

Water dan Carbon Footprint pada Budidaya Tanaman Padi dengan Sistem Otomatisasi Model Irigasi Bawah Permukaan

Abiyyu Gustya Putra^{1*} dan Satyanto Krido Saptomo¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Penulis korespondensi: abiyyu_putra@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Kesulitan dalam memantau kondisi lingkungan dapat menyebabkan penggunaan air yang tidak efisien dalam budidaya padi. Budidaya padi menyumbang 7% dari emisi gas rumah kaca. Irigasi cerdas adalah solusi yang tepat tidak hanya untuk menghemat air irigasi tetapi juga untuk mengurangi emisi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja sistem irigasi cerdas, *water footprint*, dan *carbon footprint* pada operasi irigasi bawah permukaan otomatis berbasis internet of things di lahan persawahan. Kajian dimulai dengan persiapan lahan, pengumpulan data primer dan data sekunder, analisis *water footprint* dan *carbon footprint*. Kinerja alat irigasi cerdas untuk musim tanam pertama adalah 15 hari alat irigasi hidup tetapi tidak dapat mengukur ketinggian air, 65 hari irigasi cerdas dapat dihidupkan dan dapat membaca ketinggian air. 26 hari sistem irigasi cerdas tidak berfungsi dan data tidak direkam di *cloud server*. Pada musim tanam kedua, irigasi cerdas tidak berfungsi. *Water footprint* dan *carbon footprint* yang dihasilkan dari proses irigasi bawah permukaan otomatis untuk menghasilkan produk beras adalah masing-masing 16.661,5 m³/ton dan 608,04 kg CO₂-eq/tahun.

Kata kunci: *carbon footprint*, padi; irigasi cerdas; *water footprint*

1. Pendahuluan

Pengaliran air irigasi dengan metode konvensional kurang mampu mengalirkan air secara cepat dan tepat. Petani cukup sulit jika harus selalu memantau kondisi kelembapan tanah setiap waktunya. Kesulitan dalam memerhatikan kondisi kelembapan tanah dan lingkungan mengakibatkan penggunaan air yang tidak efisien [1]. Irigasi cerdas yang berbasis *Internet of Thing* (IOT) merupakan sistem monitoring dan pengendalian irigasi secara real time. Peralatan yang dibutuhkan yaitu sensor dan aktuator untuk melakukan pengukuran dan pengendalian serta teknologi komputer dan jaringan untuk mengimplementasikan IOT [2]. Kelebihan sistem irigasi cerdas yaitu dapat memonitor kondisi lingkungan seperti kondisi lingkungan dan kondisi tanah. Selain itu sistem irigasi cerdas dapat memonitor lahan secara langsung serta dapat mengetahui volume air yang digunakan [3].

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk menganalisis penggunaan sumber daya air adalah *water footprint* atau jejak air [4]. *Water footprint* menggambarkan kajian menyeluruh yang melibatkan karakteristik iklim, tanah, dan pertumbuhan, yang berkaitan siklus konsumsi air khususnya dalam bidang pertanian dalam satuan dan skala tertentu [5]. *Water footprint* dari tanaman padi di Indonesia bernilai sekitar 3.500 m³/ton. Namun pada daerah Sulawesi Selatan dan Sumatera Utara berturut-turut bernilai 3.800

Diterima: 13 Juli 2021

Disetujui: 31 Maret 2022

Sitasi:

Putra, A.G.; Saptomo, S.K. *Water dan Carbon Footprint pada Budidaya Tanaman Padi dengan Sistem Otomatisasi Model Irigasi Bawah Permukaan*. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7 (1): 33-48.,
<https://doi.org/10.29244/jsil.7.1.33-48>

m³/ton dan 3.900 m³/ton. Sedangkan nilai *water footprint* di Pulau Jawa berkisar 2.800 m³/ton. Hal tersebut dikarenakan pada pulau Jawa memiliki produktivitas lahan sebesar 5,3 ton/ha dan evapotranspirasi 4,6 mm/hari [6].

Sektor pertanian menyumbangkan sekitar 14% dari keseluruhan emisi gas rumah kaca dunia. Sumber emisi energi sektor pertanian berasal dari padi (11%), pupuk (38%), limbah ternak/pupuk kandang (7%), peternakan (31%), dan peternakan lainnya (13%) [7]. Selain itu *carbon footprint* dapat berasal dari perangkat irigasi otomatis [8]. *Carbon footprint* atau jejak karbon menggambarkan jumlah total dari hasil emisi karbondioksida secara langsung (primer) maupun tidak langsung (sekunder) [9]. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh [4] yang meneliti tentang *water footprint* produksi gula tebu dan [5] tentang *water footprint* padi organik. Selain itu penelitian oleh [10] tentang *water footprint* dan *carbon footprint* irigasi otomatis pada tanaman kedelai menunjukkan telah dilakukan penentuan nilai *water footprint* dan *carbon footprint* pada tanaman. Tujuan dari penelitian yang dilakukan untuk menganalisis kinerja sistem otomatisasi irigasi bawah permukaan berbasis *internet of thing*; mengetahui nilai *water footprint* dan *carbon footprint* yang dihasilkan untuk produksi padi dengan sistem pemberian irigasi otomatis.

2. Metodologi

Penelitian dilakukan pada bulan Maret - Juni 2021. Pengambilan data penelitian dilakukan di Wisma Wageningen Jalan Tanjung nomor 21 B Kampus Institut Pertanian Bogor, Dramaga. Penelitian dilakukan pada lahan uji coba yang ditanami padi dengan sistem irigasi otomatis. Alat yang digunakan dalam penelitian terdiri atas stasiun cuaca, *solenoid valve*, pipa, box sawah, terpal, meteran air, laptop, gawai, *data logger*, relay, solar panel, *solar charge controller*, aki (*power supply*), sensor water level, *cctv*, dan reservoir. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah tanaman padi IPB 3S, pupuk (kandang, urea, NPK, KCl, dan TSP), tanah alluvial, dan air irigasi. Adapun program yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Microsoft Word*, *Microsoft Excel*, *Arduino IDE (Integrated Development Environment)*, dan ECH₂O.

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer berupa hasil panen, pupuk yang digunakan, pemakaian listrik dari alat irigasi otomatis, dan tinggi muka air. Data sekunder yang digunakan yaitu curah hujan, kecepatan angin, kelembapan udara, intensitas penyinaran, volume *inflow*, dan volume *outflow*. Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur mengenai lokasi otomatisasi irigasi yang berbasis *internet of thing* (IOT). Prosedur penelitian meliputi persiapan lahan, pengumpulan data berupa data primer dan data sekunder serta dilanjutkan dengan pengolahan data. Box uji coba yang telah dilengkapi dengan rangkaian irigasi otomatis berbasis *internet of thing* disiapkan. Kemudian tanah dihamburkan pada box uji coba. Box uji coba diisi dengan air untuk dilakukan pengecekan kebocoran. Setelah itu padi mulai ditanam pada box uji coba.

Alat yang digunakan pada irigasi otomatis berupa *data logger* sebagai *mikrokontroler*. *Mikrokontroler* akan mengatur relay untuk menentukan pemberian air pada lahan berdasarkan sensor yang terbaca. Nilai yang terbaca pada sensor akan dibandingkan dengan nilai *set point* yang sudah ditentukan. *Set point* yang digunakan berupa dua *set point* yaitu *set point* atas dan *set point* bawah. Pengendalian kedalaman muka air bergantung pada pembacaan nilai oleh sensor. Pengendalian muka air yaitu berada pada rentang *set point* atas dan *set point* bawah. Jika tinggi muka air berada dibawah *set point* bawah maka valve akan terbuka. Jika tinggi muka air berada diatas *set point* atas maka valve akan tertutup. Tujuan dilakukan hal tersebut agar mengurangi intensitas buka-tutup valve. Pengumpulan data primer berupa hasil panen dan pupuk yang digunakan diperoleh melalui pengukuran di lapangan serta tinggi muka air dan pemakaian listrik dari alat irigasi otomatis diperoleh melalui waktu aktif alat pada *website kendali-irigasi.com*. Data sekunder yang digunakan yaitu curah hujan, kecepatan angin, kelembapan udara, dan

intensitas penyinaran diperoleh melalui stasiun cuaca terdekat serta data tinggi volume *inflow* dan volume *outflow* diperoleh melalui pencatatan data yang sudah dilakukan.

2.1. Neraca air

Neraca air merupakan diagram air yang masuk dan keluar di suatu tempat pada periode tertentu sehingga dapat digunakan untuk mengetahui jumlah air pada lahan. Pada perhitungan neraca air memiliki persamaan awal sebagai berikut [11].

$$\text{Win-Wout} = \Delta S \quad (1)$$

Keterangan:

Win = Air yang masuk ke tanah (L)
 Wout = Air yang keluar dari tanah (L)
 ΔS = Cadangan air (L)

Pada umumnya air yang masuk ke lahan sawah berupa air hujan dan air irigasi. Komponen air yang keluar dari tanah terdiri dari evapotranspirasi, perkolasi, rembesan, dan melalui aliran permukaan. Dalam hukum konservasi masa neraca air secara matematis dapat disajikan sebagai berikut:

$$\text{Win} = P + I \quad (2)$$

$$\text{Wout} = ET + Pk + Sp + R \quad (3)$$

$$\Delta S = P + I - (ET + Pk + Sp + R) \quad (4)$$

Keterangan:

Win = air yang masuk ke tanah (L)
 Wout = air yang keluar dari tanah (L)
 ΔS = cadangan air (L)
 P = curah hujan (L)
 I = irigasi (L)
 ET = evapotranspirasi (L)
 Pk = perkolasi (L)
 Sp = rembesan (L)
 R = aliran permukaan (L)

2.2. Kebutuhan air

Kebutuhan air tanaman untuk konsumsi tanaman dihitung berdasarkan penjumlahan evapotranspirasi dan proses metabolisme tanaman. Pada proses metabolisme tanaman, air yang digunakan pada proses tersebut kurang dari 1% maka perhitungan kebutuhan air dianggap sama dengan evapotranspirasi [12]. Pengukuran evapotranspirasi tanaman dilakukan tidak langsung yaitu dengan menggunakan rumus - rumus empiris dan berdasarkan data iklim dan tanaman. Evapotranspirasi potensial dapat digunakan beberapa model diantaranya yaitu model Hargreaves. Model ini hanya membutuhkan dua data yaitu berupa data suhu dan radiasi matahari [13]. Model Hargreaves yang digunakan berdasarkan persamaan berikut [14].

$$ET_o = 0,0135(T_{\text{mean}}+17,78)R_s \quad (5)$$

Keterangan:

Eto = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
 Tmean = suhu udara rata-rata (°C)
 Rs = radiasi matahari (MJ/m²/hari)

Hubungan ETo dan Etc dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [12].

$$ET_c = K_c \times ETo \quad (6)$$

Keterangan:

ETo = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
 Etc = evapotranspirasi tanaman (mm/hari)
 Kc = koefisien tanaman

2.3. Water footprint

Komponen water footprint terdiri dari tiga komponen yaitu *blue water footprint*, *green water footprint*, dan *grey water footprint* [15]. Perhitungan *water footprint* membutuhkan nilai kebutuhan air tanaman yang dihitung berdasarkan evapotranspirasi potensial. Kebutuhan air tanaman biru dan hijau dibedakan berdasarkan sumbernya yaitu hijau: hujan dan biru air permukaan atau ground water [10]. Sedangkan pada perhitungan jejak air abu-abu tidak membutuhkan data evapotranspirasi dari tanaman karena difokuskan untuk penetral akibat polusi yang ditimbulkan akibat proses pemupukan. Perhitungan water footprint dihitung berdasarkan rumus dibawah [15].

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (7)$$

$$WF_{green} = CWU_{green}/Y \quad (8)$$

$$WF_{blue} = CWU_{blue}/Y \quad (9)$$

$$WF_{grey} = ((\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})) / Y \quad (10)$$

Keterangan:

WF = *water footprint* tanaman (m³/ton)
 WF_{green} = *green water footprint* tanaman (m³/ton)
 WF_{blue} = *blue water footprint* tanaman (m³/ton)
 WF_{grey} = *grey water footprint* tanaman (m³/ton)
 CWU_{green} = *crop water use/ET_{green}* (m³/ha)
 CWU_{blue} = *crop water use/ET_{blue}* (m³/ha)
 α = *times the leaching-run-off fraction* (-)
 AR = *chemical application rate to the field* (kg/ha)
 C_{max} = *maximum acceptable concentration* (kg/m³)
 C_{nat} = *natural concentration for the pollutant considered* (kg/m³)
 Y = *crop yield* (ton/ha)

2.4. Carbon footprint

Carbon footprint merupakan penggunaan total gas rumah kaca yang dihasilkan dalam proses pembuatan suatu produk. Pengukuran *carbon footprint* dapat dilakukan secara primer dan sekunder. Jejak karbon primer diperoleh melalui hasil pembakaran bahan bakar fosil. Jejak karbon sekunder dihasilkan

dari peralatan elektronik rumah tangga dengan menggunakan daya listrik. Berikut persamaan yang digunakan dalam menghitung *carbon footprint* [9].

$$\text{Emisi CO}_2 = \text{EF} \times \text{pemakaian listrik} \quad (11)$$

Keterangan:

Emisi CO₂ = Jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan (kgCO₂-eq/ tahun)

EF = Faktor emisi (kg CO₂/KWh)

Pemakaian listrik = Jumlah listrik yang dipakai (KWh)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kinerja Sistem Otomatisasi

Sistem irigasi otomatis yang digunakan pada penelitian ini menggunakan energi yang bersumber dari matahari. Energi panas yang dihasilkan oleh matahari diserap oleh panel surya yang dengan kapasitas 50 WP yang terhubung dengan *solar charger* dengan merk *LandStar 1024 EU 12V/10A*, relay 12 V, dan Aki dengan merk *MotorcycleFIT 12V/5A*. *Solar charger* dan aki terhubung dengan kontroler atau aktuatur berupa *data logger* dengan tipe GSM 2G dengan daya 12 V. *Data logger* berguna untuk mengatur *solenoid valve*, mencatat data pengukuran, dan mengirimkan data ke *cloud server*. *Cloud server* yang digunakan berupa *website kendali-irigasi.com* yang dapat dipantau melalui gawai. Kontroler terhubung dengan sensor *water level* dengan tipe ultrasonik dengan daya 3,3 V dan memiliki kemampuan mengukur 0-1 m dan *solenoid valve* 0,75 inchi dengan tegangan 12 V. Sensor *water level* berfungsi untuk memantau ketinggian air pada reservoir. Jika air pada reservoir berada pada level dibawah setpoint bawah maka kontroler akan membuka valve elektrik dan mengisi air pada reservoir. Pipa yang digunakan dari water supply menuju reservoir berdiameter 0,75 inchi dan dari reservoir ke box sawah berdiameter 1 inchi. Air yang masuk ke box sawah diukur dengan meteran air pada pipa sebelum reservoir dan pipa drainase setelah box sawah. Drainase pada box sawah diatur dengan kemiringan pipa. Skema irigasi otomatis dapat dilihat pada Gambar 1.

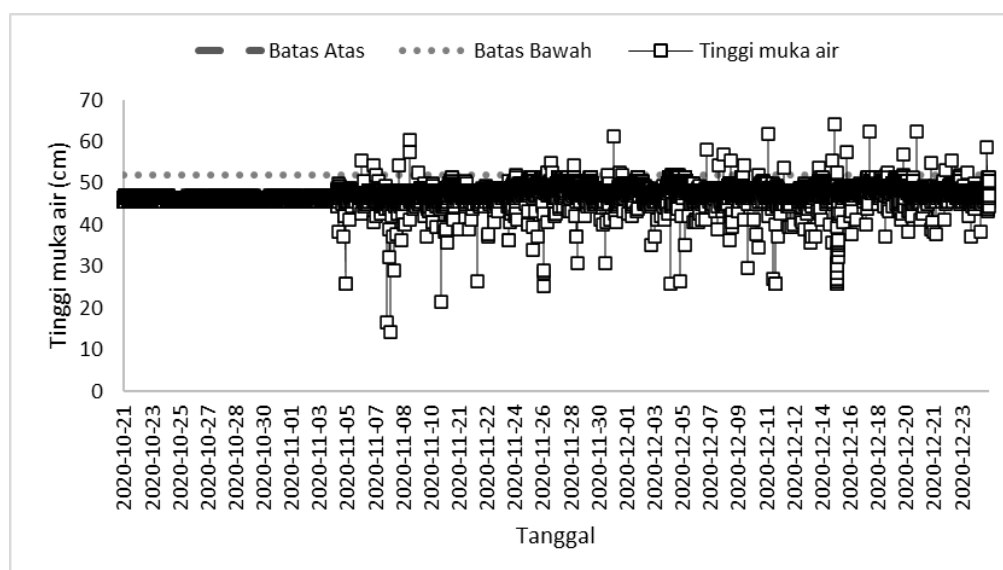


Gambar 1. Skema irigasi otomatis.

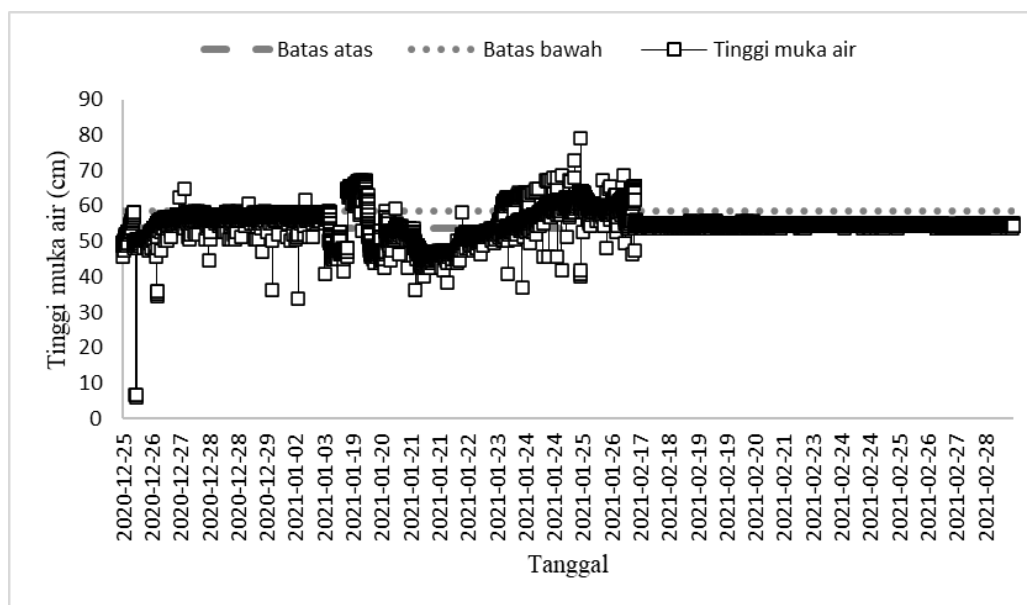
Kinerja alat dapat diukur didasarkan pada kemampuan membaca tinggi muka air dan mengatur tinggi muka air pada reservoir atau drum. Hasil dari pembacaan tinggi muka air yang tercatat pada *cloud server* perlu dilakukan kalibrasi agar mendapatkan ketinggian air yang sebenarnya. Pengaturan *set point* yang

digunakan pada musim tanam Oktober hingga Februari yaitu 2 set point yaitu pada masa vegetatif (pertumbuhan anakan) dan generatif (masa pengembang biakan) serta pada masa pematangan dan pengisian. Ketika masa vegetatif dan generatif, tinggi muka air pada reservoir diatur yaitu dengan batas atas 46 cm dan batas bawah 52 cm dari sensor atau setara dengan -3 cm dari permukaan tanah hingga tergenang 3 cm pada box sawah. Sedangkan pada masa pematangan dan pengisian, tinggi muka air pada reservoir diatur yaitu dengan batas atas 54 cm dan batas bawah 59 cm dari permukaan sensor atau setara dengan 9-4 cm dari permukaan tanah pada box sawah. Rentang waktu yang dihasilkan antara data satu dengan data yang lain berkisar ± 60 detik.

Berdasarkan hasil pengamatan pada bulan Oktober Sistem irigasi otomatis baru dipasang pada tanggal 21 Oktober 2020. Tinggi muka air pada bulan oktober berkisar 47-46 cm dari sensor. Namun hasil tersebut hanya tercatat berkisar 1-2 pada cloud server. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem irigasi otomatis yang terpasang belum bisa membaca tinggi muka air secara tepat dan perlu dilakukan kalibrasi ulang. Selanjutnya pada bulan November 2020 tanggal 1-4 alat masih menunjukkan kinerja yang sama dengan bulan sebelumnya yaitu berada pada rentang 47-46 cm dari atas permukaan reservoir. Selanjutnya pada tanggal 5-30 November 2020 alat dapat berfungsi secara optimal dapat dilihat dari data yang dihasilkan fluktuatif setiap harinya. Terdapat 28 data yang menunjukkan bahwa alat irigasi menyala secara otomatis dikarenakan tinggi muka air kurang atau sama dengan set point bawah. Selanjutnya pada bulan Desember 2021 sebagian besar data berada dalam rentang irigasi. Namun terdapat 105 data yang menunjukkan alat irigasi menyala secara otomatis. Pada tanggal 15 Desember 2020 terjadi perbaikan alat irigasi sehingga perubahan data yang signifikan. Selanjutnya pada tanggal 25 Desember 2020 terjadi perubahan set point menjadi batas atas 54 dan batas bawah 59. Pada tanggal 30 Desember 2020 hingga 1 Januari 2021 data tidak tercatat pada cloud server yang menunjukkan bahwa pada saat tersebut alat irigasi otomatis mati atau tidak terhubung dengan jaringan internet. Kemudian pada Bulan Januari 2021 alat kinerja otomatis tidak bekerja secara optimal. Hal tersebut ditandai dengan 43% data yang tercatat berada diluar batas irigasi sehingga alat irigasi otomatis lebih sering berfungsi. Pada tanggal 4-18 Januari 2021 data tidak tercatat pada *cloud server* dikarenakan tidak terhubung dengan internet. Begitu pula yang terjadi pada tanggal 26 Januari 2021 – 16 Februari 2021. Pada data selanjutnya pada bulan Februari 2021 terlihat seperti pada data bulan Oktober 2020 namun perbedaan yang terjadi yaitu bahwa terjadi kerusakan pada sensor sehingga tidak dapat mengukur ketinggian muka air pada reservoir. Hasil dari pengamatan dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Kinerja alat set point 46 – 52.



Gambar 3. Kinerja alat set point 54 – 59.

Periode musim tanam dari tanggal 15 Oktober 2020 hingga 4 Februari 2021 dengan total hari yaitu 113 hari. Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3 bahwa 7 hari pertama merupakan persiapan pemasangan alat irigasi Otomatis. Terdapat 15 hari yang menunjukkan bahwa alat irigasi menyala namun tidak dapat mengukur ketinggian muka air. Kemudian terdapat 65 hari dimana irigasi otomatis dapat menyala dan dapat membaca ketinggian muka air. Terakhir terdapat 26 hari irigasi otomatis tidak dapat berfungsi sehingga data tidak tercatat pada *cloud server*. Menurut [16], pengiriman data dengan media *wireless* memiliki kelemahan yaitu memiliki kemungkinan kehilangan data yang diakibatkan interferensi dengan sinyal lain. Selain itu dapat juga disebabkan oleh tidak terhubungnya kontroler dengan jaringan internet sehingga tidak dapat mengirimkan data. Pada musim tanam selanjutnya yaitu dari 5 Februari hingga 23 April 2021 dengan total hari 78 hari, tidak terdapat data pengukuran dikarenakan sensor rusak.

3.2. Water Footprint

Perhitungan *water footprint* didahului oleh perhitungan kebutuhan air tanaman. Kebutuhan air tanaman dapat diperoleh melalui perkalian antara evapotranspirasi potensial dan koefisien tanaman [10]. Evapotranspirasi potensial diperoleh melalui data cuaca yang berada di tempat pengamatan yaitu Wisma Wageningen yang diunduh melalui aplikasi ECH₂O. Data yang dikumpulkan berupa data kelembaban, temperatur, tekanan udara, dan lama penyinaran selama satu hari dengan rentang antar data yaitu selama 5 menit. Perhitungan evapotranspirasi potensial dilakukan dengan bantuan *Microsoft Excel* dengan menggunakan metode Hargreaves dikarenakan ketersediaan data. Hasil dari perhitungan kebutuhan air tanaman ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil dari perhitungan kebutuhan air tanaman.

Bulan/Kegiatan	Suhu rata-rata (°C)	Lama Penyinaran (MJ/m ² /bulan)	ET _o (mm/bulan)	ET _c (mm/bulan)	Curah hujan (mm)
Oktober	26,4	124,7	74,4	94,1	576
November	27	214,5	130	149,3	862
Desember	26,2	210,2	129,1	144,3	720
Januari	25,8	259,7	153,4	190,3	1615
Februari	26	254,7	151,7	148,3	875
Maret	27	371,4	233,3	254,7	77
April	26,9	282,4	170,4	219,9	4

Data koefisien tanaman dipengaruhi oleh pengaturan tinggi muka air pada lahan [17]. Keterbatasan data mengharuskan data koefisien tanaman diperoleh melalui studi literatur oleh [17] yaitu pada ketinggian genangan 0 cm atau setara muka tanah bahwa saat fase initial nilai koefisien tanaman bernilai antara 1,28-1,18; pada fase development bernilai antara 1,18-1,04; pada fase mid-season bernilai antara 1,04-1,44. Sedangkan pada ketinggian genangan -7 cm dari permukaan tanah pada fase mid-season nilai koefisien tanaman bernilai 1,09-1,28; dan pada fase late-season bernilai 1,09-1,28 1,28-1,18. Peralihan perbedaan ketinggian genangan air dari 0 cm ke -7 cm dari permukaan lahan dilakukan agar bulir padi menjadi berisi dan peralihan dari masa generatif menjadi masa pengisian dan pematangan [18]. Rata-rata evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi tanaman berturut-turut sebesar 4,4 dan 5,3 mm/hari. Hasil tersebut sesuai untuk tanaman padi pada dataran rendah yang memiliki evapotranspirasi tanaman bernilai 4-5 mm/hari.

Selanjutnya pada musim tanam kedua dilakukan budidaya padi salibu. Budidaya salibu merupakan varian teknologi budidaya ratun, yaitu tunggu setelah panen tanaman utama yang tingginya sekitar 25 cm, dipelihara selama 7-10 hari atau dibiarkan hingga keluar tunas baru. Tunas yang tumbuh >70% maka potong kembali secara seragam hingga ketinggian 3-5 cm, kemudian dipelihara dengan baik hingga panen [19]. Musim tanam kedua menggunakan nilai *set point* -3 cm dan -5 cm dari permukaan dengan nilai koefisien tanaman untuk *set point* -3 cm yaitu 0,87-1,06 dan *set point* -5 cm yaitu 1-1,31 [17]. Nilai rata-rata evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi tanaman berturut-turut sebesar 6,9 dan 7,7 mm/hari. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan dengan evapotranspirasi yang terjadi pada musim pertama dikarenakan tingginya nilai rata-rata suhu harian serta lama penyinaran. Hasil tersebut sesuai menurut [18] bahwa nilai rata-rata evapotranspirasi tanaman padi IPB 3S di Kabupaten Bogor dengan irigasi pipa metode konvensional bernilai 6,8 – 7,3 mm/hari.

Perhitungan *water footprint* diperoleh melalui penggunaan air untuk memenuhi kebutuhan tanaman. Pemberian air dari tanaman diperoleh melalui irigasi otomatis serta hujan. Pada studi ini tidak digunakan curah hujan efektif dikarenakan asumsi bahwa hujan yang jatuh terserap oleh tanaman atau tidak ada hujan yang hilang. Selain itu dikarenakan letak stasiun cuaca yang dekat dengan lahan percobaan yaitu berjarak ± 5m. Hal tersebut dikarenakan menurut World Meteorological Organization (WMO) stasiun cuaca dapat menggambarkan cuaca seluas 25 km² untuk wilayah tropis [20]. Air yang masuk dan keluar diukur melalui meteran air dengan satuan liter. Dikarenakan meteran air baru terpasang ketika padi sudah ditanam maka digunakan studi literatur air yang digunakan untuk proses persemaian, persiapan lahan, penanaman dan pemupukan. Pengaturan air yang keluar melalui pipa diatur ketinggiannya oleh pipa set sehingga tidak terjadi banjir pada lahan. Penanaman padi dilakukan pada musim hujan dan musim

kemarau dapat dilihat dari nilai curah hujan yang terjadi selama bulan Oktober-Februari melebihi 200 mm/bulan. Serta pada bulan Maret-April nilai curah hujan kurang dari 100 mm/bulan. Menurut metode Oldeman, jika hujan melebihi 200 mm/bulan maka tergolong dalam bulan basah serta hujan sama atau lebih kecil dari 100 mm/bulan maka tergolong bulan kering [21]. Perhitungan jejak air hijau diperoleh melalui air hujan yang dimanfaatkan oleh tanaman dan jejak air biru diperoleh melalui air yang digunakan untuk irigasi selama musim tanam [22]. Ketika ingin menentukan jumlah jejak air hijau dan jejak air biru berdasarkan sumber ketersediaan, komponen-komponen yang ada harus dirincikan terlebih dahulu. Selama penggunaan air hujan untuk pertanian diambil dari air yang mengalir maka tergolong ke dalam air biru sedangkan pada saat hujan turun kemudian ditampung pada lahan tanpa dialirkan ke tempat lain dalam satu wilayah tangkapan maka tergolong dalam air hijau. Hasil dari perhitungan kebutuhan air tanaman hijau dan biru dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan *blue water footprint* dan *green water footprint*.

Bulan/ Kegiatan	ETc (mm/ bulan)	Curah Hujan (L/4m ²)	Irigasi (L/4m ²)	Drainas e (L/4m ²)	ET green (L/4m ²)	ET blue (L/4m ²)	WF green (L/kg)	WF blue (L/kg)
Persemaian dan Persiapan Lahan Penanaman dan Pemupukan					163,2	242,7	54,4	80,9
Oktober	376,5	2304	227,2	693,2	206,3	227,2	68,8	75,7
November	597,4	3448	260	142,76	314,3	260	104,8	86,7
Desember	577,3	2880	972,7	510,39	239,1	972,7	79,7	324,2
Januari	761,3	6460	159	635,24	539,4	159	179,8	53
Februari	593,4	3500	34,4	803,9	593,4	34,4	1274,5	209,7
Maret	1018,9	308	54,9	138,1	276,8	54,9	675,2	334,7
April	879,7	16	98	184	16	98	39	597,7

Adanya drainase disebabkan karena air hujan sudah tidak bisa ditampung lagi oleh lahan. Air yang keluar melalui drainase sebesar 3107,6 liter yang seharusnya dapat digunakan kembali, namun dikarenakan keterbatasan alat penelitian sehingga air tidak dapat ditampung. Hasil neraca air dari musim tanam pertama sebesar 14.326,8 L. Hasil tersebut merupakan penjumlahan dari air masuk (irigasi dan hujan) dikurangi dengan air keluar (ETc dan drainase). Sedangkan pada musim kedua terjadi kekurangan air dikarenakan nilai dari neraca air yaitu -232,6 L. Terjadi perbedaan yang signifikan pada nilai hujan bulanan yang sangat kecil pada bulan Maret dan April dimungkinkan terjadi kerusakan alat pengukur hujan.

Menurut [5], pada tahapan persemaian dan persiapan lahan serta penanaman dan pemupukan pada padi organik membutuhkan 338,4 L air hijau dan 242,74 L air biru. Pada pemberian air irigasi paling banyak yaitu pada 3 bulan awal atau dengan total hari 78 hari. Berdasarkan fase tanam padi pada hari ke-0 hingga hari ke-78 tergolong dalam fase vegetatif dan fase generatif sehingga pada fase tersebut

membutuhkan lebih banyak irigasi khususnya pada bulan Desember sebesar 972,7 liter. Hal tersebut dikarenakan pada fase vegetatif, padi dalam tahapan pertumbuhan kembangan dibagian akar, batang, dan daun jika kekurangan air maka akan menyebabkan terhambatnya pertumbuhan serta jumlah anakan yang sedikit. Pada fase generatif yaitu mulai mengeluari malainya dan akan terus berkembang seiring bertambahnya usia tanam [23]. Nilai kebutuhan air hijau diperoleh melalui nilai minimum antara curah hujan dan evapotranspirasi tanaman harian dan nilai jejak air biru diperoleh dari irigasi yang digunakan [10]. Total kebutuhan air hijau dan biru yang digunakan selama musim tanam pertama berturut-turut yaitu 1722,2 liter dan 1861,6 liter untuk lahan seluas 4 m². Sedangkan pada musim tanam kedua kebutuhan air hijau dan biru berturut-turut yaitu 801,48 liter dan 187,3 liter. Hasil tersebut lebih rendah jika dibandingkan dengan penanaman padi pada Kabupaten Malang dari tahun 2008-2011 dengan total kebutuhan air hijau dan biru yang digunakan selama musim tanam berturut-turut yaitu 3475 liter dan 3571,6 liter untuk lahan seluas 4 m².

Berdasarkan data hasil panen musim tanam pertama dan kedua berturut-turut, diperoleh total berat gabah kering giling (GKG) sebesar 3 kg dan 0,5 kg gabah kering panen (GKP) untuk lahan seluas 4 m². Hasil tersebut jika dikonversi menjadi ton per hektar setara dengan 7,5 t/ha dan 1,025 t/ha. Menurut [5], nilai konversi dari gabah kering panen (GKP) menjadi gabah kering giling (GKG) yaitu 83-86% serta dari gabah kering giling (GKG) menjadi beras yaitu 65-68%. Sehingga diperoleh hasil panen musim tanam sebesar 0,41 kg (GKG) untuk lahan seluas 4 m² atau setara dengan 1,025 t/ha. Hasil musim tanam pertama lebih tinggi dibandingkan produktivitas padi rata-rata Jawa Barat pada tahun 2019 sebesar 5.75 ton/Ha [24]. Hal yang dapat memengaruhi hasil panen diantaranya luas lahan, penggunaan pupuk, dan sistem tanam [25]. Adapun pada musim tanam kedua nilainya sangat rendah disebabkan adanya gangguan hama. Hama yang paling banyak terdapat di lahan yaitu *Pareucosmetus sp.* yang dewasa berwarna hitam dan berbentuk memanjang dengan tubuh yang agak keras dengan ukuran tubuh 8-12 mm. Hama ini menyerang tanaman padi sawah dengan menghisap cairan pada bulir padi baik yang masih muda maupun yang sudah hampir matang. Akibat dari serangan hama ini, menyebabkan bulir padi menjadi hampa atau kosong. Gejala serangan hama *Pareucosmetus sp* mirip dengan gejala serangan *Leptocorixa acuta* yaitu adanya bulir padi hampa dan bintik-bintik coklat sampai pada bulir-bulir yang sudah tua [26].

Total dari *green water footprint* dan *blue water footprint* pada musim pertama berturut-turut 574,1 l/kg dan 620,5 l/kg. Sedangkan total dari *green water footprint* dan *blue water footprint* pada musim kedua berturut-turut 1954,8 l/kg dan 1142,1 l/kg. Total keseluruhan dari *green water footprint* dan *blue water footprint* berturut-turut 2528,9 l/kg dan 1762,6 l/kg. Nilai konversi dari l/kg ke m³/ton bernilai 1 maka dapat dikatakan hasil tersebut setara dengan 2528,9 m³/ton dan 1762,6 m³/ton. Hasil tersebut lebih besar dibandingkan dengan rata-rata jejak air padi di provinsi banten tahun 2017 dengan pengaliran secara konvensional. Nilai dari *blue water footprint* dan *green water footprint* di provinsi banten yaitu 1.332 m³/ton dan 1.994 m³/ton [27]. Hal tersebut disebabkan pada musim tanam kedua produktivitas lahannya sangat rendah dikarenakan banyaknya hama.

Perhitungan kebutuhan air abu-abu dapat diperoleh melalui perhitungan bahan kimia yang diterima badan air atau penyerapan zat kimia oleh tanaman [28]. Bahan kimia yang digunakan berupa pupuk kambing, urea, NPK, KCl, dan TSP serta pestisida yang mengandung metomil 25%. Data penggunaan bahan kimia secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 3. Pupuk memiliki komponen penyusun diantaranya berupa nitrogen (N) dan fosfor (P) yang dibutuhkan dalam jumlah besar oleh tanaman. Nitrogen pada umumnya diserap tanaman dalam bentuk NH₄ atau NO₃, yang dipengaruhi oleh jenis tanaman, sifat tanah, dan tahapan dalam pertumbuhan tanaman sedangkan fosfor diserap dalam bentuk *k ortofosfat primer* (H₂PO₄) dan sebagian kecil dalam bentuk ortofosfat sekunder (HPO₄) [29]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air Dan Pengendalian

Pencemaran Air terdapat 2 parameter yang terdapat pada baku mutu tersebut berupa nitrogen dan fosfor. Hasil dari perhitungan kebutuhan air abu-abu Tabel 4.

Tabel 3. Penggunaan pupuk.

Pupuk	Total Penggunaan (g)	Kandungan Nitrogen dan Pospor		Total Kandungan (g)
Urea	24,0625	N	46%	11,06875
		P		
NPK	22,5	N	15%	3,375
		P	15%	3,375
KCl	11,5625	N		
		P		
TSP	22,5	N		
		P	45%	10,125
Pupuk Kandang	64000	N	1,70%	1088
		P	0,65%	416
Pestisida (metomil 25%)	50			

Tabel 4. Hasil perhitungan *grey water footprint*.

Mineral	AR (mg)	α	Cmax (mg/L)	Cnat (mg/L)	GWF (L)	GWF I (L/kg)	GWF II (L/kg)
N	1102444	0,1	20	0,1	5539,9	1846,639	13512
P	429500	0,03	1	0,01	13015	4338,384	31744,3

Nilai AR merupakan aplikasi bahan kimia pada atau ke dalam tanah dan *alpha* merupakan fraksi zat kimia yang mencapai badan air tawar [28]. Nilai AR diperoleh melalui total penggunaan bahan kimia yang terdapat pada Tabel 3. Nilai *alpha* dipengaruhi oleh faktor lingkungan berupa sifat tanah, iklim, dan praktek pengelolaan. Jika tidak terdapat data yang menunjang untuk menghitung nilai alpha maka dapat digunakan referensi dapat berupa 0,1 untuk nitrogen dan 0,03 untuk fosfat [28]. Konsentrasi maksimum atau baku mutu untuk nitrogen dan fosfat digunakan untuk badan air kelas III yang dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut [30]. Konsentrasi natural merupakan konsentrasi yang ada hanya karena proses alam dan geologi [28]. Total dari Kebutuhan air abu-abu sebesar 18.555 liter. Hasil tersebut jauh lebih besar dibandingkan dengan rata-rata kebutuhan air abu-abu rata-rata negara Asia Tenggara dari tahun 1996-2005 yaitu sebesar 208,2 liter [31]. Dibandingkan juga dengan kebutuhan air abu-abu pada Kabupaten Malang dari tahun 2008-2011 dengan rata-rata 842,6 liter. Total dari grey water footptint satu musim tanam diperoleh 6185 l/kg. Besarnya pupuk yang digunakan pada musim tanam pertama sama dengan musim tanam kedua namun terdapat perbedaan pada hasil panen musim kedua sebesar 0,41 kg dari yang sebelumnya 3 kg sehingga memiliki nilai grey water footptint sama sehingga total grey water footptint 51.441,3 l/kg. (jika dikonversi 51.441,3 m³/ton). Hasil tersebut jauh melebihi nilai rata-rata grey water footptint di provinsi banten tahun 2017 yang hanya sebesar 205 m³/ton [27]. Penyebab besarnya nilai dari kebutuhan air abu-abu dikarenakan besarnya penggunaan pupuk kandang yaitu sebanyak 64 kg untuk lahan sebesar 4 m². Pada kondisi sebenarnya di lapangan air drainase dari lahan membutuhkan jarak yang panjang hingga ke badan air oleh karena

itu kebutuhan air abu-abu dapat diasumsikan bernilai sama dengan nol. Total dari keseluruhan water footprint dari budidaya padi dengan irigasi otomatis bawah permukaan secara teoritis sebesar 55.732,8 m³/ton. Hal tersebut dikarenakan besarnya penggunaan pupuk kandang serta rendahnya produktivitas pada musim kedua. Namun jika nilai dari grey water footprint sama dengan nol maka nilai dari water footprint sebesar 4291,5 m³/ton/ton. Hasil tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata water footprint provinsi Banten tahun 2017 sebesar 3326 m³/ton [27].

3.3. Carbon Footprint

Perhitungan *carbon footprint* dilakukan hanya pada penggunaan listrik selama musim tanam yang dihasilkan dari irigasi otomatis. Peralatan yang digunakan selama satu musim tanam beserta spesifikasi peralatan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Penggunaan energi selama musim tanam.

Peralatan	Tegangan	Arus	Daya	Waktu	Penggunaan energi
	(V)	(A)	(W)	(jam)	(kWh)
Panel Surya	12,0	4,2	50,0	1860,6	93,0
Data logger	12,0	2,0	24,0	1860,6	44,7
Sensor TMA	3,3	0,2x10 ⁻²	0,0	1860,6	0,1x10 ⁻¹
Solenoid Valve elektrik (3/4")	12,0	2,0	24,0	1860,6	44,7
Aki	12,0	5,0	60,0	1860,6	111,6
Solar Charge controller	12,0	10,0	120,0	1860,6	223,3
Relay	12,0	10,0	120,0	1860,6	223,3
CCTV	12,0	2,0	24,0	1860,6	44,7

Tabel 6. Faktor emisi.

Negara	Faktor emisi		
	kgCO ₂ /kWh	kgCH ₄ /kWh	kgN ₂ O/kWh
Indonesia	0,77	1,5 x 10 ⁻⁵	8,7 x 10 ⁻⁶

Sumber: [32]

Nilai tegangan dan arus diperoleh melalui spesifikasi peralatan yang tersedia. Daya dari suatu peralatan listrik diperoleh melalui perkalian tegangan dan arus. Daya menggambarkan daya sebenarnya yang dibutuhkan untuk oleh beban-beban peralatan listrik [33]. Lama waktu penggunaan didasarkan pada perhitungan hari aktif irigasi otomatis dikarenakan walaupun irigasi tidak mengalir namun alat irigasi tetap berjalan dalam kondisi idle. Berdasarkan Tabel 5, total penggunaan energi oleh irigasi otomatis sebesar 785,2 kWh. Faktor emisi dari penggunaan listrik dapat dilihat pada Tabel 6. Hasil dari estimasi total carbon footprint yang dihasilkan pada musim tanam pertama sebesar 608,04 kgCO₂-eq/ tahun. Pada musim kedua alat irigasi otomatis tidak berfungsi sehingga nilai dari total carbon footprint sama dengan nol. Apabila pada musim kedua diasumsikan alat irigasi berfungsi secara optimal selama masa tanam maka hasil dari estimasi total carbon footprint sama dengan musim tanam pertama sebesar 608,04 kgCO₂-eq/ tahun.

4. Kesimpulan

1. Musim tanam pertama terdiri dari 113 hari, 7 hari pertama merupakan persiapan pemasangan alat irigasi Otomatis. Terdapat 15 hari yang menunjukkan bahwa alat irigasi menyala namun tidak dapat mengukur ketinggian muka air. Kemudian terdapat 65 hari irigasi otomatis dapat menyala dan dapat membaca ketinggian muka air. Terakhir terdapat 26 hari irigasi otomatis tidak dapat berfungsi sehingga data tidak tercatat pada cloud server. Musim tanam kedua alat irigasi otomatis tidak berfungsi.
2. Besar water footprint yang dihasilkan dari proses irigasi bawah permukaan otomatis untuk menghasilkan produk padi sebesar 55.732,8 m³/ton.
3. Besar carbon footprint yang dihasilkan dari peralatan irigasi bawah permukaan otomatis untuk menghasilkan produk padi sebesar 608,04 kgCO₂-eq/ tahun.

Daftar Pustaka

- [1] Wijaya A, Rivai M. Monitoring dan kontrol sistem irigasi berbasis iot menggunakan banana pi. *Jurnal Teknik ITS*. 2018; 7(2): 288-292.
- [2] Waladi A. Penerapan konsep internet of things pada sistem pengendali otomatis irigasi lahan produksi. [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2017.
- [3] Setiawan P, Anggraeni EY. Purwarupa sistem pengairan sawah otomatis dengan arduino berbasis artificial intelegent. *Jurnal Sistem Informasi dan Telematika*. 2018; 9(2): 143-151.
- [4] Budiman ME. Water footprint produksi gula tebu. *Jurnal Rekayasa Teknologi dan Sains*. 2017; 1(2): 120-131.
- [5] Putra H. Kajian jejak air komoditas padi organik. [tesis]. Depok: Universitas Indonesia, 2019.
- [6] [ADB] Asian Development Bank. *Indonesia Country Water Assesment*. Mandaluyong(PH): Asian Development Bank, 2016.
- [7] Utamaningsih W, Hidayah S. Mitigasi emisi gas rumah kaca melalui penerapan irigasi intermitten di lahan sawah beririgasi. *Jurnal Irigasi*. 2012; 7(2): 132-141.
- [8] Saptomo SK, Esmeralda AZ, Purwanto MYJ. Solar powered automated pipe water management system, water footprint and carbon footprint in soybean production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ* 2018. Sci. 147 012030. 1-9.
- [9] Prihatmaji YP, Fauzy A, Rais S, firdaus F. Analisis carbon footprint gedung perpustakaan pusat, rektorat, dan Lab. Mipa UII berbasis vegetasi eksisting sebagai pereduksi emisi gas rumah kaca. *Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2016; 1(2): 148-155.
- [10] Esmeralda AZR. Analisis water footprint dan carbon footprint sistem otomasi irigasi dan drainase pipa pada tanaman kedelai di Cikarawang, Bogor, Jawa barat. [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2017.
- [11] Subagyono K. Dariah A, Surmaini E. Kurnia U. *Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya*. 2004.
- [12] Rosadi B. *Dasar-Dasar Teknik Irigasi*. Bandar Lampung: Graha Ilmu, 2015.
- [13] Arif C, Setiawan BI, Sofiyuddin AH. Analisis evapotranspirasi potensial pada berbagai model empiris dan jaringan syaraf tiruan dengan data cuaca terbatas. *Jurnal Irigasi*. 2020; 15(2): 71-84.

- [14] WU IP. *A Simple Evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model (CTAHR Fact Sheet, Engineer's Notebook No. 106)*. Manoa (HI): University of Hawaii, 1997.
- [15] Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. *Water Footprint Manual State of the Art 2009*. Enschede (NL): Water Footprint Network, 2009.
- [16] Yuliansyah H. Uji kinerja pengiriman data secara wireless menggunakan modul ESP8266 berbasis rest architecture [diakses 2021 Jun 1]. *Jurnal Rekayasa dan Teknik Elektro*. 2016; 10(2): 68-77. <https://electrician.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/217>.
- [17] Hasanah NAI, Setiawan BI, Arif C, Widodo S. Evaluasi koefisien tanaman padi pada berbagai perlakuan muka air [diakses 2021 Jun 2]. *Jurnal Irigasi*. 2015; 10(2): 57-68. http://jurnalirigasi_pusair.pu.go.id/index.php/jurnal_irigasi/article/view/24.
- [18] Fuadi NA, Purwanto MYJ, Tarigan SD. Kajian kebutuhan air dan produktivitas air padi sawah dengan sistem pemberian air secara sri dan konvensional menggunakan irigasi pipa [diakses 2021 Juni 2]. *Jurnal Irigasi*. 2016; 11(1): 23-32. http://jurnalirigasi_pusair.pu.go.id/index.php/jurnal_irigasi/article/view/180.
- [19] Abdulrachman S et al. *Panduan Teknologi Budidaya Padi Salibu*. Jakarta: Kementerian Pertanian, 2015.
- [20] Ismi A, Hadi MP. Efisiensi jumlah stasiun hujan untuk analisis hujan tahunan di Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta [diakses 2021 Jun 19]. *Jurnal Bumi Indonesia*. 2016; 5(1): <http://lib.geo.ugm.ac.id/ojs/index.php/jbi/issue/view/17>
- [21] Lakitan B. *Dasar-Dasar Klimatologi*. Jakarta: PT. Raja Grafindo, 2002.
- [22] Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. *The Waterfootprint Assesment Manual: Setting the Global Standard*. London (UK): Earthscan, 2011.
- [23] Rahmadani S, Nurrochmad F, Sujono J. Analisis sistem pemberian air terhadap tanah sawah berbahan organik. *Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan dan Sipil*. 2020; 6(2): 66-75.
- [24] [BPS] Badan Pusat Statistik. *Luas Panen dan Produksi Padi di Jawa Barat 2019*. Bandung: Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat, 2020.
- [25] Akbar I, Budiraharjo K, Mukson. Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas padi di Kecamatan Kesesi, Kabupaten Pekalongan [diakses 2021 Jun 27]. *Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*. 2017; 1(2): 99-111. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/agrisociconomics/article/view/1820>.
- [26] Manueke J, Assa BH, Pelealu EA. Hama-hama pada tanaman padi sawah (*oryza sativa* L.) di Kelurahan Makalonsow Kecamatan Tondano Timur Kabupaten Minahasa. *Eugenia*. 2017; 23(3): 120-127.
- [27] Hartono N, Laurence, Johannes HP. Identification, measurement, and assessment of water cycle of unhusked rice agricultural phases: Case study at Tangerang paddy field, Indonesia [diakses 2021 Jun 28]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 273, 2017.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/1/012009>

- [28] Franke NA, Boyacioglu H, Hoekstra AY. *Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines*. Delft (NL): UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2013.
- [29] Fahmi A, Syamsudin, Utami SNH, Radjagukguk B. Pengaruh interaksi hara nitrogen dan fosfor terhadap pertumbuhan tanaman jagung (*zea mays l*) pada tanah regosol dan latosol. *Berita Biologi*. 2010; 10(3): 297-304.
- [30] [PP] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.2001.
- [31] Mekonnen MM, Hoekstra AY. *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products*. *Hydrology and Earth System Sciences* 2011. 15(): 1577-1600.
- [32] Branden M, Sood A, Wylie C, Haughton A, Lovell J. X. Technical paper | electricity-specific emission factors for grid electricity. *Paper Ecometrica*. 2016; 1-22.
- [33] Roby F. Perbaikan faktor daya untuk beban rumah tangga secara otomatis. [*skripsi*] [diakses 2021 Jun 25]; Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya, 2016. <http://eprints.polsri.ac.id/3807/>

