk tanah tidak retak. Keempat kondisi memiliki trend yang sama, semakin lama periode penyiapan lahan, kebutuhan irigasi rata-rata harian lebih kecil. Meskipun demikian, secara akumulatif akan membutuhkan air irigasi yang lebih banyak. Dari trend ini juga didapatkan hasil bahwa nilai penjenuhan dan penggenangan awal menjadi kunci penting dalam penentuan KAIPL termasuk skenario penghematannya. Penggenangan terus menerus dapat meningkatkan air yang hilang (*water loss*) melalui rembesan (*seepage*) dan limpasan (*runoff*) (Sudhir-Yadav dkk., 2011). Dari trend ini juga didapatkan hasil bahwa model MVGZ dengan nilai S_f yang lebih kecil menjadi lebih hemat daripada model VGZ.

c. Perbandingan data pengukuran lapangan

Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa model MVGZ lebih mendekati hasil irigasi dari pengukuran lapangan sesuai yang ditunjukkan Gambar 5. Pada periode 23 hari penyiapan lahan, irigasi yang terukur sebanyak 162 mm, sedangkan model MVGZ sebesar 209 mm. Nilai ini lebih mendekati dibandingkan model VGZ dan 28% lebih rendah. Hal yang sama juga terjadi pada periodel penyiapan lahan 27 hari. Model MVGZ 34% lebih hemat air dibandingkan model VGZ dan mendekati hasil pengukuran lapangan. Pada observasi lapangan nilai irigasi lebih rendah karena kekurangannya masih dapat dikompensasi oleh hujan. Sedangkan pada pengembangan model hujan belum dipertimbangkan.



Gambar 5. Perbandingan hasil pengukuran lapangan dengan model MVGZ dan VGZ

Tabel 3. Komponen keseimbangan air hasil observasi lapangan

Komponen	Musim I	Musim II	Satuan
Durasi KAIPL	23	27	hari
Inflow			
- Irigasi	162,4	195,4	mm
- Hujan	11,1	40,4	mm
Total inflow	173,5	235,8	mm
Outflow			
- Runoff	0,0	29,6	mm
- ET	78,5	104,1	mm
- Perkolasi	46,0	54,0	mm
Total Outflow	124,5	187,7	mm
Kehilangan Air	48,9	48,1	mm
Prosentase Kehilangan air	30%	25%	%

Tabel 3 menunjukkan komponen keseimbangan air hasil observasi lapangan. Dari hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa potensi kehilangan air di lapangan berkisar 25-30%. Nilai kehilangan air ini masih lebih kecil dibandingkan hasil penelitian sebelumnya (Cabangon dan Tuong, 2000). Persentase kehilangan air ini dapat dijadikan acuan dalam penentuan kebutuhan air penjenuhan dan penggenangan awal.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Model empiris (Model MVGZ) penentuan Kebutuhan Air Irrigasi Penyiapan Lahan (KAIPL) yang lebih hemat air telah dikembangkan berdasarkan irigasi berselang dan 3 jenis tekstur tanah berbeda. Nilai konstanta model MVGZ, nilai “a” sebesar 0,79; 0,76 dan 0,73 untuk tekstur tanah berat, sedang dan ringan. Hasil validasi lapangan menunjukkan model MVGZ dengan tipe tanah berat tersebut mendekati hasil pengukuran dengan penghematan air sebesar 28-34% dibandingkan dengan model VGZ.

Saran

Uji lapangan terhadap tekstur tanah sedang dan ringan perlu dilakukan untuk menguji model yang dikembangkan.

Ucapan Terima Kasih

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada reviewer yang memberikan komentar untuk perbaikan makalah ini. Selain itu, ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kemendikbud-Dikti yang mendanai riset dasar tahun 2023 dengan judul “*Integrated Model of Artificial Intelligence – Based Water and Environment Management for Sustainable Rice Farming (IMAIWEM-SRF)*” dan ADB dalam rangkaian kegiatan “*NPIC Consulting Services for Guideline Improvement IPDMIP*” tahun 2021-2023.

Daftar Referensi

- Allen, R., Pareira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Anggraeni, I.D.S., Kalsim, D.K., 2013. Perbandingan Perhitungan Kebutuhan Irigasi Padi Metoda KP-01 dengan Cropwat-8.0, *Jurnal Irigasi*, 8, 15–23.
- Arif, C., Setiawan, B.I., 2019. Pendugaan komponen keseimbangan air di lahan sawah dengan linear programming, *Jurnal Irigasi* 14, 79–88. <https://doi.org/10.31028/ji.v14.i2.79-88>
- Arif, C., Setiawan, B.I., Sofiyuddin, H.A., Martief, L.M., Mizoguchi, M., Doi, R., 2012. Estimating Crop Coefficient in Intermittent Irrigation Paddy Fields Using Excel Solver, *Rice Science*, 19, 143–152. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60033-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60033-X)
- Arora, N.K., 2019. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions, *Environmental Sustainability*, 2, 95–96. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>
- Cabangon, R.J., Tuong, T.P., 2000. Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation, *Soil and Tillage Research*, 56, 105–116. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00125-2)
- de Avila, L.A., Martini, L.F.D., Mezzomo, R.F., Refatti, J.P., Campos, R., Cezimbra, D.M., Machado, S.L.O., Massey, J.H., Carlesso, R., Marchesan, E., 2015. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation, *Agronomy Journal*, 107, 442–448.
- Ebrahimian, H., Dialameh, B., Hosseini-Moghari, S.-M., Ebrahimian, A., 2020. Optimal conjunctive use of aqua-agriculture reservoir and irrigation canal for paddy fields (case study: Tajan irrigation network, Iran), *Paddy Water Environ.*, 18, 499–514. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00797-5>
- FAO, 2002. *Crops and Drops; Making the best use of water for agriculture*, FAO.

- Gaviria, C., Carvajal-Serna, F., 2022. Regionalization of flow duration curves in Colombia, *Hydrology Research*, 53, 1075–1089. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.022>
- Gheewala, S.H., Silalertruksa, T., Nilsalab, P., Mungkung, R., Perret, S.R., Chaiyawannakarn, N., 2014. Water Footprint and Impact of Water Consumption for Food, Feed, Fuel Crops Production in Thailand, *Water*, 6, 1698–1718. <https://doi.org/10.3390/w6061698>
- Gordon, L.J., Finlayson, C.M., Falkenmark, M., 2010. Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services, *Agricultural Water Management, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, 97, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.017>
- Kim, H.K., Jang, T.I., Im, S.J., Park, S.W., 2009. Estimation of irrigation return flow from paddy fields considering the soil moisture, *Agricultural Water Management*, 96, 875–882. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.009>
- Kung, P., Atthyodhin, C., 1968. Water requirements in rice production, in: Committee for Coordination of Investigations of the Lower Mekong Basin. Presented at the *Fourth Seminar on Economic and Social Studies (Rice Production)*, Los Banos, Philippines, pp. 94–112.
- Lu, S., Bai, X., Li, W., Wang, N., 2019. Impacts of climate change on water resources and grain production, *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.015>
- Sato, S., Yamaji, E., Kuroda, T., 2011. Strategies and engineering adaptions to disseminate SRI methods in large-scale irrigation systems in Eastern Indonesia, *Paddy Water Environ.*, 9, 79–88. <https://doi.org/10.1007/s10333-010-0242-2>
- Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L., 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality, *Water Resources Research*, 43. <https://doi.org/10.1029/2006WR005486>
- Sudhir-Yadav, Humphreys, E., Kukal, S.S., Gill, G., Rangarajan, R., 2011. Effect of water management on dry seeded and puddled transplanted rice: Part 2: Water balance and water productivity, *Field Crops Research*, 120, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.003>