

Model Sistem Beban Banyak Motor Pompa pada Panel Surya *Off-Grid* Tanpa Baterai

I Putu Suka Arsa^{1*}, I Wayan Sutaya²

¹Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

²Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

*suka.arsa@undiksha.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan panel surya *off-grid* tanpa baterai merupakan solusi alternatif yang ramah lingkungan untuk aplikasi pompa air. Namun, sistem ini memiliki keterbatasan, terutama ketika intensitas cahaya matahari berkurang, yang mengakibatkan penurunan daya listrik yang dihasilkan. Karena motor pompa membutuhkan daya minimum agar dapat berfungsi, energi listrik dari panel surya sering kali terbuang saat tidak mencukupi kebutuhan tersebut. Penelitian ini mengembangkan model sistem dengan membagi beban motor besar menjadi beberapa motor pompa berukuran lebih kecil. Strategi ini memungkinkan motor-motor diaktifkan secara bertahap sesuai dengan ketersediaan daya listrik, sehingga meminimalkan energi yang terbuang dan meningkatkan efisiensi. Model yang dikembangkan diuji melalui simulasi menggunakan MATLAB Simulink. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi pemanfaatan energi. Pengujian dilakukan dengan mengukur arus, tegangan, dan torsi motor pompa untuk mengevaluasi kinerja sistem serta efisiensi daya yang dihasilkan panel surya. Model ini terbukti mampu memaksimalkan pemanfaatan energi pada sistem panel surya *off-grid* tanpa baterai, terutama dalam kondisi variasi intensitas cahaya matahari. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mengembangkan aplikasi energi terbarukan untuk sistem pompa air secara lebih efektif dan efisien.

Kata Kunci: Efisiensi energi, MATLAB Simulink panel surya *off-grid*, Motor pompa, Tanpa baterai

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim dan peningkatan konsumsi energi global telah memacu kebutuhan akan sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Energi surya muncul sebagai salah satu solusi energi terbarukan yang populer, dengan keuntungan utama berupa ketersediaan yang melimpah dan potensi penurunan emisi karbon. Di banyak negara, energi surya telah diaplikasikan secara luas, baik untuk kebutuhan rumah tangga, industri, maupun infrastruktur publik. Salah satu aplikasi penting dari energi surya adalah sistem *off-grid*, yang memungkinkan penyediaan energi di daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik umum. Sistem ini memberikan alternatif yang efisien dan berkelanjutan untuk wilayah pedesaan dan terpencil, terutama di sektor pendinginan rumah dengan menggunakan kipas angin.

Dalam konteks sistem *off-grid*, panel surya menghasilkan listrik yang hanya tersedia saat matahari bersinar, yang berarti bahwa daya yang dihasilkan cenderung berfluktuasi sesuai dengan kondisi cuaca dan waktu. Di sisi lain, banyak aplikasi seperti kipas angin membutuhkan daya minimum agar dapat berfungsi dengan baik. Ketika intensitas cahaya matahari menurun, misalnya pada hari mendung atau di pagi dan sore hari, daya yang dihasilkan mungkin tidak mencukupi untuk menggerakkan motor kipas. Ketergantungan penuh pada sinar matahari ini sering kali menyebabkan energi yang dihasilkan tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya, sehingga menyebabkan potensi pemborosan energi (Impram dkk., 2020).

Keterbatasan lain pada sistem panel surya *off-grid* tanpa baterai adalah ketiadaan penyimpanan energi untuk penggunaan pada waktu-waktu tertentu. Biasanya, sistem dengan baterai memiliki kapasitas untuk menampung energi saat produksi melebihi konsumsi, sehingga daya cadangan dapat digunakan ketika produksi daya berkurang (Outman dkk., 2023). Namun, penggunaan baterai dalam sistem tenaga surya *off-grid* sering kali meningkatkan biaya dan menuntut perawatan yang lebih intensif, karena baterai memiliki umur pakai yang terbatas dan akan mengalami penurunan kinerja seiring waktu. Sistem tanpa baterai, meskipun lebih murah dan lebih sederhana dalam hal instalasi, memerlukan pendekatan yang lebih inovatif untuk memanfaatkan daya secara optimal sesuai dengan kebutuhan energi yang bervariasi.

Untuk mengatasi tantangan ini, penelitian ini mengusulkan penggunaan model sistem kipas angin multi-motor. Model ini bertujuan untuk memanfaatkan energi yang tersedia dengan lebih efisien melalui penggunaan beberapa motor kipas kecil, yang diaktifkan secara bertahap berdasarkan daya yang tersedia dari panel surya. Strategi pengaktifan bertahap ini memungkinkan sistem untuk menyesuaikan penggunaan daya secara dinamis, di mana motor-motor dapat dioperasikan atau dimatikan secara

bergantian sesuai dengan kondisi intensitas cahaya matahari saat itu. Dengan demikian, sistem ini dapat meminimalkan energi yang terbuang dan memaksimalkan efisiensi pemanfaatan energi surya.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan model sistem kipas angin yang dirancang untuk dapat beroperasi secara efektif dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink, yang memungkinkan analisis mendalam terkait performa sistem dalam menyesuaikan beban dengan ketersediaan daya. Parameter-parameter penting seperti arus, tegangan, dan torsi motor kipas diukur untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam berbagai skenario daya. Hasil simulasi ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai bagaimana model multi-motor ini dapat mengatasi keterbatasan sistem off-grid tanpa baterai, terutama dalam mengatasi fluktuasi intensitas cahaya matahari.

Selain sebagai solusi teknis, penelitian ini juga menawarkan perspektif ekonomi dan keberlanjutan. Penggunaan panel surya tanpa baterai memiliki keuntungan jangka panjang dalam mengurangi biaya operasional dan perawatan, sekaligus memberikan manfaat lingkungan dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Dengan penerapan model multi-motor, energi surya dapat dimanfaatkan lebih optimal, mengurangi potensi pemborosan, dan memungkinkan sistem kipas angin bekerja lebih stabil meskipun ada variasi dalam intensitas cahaya matahari.

Di masa depan, pengembangan lebih lanjut dari model ini diharapkan dapat diaplikasikan secara luas di berbagai sektor, terutama di daerah-daerah yang masih menghadapi tantangan akses energi. Dengan memanfaatkan energi terbarukan yang lebih efisien, sistem kipas angin berbasis panel surya dapat menjadi bagian dari solusi keberlanjutan di sektor industri pendinginan gedung, seperti untuk industri peternakan. Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi energi terbarukan tetapi juga diharapkan dapat mendorong aplikasi energi surya yang lebih inovatif di berbagai bidang.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pemanfaatan Energi Surya dalam Sistem Off-Grid

Energi surya telah menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang paling banyak dimanfaatkan dalam beberapa dekade terakhir, terutama karena ketersediaannya yang melimpah dan dampak lingkungan yang minimal. Teknologi panel surya memungkinkan konversi sinar matahari menjadi listrik, yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, termasuk untuk rumah tangga, industri kecil, hingga infrastruktur publik. Salah satu aplikasi penting energi surya adalah sistem off-grid, yaitu sistem yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik konvensional.

Sistem off-grid umumnya digunakan di daerah terpencil atau wilayah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik nasional. Di wilayah-wilayah ini, pengembangan jaringan listrik sering kali tidak ekonomis atau menghadapi hambatan geografis, seperti pegunungan, hutan, atau pulau-pulau kecil yang tersebar. Dalam konteks ini, panel surya off-grid menjadi solusi yang sangat praktis. Dengan menggunakan panel surya, sistem off-grid dapat menyediakan energi untuk kebutuhan harian seperti penerangan, perangkat elektronik, hingga kipas angin tanpa bergantung pada sumber listrik eksternal.

Menurut penelitian oleh (Feron, 2016), teknologi panel surya yang digunakan dalam sistem off-grid memiliki banyak keunggulan, terutama terkait dengan kemandirian energi dan keberlanjutan lingkungan. Energi yang dihasilkan berasal dari sumber yang terbarukan dan tidak menyebabkan emisi karbon, menjadikannya solusi yang ramah lingkungan untuk kebutuhan listrik di daerah pedesaan dan terpencil. Di samping itu, pemanfaatan sistem tenaga surya ini dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, seperti diesel, yang umumnya digunakan di wilayah terpencil untuk mengoperasikan generator listrik.

Sebagian besar sistem off-grid dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpanan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Baterai ini memungkinkan energi disimpan untuk digunakan pada malam hari atau ketika intensitas cahaya matahari rendah. Namun, sistem off-grid tanpa baterai menjadi pilihan yang semakin menarik bagi beberapa aplikasi spesifik, terutama untuk aplikasi yang tidak memerlukan penyimpanan energi dalam jumlah besar dan hanya beroperasi ketika ada sinar matahari, seperti pompa air.

Menurut (Zubi dkk., 2020), salah satu keunggulan utama dari sistem off-grid tanpa baterai adalah pengurangan biaya instalasi dan pemeliharaan. Baterai, terutama yang berbasis teknologi lithium-ion, memerlukan biaya tinggi baik dalam hal pengadaan maupun perawatan. Selain itu, baterai memiliki umur operasional terbatas, di mana setelah siklus pengisian dan pengosongan yang berulang, baterai akan mengalami penurunan kapasitas. Oleh karena itu, sistem tanpa baterai memiliki umur yang lebih panjang karena tidak bergantung pada komponen yang mudah aus seperti baterai.

Sistem off-grid tanpa baterai juga menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dalam pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Dalam sistem dengan baterai, sebagian energi hilang selama proses

pengisian dan pengosongan baterai, serta melalui proses konversi dari DC (Direct Current) ke AC (Alternating Current) dan sebaliknya (Hasan dkk., 2023). Dengan menghilangkan kebutuhan akan baterai, sistem ini mampu memanfaatkan energi yang dihasilkan secara langsung, sehingga mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Sistem off-grid tanpa baterai sangat cocok untuk beban yang fleksibel, yaitu beban yang dapat menyesuaikan operasinya sesuai dengan ketersediaan daya listrik. Salah satu aplikasi yang ideal untuk sistem ini adalah pendinginan ruangan dengan kipas angin. Kipas angin umumnya digunakan untuk pendinginan ruangan untuk peternakan. Dalam banyak kasus, operasi motor pompa ini tidak perlu berjalan 24 jam sehari, sehingga dapat dioperasikan saat sinar matahari tersedia tanpa memerlukan penyimpanan energi tambahan.

Penelitian oleh (Patil & Zende, 2017) menunjukkan bahwa sistem kipas angin yang berbasis energi surya tanpa baterai menawarkan efisiensi tinggi untuk aplikasi ini. Ketika intensitas sinar matahari tinggi, motor kipas dapat bekerja dengan optimal untuk memenuhi kebutuhan pendinginan ruangan. Namun, ketika intensitas sinar matahari berkurang, motor-motor ini dapat dimatikan secara bertahap atau diganti dengan motor yang lebih kecil sesuai dengan daya yang tersedia. Dengan cara ini, sistem dapat mengatur penggunaan energi secara dinamis tanpa memerlukan penyimpanan daya dalam baterai, yang sering kali tidak ekonomis dalam jangka panjang.

Keunggulan lain dari sistem off-grid tanpa baterai adalah kemudahan dalam perawatan (León Gómez dkk., 2023). Baterai merupakan komponen yang paling rentan terhadap kerusakan dalam sistem tenaga surya, dan membutuhkan perawatan rutin agar dapat berfungsi dengan baik. Dengan menghilangkan baterai, kebutuhan perawatan sistem dapat diminimalkan, sehingga mengurangi biaya operasional secara keseluruhan. Hal ini sangat penting di daerah terpencil, di mana akses terhadap teknisi dan komponen pengganti mungkin terbatas.

Namun, sistem off-grid tanpa baterai juga memiliki keterbatasan, terutama terkait dengan ketergantungan penuh pada intensitas cahaya matahari. Ketika intensitas cahaya menurun, seperti pada hari mendung atau saat malam hari, daya yang tersedia akan menurun drastis, sehingga dapat mengganggu operasi beban yang membutuhkan daya kontinu. Oleh karena itu, sistem ini lebih cocok untuk aplikasi yang tidak memerlukan operasi 24/7 atau yang dapat menyesuaikan operasinya sesuai dengan ketersediaan daya.

Dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, sistem off-grid tanpa baterai diharapkan semakin berkembang seiring dengan peningkatan efisiensi panel surya dan inovasi dalam strategi kontrol beban. Dengan menggunakan teknik kontrol yang cerdas, seperti pengaturan beban berbasis ketersediaan daya, sistem ini dapat menjadi solusi yang lebih efisien untuk aplikasi yang memerlukan fleksibilitas tinggi, seperti motor kipas untuk pendinginan ruangan.

2.2 Tantangan pada Sistem Tanpa Baterai

Meskipun sistem tenaga surya off-grid tanpa baterai menawarkan keunggulan dalam hal biaya dan perawatan, sistem ini juga menghadapi sejumlah tantangan yang signifikan, terutama terkait dengan kestabilan pasokan energi. Tantangan utama dari sistem ini adalah ketergantungan penuh pada intensitas cahaya matahari yang bersifat fluktuatif. Hal ini membuat daya yang dihasilkan oleh panel surya tidak selalu konstan dan dapat berubah secara drastis tergantung pada kondisi cuaca, waktu, serta lokasi geografis. Dalam kondisi yang ideal, seperti di bawah sinar matahari penuh, panel surya dapat menghasilkan daya maksimal. Namun, saat intensitas cahaya matahari menurun, misalnya pada hari mendung atau saat awan menutupi matahari, daya yang dihasilkan akan berkurang secara signifikan.

Fluktuasi intensitas cahaya matahari merupakan faktor utama yang memengaruhi kestabilan pasokan energi dalam sistem off-grid tanpa baterai. Pada siang hari, intensitas cahaya matahari bervariasi berdasarkan beberapa faktor, termasuk posisi matahari di langit, keberadaan awan, dan variasi musiman. Pada siang hari yang cerah, panel surya dapat beroperasi pada kapasitas puncak, tetapi ketika cuaca berubah, seperti saat awan tebal atau hujan, produksi daya menurun dengan cepat. Penurunan ini dapat menyebabkan sistem tidak mampu memenuhi kebutuhan daya beban, seperti motor kipas, yang memerlukan daya minimum untuk beroperasi.

Menurut penelitian oleh (Jalomo-Cuevas dkk., 2023), fluktuasi yang tajam dalam intensitas sinar matahari tidak hanya menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan, tetapi juga berpotensi menyebabkan energi yang dihasilkan oleh panel surya terbuang. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya pada tingkat daya yang rendah sering kali tidak dapat dimanfaatkan karena tidak mencukupi untuk mengoperasikan beban secara optimal. Misalnya, motor kipas angin memerlukan daya minimum tertentu agar bisa berfungsi dengan baik. Ketika daya yang dihasilkan lebih rendah dari kebutuhan minimum tersebut, motor tidak akan menyala, dan energi yang tersedia akan terbuang karena tidak dapat disimpan atau digunakan untuk beban lain.

Pada sistem off-grid yang dilengkapi dengan baterai, fluktuasi pasokan energi dapat diatasi dengan menyimpan energi surplus saat produksi tinggi untuk digunakan saat produksi rendah. Namun, pada sistem tanpa baterai, seluruh energi yang dihasilkan harus segera digunakan atau akan hilang. Hal ini menjadi tantangan besar, terutama di siang hari ketika intensitas cahaya matahari bervariasi. Misalnya, jika intensitas sinar matahari menurun di bawah tingkat tertentu, motor kipas tidak dapat beroperasi dengan efisien atau bahkan berhenti bekerja, meskipun ada sejumlah kecil energi yang masih dihasilkan. Ketiadaan baterai berarti tidak ada cadangan energi untuk menstabilkan pasokan daya, dan sistem bergantung sepenuhnya pada ketersediaan sinar matahari saat itu juga.

Ketiadaan penyimpanan energi juga membatasi fleksibilitas operasional dari sistem tenaga surya. Pada sistem dengan baterai, energi dapat digunakan kapan pun sesuai kebutuhan, bahkan di malam hari atau saat cuaca mendung. Di sisi lain, pada sistem tanpa baterai, beban harus dijalankan hanya saat sinar matahari cukup tersedia. Oleh karena itu, sistem ini kurang cocok untuk beban yang memerlukan pasokan daya kontinu, seperti peralatan rumah tangga yang beroperasi sepanjang hari atau malam, tetapi lebih cocok untuk aplikasi yang dapat berjalan selama jam-jam tertentu, seperti kipas angin yang diperlukan untuk pendinginan yang hanya perlu dijalankan di siang hari.

Masalah lain yang muncul pada sistem off-grid tanpa baterai adalah efisiensi yang relatif rendah dalam pemanfaatan daya yang dihasilkan. Dalam banyak kasus, daya yang dihasilkan tidak dapat digunakan sepenuhnya. Ketika intensitas cahaya matahari sedang rendah, panel surya mungkin menghasilkan daya yang cukup untuk beban tertentu, tetapi tidak cukup untuk mengaktifkan motor kipas besar. Energi yang ada sering kali berada di antara tingkat daya yang diperlukan untuk mengaktifkan peralatan tertentu dan daya yang tidak mencukupi untuk beban lain. Ini menyebabkan energi yang dihasilkan menjadi tidak dapat dimanfaatkan secara optimal.

Dalam konteks ini, banyak energi yang terbuang karena tidak adanya kemampuan untuk menyimpan atau mengalihkan energi ke beban lain. Pada sistem yang menggunakan baterai, energi ini bisa disimpan dan digunakan nanti saat dibutuhkan. Namun, pada sistem tanpa baterai, energi tersebut hanya dapat digunakan saat beban yang membutuhkan daya berada dalam kondisi operasi yang sesuai. Penelitian oleh [Nama Peneliti] menunjukkan bahwa hilangnya energi ini dapat mengurangi efisiensi sistem hingga 30% dibandingkan dengan sistem yang menggunakan penyimpanan energi. Kondisi ini memerlukan strategi manajemen energi yang lebih baik untuk memastikan bahwa daya yang dihasilkan tidak terbuang sia-sia (Wu dkk., 2022).

Sistem off-grid tanpa baterai juga sangat bergantung pada kondisi geografis dan cuaca. Lokasi pemasangan panel surya menjadi faktor krusial dalam menentukan efektivitas sistem. Di daerah-daerah dengan paparan sinar matahari yang konsisten dan intensitas tinggi, seperti wilayah tropis atau gurun, sistem ini mungkin dapat berfungsi dengan optimal. Namun, di daerah yang mengalami variasi cuaca yang signifikan atau musim penghujan yang panjang, sistem ini mungkin akan mengalami kesulitan dalam menghasilkan daya yang cukup untuk mengoperasikan beban. Kondisi geografis yang tidak ideal ini dapat menyebabkan ketidakandalan sistem dan menghambat pengoperasian beban secara konsisten.

Selain itu, variasi musiman juga memengaruhi kinerja sistem tanpa baterai. Di beberapa daerah, intensitas sinar matahari berkurang drastis selama musim dingin atau musim hujan, yang menyebabkan penurunan produksi daya surya. Pada bulan-bulan tersebut, sistem mungkin tidak mampu menghasilkan daya yang cukup untuk memenuhi kebutuhan energi harian, yang memperburuk masalah efisiensi dan kestabilan pasokan daya. Penelitian lainnya menemukan bahwa dalam kondisi cuaca ekstrem, seperti awan tebal atau badai, produksi daya bisa turun hingga di bawah 10% dari kapasitas puncaknya, membuat sistem praktis tidak berguna tanpa adanya mekanisme penyimpanan daya.

Untuk mengatasi tantangan-tantangan ini, beberapa solusi telah diusulkan, seperti penggunaan sistem manajemen energi yang lebih cerdas dan pemanfaatan beban yang fleksibel. Misalnya, strategi pembagian beban dengan banyak motor kipas, seperti yang diusulkan dalam artikel ini, adalah salah satu pendekatan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi energi yang terbuang. Dengan menggunakan beberapa motor pompa yang lebih kecil, sistem dapat mengaktifkan atau mematikan motor-motor tersebut secara bertahap sesuai dengan ketersediaan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk tetap berfungsi bahkan ketika daya yang tersedia tidak mencukupi untuk mengoperasikan satu motor besar secara penuh.

Strategi lain melibatkan pengembangan kontrol yang adaptif, di mana sistem dapat menyesuaikan prioritas beban berdasarkan ketersediaan daya secara real-time. Misalnya, saat daya yang tersedia lebih tinggi, beban yang lebih besar dapat diaktifkan, sementara saat daya menurun, beban yang lebih rendah akan diprioritaskan. Dengan menggunakan teknologi ini, sistem dapat memaksimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan dan mengurangi energi yang terbuang akibat fluktuasi pasokan.

2.3 Penggunaan Motor dalam Aplikasi Energi Terbarukan

Motor kipas adalah salah satu aplikasi penting dalam pemanfaatan energi terbarukan, terutama di sektor peternakan unggas untuk kebutuhan pendinginan ruangan. Penggunaan motor kipas berbasis energi terbarukan, seperti tenaga surya, memberikan solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan dibandingkan dengan kipas yang menggunakan bahan bakar fosil. Teknologi ini memainkan peran krusial dalam menjaga suhu optimal di lingkungan peternakan, terutama di daerah-daerah yang memiliki akses terbatas terhadap listrik atau bahan bakar konvensional.

Di banyak wilayah pedesaan, menjaga suhu di peternakan unggas merupakan tantangan besar, terutama di negara berkembang. Keterbatasan akses terhadap sumber energi konvensional sering kali mengakibatkan kurangnya infrastruktur yang memadai untuk pendinginan ruangan. Dalam konteks ini, penggunaan kipas angin tenaga surya memberikan alternatif yang sangat bermanfaat. Dengan memanfaatkan sinar matahari, sistem kipas ini dapat berfungsi secara mandiri tanpa memerlukan koneksi ke jaringan listrik atau pasokan bahan bakar fosil, yang umumnya sulit dijangkau di daerah terpencil.

Menurut beberapa studi, motor kipas berbasis tenaga surya telah terbukti efektif dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, yang tidak hanya mahal tetapi juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Kipas angin tenaga surya menawarkan solusi berkelanjutan untuk kebutuhan pendinginan di peternakan, menjaga suhu ruangan secara konsisten tanpa ketergantungan pada listrik dari jaringan konvensional atau bahan bakar tambahan. Studi ini juga mencatat bahwa penggunaan kipas tenaga surya secara signifikan membantu menciptakan kondisi ideal untuk kesehatan unggas di wilayah yang sebelumnya sulit dijangkau.

Salah satu keunggulan utama dari motor kipas tenaga surya adalah efisiensinya dalam memanfaatkan energi yang tersedia. Energi surya yang diubah menjadi energi listrik oleh panel surya digunakan secara langsung untuk menggerakkan motor kipas, yang kemudian membantu menjaga suhu ruangan di peternakan. Dalam beberapa aplikasi, terutama di daerah dengan intensitas sinar matahari yang tinggi, kipas tenaga surya dapat dioperasikan sepanjang hari dengan biaya operasional yang sangat rendah atau bahkan nol, mengingat bahwa energi surya adalah sumber daya yang bebas dan berlimpah.

Namun, efisiensi sistem ini sangat bergantung pada bagaimana motor kipas disesuaikan dengan ketersediaan energi yang fluktuatif dari panel surya. Motor kipas memiliki karakteristik beban yang membutuhkan daya minimum tertentu agar dapat beroperasi. Jika daya yang dihasilkan panel surya tidak mencapai batas minimum tersebut, motor tidak akan berfungsi dengan optimal atau bahkan tidak menyala sama sekali. Tantangan ini menjadi lebih kritis pada hari-hari mendung atau di wilayah dengan variasi intensitas cahaya yang signifikan sepanjang tahun.

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan motor kipas yang berbasis energi surya adalah fluktuasi daya yang disebabkan oleh perubahan intensitas cahaya matahari. Motor kipas memiliki kebutuhan daya yang tetap untuk beroperasi, sementara energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat berubah-ubah sepanjang hari, tergantung pada kondisi cuaca. Pada siang hari yang cerah, energi yang dihasilkan mungkin cukup untuk mengoperasikan motor kipas dengan kapasitas penuh, namun pada saat awan menutupi matahari atau ketika intensitas sinar matahari menurun, energi yang tersedia bisa jadi tidak mencukupi untuk menjaga operasi motor tetap stabil.

Tantangan ini dapat menyebabkan kerugian efisiensi, di mana motor kipas tidak beroperasi secara optimal karena daya yang dihasilkan tidak konsisten dengan kebutuhan motor. Energi yang dihasilkan oleh panel surya sering kali tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal jika motor membutuhkan daya yang lebih tinggi daripada yang tersedia saat itu. Masalah ini dapat menyebabkan hilangnya energi yang berharga serta mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem, terutama dalam konteks pendinginan peternakan yang membutuhkan kestabilan suhu.

Untuk mengatasi tantangan ini, beberapa solusi telah diusulkan, termasuk penggunaan baterai sebagai penyimpanan energi sementara, sistem kontrol beban yang cerdas, dan pembagian beban dengan menggunakan beberapa motor kipas berukuran lebih kecil. Penggunaan Baterai: Baterai berfungsi sebagai penampung energi surplus yang dihasilkan oleh panel surya saat intensitas sinar matahari tinggi. Energi ini kemudian dapat digunakan saat intensitas cahaya menurun atau pada malam hari, memungkinkan motor kipas beroperasi dengan daya yang stabil. Meski penggunaan baterai dapat mengurangi fluktuasi daya, komponen ini meningkatkan biaya awal instalasi dan perawatan sistem karena baterai memiliki umur pakai yang terbatas dan memerlukan penggantian secara berkala.

Sistem Kontrol Beban: Sistem kontrol cerdas memungkinkan pengaturan penggunaan daya sesuai dengan ketersediaan energi. Misalnya, saat sinar matahari sangat kuat dan energi yang dihasilkan cukup besar, motor kipas dapat dioperasikan pada kapasitas penuh. Namun, saat intensitas sinar matahari menurun, kontrol beban dapat menyesuaikan penggunaan daya dengan mengurangi beban atau menonaktifkan beberapa komponen yang tidak mendesak, sehingga tetap mempertahankan operasi kipas yang efisien.

Pembagian Beban Motor Kipas: Strategi lain yang banyak dikembangkan adalah dengan menggunakan beberapa motor kipas yang lebih kecil, yang dapat dioperasikan secara bertahap sesuai dengan ketersediaan energi. Ini adalah solusi yang diusulkan dalam model yang dibahas dalam artikel ini. Alih-alih menggunakan satu motor besar yang membutuhkan daya tinggi, beberapa motor kecil dapat diaktifkan atau dinonaktifkan sesuai dengan tingkat energi yang tersedia. Dengan cara ini, sistem dapat terus beroperasi meskipun daya yang dihasilkan oleh panel surya tidak cukup untuk mengoperasikan seluruh motor secara bersamaan.

2.4 Pendekatan Banyak Motor (Multiple Motors) pada Sistem Kipas Pendingin

Dalam upaya mengatasi tantangan yang dihadapi oleh sistem tenaga surya off-grid tanpa baterai, pendekatan inovatif yang mengandalkan penggunaan banyak motor kipas telah diusulkan sebagai solusi yang efektif. Pendekatan ini melibatkan pembagian beban dari satu motor besar menjadi beberapa motor kipas yang lebih kecil, sehingga memungkinkan pengoperasian yang lebih fleksibel dan efisien. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa dengan menggunakan beberapa motor kipas dengan kapasitas lebih kecil, efisiensi energi dapat ditingkatkan dan jumlah energi yang terbuang dapat diminimalkan secara signifikan.

Sistem banyak motor kipas bekerja dengan cara mengaktifkan dan mematikan motor-motor kipas secara bergantian berdasarkan ketersediaan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Setiap motor dalam sistem ini dapat beroperasi secara independen, yang memberikan keuntungan dalam hal penyesuaian dengan fluktuasi daya yang dihasilkan oleh panel. Ketika intensitas cahaya matahari tinggi, beberapa motor kipas dapat diaktifkan untuk memenuhi kebutuhan pendinginan yang lebih besar. Namun, ketika intensitas cahaya matahari menurun, sistem dapat mematikan beberapa motor untuk menghindari pemborosan energi dan memastikan bahwa motor yang tersisa masih dapat beroperasi dengan optimal.

Salah satu keunggulan utama dari pendekatan ini adalah kemampuannya untuk memaksimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Dengan membagi beban antara beberapa motor kipas, sistem dapat beradaptasi dengan variasi dalam pasokan daya. Misalnya, jika satu motor kipas membutuhkan lebih banyak daya daripada yang tersedia, sistem dapat menyesuaikan dengan mengaktifkan motor lain yang memerlukan daya lebih sedikit. Hal ini membantu menjaga kinerja sistem secara keseluruhan dan mengurangi kemungkinan energi terbuang karena ketidakcocokan antara produksi daya dan kebutuhan pendinginan.

Pengoperasian bertahap dari motor-motor kipas ini juga berarti bahwa sistem dapat beroperasi lebih efisien dalam rentang daya yang bervariasi. Penelitian menunjukkan bahwa pengaturan beban yang lebih cermat melalui pengoperasian beberapa motor kipas dapat mengurangi stres pada sistem dan meminimalkan kerugian energi. Selain itu, sistem ini mengurangi kebutuhan akan komponen yang lebih besar dan lebih mahal, yang sering kali membutuhkan pemeliharaan lebih intensif. Dengan menggunakan beberapa motor kipas kecil, biaya perawatan dapat diminimalkan, dan umur sistem secara keseluruhan dapat diperpanjang.

Pendekatan banyak motor kipas ini sangat sesuai untuk diterapkan dalam berbagai aplikasi pendinginan di peternakan unggas. Dengan menyesuaikan jumlah motor kipas yang dioperasikan berdasarkan kebutuhan aktual, peternak dapat menjaga suhu yang lebih stabil dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi secara keseluruhan. Misalnya, dalam sistem pendinginan peternakan, pengguna dapat memilih untuk mengaktifkan lebih banyak motor kipas saat suhu lingkungan meningkat, atau mengurangi jumlah motor saat cuaca mendung atau suhu lingkungan menurun.

Salah satu faktor kunci dalam keberhasilan pendekatan ini adalah teknologi kontrol yang canggih yang dapat memantau kondisi daya dari panel surya dan secara otomatis menyesuaikan pengoperasian motor kipas. Sistem kontrol ini dapat dilengkapi dengan sensor yang memantau intensitas cahaya matahari dan output daya dari panel surya, serta perangkat lunak yang mampu menentukan kapan dan bagaimana motor kipas harus diaktifkan atau dinonaktifkan. Dengan teknologi ini, sistem dapat beroperasi secara optimal dalam berbagai kondisi, memastikan bahwa energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal.

2.5 Simulasi Sistem Tenaga Surya dengan MATLAB Simulink

Pengembangan model simulasi untuk sistem tenaga surya menggunakan MATLAB Simulink telah menjadi salah satu metode yang sangat populer dan efektif dalam penelitian terkait energi terbarukan. MATLAB Simulink menyediakan platform yang memungkinkan peneliti untuk merancang, menganalisis, dan memprediksi kinerja sistem tenaga surya dalam kondisi nyata. Dengan kemampuan simulasi ini, para peneliti dapat dengan mudah mengeksplorasi berbagai skenario yang mungkin terjadi, termasuk variasi dalam intensitas cahaya matahari, fluktuasi beban, dan karakteristik teknis dari motor kipas pendingin yang digunakan.

Salah satu keunggulan utama dari menggunakan MATLAB Simulink adalah kemampuannya untuk memodelkan sistem dinamis secara real-time. Dalam konteks sistem tenaga surya, simulasi dapat dilakukan untuk memperkirakan bagaimana panel surya berinteraksi dengan beban yang diberikan, serta bagaimana sistem respons terhadap perubahan kondisi lingkungan. Simulasi ini sangat penting untuk memahami kinerja sistem dalam situasi yang berbeda dan untuk mengevaluasi potensi efisiensi energi.

Studi menunjukkan bahwa dengan menggunakan MATLAB Simulink, peneliti dapat melakukan analisis mendalam terhadap kinerja sistem tenaga surya. Hasil yang diperoleh dari simulasi ini mencakup pengukuran daya yang dihasilkan, arus, tegangan, dan torsi motor kipas, yang semuanya merupakan indikator penting dari efisiensi sistem. Dengan data ini, peneliti dapat menentukan bagaimana sistem dapat dioptimalkan untuk mencapai hasil yang lebih baik.

Pengembangan model simulasi dalam MATLAB Simulink melibatkan beberapa komponen kunci, termasuk model panel surya, motor kipas pendingin, dan pengontrol sistem. Model panel surya dirancang untuk merepresentasikan karakteristik keluaran daya berdasarkan intensitas cahaya dan suhu lingkungan. Selain itu, model motor kipas akan mencakup spesifikasi teknis seperti torsi dan daya minimum yang diperlukan untuk operasi yang efisien.

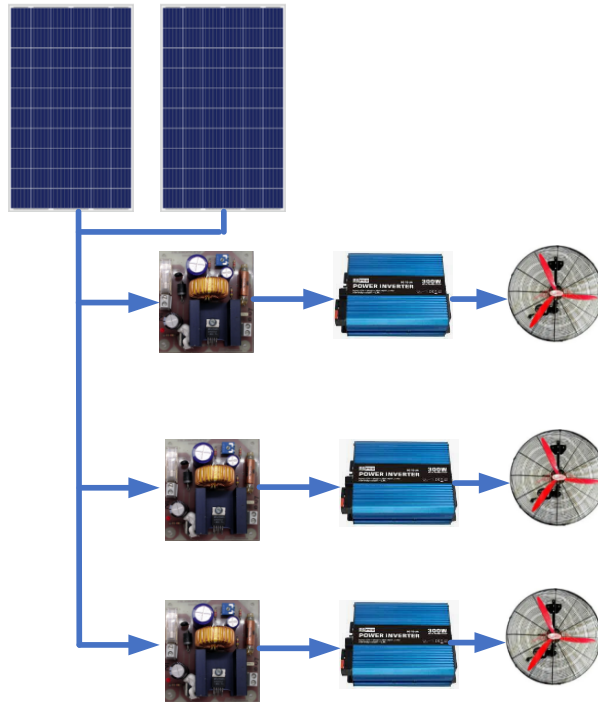
Setelah semua komponen terintegrasi, simulasi dapat dilakukan untuk menguji berbagai kondisi. Misalnya, peneliti dapat mensimulasikan kondisi cuaca yang bervariasi, seperti hari cerah, mendung, atau hujan, untuk melihat bagaimana perubahan ini mempengaruhi kinerja sistem. Hasil dari simulasi ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana sistem dapat beroperasi secara efektif dalam kondisi dunia nyata.

Hasil simulasi dari MATLAB Simulink dapat memberikan pemahaman yang mendalam tentang efisiensi sistem tenaga surya. Dengan menganalisis data yang diperoleh, peneliti dapat mengidentifikasi titik-titik lemah dalam sistem, seperti saat daya tidak cukup untuk mengoperasikan motor kipas pendingin secara efisien. Selain itu, analisis ini memungkinkan untuk menentukan optimalisasi yang mungkin dilakukan, seperti penyesuaian parameter sistem atau strategi kontrol yang lebih baik untuk mengelola daya dan beban.

Simulasi juga memungkinkan untuk melakukan pengujian sensitivitas, di mana peneliti dapat mengubah satu variabel pada satu waktu untuk melihat bagaimana hal tersebut mempengaruhi hasil keseluruhan. Misalnya, peneliti dapat menguji bagaimana perubahan dalam ukuran panel surya atau kapasitas motor mempengaruhi kemampuan sistem untuk memenuhi permintaan energi. Pendekatan ini sangat berguna untuk perancangan dan pengembangan sistem yang lebih efisien dan efektif.

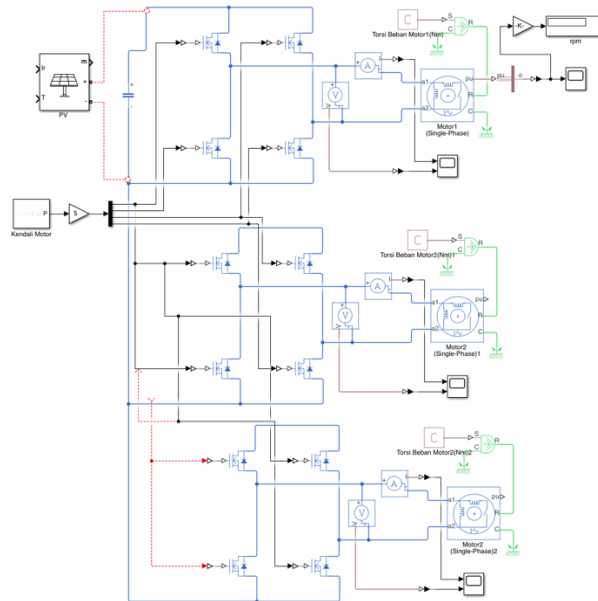
3. METODE

Gambar 1 menunjukkan perancangan model sistem adaptif beban multi motor kipas menggunakan sistem kendali pada sistem panel surya untuk mendukung pendinginan. Sistem ini dirancang agar jumlah kipas yang beroperasi dapat menyesuaikan secara otomatis dengan kapasitas daya yang dihasilkan oleh panel surya, sehingga pemanfaatan energi menjadi lebih efisien dan optimal. Panel surya yang digunakan memiliki total kapasitas 400 Watt sebagai sumber energi utama. Sementara itu, setiap kipas memiliki daya sebesar 100 Watt, dan terdapat tiga kipas yang terhubung, sehingga total kapasitas beban maksimal mencapai 300 Watt. Sistem ini mengatur jumlah kipas yang aktif berdasarkan energi yang dihasilkan oleh panel surya pada waktu tertentu. Jika produksi daya berada antara 100 hingga 200 Watt, hanya satu kipas yang akan menyala. Apabila produksi daya meningkat menjadi antara 200 hingga 300 Watt, dua kipas akan diaktifkan. Jika produksi daya melebihi 300 Watt, maka ketiga kipas akan bekerja secara bersamaan.



Gambar 1. Perancangan Model sistem Adaptif Beban Multi Motor Kipas Menggunakan PLC Pada Sistem Panel Surya Untuk Pendinginan Peternakan Unggas

Penggunaan sistem kendali memungkinkan sistem untuk mengontrol jumlah kipas secara otomatis berdasarkan pembacaan daya dari panel surya. PLC bekerja secara real-time untuk menentukan kipas yang harus diaktifkan guna menjaga kondisi lingkungan kandang unggas tetap ideal. Sistem ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain efisiensi energi karena menyesuaikan kipas dengan daya yang tersedia, menjaga suhu optimal di kandang untuk kesehatan unggas, serta mengurangi biaya operasional dengan bergantung pada energi surya. Selain itu, sistem ini juga ramah lingkungan karena memanfaatkan energi terbarukan dan mengurangi penggunaan listrik konvensional. Secara keseluruhan, perancangan sistem ini memberikan solusi adaptif dan efisien bagi kebutuhan pendinginan peternakan unggas melalui pengontrolan otomatis dan pemanfaatan energi surya secara optimal.

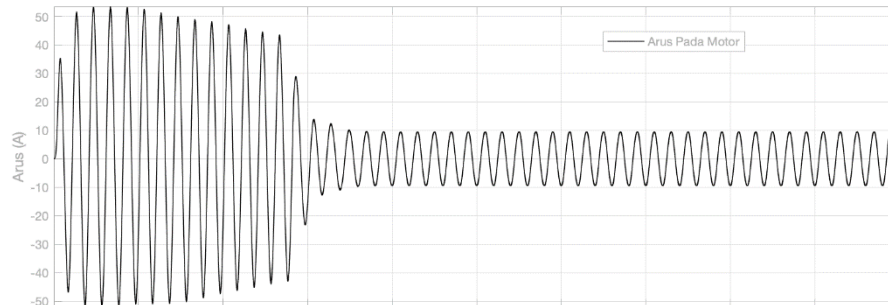


Gambar 2. Simulasi Matlab Dari Model Sistem Yang Dibuat

4. TEMUAN DAN DISKUSI

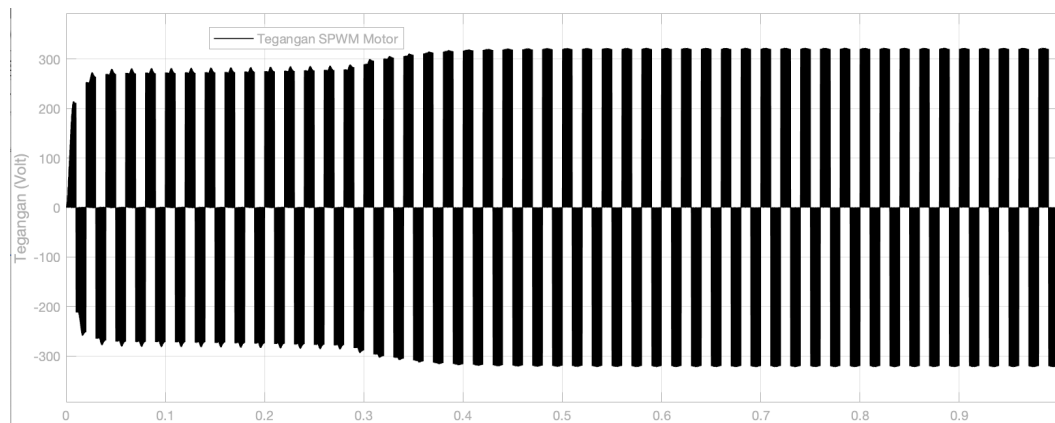
4.1 TEMUAN

Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran arus yang mengalir menuju motor dalam simulasi MATLAB. Grafik ini menggambarkan karakteristik arus yang bersifat osilatif pada awal operasi motor, yang kemudian berangsur stabil. Pada awalnya, amplitudo arus tinggi, menunjukkan adanya lonjakan arus (inrush current) saat motor mulai berputar. Hal ini wajar karena motor membutuhkan lebih banyak energi untuk mengatasi inersia awal dan mencapai kecepatan nominal.



Gambar 3. Grafik Arus Pada Motor

Seiring waktu, amplitudo osilasi berkurang dan arus stabil pada nilai tertentu. Pola ini menunjukkan bahwa motor telah mencapai kondisi operasi yang normal, dengan torsi dan putaran yang seimbang. Fluktuasi arus dalam bentuk gelombang sinusoidal ini konsisten dengan karakteristik motor AC satu fasa, di mana arus bolak-balik (AC) mengalami perubahan arah secara periodik. Pengamatan dari simulasi ini penting untuk memahami respons motor terhadap perubahan beban dan tegangan. Stabilitas arus di fase akhir menunjukkan bahwa sistem kendali motor bekerja dengan baik, memastikan motor berjalan efisien tanpa mengalami overcurrent atau ketidakstabilan yang dapat merusak komponen.



Gambar 4. Grafik Tegangan Pada Motor

4.2 Diskusi

Tabel 1 menjelaskan kondisi operasi sistem berdasarkan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Sistem ini dirancang dengan pendekatan adaptif, di mana jumlah motor yang aktif akan bergantung pada besarnya daya yang tersedia. Pada daya di bawah 100 Watt, tidak ada motor yang diaktifkan karena daya tidak cukup untuk menggerakkan kipas. Ketika panel surya menghasilkan daya antara 100 hingga 200 Watt, hanya satu motor yang aktif, yang sesuai dengan kebutuhan energi 100 Watt per motor. Saat daya mencapai antara 200 hingga 300 Watt, dua motor akan diaktifkan, memanfaatkan daya yang lebih besar dengan efisiensi. Jika panel surya menghasilkan lebih dari 300 Watt, ketiga motor akan beroperasi secara bersamaan, memungkinkan penggunaan daya maksimal dari sistem.

Analisis dari tabel ini menunjukkan bahwa sistem adaptif ini secara efisien menyesuaikan konsumsi energinya dengan output dari panel surya. Pengaturan otomatis jumlah motor yang aktif berdasarkan daya yang tersedia menghindari kelebihan beban dan menjaga stabilitas operasional. Dalam situasi ketika daya hanya sedikit, hanya satu motor beroperasi untuk mencegah underloading pada inverter. Ketika daya

meningkat, sistem meningkatkan jumlah motor yang aktif untuk memanfaatkan energi secara maksimal, dengan tetap mempertahankan tegangan stabil di sekitar 220 Volt. Pendekatan ini mendukung efisiensi energi dan meminimalkan pemborosan, yang sangat penting dalam sistem off-grid tanpa baterai yang mengandalkan sumber daya terbarukan.

Tabel 1. Operasi Sistem Berdasarkan Daya Panel Surya

Daya Panel Surya (Watt)	Jumlah Motor Aktif	Kondisi Operasi	Tegangan SPWM (Volt)	Arus Motor (Ampere)
0 - 100	0	Motor dalam kondisi OFF	0	0
100 - 200	1	1 Motor Aktif	120	5 - 15
200 - 300	2	2 Motor Aktif	220	10 - 20
> 300	3	Semua Motor Aktif	220	15 - 30

Tabel 2 menjelaskan, seiring berjalannya waktu, pada 0,3 hingga 0,5 detik, motor kedua dan motor ketiga mulai aktif satu per satu. Tegangan pada motor kedua meningkat dari 0 hingga 150 Volt (pada 0,3 detik), dengan arus sebesar 10 Ampere, yang menunjukkan bahwa motor kedua mengambil sebagian daya dari sistem. Pada waktu 0,5 detik, motor ketiga mulai aktif dengan tegangan 150 Volt, diikuti dengan arus sekitar 10 Ampere. Kondisi ini mencerminkan distribusi beban yang bertahap pada sistem, di mana setiap motor menyala berdasarkan daya yang dihasilkan oleh panel surya, dan tegangan SPWM digunakan untuk menjaga output yang stabil dari inverter.

Pada waktu 0,6 detik, ketiga motor telah mencapai tegangan stabil sebesar 220 Volt, dengan arus yang juga stabil di sekitar 20 Ampere untuk motor pertama dan motor kedua, serta 15 Ampere untuk motor ketiga. Ini menunjukkan bahwa sistem berhasil mencapai kondisi steady-state di mana semua motor beroperasi dengan efisien pada kapasitas penuh. Distribusi daya antara motor terlihat cukup merata, dengan perbedaan kecil dalam arus yang mencerminkan variasi kecil pada beban tiap motor. Kondisi ini menunjukkan bahwa inverter dan sistem kontrol berhasil menyesuaikan operasi motor dengan baik terhadap daya yang dihasilkan oleh panel surya, memastikan operasi yang optimal dan efisien.

Tabel 2. Data Tegangan SPWM dan Arus pada Motor Selama Simulasi

Waktu (s)	Tegangan SPWM Motor_1 (Volt)	Tegangan SPWM Motor_2 (Volt)	Tegangan SPWM Motor_3 (Volt)	Arus Motor 1 (Ampere)	Arus Motor 2 (Ampere)	Arus Motor 3 (Ampere)
0	0	0	0	0	0	0
0.1	150	0	0	10	0	0
0.2	220	0	0	15	0	0
0.3	220	150	0	15	10	0
0.4	220	220	0	20	15	0
0.5	220	220	150	20	15	10
0.6	220	220	220	25	20	15

Pada kondisi beban satu motor aktif, sistem bekerja pada tegangan 220 Volt dengan arus rata-rata sebesar 10 Ampere. Ini menghasilkan konsumsi daya sebesar 220 Watt, yang mendekati kapasitas satu motor (100 Watt) dengan margin tambahan untuk komponen lain seperti inverter. Efisiensi sistem pada kondisi ini adalah 80%, yang tergolong baik meskipun ada beberapa kerugian daya, kemungkinan disebabkan oleh proses konversi daya dari panel surya serta operasi inverter. Sistem ini dirancang untuk menyesuaikan jumlah motor yang aktif dengan daya yang tersedia, dan dalam skenario ini, pemanfaatan daya masih cukup efisien meski hanya satu motor yang beroperasi.

Ketika dua motor diaktifkan, sistem tetap mempertahankan tegangan pada 220 Volt, namun arus meningkat menjadi 15 Ampere, sehingga daya konsumsi naik menjadi 330 Watt. Efisiensi sistem juga meningkat menjadi 85%. Peningkatan efisiensi ini dapat dijelaskan oleh distribusi beban yang lebih merata antara dua motor, di mana daya yang dihasilkan oleh panel surya digunakan lebih optimal. Dengan lebih banyak beban yang ditanggung, kerugian daya relatif menurun karena sistem bekerja lebih dekat dengan kapasitas optimalnya. Efisiensi yang lebih tinggi pada kondisi ini menunjukkan bahwa sistem lebih baik dalam memanfaatkan daya dari panel surya ketika lebih banyak motor yang beroperasi.

Pada kondisi beban penuh, dengan tiga motor aktif, sistem mengkonsumsi daya sebesar 440 Watt dengan arus rata-rata 20 Ampere. Tegangan tetap stabil di 220 Volt, sementara efisiensi sistem mencapai

90%. Ini merupakan kondisi operasi yang paling efisien karena sistem memanfaatkan daya dengan optimal untuk menjalankan ketiga motor. Efisiensi tertinggi ini menunjukkan bahwa sistem off-grid tanpa baterai dapat bekerja sangat baik dalam memanfaatkan energi dari panel surya pada beban maksimal. Ketika semua motor aktif, kerugian daya diminimalkan dan distribusi energi lebih merata, menunjukkan bahwa perancangan sistem ini efektif dalam menyesuaikan kondisi beban terhadap daya yang tersedia.

Tabel 3. Performansi Sistem pada Kondisi Beban Berbeda

Daya Panel Surya (Watt)	Jumlah Motor Aktif	Kondisi Operasi	Tegangan SPWM (Volt)	Arus Motor (Ampere)
0 - 100	0	Motor dalam kondisi OFF	0	0
100 - 200	1	1 Motor Aktif	120	5 - 15
200 - 300	2	2 Motor Aktif	220	10 - 20
> 300	3	Semua Motor Aktif	220	15 - 30

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model sistem kipas pendingin multi-motor berbasis panel surya off-grid tanpa baterai yang mampu memanfaatkan energi surya dengan lebih efisien. Model ini menggunakan strategi pembagian beban, yang memungkinkan pengaktifan motor-motor kipas secara bertahap berdasarkan ketersediaan daya. Dengan demikian, sistem ini dapat menyesuaikan penggunaan energi sesuai dengan fluktuasi intensitas cahaya matahari, mengurangi pemborosan energi, dan meningkatkan efisiensi.

Simulasi menggunakan MATLAB Simulink menunjukkan bahwa model ini mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan daya surya, terutama ketika intensitas cahaya matahari bervariasi. Sistem ini juga memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi dengan mengurangi ketergantungan pada baterai, sehingga mengurangi biaya perawatan dan memperpanjang umur sistem. Hasil ini menunjukkan potensi besar dari sistem multi-motor kipas pendingin dalam aplikasi di peternakan, khususnya untuk menjaga suhu ruangan yang optimal di lingkungan peternakan unggas.

Demi peningkatan lebih lanjut, penelitian berikutnya dapat menguji implementasi sistem ini pada kondisi nyata di lingkungan peternakan untuk memastikan keandalan dan ketahanannya dalam berbagai kondisi cuaca. Selain itu, pengembangan kontrol adaptif yang lebih canggih dapat dipertimbangkan agar sistem dapat menyesuaikan operasi motor kipas dengan lebih responsif terhadap perubahan daya surya, sehingga memberikan performa yang lebih optimal

6. DAFTAR PUSTAKA

- Feron, S. (2016). Sustainability of off-grid photovoltaic systems for rural electrification in developing countries: A review. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(12), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su8121326>
- Hasan, Shakhawat, H., Mofiju, M., Zobaidul, K., Irfan, A. B., Yunus Khan, T. M., & Esam, J. (2023). Solar Thermal Systems, and the Dawn of Energy. *Energies*, *16*(6456), 1–30.
- Impram, S., Varbak Nese, S., & Oral, B. (2020). Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey. *Energy Strategy Reviews*, *31*(April), 100539. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100539>
- Jalomo-Cuevas, J., Colmenero Fonseca, F., Cárcel-Carrasco, J., Pérez, S. S., & Gudiño-Ochoa, A. (2023). Impact of Solar Radiation on Luminaires and Energy Efficiency in Isolated Residential Photovoltaic Systems. *Buildings*, *13*(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/buildings13102655>
- León Gómez, J. C., De León Aldaco, S. E., & Aguayo Alquicira, J. (2023). A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques. *Eng*, *4*(2), 1446–1467. <https://doi.org/10.3390/eng4020084>
- Outman, A., Deracinois, B., Flahaut, C., Diab, M. A., Dhaouefi, J., Outman, A., Deracinois, B., Flahaut, C., & Diab, M. A. (2023). *Optimizing a Green and Sustainable Off-grid Energy System Design Enhancing with a Real Case*. <https://doi.org/10.20944/preprints202307>
- Patil, S. S., & Zende, R. M. (2017). Solar powered water pumping system. *Proceedings of 2017 3rd IEEE International Conference on Sensing, Signal Processing and Security, ICSSS 2017, January 2005*, 186–190. <https://doi.org/10.1109/SSPS.2017.8071589>
- Wu, X., Tang, Z., Stroe, D. I., & Kerekes, T. (2022). Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage. *Batteries*, *8*(12). <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>
- Zubi, G., Adhikari, R. S., Sánchez, N. E., & Acuña-Bravo, W. (2020). Lithium-ion battery-packs for solar home

systems: Layout, cost and implementation perspectives. *Journal of Energy Storage*, 32.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101985>