

PENGARUH KONDISI LINGKUNGAN TERHADAP KINERJA STABILITAS DAYA MIKROGRID BERBASIS KONTROL TERDESENTRALISASI

Adhi Kusmantoro*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia

*Penulis korespondensi: adhikusmantoro@upgris.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi listrik di perumahan disebabkan oleh peningkatan jumlah perumahan di daerah pedesaan. Saat ini, distribusi energi listrik belum menjangkau daerah pedesaan, terutama di daerah terpencil. Mikrogrid merupakan solusi dalam menyediakan layanan energi listrik untuk perumahan. Mikrogrid mengintegrasikan beberapa sumber energi dan penyimpanan energi untuk memasok beban perumahan. Perubahan intensitas iradiasi matahari dan temperatur lingkungan secara langsung memengaruhi daya keluaran sistem photovoltaik (PV), sehingga berpotensi menyebabkan fluktuasi tegangan, frekuensi, serta ketidakseimbangan daya pada mikrogrid. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan kondisi lingkungan terhadap stabilitas daya mikrogrid berbasis kontrol terdesentralisasi pada kawasan perumahan. Metode yang digunakan adalah merancang pengontrol terdesentralisasi dari beberapa susunan PV dan baterai dalam mendistribusikan daya ke beban perumahan. Parameter yang diamati meliputi daya keluaran PV, tegangan sistem, frekuensi, daya aktif, daya reaktif, serta *State of Charge* (SOC) baterai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan iradiasi dari kondisi cerah menuju kondisi mendung menyebabkan penurunan daya keluaran PV yang berdampak pada meningkatnya perubahan tegangan dan frekuensi sistem. Kenaikan suhu lingkungan mengakibatkan penurunan efisiensi modul PV sehingga memperbesar fluktuasi daya yang dihasilkan. Kontrol terdesentralisasi mampu mempertahankan kestabilan tegangan dan frekuensi dalam batas operasi, sehingga dampak perubahan lingkungan dapat berkurang serta mampu meningkatkan respons sistem mikrogrid terhadap fluktuasi beban dan produksi energi.

Kata kunci: Mikrogrid, Kontrol Terdesentralisasi, Suhu Lingkungan, Emisi Karbon

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi, perkembangan kawasan perumahan, serta peningkatan penggunaan peralatan listrik mendorong perlunya pengembangan sistem kelistrikan yang lebih andal, efisien, dan berkelanjutan. Di sisi lain, ketergantungan yang tinggi terhadap pembangkit listrik berbahan bakar fosil menimbulkan berbagai permasalahan, seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca, penurunan kualitas lingkungan, dan keterbatasan cadangan energi konvensional (International Energy Agency, 2024). Oleh karena itu, pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi salah satu solusi strategis untuk mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (International Renewable Energy Agency, 2024).

Salah satu bentuk implementasi energi terbarukan yang berkembang pesat adalah penggunaan photovoltaik (PV) dalam sistem mikrogrid. Mikrogrid merupakan sistem tenaga listrik skala kecil yang mengintegrasikan berbagai sumber energi terdistribusi (*Distributed Energy Resources*), sistem penyimpanan energi, dan beban lokal yang dapat beroperasi secara terhubung

dengan jaringan utama maupun secara mandiri (*islanded mode*) (Issa et al., 2024). Konsep mikrogrid dinilai mampu meningkatkan keandalan sistem kelistrikan, mengurangi rugi-rugi distribusi, serta mendukung penetrasi energi terbarukan dalam skala yang lebih luas (Chai et al., 2024). Pada kawasan perumahan, mikrogrid berbasis PV menjadi alternatif yang menarik karena mampu memanfaatkan potensi energi surya yang melimpah sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional (Alsharif et al., 2022). Meskipun memiliki berbagai keunggulan, integrasi PV dalam sistem mikrogrid menghadapi tantangan yang cukup besar akibat karakteristik sumber energi surya yang bersifat intermiten dan bergantung pada kondisi lingkungan (Abdulla et al., 2024). Perubahan iradiasi matahari yang disebabkan oleh perubahan cuaca, munculnya awan, serta perubahan posisi matahari dapat menyebabkan fluktuasi daya keluaran PV secara signifikan (Kumar et al., 2024). Selain itu, suhu lingkungan dan suhu operasi modul photovoltaik juga memengaruhi efisiensi konversi energi sehingga berdampak pada besarnya daya listrik yang dihasilkan (Shaker et al., 2024). Kondisi tersebut dapat menimbulkan ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban yang berujung pada gangguan stabilitas sistem mikrogrid (Ugwuagbo et al., 2025).

Stabilitas daya merupakan salah satu aspek penting dalam operasi mikrogrid karena berkaitan langsung dengan kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan dan frekuensi pada nilai nominal selama terjadi gangguan atau perubahan kondisi operasi (Shahgholian et al., 2025). Pada sistem mikrogrid berbasis energi terbarukan, fluktuasi daya keluaran PV sebagai akibat perubahan kondisi lingkungan dapat menyebabkan perubahan tegangan dan frekuensi yang berpotensi menurunkan kualitas daya serta mengganggu kinerja peralatan listrik (Kusmantoro et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan suatu strategi pengendalian yang mampu menjaga keseimbangan daya secara cepat dan efektif agar stabilitas sistem tetap terjaga (Ali et al., 2021). Berbagai metode pengendalian telah dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas mikrogrid, mulai dari pengendalian terpusat (*centralized control*), pengendalian hierarkis (*hierarchical control*), hingga pengendalian terdesentralisasi (*decentralized control*) (Salehi et al., 2022). Sistem pengendalian terpusat memiliki kemampuan koordinasi yang baik, namun membutuhkan infrastruktur komunikasi yang kompleks dan rentan terhadap kegagalan pada pusat kendali (Alnaser et al., 2024). Sebaliknya, kontrol terdesentralisasi memungkinkan setiap unit sumber energi terdistribusi melakukan pengambilan keputusan secara mandiri berdasarkan kondisi lokal yang terukur tanpa bergantung pada pengendali pusat (Ahmad et al., 2025). Pendekatan ini menawarkan keunggulan berupa fleksibilitas yang tinggi, waktu respons yang lebih cepat, serta peningkatan keandalan sistem dalam menghadapi gangguan dan perubahan kondisi operasi (Khosravi et al., 2025). Dalam mikrogrid berbasis PV, kontrol terdesentralisasi berperan penting dalam mengelola fluktuasi daya akibat perubahan iradiasi dan suhu lingkungan. Ketika daya keluaran PV menurun akibat berkurangnya iradiasi atau meningkatnya suhu, sistem penyimpanan energi dapat secara otomatis menyuplai kekurangan daya untuk menjaga keseimbangan energi sistem (Bevrani et al., 2017). Sebaliknya, ketika daya keluaran PV meningkat dan melebihi kebutuhan beban, kelebihan energi dapat disimpan dalam baterai untuk digunakan pada periode berikutnya (Satapathy et al., 2024). Dengan demikian, kontrol terdesentralisasi mampu meningkatkan kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan lingkungan yang dinamis. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja sistem fotovoltaik dan stabilitas mikrogrid. Penelitian yang dilakukan oleh (Akram et al., 2019) menunjukkan bahwa perubahan iradiasi merupakan faktor dominan yang mempengaruhi daya keluaran PV dan kualitas daya sistem. Penelitian lain oleh (Singh et al., 2024) menjelaskan bahwa integrasi sistem penyimpanan energi dan strategi pengendalian yang tepat dapat meningkatkan

kemampuan mikrogrid dalam mempertahankan stabilitas tegangan dan frekuensi selama terjadi fluktuasi pembangkitan energi terbarukan. Namun demikian, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh kondisi lingkungan terhadap stabilitas daya mikrogrid berbasis kontrol terdesentralisasi pada kawasan perumahan masih relatif terbatas, terutama dengan mempertimbangkan hubungan antara irradiansi, temperatur, daya keluaran PV, tegangan, frekuensi, dan respons sistem kendali dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi.

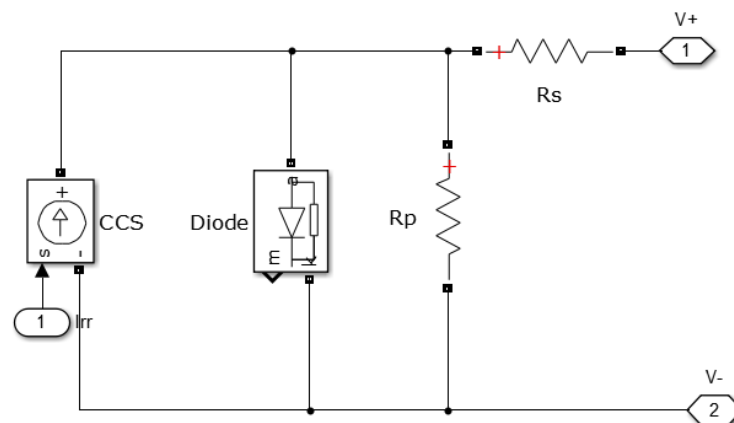
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja stabilitas daya mikrogrid berbasis kontrol terdesentralisasi pada kawasan perumahan dengan simulasi Matlab. Analisis berfokus pada hubungan antara iradiasi dan suhu terhadap daya keluaran PV, dampaknya terhadap tegangan dan frekuensi mikrogrid, serta kemampuan kontrol terdesentralisasi dalam mempertahankan keseimbangan daya sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem mikrogrid yang lebih andal, adaptif, dan efisien dalam mendukung pemanfaatan energi terbarukan pada sektor perumahan.

2 METODE

Penelitian ini menggunakan metode simulasi dan pemodelan sistem mikrogrid untuk menganalisis pengaruh kondisi lingkungan terhadap stabilitas daya mikrogrid berbasis kontrol terdesentralisasi pada kawasan perumahan. Penelitian dilakukan dengan menguji berbagai kondisi lingkungan yang mempengaruhi pembangkitan energi terbarukan, dan mengevaluasi respons sistem mikrogrid terhadap perubahan tersebut. Langkah rancangan simulasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

2.1 Pemodelan Photovoltaik (PV)

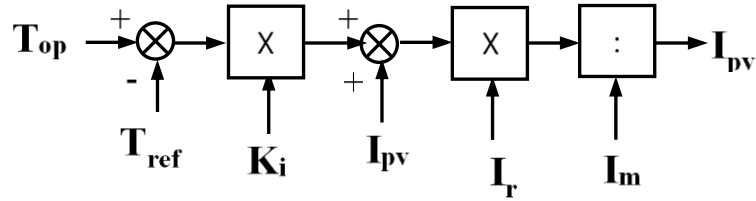
Salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah di Indonesia adalah energi surya. Energi ini diperoleh secara gratis, karena Indonesia terletak di garis khatulistiwa. Untuk memanfaatkan sumber energi surya ini, digunakan photovoltaik. Photovoltaik (PV) berfungsi untuk mengubah intensitas iradiasi matahari menjadi tegangan dan arus searah. Oleh karena itu, PV dapat dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada model ini, PV dimodelkan dengan dioda penyearah yang dilengkapi dengan sumber DC. Selain itu, pada model ini, PV memiliki resistor yang dihubungkan secara paralel dan seri.



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen PV.

Berdasarkan gambar di atas, maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

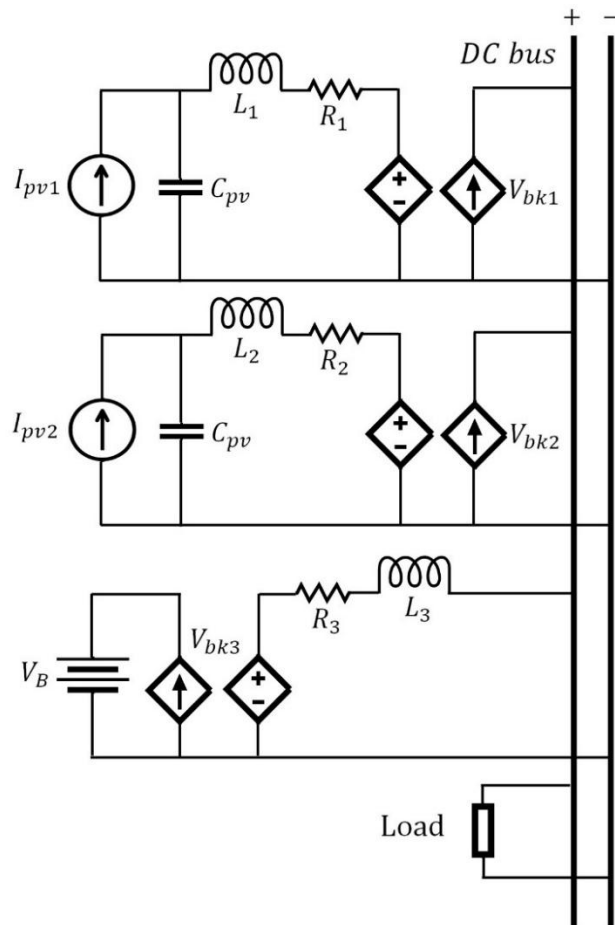
$$I_D = N_p \times I_0 \left\{ e^{\left(\frac{V/N_s + IR_s/N_p}{nV_t} \right)} - 1 \right\} \quad (1)$$



Gambar 2. PV Model rangkaian arus PV.

Gambar 2 memperlihatkan model arus yang mengalir di PV. Oleh karena itu, persamaan arus PV dapat diturunkan dengan mempertimbangkan V_t . Berdasarkan persamaan pertama, arus paralel dapat diterjemahkan ke dalam persamaan berikut.

$$I_{sh} = \frac{(V \times \frac{N_p}{N_s}) + (R_s \times I)}{R_{sh}} \quad (2)$$



Gambar 3. Sistem mikrogrid dengan PV-Baterai.

Untuk menentukan arus keluaran modul PV berdasarkan persamaan sebelumnya, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I = (I_{pv} \times N_p) - I_{sh} - I_D \quad (3)$$

Modul PV yang digunakan memiliki tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) = 21.6 V, jumlah sel seri (N_s) = 36, jumlah sel paralel (N_p) = 1, tegangan maksimum (V_{mp}) = 18 V, daya (P_{mp}) = 60 W. Selain itu, baterai yang digunakan adalah baterai Lithium-Ion dengan tegangan nominal 12 V, kapasitas terukur 65 Ah, dan SOC awal 40%. Sedangkan Gambar 3 memperlihatkan model PV dalam sistem mikrogrid. Daya keluaran mikrogrid dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{pv} = A \times G \times \eta \quad (4)$$

P_{PV} = daya keluaran mikrogrid (W)
A = luas panel surya (m^2)
G = iradiasi matahari (W/m^2)
 η = efisiensi panel surya

Variabel lingkungan yang digunakan mencakup intensitas iradiasi matahari, suhu lingkungan, dan kondisi cuaca.

2.2 Baterai

Karena sumber energi terbarukan bersifat intermiten dan permintaan beban berubah, sistem penyimpanan energi (baterai) sangat penting untuk mengatasi kesenjangan antara pembangkitan dan konsumsi. Status pengisian daya dan tegangan terminal adalah dua parameter penting untuk menggambarkan SOC.

$$V_b = V_o - R_i I_b - U \quad (5)$$

$$U = \frac{KQ}{Q + \int I_b dt} + A_b \exp(B_b \int I_b dt) \quad (6)$$

R_i mewakili hambatan internal, tegangan rangkaian terbuka dinyatakan dengan V_o , arus pengisian baterai dinyatakan dengan I_b , tegangan polarisasi dinyatakan dengan K_b , kapasitas baterai adalah Q, tegangan eksponensial dinyatakan dengan A_b , dan kapasitas eksponensial dinyatakan dengan B_b . Proses pengisian dan pengosongan dilakukan oleh DC-DC konverter dua arah. Unit baterai digunakan untuk menyimpan energi dan menyeimbangkan daya saat terjadi fluktuasi pembangkitan PLTS. Perubahan *State of Charge* (SOC) dihitung berdasarkan energi yang masuk dan keluar dari baterai. Parameter yang diamati sebagai berikut:

- SOC (%)
- Tegangan baterai
- Arus pengisian dan pengosongan

2.3 Pemodelan Beban Perumahan

Beban perumahan dimodelkan berdasarkan profil konsumsi energi rumah tangga yang bervariasi sepanjang hari. Kategori beban dinyatakan sebagai berikut:

- Beban ringan
- Beban sedang
- Beban puncak

2.4 Perancangan Kontrol Terkoordinasi

Kontrol terdesentralisasi diterapkan pada setiap *Distributed Energy Resource* (DER) sehingga masing-masing unit mampu melakukan pengaturan secara mandiri tanpa pengendali pusat. Fungsi utama kontrol dalam penelitian ini sebagai berikut.

- Pengaturan frekuensi
- Pengaturan tegangan
- Pembagian daya aktif
- Pembagian daya reaktif

Sedangkan struktur kontrol terdiri atas:

- Pengukuran parameter sistem.
- Pengolahan sinyal kontrol.
- Pengiriman sinyal kendali ke inverter.
- Koreksi gangguan secara lokal.

2.5 Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis dengan metode statistik deskriptif dan komparatif, dengan analisis sebagai berikut

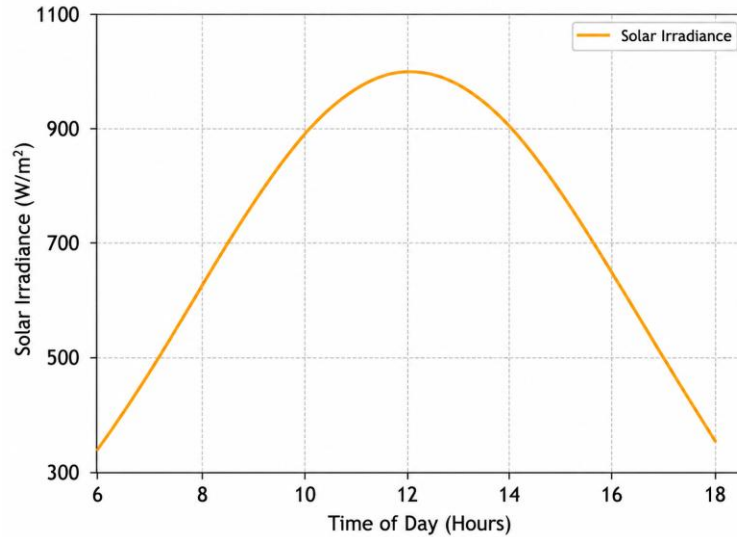
- Hubungan kondisi lingkungan dengan daya keluaran PV.
- Pengaruh kondisi lingkungan terhadap tegangan sistem.
- Pengaruh kondisi lingkungan terhadap frekuensi sistem.
- Respons kontrol terdesentralisasi terhadap perubahan lingkungan.
- Kemampuan sistem mempertahankan stabilitas daya.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan daya keluaran pembangkit akibat suhu yang tinggi dapat mempengaruhi operasi mikrogrid secara keseluruhan. Ketika daya yang dihasilkan pembangkit berkurang, sistem harus memperoleh suplai tambahan dari baterai atau sumber *Distributed Energy Resource* (DER) lainnya untuk menjaga keseimbangan daya.

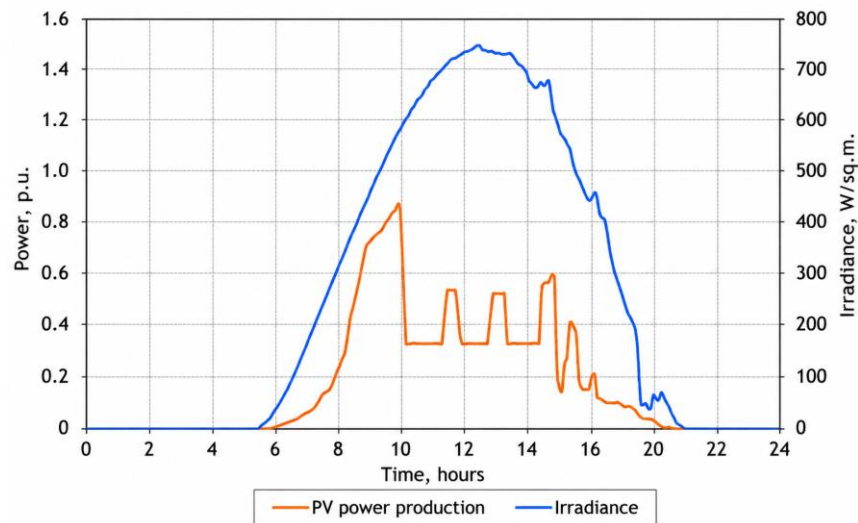
3.1 Profil Iradiasi dan Suhu (Temperatur) Lingkungan

Gambar 4 memperlihatkan perubahan iradiasi matahari dan temperatur. Terlihat bahwa iradiasi mulai meningkat pada pagi hari, mencapai nilai maksimum sekitar jam 12.00, kemudian menurun secara bertahap menjelang sore hari. Pola ini sejalan dengan pergerakan posisi matahari yang mempengaruhi jumlah energi surya yang diterima oleh photovoltaik. Selain itu, temperatur lingkungan cenderung meningkat setelah terjadinya kenaikan iradiasi dan mencapai puncaknya pada siang hingga sore hari. Kenaikan temperatur ini dapat mempengaruhi kinerja PV karena efisiensi konversi energi PV umumnya menurun pada suhu yang lebih tinggi. Oleh karena itu, kedua parameter lingkungan tersebut menjadi faktor utama yang menentukan besarnya daya keluaran PV pada sistem mikrogrid.



Gambar 4. Profil iradiasi dengan suhu lingkungan.

3.2 Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Daya Keluaran Pembangkit



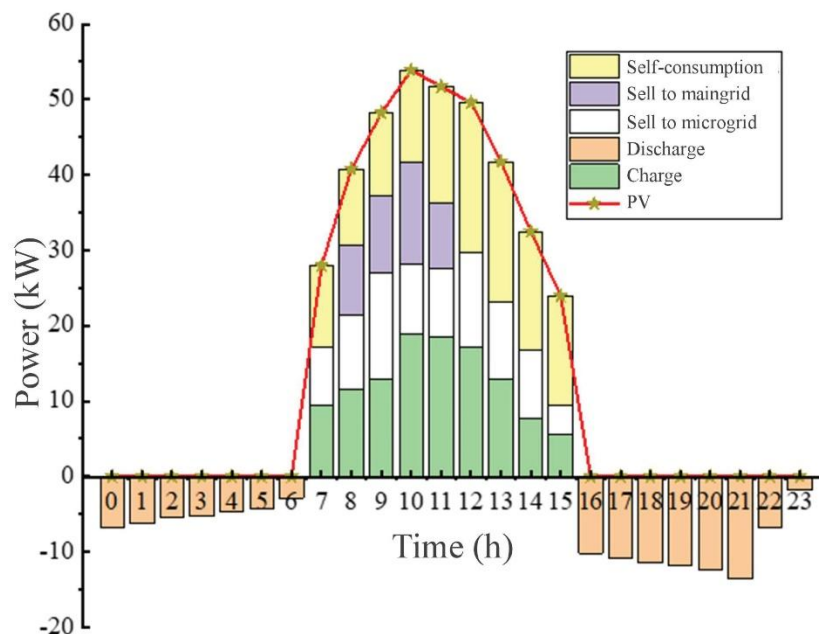
Gambar 5. Kondisi lingkungan terhadap daya keluaran pembangkit.

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara kondisi lingkungan berupa iradiasi matahari dan suhu terhadap daya keluaran PV. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa peningkatan iradiasi menyebabkan daya keluaran PV meningkat secara signifikan. Kondisi ini terjadi karena jumlah energi matahari yang diterima modul surya bertambah sehingga proses konversi energi listrik menjadi lebih besar. Sebaliknya, peningkatan suhu lingkungan menyebabkan penurunan daya keluaran PV meskipun iradiasi berada pada tingkat yang sama. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya suhu sel surya yang mengakibatkan penurunan tegangan keluaran modul dan efisiensi konversi energi. Dengan demikian, iradiasi memiliki pengaruh positif terhadap daya keluaran PV, sedangkan suhu memiliki pengaruh negatif terhadap kinerja pembangkitan. Hasil ini

menunjukkan bahwa kondisi lingkungan merupakan faktor penting yang menentukan kemampuan PV dalam menyuplai kebutuhan daya pada sistem mikrogrid perumahan.

3.3 Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Tegangan Mikrogrid

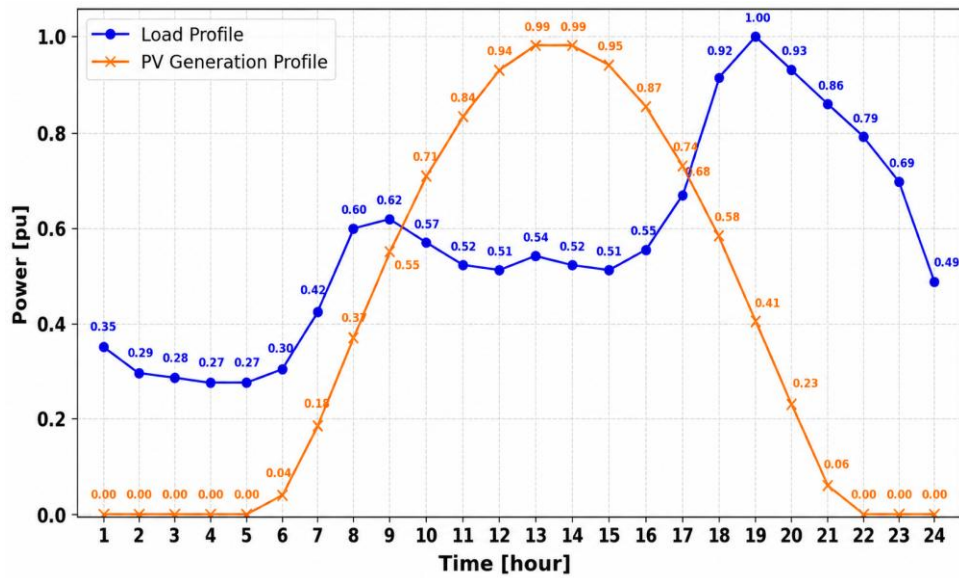
Gambar 6 memperlihatkan perubahan profil tegangan mikrogrid akibat perubahan kondisi lingkungan yang memengaruhi daya keluaran PV. Pada saat iradiasi tinggi, daya yang dihasilkan PV meningkat sehingga tegangan sistem berada pada kondisi yang lebih stabil dan mendekati nilai nominal. Sebaliknya, ketika iradiasi menurun akibat kondisi berawan atau mendung, daya keluaran PV berkurang sehingga terjadi kecenderungan penurunan tegangan pada sistem mikrogrid. Penurunan tegangan ini menjadi lebih signifikan apabila beban mengalami peningkatan secara bersamaan. Kontrol terdesentralisasi mampu menjaga tegangan sistem tetap berada dalam batas standar operasi yang diizinkan. Setiap *Distributed Energy Resource* (DER) melakukan penyesuaian daya secara mandiri sehingga fluktuasi tegangan akibat perubahan kondisi lingkungan dapat diminimalkan.



Gambar 6. Pengaruh kondisi lingkungan terhadap tegangan mikrogrid.

3.4 Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Frekuensi Mikrogrid

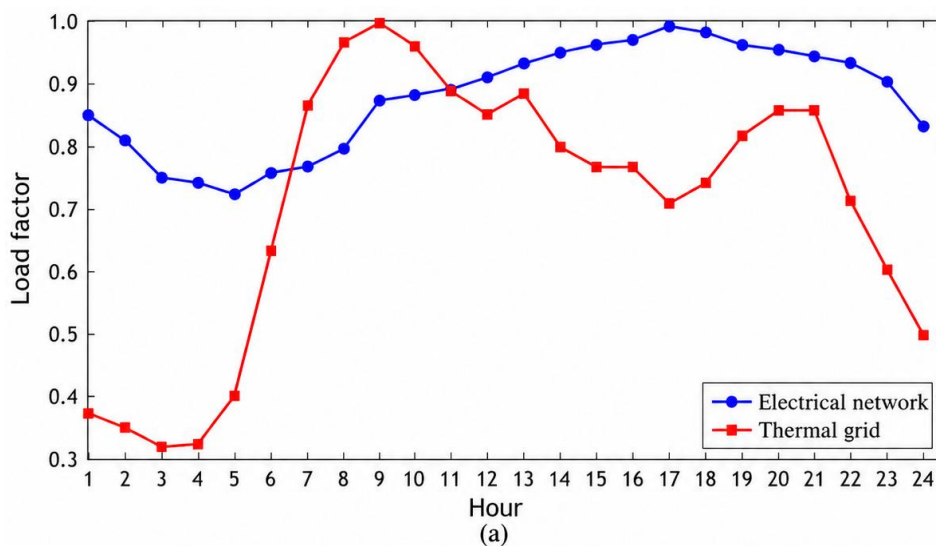
Gambar 7 memperlihatkan respons frekuensi sistem mikrogrid terhadap perubahan kondisi lingkungan. Penurunan iradiasi menyebabkan berkurangnya daya aktif yang dihasilkan PV sehingga keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban terganggu. Kondisi tersebut memicu terjadinya perubahan frekuensi dari nilai nominal 50 Hz. Pada saat terjadi perubahan lingkungan secara mendadak, frekuensi sistem mengalami penyimpangan sementara sebelum kembali menuju kondisi stabil. Besarnya perubahan frekuensi bergantung pada tingkat perubahan daya pembangkitan serta kemampuan sistem kendali dalam melakukan kompensasi daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol terdesentralisasi mampu meredam fluktuasi frekuensi dengan cepat melalui koordinasi antar sumber energi dan sistem penyimpanan baterai. Dengan demikian, frekuensi sistem tetap berada dalam rentang operasi yang diperbolehkan meskipun terjadi perubahan kondisi lingkungan yang signifikan.

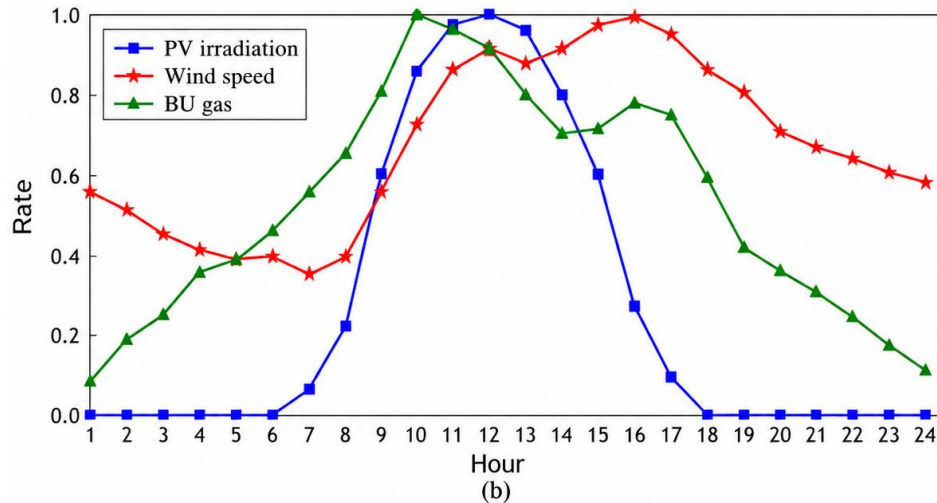


Gambar 7. Pengaruh kondisi lingkungan terhadap frekuensi mikrogrid.

3.5 Respon Kontrol Terdesentralisasi terhadap Perubahan Lingkungan

Gambar 8 memperlihatkan kemampuan kontrol terdesentralisasi dalam merespons perubahan kondisi lingkungan yang memengaruhi pembangkitan energi surya. Ketika iradiasi menurun dan daya keluaran PV berkurang, sistem kontrol secara otomatis mengatur kontribusi daya dari baterai untuk menjaga keseimbangan energi pada mikrogrid. Ketika iradiasi meningkat dan daya PV melebihi kebutuhan beban, energi ini digunakan untuk mengisi baterai atau disalurkan ke beban lain sesuai strategi pengelolaan energi yang diterapkan. Mekanisme ini memungkinkan sistem tetap beroperasi secara stabil tanpa memerlukan pengendali pusat.





Gambar 8. Respons kontrol terdesentralisasi terhadap perubahan lingkungan.

Pada penelitian ini, kontrol terdesentralisasi berperan dalam mengurangi dampak negatif kenaikan temperatur terhadap stabilitas daya mikrogrid. Ketika daya keluaran PV menurun akibat temperatur yang tinggi, masing-masing unit sumber energi secara mandiri melakukan penyesuaian daya sesuai kondisi lokal yang terukur. Dengan demikian, meskipun temperatur lingkungan meningkat dan menyebabkan penurunan kinerja PV, sistem mikrogrid tetap mampu mempertahankan stabilitas operasinya melalui koordinasi kontrol terdesentralisasi.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan berupa iradiasi matahari dan temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya keluaran PV serta stabilitas daya mikrogrid pada kawasan perumahan. Peningkatan iradiasi mampu meningkatkan daya pembangkitan PV, sedangkan kenaikan temperatur menyebabkan penurunan efisiensi modul surya yang berdampak pada berkurangnya daya keluaran. Fluktuasi daya akibat perubahan kondisi lingkungan tersebut memengaruhi keseimbangan daya, tegangan, dan frekuensi sistem mikrogrid. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan kontrol terdesentralisasi mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara adaptif melalui koordinasi antar sumber energi dan baterai penyimpanan, sehingga kestabilan sistem tetap terjaga meskipun terjadi variasi pembangkitan energi surya. Kontrol terdesentralisasi juga terbukti efektif dalam mengurangi deviasi daya, mempertahankan tegangan dan frekuensi pada batas operasi yang diizinkan, serta meningkatkan keandalan sistem mikrogrid berbasis energi terbarukan. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sistem dapat diperluas dengan menggunakan data lingkungan aktual dari lapangan, mengintegrasikan sumber energi terbarukan lain seperti turbin angin atau mikrohidro, serta menerapkan metode kendali cerdas seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Artificial Neural Network* (ANN), atau *Active Disturbance Rejection Control* (ADRC) guna meningkatkan kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan lingkungan. Selain itu, implementasi pada prototipe atau sistem mikrogrid nyata perlu dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi dan mengevaluasi kinerja kontrol terdesentralisasi dalam kondisi operasi yang sesungguhnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas dukungan dan kesempatan dalam melakukan penelitian dan publikasi artikel dalam pengembangan energi terbarukan, khususnya dalam sistem mikrogrid.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>.
- Ahmad, G., Hassan, A., Islam, A., Shafiullah, M., Abido, M. A., & AlDhaifallah, M. (2025). Distributed control strategies for microgrids: A critical review of technologies and challenges. *IEEE Access*, 13, 60702–60719. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3552940>.
- Ali, S., Zheng, H., Arefi, A., & Abusorrah, A. (2021). A review of decentralized and hierarchical control strategies for islanded microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110912>.
- Alnaser, M., Alzahrani, A., Alotaibi, M., Alrashed, M., & Guerrero, J. M. (2024). Networked microgrids: A review on configuration, operation, and control strategies. *Energies*, 17(3), 715. <https://doi.org/10.3390/en17030715>.
- Alsharif, A. H., Alam, M. S., & Vasquez, J. C. (2022). Analysis of energy management schemes for renewable-energy-based smart homes against the backdrop of COVID-19. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, Article 102136. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102136>.
- Akram, U., Shah, R., & Mithulananthan, N. (2019). Hybrid energy storage system for frequency regulation in microgrids with source and load uncertainties. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(22), 5048–5057. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.7064>.
- Chowdary, A., & Rao, S. S. (2022). Grid-connected photovoltaic-based microgrid as charging infrastructure for meeting electric vehicle load. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 961734. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.961734>.
- International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*. International Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable capacity statistics 2024*. International Renewable Energy Agency.
- Issa, W., Sharkh, S. M., & Abusara, M. A. (2024). A review of recent control techniques of drooped inverter-based AC microgrids. *Energy Science & Engineering*, 12(4), 1792–1814. <https://doi.org/10.1002/ese3.1670>.
- Khosravi, N., Çelik, D., Bevrani, H., & Echalih, S. (2025). Microgrid stability: A comprehensive review of challenges, trends, and emerging solutions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 170, Article 110829. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110829>.
- Kumar, A., Dubey, A. K., Ramírez, I. S., del Río, A. M., & García Márquez, F. P. (2024). *Artificial intelligence techniques for the photovoltaic system: A systematic review and analysis for evaluation and benchmarking*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31, 4429–4453. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10125-3>.
- Kusmantoro, A., Priyadi, A., Budiharto Putri, V. L., & Purnomo, M. H. (2021). Coordinated control of battery energy storage system based on fuzzy logic for microgrid with modified AC coupling configuration. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(2), 495–510. <https://doi.org/10.22266/ijies2021.0430.45>.

- Salehi, N., Martinez-Garcia, H., Velasco-Quesada, G., & Guerrero, J. M. (2022). A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids. *IEEE Access*, 10, 21420–21449. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>.
- Shahgholian, G., Moradian, M., & Fathollahi, A. (2025). Droop control strategy in inverter-based microgrids: A brief review on analysis and application in islanded mode of operation. *IET Renewable Power Generation*, 19(1), e13186. <https://doi.org/10.1049/rpg2.13186>.
- Shaker, L. M., Al-Amiery, A. A., Hanoon, M. M., Al-Azzawi, W., Kadhum, A. A. H., & Salman, A. D. (2024). Examining the influence of thermal effects on solar cells: A comprehensive review. *Sustainable Energy Research*, 11, Article 6. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00100-8>.
- Singh, J., Singh, S. P., Verma, K. S., Iqbal, A., & Kumar, B. (2021). Recent control techniques and management of AC microgrids: A critical review on issues, strategies, and future trends. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11), e13035. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13035>.
- Ugwuagbo, E., Ray, B., Sul, J., Nabi, N., Datta, U., & Emami, K. (2025). Optimal allocation of grid-connected converter-based energy resources for securing power system stability: A comprehensive review. *Electric Power Systems Research*, 248, Article 111978. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111978>.