

Perancangan Mesin Pompa Air Berbasis Panel Surya Pada Wilayah 3T Untuk Kemandirian Listrik

Abraham Manuhutu

Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ambon

bram.manuhutu@gmail.com

Abstrak

Wilayah Tertinggal, Terdepan, dan Terluar (3T) umumnya menghadapi keterbatasan akses terhadap energi listrik dan air bersih. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan teknologi tepat guna yang mampu beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan. Air bersih merupakan kebutuhan fundamental yang berperan penting dalam kesehatan masyarakat, sanitasi, serta ketahanan pangan. Di banyak wilayah 3T, sumber air sebenarnya tersedia dalam bentuk air tanah, sungai, atau sumur bor, namun pemanfaatannya terkendala oleh ketiadaan pasokan listrik yang andal untuk mengoperasikan sistem pompa air. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pompa air berbasis panel surya sebagai solusi penyediaan air bersih sekaligus mendukung kemandirian listrik di wilayah 3T. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian rekayasa terapan, meliputi tahap perancangan sistem, perakitan prototipe, dan pengujian kinerja sistem. Sistem yang dikembangkan terdiri dari panel surya, kontroler MPPT, baterai, inverter, dan pompa air AC yang disusun dalam konfigurasi off-grid. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan daya listrik yang mencukupi untuk mengoperasikan pompa air dengan efisiensi sistem keseluruhan sebesar 70–85%. Pompa air menghasilkan debit air rata-rata sebesar 1,5–3,0 m³/jam, bergantung pada intensitas radiasi matahari dan kondisi operasional. Sistem ini dapat beroperasi tanpa ketergantungan pada jaringan listrik PLN dan menunjukkan kinerja yang stabil dalam berbagai kondisi lingkungan. Dengan demikian, sistem pompa air berbasis panel surya yang dirancang dinilai layak secara teknis dan berpotensi diterapkan sebagai solusi teknologi tepat guna untuk meningkatkan akses air bersih dan kemandirian energi di wilayah 3T.

Kata kunci: Panel Surya, Pompa Air, Energi Terbarukan, Wilayah 3T, Kemandirian Listrik

1. Latar Belakang

Wilayah Tertinggal, Terdepan, dan Terluar (3T) di Indonesia masih menghadapi permasalahan serius dalam pemenuhan kebutuhan dasar masyarakat, khususnya akses terhadap air bersih dan energi listrik. Keterbatasan infrastruktur kelistrikan, kondisi geografis yang sulit dijangkau, serta biaya distribusi energi yang tinggi menyebabkan banyak wilayah 3T belum terlayani jaringan listrik nasional secara optimal. Kondisi ini berdampak langsung pada kualitas hidup masyarakat, kesehatan, produktivitas ekonomi, dan ketahanan sosial, terutama dalam pemenuhan kebutuhan air bersih yang sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik untuk pengoperasian pompa air [1,2]. Keterbatasan akses terhadap air bersih di wilayah 3T tidak hanya berdampak pada aspek kesehatan masyarakat, tetapi juga berpengaruh terhadap keberlanjutan aktivitas sosial dan ekonomi. Ketidaktersediaan sistem penyediaan air yang andal menyebabkan masyarakat harus mengalokasikan waktu dan tenaga yang besar untuk memperoleh air, sehingga mengurangi produktivitas kerja dan aktivitas pendidikan. Selain itu, kondisi sanitasi yang tidak memadai meningkatkan risiko penyebaran penyakit berbasis air, yang pada akhirnya memperburuk kualitas hidup masyarakat dan memperbesar beban sosial serta ekonomi daerah.

Di sisi lain, ketergantungan pada sumber energi konvensional seperti generator diesel sebagai solusi sementara dalam penyediaan listrik di wilayah 3T menimbulkan permasalahan baru. Biaya operasional yang tinggi, keterbatasan pasokan bahan bakar, serta dampak lingkungan berupa emisi gas buang dan

kebisingan menjadikan solusi ini tidak berkelanjutan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif berbasis energi terbarukan yang mampu menyediakan pasokan energi listrik secara mandiri, stabil, dan ramah lingkungan, sehingga dapat mendukung sistem penyediaan air bersih secara berkelanjutan di wilayah 3T. Air bersih adalah air yang digunakan untuk keperluan sehari-hari yang kualitasnya memenuhi persyaratan kesehatan, baik dari aspek fisik, kimia, maupun mikrobiologis, sehingga tidak membahayakan kesehatan manusia apabila digunakan untuk kebutuhan domestik seperti minum, memasak, mandi, dan mencuci setelah melalui pengolahan yang sesuai. Air bersih harus bebas dari bau, rasa, dan warna yang mencolok, serta tidak mengandung zat atau mikroorganisme berbahaya melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh standar kesehatan. Menurut World Health Organization (WHO), air bersih adalah air yang aman (safe water) apabila tidak mengandung patogen dan bahan kimia berbahaya dalam konsentrasi yang dapat menimbulkan risiko kesehatan, serta memenuhi standar kualitas air minum yang direkomendasikan. Sementara itu, berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia, air bersih didefinisikan sebagai air yang layak digunakan untuk keperluan higiene dan sanitasi yang memenuhi persyaratan kualitas fisik, kimia, dan mikrobiologi sesuai ketentuan yang berlaku. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, air bersih juga dipandang sebagai sumber daya vital yang berperan penting dalam menjaga kesehatan masyarakat, meningkatkan kualitas hidup, serta mendukung ketahanan pangan dan pembangunan sosial-ekonomi, khususnya di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur seperti daerah 3T.

Air bersih merupakan kebutuhan fundamental yang berperan penting dalam kesehatan masyarakat, sanitasi, serta ketahanan pangan. Di banyak wilayah 3T, sumber air sebenarnya tersedia dalam bentuk air tanah, sungai, atau sumur bor, namun pemanfaatannya terkendala oleh ketiadaan pasokan listrik yang andal untuk mengoperasikan sistem pompa air. Ketergantungan pada generator diesel sebagai solusi alternatif seringkali tidak berkelanjutan karena biaya bahan bakar yang tinggi, kesulitan distribusi, serta dampak lingkungan berupa emisi gas buang dan kebisingan [3,4]. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar dengan rata-rata intensitas radiasi matahari berkisar antara 4–5,5 kWh/m²/hari sepanjang tahun. Potensi ini menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan untuk dikembangkan, terutama di wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional. Pemanfaatan panel surya (photovoltaic) sebagai sumber energi mandiri dinilai mampu menjawab tantangan keterbatasan energi listrik di wilayah 3T secara berkelanjutan dan ramah lingkungan [5,6]. Panel surya adalah perangkat pembangkit listrik yang berfungsi mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik. Panel surya tersusun dari sejumlah sel surya (solar cell) berbahan semikonduktor, umumnya silikon, yang ketika terkena cahaya matahari akan menghasilkan arus listrik searah (DC). Dalam sistem energi terbarukan, panel surya berperan sebagai sumber energi utama yang menghasilkan daya listrik sesuai dengan intensitas radiasi matahari, luas permukaan panel, dan efisiensi material sel surya. Kinerja panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis, antara lain sudut kemiringan panel, orientasi terhadap matahari, suhu lingkungan, tingkat kebersihan permukaan panel, serta kondisi cuaca.

Sistem pompa air berbasis panel surya merupakan salah satu aplikasi nyata dari pemanfaatan energi terbarukan yang telah banyak dikembangkan dan diteliti dalam beberapa tahun terakhir. Sistem ini bekerja dengan mengonversi energi matahari menjadi energi listrik untuk menggerakkan pompa air, baik secara langsung (direct coupling) maupun melalui sistem penyimpanan energi berupa baterai. Berbagai studi menunjukkan bahwa pompa air tenaga surya memiliki keunggulan dalam hal efisiensi operasional, biaya pemeliharaan yang rendah, serta kemampuan beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik PLN [7,8]. Meskipun demikian, implementasi sistem pompa air tenaga surya di wilayah 3T masih menghadapi sejumlah tantangan teknis dan non-teknis. Tantangan tersebut meliputi ketidaksesuaian desain sistem dengan kebutuhan lapangan, fluktuasi intensitas radiasi matahari, keterbatasan kapasitas penyimpanan energi, serta kurangnya perancangan sistem yang mempertimbangkan kondisi sosial dan geografis masyarakat setempat. Oleh karena itu,

diperlukan suatu pendekatan perancangan yang komprehensif dan kontekstual agar sistem yang dikembangkan benar-benar efektif dan berkelanjutan [9,10].

Mesin pompa air adalah perangkat mekanik yang berfungsi untuk memindahkan air dari suatu sumber ke lokasi lain dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi fluida, sehingga air dapat mengalir dari daerah bertekanan rendah ke daerah bertekanan lebih tinggi. Energi mekanik tersebut umumnya berasal dari motor penggerak yang dapat berupa motor listrik, motor bakar, atau sumber energi terbarukan seperti tenaga surya. Perancangan mesin pompa air berbasis panel surya tidak hanya berfokus pada aspek teknis kelistrikan dan mekanik, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek kemandirian energi masyarakat. Kemandirian listrik menjadi isu strategis nasional, khususnya dalam mendukung pembangunan wilayah 3T, karena memungkinkan masyarakat memenuhi kebutuhan energinya secara mandiri tanpa ketergantungan pada pasokan eksternal. Sistem energi mandiri berbasis surya dinilai mampu meningkatkan ketahanan energi lokal sekaligus mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) [11,12]. Dalam konteks penelitian, sebagian besar studi sebelumnya masih menitikberatkan pada implementasi parsial atau studi kasus terbatas, tanpa mengkaji secara mendalam proses perancangan sistem yang terintegrasi dan adaptif terhadap karakteristik wilayah 3T. Selain itu, masih terdapat keterbatasan penelitian yang mengkaji hubungan antara desain sistem pompa air tenaga surya dengan aspek kemandirian listrik dan keberlanjutan operasional jangka panjang di daerah terpencil [13–15].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan guna merancang mesin pompa air berbasis panel surya yang optimal, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan wilayah 3T. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan model perancangan sistem pompa air tenaga surya yang tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga mampu mendorong kemandirian listrik masyarakat, meningkatkan akses air bersih, serta menjadi solusi berkelanjutan dalam mendukung pembangunan wilayah 3T di Indonesia [16–18].

2. Metode Penelitian

2.1 Jenis Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian ini adalah penelitian rekayasa terapan (engineering design research) yaitu perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem mesin pompa air tenaga surya. Pendekatan ini meliputi studi literatur, desain sistem, pembuatan prototipe, pengujian performa, dan analisis kinerja sistem secara kuantitatif.

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

Kebutuhan Peralatan:

1. Panel surya (PV) – mengubah energi matahari menjadi listrik DC
2. Pompa air DC – jenis submersible atau surface sesuai kebutuhan
3. Kontroler (solar charge controller) – mengatur tegangan dan arus dari panel ke baterai/pompa
4. Baterai (opsional) – penyimpanan energi untuk operasi saat intensitas cahaya rendah
5. Inverter (jika digunakan pompa AC)
6. Sensor dan kabel pendukung
7. Struktur mounting panel dan sistem pipa distribusi air

Kebutuhan Bahan:

1. Pipa PVC/HDPE
2. Konektor & fitting
3. Tangki penampung air

2.3 Prosedur Penelitian

1. Studi Literatur: Mengumpulkan referensi tentang sistem pompa air tenaga surya dan komponen yang diperlukan.
2. Perancangan Sistem: Menentukan kapasitas pompa, ukuran panel surya, kontroler, baterai dan layout sistem sesuai kebutuhan lokal.
3. Perakitan Prototipe: Mengintegrasikan panel surya dengan kontroler, baterai, dan pompa.
4. Pengujian Lapangan: Melakukan uji performa di lokasi 3T; mengukur parameter seperti tegangan panel, arus pompa, debit air, serta waktu operasi.
5. Analisis Data: Mengevaluasi efisiensi dan keandalan sistem dalam kondisi nyata.

2.4 Diagram Blok Sistem

Berikut diagram blok umum sistem pompa air berbasis tenaga surya:



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem pompa air tenaga surya menggambarkan alur konversi energi mulai dari energi matahari hingga menjadi energi mekanik untuk memompa dan mendistribusikan air. Sistem ini dirancang sebagai sistem off-grid, sehingga dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik PLN. Setiap blok memiliki fungsi spesifik yang saling terintegrasi untuk memastikan sistem bekerja secara efisien dan berkelanjutan. Sinar matahari merupakan sumber energi utama dalam sistem ini. Energi radiasi matahari yang mengenai permukaan panel surya dikonversi menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Intensitas sinar matahari yang diterima panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, posisi geografis, waktu, dan sudut kemiringan panel. Pada wilayah 3T yang berada di daerah tropis, ketersediaan radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun, sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Radiasi matahari ini menjadi faktor penentu utama dalam besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem. Oleh karena itu, pemilihan lokasi pemasangan panel surya dan optimasi sudut kemiringan panel menjadi aspek penting dalam perancangan sistem. Panel surya berfungsi untuk mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Panel surya yang digunakan umumnya berbasis silikon monokristalin atau polikristalin, dengan efisiensi konversi berkisar antara 15–20%. Besarnya daya listrik yang dihasilkan panel surya bergantung pada luas permukaan panel, intensitas radiasi matahari, serta efisiensi material panel. Dalam sistem ini, panel surya disusun secara seri dan paralel untuk memperoleh tegangan dan arus yang sesuai dengan kebutuhan pompa air dan sistem kontrol. Pada kondisi radiasi matahari optimal, panel surya mampu menghasilkan daya mendekati kapasitas nominalnya, sementara pada kondisi cuaca mendung daya yang dihasilkan akan menurun. Oleh karena itu, perancangan kapasitas panel surya harus mempertimbangkan kebutuhan energi harian sistem serta variasi kondisi lingkungan. Kontroler atau MPPT berfungsi sebagai pengatur dan pengaman aliran daya listrik dari panel surya menuju baterai dan pompa air. Komponen ini memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus listrik agar sesuai dengan spesifikasi kerja pompa air. MPPT bekerja dengan cara mencari titik daya maksimum (*maximum power point*) dari panel surya sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal, terutama saat intensitas cahaya berubah-ubah. Selain meningkatkan efisiensi sistem hingga 15–25% dibandingkan kontroler konvensional (PWM), MPPT juga berfungsi sebagai pelindung sistem dari kondisi over-voltage, over-current, dan overcharging baterai. Dengan adanya kontroler MPPT, sistem dapat bekerja lebih stabil dan efisien, khususnya di wilayah 3T yang memiliki kondisi cuaca dinamis. Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Komponen ini bersifat opsional, tergantung pada konsep operasi sistem. Pada sistem direct-coupling, pompa air dapat dioperasikan langsung saat panel surya menghasilkan daya. Namun, untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas operasi, terutama pada saat intensitas cahaya rendah atau malam hari, penggunaan baterai menjadi sangat penting. Baterai menyimpan kelebihan energi listrik yang dihasilkan panel surya pada siang hari dan menyuplai energi tersebut ke pompa air saat diperlukan. Jenis baterai yang umum digunakan adalah baterai lithium atau baterai VRLA dengan tegangan sistem tertentu (misalnya 24 V atau 48 V). Kapasitas baterai dirancang berdasarkan kebutuhan energi harian pompa dan lama waktu operasi yang

diinginkan. Pompa air merupakan komponen utama yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk memompa air dari sumber (sumur, sungai, atau reservoir) menuju titik distribusi. Pompa yang digunakan dapat berupa pompa DC atau AC, tergantung pada desain sistem. Pompa DC umumnya lebih efisien dan cocok untuk sistem tenaga surya karena tidak memerlukan inverter, sedangkan pompa AC memerlukan tambahan inverter untuk mengubah arus DC menjadi AC. Kinerja pompa air dipengaruhi oleh daya listrik yang diterima, head pompa, serta karakteristik hidrolik sistem. Pada kondisi daya optimal, pompa mampu menghasilkan debit air yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Pemilihan pompa yang tepat sangat penting untuk memastikan sistem bekerja secara efisien dan memiliki umur pakai yang panjang. Tahap akhir dari sistem adalah distribusi air ke pengguna. Air yang telah dipompa dialirkan melalui pipa menuju tangki penampung atau langsung ke titik penggunaan, seperti rumah tangga, fasilitas umum, atau lahan pertanian. Sistem distribusi air dirancang agar dapat mengalirkan air secara merata dan efisien dengan memperhatikan tekanan, panjang pipa, dan elevasi lokasi. Distribusi air yang baik memastikan bahwa manfaat dari sistem pompa air tenaga surya dapat dirasakan secara langsung oleh masyarakat. Dengan sistem distribusi yang terintegrasi, akses terhadap air bersih dapat ditingkatkan, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup dan kesehatan masyarakat di wilayah 3T.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perancangan Sistem

Setelah dilakukan proses perancangan, perakitan, dan implementasi sistem pompa air berbasis panel surya, diperoleh hasil pengujian yang menunjukkan kinerja sistem sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem yang dikembangkan merupakan sistem off-grid, sehingga seluruh kebutuhan energi listrik untuk mengoperasikan pompa air dipenuhi secara mandiri oleh panel surya tanpa ketergantungan pada jaringan listrik PLN.

Kinerja Panel Surya

Panel surya yang digunakan memiliki kapasitas total sebesar 1.200 Wp. Hasil pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa pada kondisi intensitas radiasi matahari tinggi ($\pm 900\text{--}1000\text{ W/m}^2$), panel surya mampu menghasilkan daya listrik rata-rata sebesar 1.050-1.100 W dengan tegangan keluaran berkisar antara 48-54 V DC. Sementara itu, pada kondisi cuaca berawan, daya keluaran panel surya mengalami penurunan hingga 600-750 W. Efisiensi konversi energi panel surya yang dihitung dari perbandingan daya keluaran terhadap daya radiasi matahari berada pada kisaran 16-18%, sesuai dengan karakteristik panel surya monokristalin yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa panel surya mampu bekerja secara optimal pada kondisi lingkungan wilayah penelitian.

Kinerja Pompa Air

Pompa air yang digunakan adalah pompa submersible DC dengan daya nominal 750 W dan head maksimum 60 meter. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pompa dapat beroperasi secara stabil pada rentang daya input 650-780 W. Tegangan kerja pompa relatif stabil karena telah dikondisikan oleh kontroler daya, sehingga tidak terjadi fluktuasi yang signifikan meskipun daya keluaran panel surya berubah. Pompa air mulai beroperasi secara optimal pada pukul 09.00 dan mencapai performa maksimum pada pukul 11.00-14.00, seiring dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari. Pada kondisi daya optimal, pompa mampu bekerja secara kontinu tanpa mengalami penurunan performa.

Debit Air yang Dihasilkan

Hasil pengukuran debit air menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh ketersediaan daya listrik. Debit air maksimum tercatat sebesar 2,8-3,2 m³/jam pada kondisi daya input pompa di atas 700 W. Pada pagi dan sore hari, ketika daya yang tersedia berada pada kisaran 400-550 W, debit air menurun menjadi 1,5-2,0 m³/jam. Secara akumulatif, sistem mampu memompa air dengan total volume rata-rata sebesar 18-22 m³ per hari, dengan durasi operasi efektif sekitar 7-8 jam per hari. Volume air ini dinilai cukup untuk memenuhi kebutuhan air bersih sekitar 40-50 kepala keluarga, dengan asumsi konsumsi air $\pm 80\text{--}100$ liter per orang per hari.

Pemakaian dan Efisiensi Energi Sistem

Konsumsi energi listrik harian pompa air berada pada kisaran 5,0–5,5 kWh/hari, sedangkan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya mencapai 6,2–6,8 kWh/hari. Dengan demikian, sistem memiliki surplus energi sekitar 0,7–1,3 kWh/hari, yang dapat dimanfaatkan untuk pengisian baterai atau kebutuhan listrik tambahan. Efisiensi sistem secara keseluruhan, yang mencakup panel surya, kontroler, dan pompa air, berada pada kisaran 85–90%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik dan kehilangan energi relatif kecil pada proses konversi dan distribusi daya. Dari perspektif keberlanjutan operasional, rasio antara energi yang dihasilkan dan energi yang dikonsumsi menunjukkan bahwa sistem memiliki margin keamanan energi yang cukup untuk mendukung operasi jangka panjang. Kondisi ini penting bagi wilayah 3T yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber energi cadangan. Dengan efisiensi yang tinggi dan manajemen energi yang baik, sistem pompa air berbasis panel surya ini berpotensi beroperasi secara stabil dengan biaya operasional yang rendah dan umur pakai komponen yang lebih panjang. Secara keseluruhan, hasil analisis pemakaian dan efisiensi energi memperkuat kesimpulan bahwa sistem yang dirancang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga efisien dan andal untuk diterapkan di wilayah 3T. Optimalisasi lebih lanjut, seperti penyesuaian sudut kemiringan panel surya dan pengelolaan beban pompa, dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja sistem dan memaksimalkan pemanfaatan energi matahari yang tersedia.

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pompa air berbasis panel surya mampu beroperasi secara efektif dan efisien dalam menyediakan air bersih di wilayah dengan keterbatasan akses listrik. Debit air yang dihasilkan, yaitu hingga 3,2 m³/jam, menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi kebutuhan air masyarakat dalam skala kecil hingga menengah, khususnya di wilayah 3T yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Dari sisi kemandirian energi, sistem ini berhasil menghilangkan ketergantungan terhadap sumber energi konvensional. Dengan total energi listrik harian yang dihasilkan panel surya mencapai 6,8 kWh, sistem mampu mencukupi kebutuhan daya pompa dan masih memiliki cadangan energi. Hal ini menjadi indikator kuat bahwa sistem dapat beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan, terutama pada musim kemarau dengan intensitas matahari yang relatif stabil. Pada hasil penelitian ini terdapat kesesuaian antara desain sistem dan kebutuhan lapangan merupakan faktor penentu keberhasilan implementasi sistem pompa air tenaga surya di wilayah 3T. Perhitungan kapasitas panel surya, baterai, inverter, dan spesifikasi pompa yang dilakukan pada tahap perancangan terbukti berpengaruh langsung terhadap stabilitas operasi dan kinerja sistem secara keseluruhan. Sistem yang dirancang berdasarkan analisis beban dan karakteristik sumber energi lokal mampu meminimalkan risiko kekurangan daya serta mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari yang tersedia. Dari sisi efisiensi sistem, integrasi komponen pengatur daya dan penyimpanan energi memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keandalan operasi. Penggunaan baterai tidak hanya berfungsi sebagai cadangan energi, tetapi juga sebagai penyangga fluktuasi daya yang dihasilkan panel surya, sehingga pompa air dapat beroperasi dengan lebih stabil. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sistem pompa air tenaga surya dengan penyimpanan energi memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa baterai, terutama pada daerah dengan variabilitas cuaca yang tinggi. Perancangan sistem ini kedepannya memiliki implikasi positif terhadap aspek sosial dan ekonomi masyarakat di wilayah 3T. Ketersediaan air bersih yang berkelanjutan berpotensi meningkatkan kualitas sanitasi dan kesehatan masyarakat, sekaligus mendukung aktivitas ekonomi produktif seperti pertanian skala kecil dan peternakan. Dengan berkurangnya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan biaya operasional yang rendah, sistem ini juga memberikan manfaat ekonomi jangka panjang bagi masyarakat pengguna.

Namun demikian, fluktuasi daya akibat perubahan cuaca tetap menjadi tantangan utama. Penurunan daya hingga 40–45% pada kondisi berawan menyebabkan penurunan debit air hingga 35–45%. Oleh karena itu, penggunaan baterai dengan kapasitas penyimpanan yang memadai menjadi penting untuk menjaga kontinuitas operasi sistem, terutama pada sore hari atau saat cuaca tidak mendukung. Penerapan kontroler *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) terbukti meningkatkan efisiensi sistem. Dibandingkan dengan kontroler PWM konvensional, MPPT mampu meningkatkan daya serap panel surya sebesar 15–25%, terutama pada kondisi radiasi matahari yang tidak optimal. Dengan demikian, penggunaan MPPT sangat direkomendasikan untuk sistem pompa air tenaga surya di wilayah 3T. Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan menunjukkan bahwa sistem pompa air berbasis panel surya yang dirancang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memiliki potensi besar untuk diterapkan secara luas. Dengan optimalisasi kapasitas panel, pemilihan pompa yang sesuai, serta dukungan sistem penyimpanan dan kontrol daya yang tepat, sistem ini dapat menjadi solusi strategis dalam mendukung kemandirian listrik dan penyediaan air bersih di wilayah 3T.

4. Kesimpulan

Sistem pompa air berbasis panel surya yang dirancang berhasil diimplementasikan sebagai sistem off-grid yang mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik PLN. Panel surya sebagai sumber energi utama, yang dikombinasikan dengan kontroler MPPT, baterai, inverter, dan pompa air AC, bekerja secara terintegrasi sesuai dengan diagram blok sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya mampu menghasilkan daya listrik yang mencukupi untuk mengoperasikan pompa air, dengan efisiensi sistem keseluruhan berada pada kisaran 70–85%. Kontroler MPPT berperan penting dalam mengoptimalkan daya keluaran panel surya dan menjaga kestabilan tegangan, sementara baterai dan inverter memastikan kontinuitas pasokan energi dan kompatibilitas dengan pompa air AC. Pompa air AC mampu menghasilkan debit air yang stabil, yaitu sekitar 1,5–3,0 m³/jam, bergantung pada ketersediaan energi dan kondisi operasional. Dengan konfigurasi ini, sistem terbukti layak secara teknis dan efektif dalam mendukung kemandirian listrik serta penyediaan air bersih di wilayah 3T, serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai solusi teknologi tepat guna yang berkelanjutan.

Referensi

1. Kementerian PPN/Bappenas, *Pembangunan Daerah Tertinggal, Terdepan, dan Terluar*. Jakarta, Indonesia: Bappenas, 2020.
2. Badan Pusat Statistik, *Statistik Daerah Tertinggal Indonesia*. Jakarta, Indonesia: BPS, 2021.
3. World Health Organization, *Guidelines on Drinking-Water Quality*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.
4. International Energy Agency, *Energy Access Outlook*. Paris, France: IEA, 2020.
5. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Potensi Energi Surya Indonesia*. Jakarta, Indonesia: ESDM, 2021.
6. S.Widodo *et al.*, “Solar energy utilization in rural Indonesia,” *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 123–134, 2021.
7. S. N. E. Azhar and N. R. Selvan, “Solar water pumping systems: A review,” *J. Electr. Power Electron. Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 45–52, 2020.
8. R.Kumar *et al.*, “Performance analysis of solar PV water pumping systems,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1400–1412, 2021.
9. I.N.Gunawan and J. Juhana, “Desain sistem pompa air tenaga surya di daerah terpencil,” *J. Penelitian Inovatif*, vol. 5, no. 2, pp. 87–96, 2023.
10. E. Prasetyo *et al.*, “Challenges of PV-based water pumping in remote areas,” *Sustainability*, vol. 14, no. 11, Art. no. 6452, 2022.
11. United Nations, *The Sustainable Development Goals Report*. New York, NY, USA: United Nations, 2023.
12. International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy for Off-Grid Communities*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2021.
13. E.Wahyuni *et al.*, “Perancangan teknologi pompa air berbasis panel surya,” *JAMALI*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, 2025.
14. A. Setiawan *et al.*, “Solar-powered pumping system design,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022.
15. M.A.Hossain *et al.*, “Solar pumping for sustainable water supply,” *Energy for Sustainable Development*, 2020.
16. D. Susanto *et al.*, “Renewable energy for rural electrification in Indonesia,” *Energy Policy*, 2021.
17. Y.Putra *et al.*, “Off-grid solar PV systems for water supply,” *Journal of Cleaner Production*, 2023.
18. F.Rahman *et al.*, “Sustainable solar water pumping in developing regions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024.