

PERANCANGAN SISTEM IRIGASI BERBASIS *WATER-ENERGY NEXUS* MENGGUNAKAN POMPA SUBMERSIBLE TENAGA SURYA PADA LAHAN HORTIKULTURA TADAH HUJAN

Jeni Paresa¹⁾, Muh. Akbar^{2,*})

^{1,2*)}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Musamus

Email : akabr@unmus.ac.id

Abstrak

Lahan hortikultura tadah hujan menghadapi keterbatasan ketersediaan air dan ketergantungan tinggi terhadap energi konvensional dalam sistem irigasi. Sistem irigasi permukaan yang umum digunakan membutuhkan volume air besar serta biaya operasional tinggi akibat penggunaan pompa berbahan bakar fosil. Kondisi ini mendorong perlunya pendekatan irigasi yang mampu mengintegrasikan efisiensi air dan energi secara simultan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kinerja sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* menggunakan pompa submersible tenaga surya pada lahan hortikultura tadah hujan. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan rekayasa sistem melalui integrasi subsistem energi surya, pemompaan, penyimpanan air, dan distribusi air berbasis gravitasi. Sistem energi menggunakan panel fotovoltaik berkapasitas 900 Wp yang dilengkapi baterai penyimpanan, sedangkan sistem pemompaan menggunakan pompa submersible berdaya 750 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan energi listrik harian sebesar 2,07 kWh yang mendukung operasional pompa selama 1 jam 53 menit dan menghasilkan volume air terpompa sebesar 83.979 liter dengan debit rata-rata 0,0124 m³/s. Analisis kebutuhan air menunjukkan bahwa irigasi permukaan membutuhkan sekitar 250.000 liter untuk lahan seluas 0,25 ha, sementara sistem mampu memenuhi sekitar 33,6% dari kebutuhan tersebut dalam satu siklus irigasi.

Kata kunci : *water-energy nexus*, irigasi, pompa submersible, tenaga surya, hortikultura tadah hujan

Abstract

Rainfed horticultural land faces limited water availability and high dependence on conventional energy for irrigation systems. Surface irrigation practices commonly require large volumes of water and incur high operational costs due to fossil fuel-based pumping. These conditions highlight the need for irrigation approaches that integrate water and energy efficiency simultaneously. This study aims to design and evaluate the performance of an irrigation system based on the water-energy nexus using a solar-powered submersible pump for rainfed horticultural land. An experimental method with a system engineering approach was applied by integrating solar energy, pumping, water storage, and gravity-based water distribution subsystems. The energy system employed photovoltaic panels with an installed capacity of 900 Wp equipped with battery storage, while the pumping system used a 750 W submersible pump. The results show that the system produced 2.07 kWh of daily electrical energy, enabling pump operation for 1 hour and 53 minutes and generating a pumped water volume of 83,979 liters with an average discharge of 0.0124 m³/s. Water demand analysis indicates that surface irrigation requires approximately 250,000 liters for a 0.25 ha area, while the system supplied about 33.6% of this demand per irrigation cycle.

Keyword: *water-energy nexus, irrigation, submersible pump, solar energy, rainfed horticulture*

PENDAHULUAN

Pertanian hortikultura pada lahan tadah hujan menghadapi keterbatasan suplai air yang berdampak langsung pada keberlanjutan sistem irigasi [1,2]. Kabupaten Merauke berperan sebagai salah satu sentra hortikultura utama di Provinsi Papua Selatan dengan produksi tanaman sayuran mencapai 2.078,42 ton dan luas tanam sekitar 170 ha. Sebagian besar lahan pertanian tersebut merupakan lahan tadah hujan sehingga petani sangat bergantung pada curah hujan sebagai sumber utama air [1,3]. Ketergantungan ini menyebabkan ketidakstabilan ketersediaan air terutama pada musim kemarau [2,4]. Petani kemudian memanfaatkan kolam penampungan air untuk menjaga suplai irigasi. Namun perbedaan elevasi antara kolam penampungan dan lahan pertanian menuntut penggunaan pompa agar air dapat dialirkan secara efektif [5].

Petani hortikultura umumnya menerapkan sistem irigasi permukaan yang membutuhkan volume air dalam jumlah besar [3,6]. Kebutuhan air pada sistem ini berkisar antara 120.000 hingga 240.000 liter per hektar pada setiap periode tanam [4,6]. Petani memenuhi kebutuhan tersebut dengan menggunakan pompa berbahan bakar bensin. Pompa tersebut mengonsumsi sekitar 60 liter bensin per hektar sehingga biaya operasional irigasi mencapai Rp4.200.000 per musim tanam. Kondisi ini meningkatkan biaya produksi pertanian secara signifikan [7,8]. Selain itu keterbatasan distribusi bahan bakar bersubsidi di wilayah terpencil menyebabkan ketidakpastian operasional sistem irigasi. Situasi tersebut menurunkan efisiensi usaha tani dan berpotensi mengganggu kontinuitas produksi hortikultura [8].

Permasalahan ketersediaan air dan tingginya konsumsi energi menunjukkan urgensi pengembangan sistem irigasi yang mampu mengintegrasikan efisiensi air dan

energi secara bersamaan [9–11]. Kabupaten Merauke memiliki potensi energi surya yang besar karena intensitas radiasi matahari mampu menghasilkan daya hingga $\pm 270 \text{ W/m}^2$ [12–14]. Potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan untuk mendukung sistem irigasi pertanian. Pemanfaatan pompa submersible tenaga surya memungkinkan pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil [13,15]. Selain itu penerapan tandon air bertingkat memungkinkan penyimpanan air sehingga distribusi air dapat dilakukan secara gravitasi [11,16]. Sistem ini dapat meningkatkan keandalan irigasi meskipun terjadi fluktuasi radiasi matahari harian [10].

Penelitian ini melibatkan variabel bebas dan variabel terikat yang membentuk satu kesatuan sistem irigasi [9]. Variabel bebas mencakup kinerja sistem energi surya yang direpresentasikan oleh kapasitas panel fotovoltaik sebesar 900 Wp serta energi listrik harian yang mencapai $\pm 2.067 \text{ Wh}$ dan kapasitas baterai 24 V 200 Ah. Variabel bebas lainnya mencakup konfigurasi pompa submersible dan sistem tandon air bertingkat. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kinerja hidraulik sistem irigasi permukaan. Kinerja tersebut dinyatakan melalui debit aliran dan volume air terdistribusi yang mencapai 83.979 liter serta durasi operasi pompa dan luas layanan irigasi sekitar 0,25 ha dengan tinggi muka air $\pm 10 \text{ cm}$ [5,10].

Sebagian besar penelitian terdahulu menempatkan energi surya hanya sebagai sumber penggerak pompa irigasi. Penelitian tersebut umumnya belum mengkaji hubungan antara kebutuhan air dan konsumsi energi secara terpadu dalam satu sistem. Sistem irigasi tenaga surya sering dioperasikan secara langsung mengikuti ketersediaan radiasi matahari sehingga keandalan suplai air masih terbatas [6,13,14,17]. Pendekatan perancangan yang menggabungkan pompa submersible tenaga surya dengan tandon air bertingkat

memberikan mekanisme penyimpanan energi dalam bentuk energi potensial air. Pendekatan ini memungkinkan distribusi air yang lebih stabil dan efisien pada sistem irigasi permukaan lahan hortikultura tadah hujan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* menggunakan pompa submersible tenaga surya pada lahan hortikultura tadah hujan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem energi surya dalam mendukung operasional pompa irigasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis kinerja hidraulik sistem irigasi permukaan yang dihasilkan. Selain itu penelitian ini bertujuan untuk menilai efektivitas tandon air sebagai media penyimpanan dan distribusi air berbasis gravitasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem irigasi berkelanjutan yang efisien dan aplikatif pada wilayah pertanian tadah hujan.

METODE PENELITIAN

a. Pendekatan Rekayasa Sistem Irigasi

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem untuk merancang dan mengevaluasi sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* pada lahan hortikultura tadah hujan. Pendekatan ini memandang sistem irigasi sebagai satu kesatuan fungsional yang terdiri atas subsistem energi, subsistem pemompaan, subsistem penyimpanan air, dan subsistem distribusi hidraulik [10,11]. Penelitian ini bersifat eksperimental terapan dan menekankan evaluasi kinerja sistem secara terintegrasi pada kondisi lapangan. Pendekatan rekayasa sistem digunakan karena mampu menjelaskan keterkaitan antara ketersediaan energi surya, kinerja pompa submersible, dan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan air irigasi secara berkelanjutan [9].

b. Konfigurasi Sistem dan Bahan Penelitian

Sistem irigasi yang dikaji terdiri atas empat subsistem utama. Subsistem energi menggunakan panel fotovoltaik tipe monocrystalline dengan total kapasitas terpasang 900 Wp yang dilengkapi solar charge controller, inverter pure sine wave, dan baterai VRLA 24 V 200 Ah sebagai media penyimpanan energi. Subsistem pemompaan menggunakan pompa submersible listrik berdaya 750 W (1 HP) yang dirancang untuk pemompaan air dari kolam penampungan. Subsistem penyimpanan air menggunakan tandon air berkapasitas ± 1.100 liter yang ditempatkan pada struktur bertingkat untuk menghasilkan aliran gravitasi. Subsistem distribusi air menggunakan saluran irigasi permukaan dengan dimensi penampang yang disesuaikan dengan kondisi lahan hortikultura [13,14].

Peralatan pengukuran yang digunakan meliputi digital watt meter untuk mengukur tegangan, arus, dan daya listrik, serta alat ukur volume dan waktu untuk menentukan debit aliran. Bahan pendukung lainnya meliputi pipa distribusi air, struktur tandon, dan perangkat proteksi kelistrikan. Seluruh alat dan bahan dipilih untuk merepresentasikan sistem irigasi skala kecil yang aplikatif bagi lahan hortikultura tadah hujan [15].

c. Analisis Kinerja Subsistem Energi

Analisis kinerja subsistem energi dilakukan dengan mengevaluasi daya dan energi listrik yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik. Daya listrik sesaat dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \quad (1)$$

di mana P adalah daya listrik (W), V adalah tegangan (V), dan I adalah arus listrik (A).

Energi listrik harian dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian daya dan interval waktu pengukuran menggunakan persamaan:

$$E = \sum(P \times \Delta t) \quad (2)$$

di mana E adalah energi listrik (Wh) dan Δt adalah interval waktu (jam). Nilai energi ini digunakan untuk menentukan durasi operasi efektif pompa submersible serta mengevaluasi kecukupan sistem energi dalam mendukung kebutuhan irigasi [17].

d. Analisis Kinerja Hidraulik Sistem Pemompaan dan Distribusi

Kinerja hidraulik sistem dianalisis berdasarkan debit aliran dan volume air yang berhasil dialirkan. Debit aliran pompa dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

di mana Q adalah debit aliran (m^3/s), V adalah volume air terpompa (m^3), dan t adalah waktu pemompaan (s).

Daya hidraulik pompa dianalisis menggunakan persamaan:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H \quad (4)$$

di mana P_h adalah daya hidraulik (W), ρ adalah massa jenis air (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan H adalah tinggi angkat pompa (m). Analisis ini digunakan untuk menilai kesesuaian antara energi listrik yang tersedia dan kebutuhan energi pemompaan [5].

Kebutuhan air irigasi permukaan dihitung berdasarkan luas lahan dan tinggi genangan menggunakan persamaan:

$$V_i = A \times h_i \quad (5)$$

di mana V_i adalah volume air irigasi (m^3), A adalah luas lahan (m^2), dan h_i adalah tinggi genangan air (m) [6].

e. Evaluasi Kinerja Sistem Terintegrasi Berbasis *Water-Energy Nexus*

Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan menganalisis hubungan antara energi listrik yang tersedia, kinerja pompa submersible, dan volume air yang berhasil didistribusikan. Energi potensial air yang tersimpan dalam tandon dianalisis menggunakan persamaan:

$$E_p = \rho \times g \times V \times h \quad (6)$$

di mana E_p adalah energi potensial air (J), V adalah volume air tersimpan (m^3), dan h adalah elevasi tandon (m). Energi potensial ini memungkinkan distribusi air secara gravitasi tanpa tambahan konsumsi energi listrik.

Evaluasi ini menegaskan bahwa sistem irigasi yang dirancang bekerja sebagai sistem terpadu yang mengoptimalkan keterkaitan antara air dan energi. Pendekatan ini merepresentasikan konsep *water-energy nexus* dalam sistem irigasi hortikultura tadah hujan [16].

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Kinerja Subsistem Energi Surya

Kinerja subsistem energi surya dianalisis untuk mengetahui kemampuan sistem panel fotovoltaik dalam menyediakan energi listrik bagi operasional pompa submersible pada sistem irigasi. Sistem energi menggunakan panel fotovoltaik tipe monocrystalline dengan kapasitas terpasang sebesar 900 Wp. Pengukuran dilakukan selama satu hari penuh dari pukul 06.00 hingga 17.00 WIT dengan interval waktu satu jam menggunakan digital watt meter. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya sesaat, dan energi listrik harian.

Daya listrik sesaat yang dihasilkan panel fotovoltaik dihitung menggunakan Persamaan (1). Berdasarkan hasil pengukuran

lapangan pada kondisi radiasi maksimum, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 42,11 V dan arus maksimum sebesar 31,57 A. Substitusi nilai tersebut ke dalam Persamaan (1) menghasilkan:

$$P = 42,11 \times 31,57$$

$$P = 1.329,91 \text{ W}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya listrik teoritis sesaat yang dapat dihasilkan sistem panel fotovoltaik mencapai 1.330 W. Namun, daya efektif maksimum yang tercatat pada sistem adalah sekitar 307 W. Perbedaan ini disebabkan oleh kehilangan energi pada komponen konversi daya seperti solar charge controller dan inverter, serta pengaruh sudut datang radiasi matahari dan karakteristik beban pompa. Secara rekayasa sistem, hasil ini menunjukkan bahwa daya sesaat tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan secara langsung sehingga evaluasi kinerja sistem perlu dilakukan berbasis energi listrik harian.

Energi listrik harian yang dihasilkan sistem panel fotovoltaik dihitung menggunakan Persamaan (2) dengan interval waktu pengukuran $\Delta t = 1$ jam. Berdasarkan hasil pengukuran daya sesaat pada setiap interval waktu, diperoleh nilai daya listrik sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Daya Listrik Panel Fotovoltaik Harian

Waktu (WIT)	Daya (W)
06.00	82
07.00	157
08.00	247
09.00	307
10.00	329
11.00	291
12.00	230
13.00	179
14.00	131
15.00	80
16.00	31
17.00	9

Energi listrik harian total dihitung dengan menjumlahkan seluruh daya pada setiap interval waktu sebagai berikut:

$$E = (82+157+247+307+329+291+230+179+131+80+31+9) \times 1$$

$$E = 2.073 \text{ Wh}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi listrik harian yang dihasilkan oleh sistem panel fotovoltaik adalah sekitar ± 2.070 Wh. Nilai ini sejalan dengan hasil pengukuran kumulatif sistem sebesar ± 2.067 Wh, dengan selisih kecil akibat pembulatan data pengukuran.

Energi listrik harian sebesar $\pm 2,07$ kWh menunjukkan bahwa subsistem energi surya mampu menyediakan pasokan energi yang cukup untuk mendukung operasional pompa submersible dalam satu siklus irigasi. Energi ini menjadi parameter utama dalam menentukan durasi operasi pompa serta volume air yang dapat dipompa. Secara sistem engineering, hasil ini menegaskan bahwa energi listrik harian merupakan indikator kinerja yang lebih representatif dibandingkan daya sesaat karena mencerminkan kemampuan sistem dalam mendukung fungsi irigasi secara berkelanjutan. Temuan ini memperkuat peran subsistem energi sebagai komponen pengendali utama dalam sistem irigasi berbasis *water-energy nexus*.

b. Kinerja Pompa Submersible dan Analisis Hidraulik

Kinerja pompa submersible dianalisis untuk menilai kemampuan sistem dalam mengonversi energi listrik yang tersedia menjadi aliran air irigasi yang memenuhi kebutuhan lahan hortikultura tadah hujan. Analisis ini difokuskan pada durasi operasi pompa, volume air terpompa, dan debit aliran sebagai indikator utama kinerja hidraulik.

Seluruh parameter tersebut dianalisis secara terintegrasi untuk menunjukkan keterkaitan antara subsistem energi dan subsistem air dalam kerangka *water-energy nexus*.

Pengujian lapangan menunjukkan bahwa pompa submersible listrik berdaya 750 W (1 HP) mampu beroperasi selama ± 1 jam 53 menit dengan suplai energi langsung dari panel fotovoltaik. Ketika sistem menggunakan energi tersimpan pada baterai yang terisi penuh, durasi operasi pompa meningkat hingga ± 2 jam 11 menit. Variasi durasi operasi ini mencerminkan pengaruh langsung ketersediaan energi terhadap kinerja pompa dan volume air yang dapat dipompa dalam satu siklus irigasi.

Volume air yang berhasil dipompa selama satu siklus operasi tercatat sebesar 83.979 liter. Volume ini menjadi dasar dalam perhitungan debit aliran pompa menggunakan Persamaan (3). Debit aliran dihitung sebagai rasio antara volume air terpompa dan waktu pemompaan sehingga mencerminkan kapasitas aliran rata-rata pompa selama periode operasi dengan V sebagai volume air terpompa dan t sebagai durasi operasi pompa. Berdasarkan hasil pengujian, volume air terpompa sebesar 83,979 m³, sedangkan durasi operasi pompa selama 6.780 detik. Substitusi nilai tersebut ke dalam Persamaan (3) menghasilkan debit aliran rata-rata sebesar:

$$Q = \frac{83,979}{6.780} = 0,0124 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pompa submersible menghasilkan debit aliran rata-rata sekitar 0,0124 m³/s atau setara dengan 12,4 liter/detik. Nilai debit ini menunjukkan bahwa pompa memiliki kapasitas aliran yang memadai untuk mendukung sistem irigasi permukaan pada lahan hortikultura tadah hujan. Debit aliran

yang relatif stabil juga menunjukkan bahwa pompa bekerja secara efisien pada kondisi suplai energi yang tersedia.

Selanjutnya, kinerja hidraulik pompa dianalisis melalui perhitungan daya hidraulik menggunakan Persamaan (4). Daya hidraulik menunjukkan kebutuhan energi teoritis untuk mengalirkan air pada debit dan tinggi angkat tertentu. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3,$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2,$$

$$Q = 0,0124 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$\text{dan tinggi angkat efektif pompa } H = 9 \text{ m}.$$

Substitusi nilai tersebut menghasilkan daya hidraulik sebesar:

$$\begin{aligned} P_h &= 1.000 \times 9,81 \times 0,0124 \times 9 \\ &= 1.094 \text{ W} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya hidraulik teoritis pompa mencapai ± 1.094 W. Nilai ini lebih besar dibandingkan daya listrik nominal pompa sebesar 750 W, yang menunjukkan bahwa pompa tidak beroperasi secara kontinu pada kondisi debit dan head maksimum. Kondisi ini menguatkan peran sistem penyimpanan air sebagai strategi rekayasa untuk mengurangi kebutuhan operasi pompa secara langsung dan meningkatkan efisiensi sistem irigasi.

Untuk memperjelas hubungan antara parameter kinerja pompa, hasil analisis dirangkum dalam Tabel 2. Tabel ini menyajikan keterkaitan antara daya pompa, durasi operasi, volume air terpompa, debit aliran, dan daya hidraulik yang dihitung berdasarkan hasil pengujian dan persamaan yang digunakan.

Tabel 2. Hasil Analisis Kinerja Pompa Submersible

Parameter	Nilai
Daya pompa	750 W (1 HP)
Durasi operasi (PV)	1 jam 53 menit
Durasi operasi (baterai)	2 jam 11 menit
Volume air terpompa	83.979 liter
Debit aliran rata-rata	0,0124 m ³ /s (12,4 L/s)

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan durasi operasi pompa secara langsung meningkatkan volume air terpompa, sementara debit aliran relatif konstan selama periode operasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kinerja hidraulik pompa lebih dipengaruhi oleh durasi operasi dibandingkan oleh fluktuasi debit. Secara sistem engineering, temuan ini menegaskan bahwa ketersediaan energi listrik menjadi faktor pembatas utama dalam menentukan kinerja irigasi, bukan kapasitas pompa itu sendiri.

Hasil analisis ini memperlihatkan bahwa pompa submersible berfungsi sebagai penghubung utama antara subsistem energi dan subsistem distribusi air. Debit aliran yang dihasilkan menentukan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan irigasi permukaan, sedangkan durasi operasi pompa ditentukan oleh energi listrik yang tersedia. Dengan demikian, kinerja pompa submersible memainkan peran sentral dalam sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* pada lahan hortikultura tadah hujan.

c. Kinerja Sistem Penyimpanan dan Distribusi Air

Kinerja sistem penyimpanan dan distribusi air dianalisis untuk menilai kemampuan sistem irigasi dalam menyalurkan air hasil pemompaan ke lahan hortikultura secara efektif dan efisien. Sistem penyimpanan air menggunakan tandon bertingkat yang berfungsi sebagai penampung air sementara sekaligus sebagai

media konversi energi listrik menjadi energi potensial air. Sistem distribusi air memanfaatkan aliran gravitasi sehingga air dapat dialirkan ke lahan pertanian tanpa tambahan konsumsi energi listrik. Pendekatan ini dirancang untuk meningkatkan keandalan sistem irigasi pada kondisi fluktuasi ketersediaan energi surya.

Hasil pengujian lapangan menunjukkan bahwa air hasil pemompaan dari kolam penampungan dialirkan terlebih dahulu ke tandon air sebelum didistribusikan ke lahan hortikultura. Tandon air memiliki kapasitas penyimpanan sebesar ± 1.100 liter dan ditempatkan pada elevasi yang memadai untuk menghasilkan tekanan aliran gravitasi. Keberadaan tandon memungkinkan pemompaan dilakukan secara periodik sesuai ketersediaan energi listrik, sementara distribusi air dapat dilakukan secara lebih fleksibel sesuai kebutuhan irigasi. Dengan demikian, sistem tidak bergantung pada operasi pompa secara kontinu.

Kinerja distribusi air dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan volume air irigasi permukaan pada luas lahan tertentu. Kebutuhan volume air irigasi dihitung menggunakan Persamaan (5) dengan A sebagai luas lahan irigasi dan h_i sebagai tinggi genangan air. Berdasarkan kondisi lapangan, luas lahan hortikultura yang diairi sebesar 0,25 ha atau setara dengan 2.500 m², sedangkan tinggi genangan air irigasi permukaan ditetapkan sebesar 10 cm atau 0,10 m. Substitusi nilai tersebut ke dalam Persamaan (5) menghasilkan kebutuhan volume air irigasi sebagai berikut:

$$V_i = 2.500 \times 0,10 = 250 \text{ m}^3$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan volume air irigasi permukaan untuk satu siklus penyiraman pada lahan

hortikultura seluas 0,25 ha adalah sebesar 250 m³ atau setara dengan 250.000 liter. Nilai ini menggambarkan besarnya kebutuhan air pada sistem irigasi permukaan dan menjadi dasar dalam mengevaluasi kecukupan volume air yang disuplai oleh sistem pemompaan dan penyimpanan.

Volume air yang berhasil dipompa dan didistribusikan oleh sistem tercatat sebesar 83.979 liter. Jika dibandingkan dengan kebutuhan air irigasi permukaan sebesar 250.000 liter, maka volume air yang tersedia mampu memenuhi sekitar 33,6% dari total kebutuhan air dalam satu siklus genangan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem irigasi yang dikaji tidak ditujukan untuk memenuhi kebutuhan genangan penuh dalam satu waktu, melainkan berfungsi sebagai sistem penyiraman bertahap yang disesuaikan dengan ketersediaan energi dan kapasitas penyimpanan air.

Untuk memperjelas kinerja sistem penyimpanan dan distribusi air, hasil analisis dirangkum dalam Tabel 3. Tabel ini menyajikan keterkaitan antara luas layanan irigasi, tinggi genangan air, volume air terdistribusi, dan mekanisme distribusi air yang digunakan.

Tabel 3. Kinerja Sistem Irigasi Permukaan

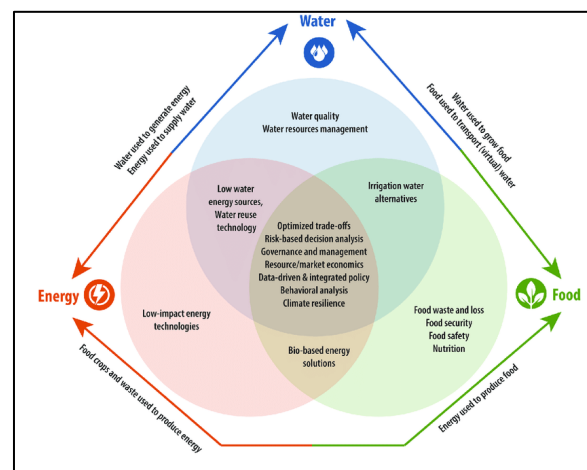
Parameter	Nilai
Luas layanan irigasi	0,25 ha (2.500 m ²)
Tinggi genangan air	10 cm
Kebutuhan volume air irigasi	250.000 liter
Volume air terdistribusi	83.979 liter
Persentase pemenuhan kebutuhan	33,6%
Sistem distribusi air	Gravitasi

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem distribusi berbasis gravitasi mampu menyalurkan air secara efektif dari tandon ke lahan hortikultura tanpa tambahan energi

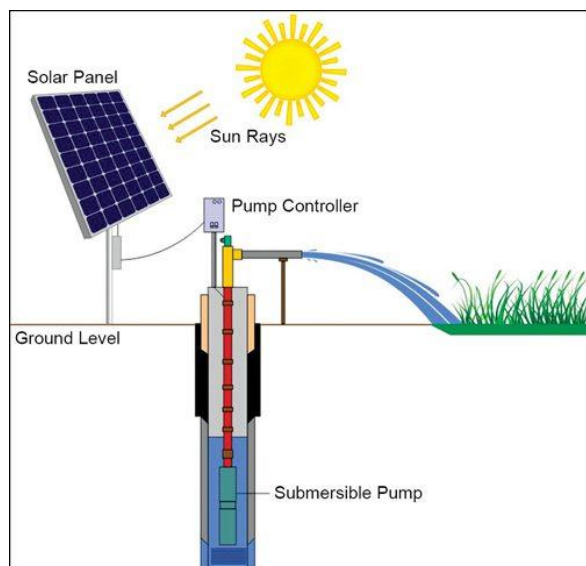
listrik. Persentase pemenuhan kebutuhan air yang belum mencapai 100% menegaskan bahwa sistem irigasi permukaan memiliki kebutuhan air yang tinggi. Temuan ini memperkuat pentingnya strategi penyimpanan air dan pengaturan distribusi secara bertahap dalam sistem irigasi berbasis *water–energy nexus*. Selain itu, hasil ini memberikan dasar teknis untuk pengembangan sistem irigasi yang lebih hemat air, seperti irigasi tetes atau sprinkler, guna meningkatkan efisiensi penggunaan air dan energi pada lahan hortikultura tadah hujan.

d. Analisis Sistem Terintegrasi Berbasis *Water–Energy Nexus*

Integrasi antara subsistem energi, pemompaan, penyimpanan, dan distribusi air menunjukkan keterkaitan yang kuat antara ketersediaan energi dan kinerja irigasi. Energi listrik yang dihasilkan panel surya menentukan durasi operasi pompa, sedangkan volume air yang dipompa menentukan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan irigasi.



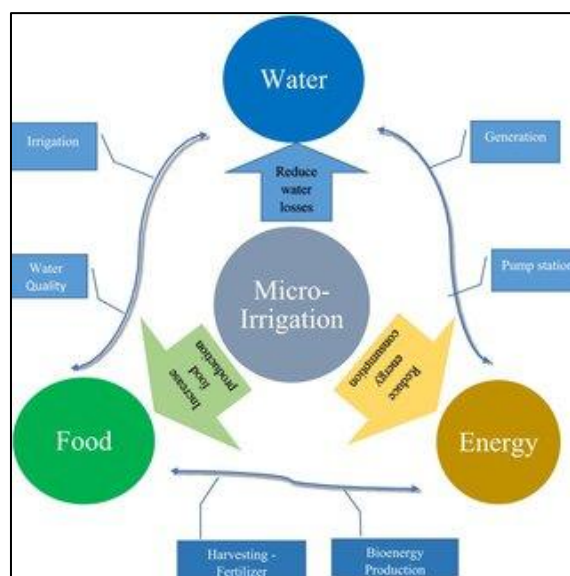
(a)



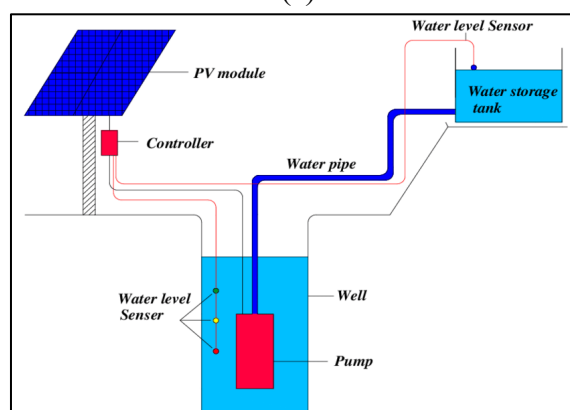
(b)

Gambar 1. (a) Hubungan antara energi listrik harian panel fotovoltaik, (b) volume air terpompa pada sistem irigasi berbasis *water-energy nexus*.

Gambar 1 menunjukkan hubungan fungsional antara energi listrik harian yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dan volume air yang berhasil dipompa oleh pompa submersible. Energi listrik harian yang dihitung menggunakan Persamaan (2) menentukan durasi operasi pompa, sedangkan durasi operasi tersebut menentukan volume air terpompa sebagaimana dihitung menggunakan Persamaan (3). Hubungan ini memperlihatkan bahwa peningkatan energi listrik harian berbanding lurus dengan peningkatan volume air yang dapat dialirkan untuk irigasi. Kondisi ini menegaskan bahwa subsistem energi berperan sebagai faktor pengendali utama dalam kinerja sistem irigasi pada lahan hortikultura tadah hujan.



(a)



(b)

Gambar 2. Skema sistem irigasi terintegrasi berbasis *water-energy nexus* menggunakan pompa submersible tenaga surya.

Gambar 2 memperlihatkan konfigurasi sistem irigasi terintegrasi yang terdiri atas subsistem energi, subsistem pemompaan, subsistem penyimpanan air, dan subsistem distribusi air. Panel fotovoltaik berfungsi sebagai sumber energi listrik yang menyuplai pompa submersible. Pompa kemudian mengalirkan air dari kolam penampungan menuju tandon air bertingkat. Tandon air berperan sebagai media penyimpanan air sekaligus penyimpan energi dalam bentuk energi potensial. Selanjutnya, air didistribusikan ke lahan hortikultura melalui sistem irigasi permukaan berbasis gravitasi.

Konfigurasi ini memungkinkan pemisahan antara waktu produksi energi dan waktu distribusi air sehingga meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem irigasi pada wilayah tadah hujan.

e. Implikasi Teknik dan Keberlanjutan Sistem

Implikasi teknik dari penerapan sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* menunjukkan perubahan paradigma dalam perancangan sistem irigasi pada lahan hortikultura tadah hujan. Sistem yang dirancang tidak lagi memosisikan pompa sebagai elemen operasional utama yang bekerja secara kontinu, melainkan sebagai bagian dari sistem terpadu yang dikendalikan oleh ketersediaan energi dan kapasitas penyimpanan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi listrik harian sebesar $\pm 2,07$ kWh membatasi durasi operasi pompa, sementara tandon air bertingkat memungkinkan pemisahan antara waktu pemompaan dan waktu distribusi air. Strategi ini memberikan implikasi teknik berupa pengurangan beban kerja pompa dan peningkatan keandalan sistem distribusi air.

Dari sudut pandang teknik keairan, sistem penyimpanan air berperan sebagai elemen kunci dalam mengonversi energi listrik menjadi energi potensial air. Energi potensial ini kemudian dimanfaatkan untuk distribusi air secara gravitasi tanpa tambahan konsumsi energi listrik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa distribusi berbasis gravitasi mampu menyalurkan air secara stabil ke lahan hortikultura seluas 0,25 ha. Implikasi teknik dari pendekatan ini adalah berkurangnya kehilangan energi akibat operasi pompa yang berulang dan meningkatnya efisiensi sistem distribusi air. Sistem ini juga lebih toleran terhadap fluktuasi radiasi matahari yang sering terjadi pada wilayah tropis.

Implikasi keberlanjutan sistem terlihat dari kemampuan sistem irigasi dalam menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Sistem konvensional yang menggunakan pompa berbahan bakar bensin membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan biaya operasional yang besar. Sebaliknya, sistem irigasi tenaga surya memanfaatkan sumber energi terbarukan yang tersedia secara lokal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menggantikan sebagian besar kebutuhan energi fosil untuk irigasi. Kondisi ini memberikan dampak positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan mendukung prinsip pembangunan pertanian yang berkelanjutan.

Keberlanjutan sistem juga tercermin dari aspek adaptabilitas terhadap kondisi iklim dan ketersediaan sumber daya. Sistem irigasi yang dirancang mampu beroperasi secara fleksibel dengan menyesuaikan jadwal pemompaan terhadap intensitas radiasi matahari harian. Ketika produksi energi menurun, sistem tetap dapat mendistribusikan air dari tandon penyimpanan. Implikasi ini sangat penting bagi wilayah tadah hujan yang memiliki variabilitas curah hujan dan ketersediaan energi yang tinggi. Dengan demikian, sistem irigasi tidak hanya berfungsi sebagai infrastruktur teknis, tetapi juga sebagai mekanisme adaptasi terhadap perubahan iklim.

Dari perspektif rekayasa sistem, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimalisasi sistem irigasi tidak dapat dilakukan hanya dengan meningkatkan kapasitas pompa atau menambah daya panel surya. Sistem harus dirancang dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kapasitas energi, kapasitas pemompaan, dan kapasitas penyimpanan air. Ketidakseimbangan pada salah satu subsistem dapat menurunkan kinerja

keseluruhan sistem. Oleh karena itu, pendekatan *water-energy nexus* memberikan kerangka kerja yang lebih komprehensif dalam perancangan sistem irigasi yang efisien dan berkelanjutan.

Implikasi lanjutan dari hasil penelitian ini adalah perlunya pengembangan sistem irigasi yang lebih hemat air. Hasil analisis menunjukkan bahwa irigasi permukaan membutuhkan volume air yang besar sehingga efisiensi sistem masih dapat ditingkatkan. Integrasi sistem irigasi tetes atau sprinkler dengan sistem energi surya dan tandon air berpotensi menurunkan kebutuhan volume air sekaligus meningkatkan efisiensi energi. Dengan demikian, sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai model irigasi berkelanjutan yang adaptif terhadap keterbatasan air dan energi pada lahan hortikultura tadah hujan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem irigasi berbasis *water-energy nexus* menggunakan pompa submersible tenaga surya mampu beroperasi secara efektif pada lahan hortikultura tadah hujan. Sistem panel fotovoltaik berkapasitas 900 Wp menghasilkan energi listrik harian sekitar $\pm 2,07$ kWh yang mendukung operasional pompa submersible berdaya 750 W selama 1 jam 53 menit. Energi tersebut menghasilkan volume air terpompa sebesar 83.979 liter dengan debit aliran rata-rata $0,0124 \text{ m}^3/\text{s}$, yang menunjukkan kinerja hidraulik pompa yang stabil untuk irigasi permukaan skala kecil.

Hasil penelitian menegaskan bahwa integrasi tandon air bertingkat merupakan komponen kunci dalam meningkatkan keandalan sistem irigasi. Tandon air memungkinkan pemisahan antara waktu pemompaan dan waktu distribusi air sehingga air dapat dialirkan secara gravitasi tanpa tambahan konsumsi energi listrik. Pendekatan ini mengurangi ketergantungan

sistem terhadap operasi pompa secara kontinu dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya yang bersifat fluktuatif.

Analisis kebutuhan air menunjukkan bahwa irigasi permukaan membutuhkan volume air yang besar, yaitu sekitar 250.000 liter untuk lahan seluas 0,25 ha pada tinggi genangan 10 cm, sementara sistem hanya mampu memenuhi sekitar 33,6% dari kebutuhan tersebut dalam satu siklus. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem dirancang untuk penyiraman bertahap dan menegaskan pentingnya pengembangan sistem irigasi yang lebih hemat air. Secara keseluruhan, pendekatan *water-energy nexus* menawarkan solusi teknis yang adaptif dan berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan energi pada wilayah pertanian tadah hujan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada LPPM UNMUS yang telah mendanai sepenuhnya penelitian ini melalui Hibah Penelitian Terapan UNMUS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S.P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., et al. . (2010) .Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*. 97(4):543–550.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009>.
- [2] Falkenmark, M., and Rockström, J. . (2004) .Balance between water availability and water requirements: Drivers of food insecurity and human migration. *Water International*. 29(3):283–295.
DOI:<https://doi.org/10.1080/02508060408691775>.
- [3] FAO . (2017) .Water use in agriculture. *FAO Water Reports*. (23):.
- [4] Mekonnen, M., and Hoekstra, A. . (2011) .The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop

- products. *Hydrology and Earth System Sciences*. 151577–1600. DOI:https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011.
- [5] Maidment, D.R. . (1992) Handbook of hydrology. .
- [6] Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., and Raes, D. . (2012) Crop Yield Response to Water. FAO, Rome.
- [7] Kumar, P., and Singh, R. . (2004) .Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone India—Part I. *Energy Conversion and Management*. 45(9–10):1375–1386. DOI:https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00162-3.
- [8] Shah, T., Shah, A., and Verma, S. . (2018) .Solar irrigation pumps and India's energy–irrigation nexus. *Economic & Political Weekly*. 53(7):64–72.
- [9] Hellegers, P., and Zilberman, D. . (2008) .Interactions between water, energy, food and environment: Evolving perspectives and policy issues. *Water Policy*. 10(S1):1–10. DOI:https://doi.org/10.2166/wp.2008.048.
- [10] Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., et al. . (2011) .Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*. 39(12):7896–7906. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039.
- [11] Hermann, S., Howells, M., McCollum, D., Young, T., and Mai, T. . (2011) .The water–energy nexus: Strategic considerations for water-energy planning. *Energy Policy*. 39(12):7907–7918. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.038.
- [12] Pamuttu, D.L., Akbar, M., Andika, A.P., and Hariyanto, H. . (2023) .An Investigation of Hybrid Renewable Energy Potential by Harnessing Traffic Flow. *International Journal of Heat & Technology*. 41(1):.
- [13] Bouzidi, M.K. . (2011) .Renewable energy for water pumping applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(2):1065–1075. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.015.
- [14] Hamidat, A., Benyoucef, B., and Hartani, T. . (2003) .Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy*. 28(7):1081–1096. DOI:https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00058-7.
- [15] Burney, J., Woltering, L., Burke, M., Naylor, R., and Pasternak, D. . (2010) .Solar-powered drip irrigation enhances food security in the Sudano–Sahel. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 107(5):1848–1853. DOI:https://doi.org/10.1073/pnas.0909678107.
- [16] Hoff, H. . (2011) .Understanding the nexus. *Background Paper for the Bonn 2011 Nexus Conference*.
- [17] Yadav, M., Kumar, R., and Sinha, S.K. . (2014) .Performance evaluation of solar photovoltaic water pumping system. *International Journal of Renewable Energy Research*. 4(4):965–972.