

# Strategi Peningkatan Kinerja *DC Microgrid* dengan Konfigurasi *DC/AC Coupling*

Adhi Kusmanto<sup>1</sup>, Ardyono Priyadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang, Semarang, 50232 INDONESIA (tel.: 024-831 6377; fax: 024-8448217, email: adhikusmanto@upgris.ac.id)

<sup>2</sup> Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60117 INDONESIA (Tel.: 031-5947274; fax: 031-5923465; email: <sup>2</sup>priyadi@ee.its.ac.id)

[Diterima: 11 April 2023, Revisi: 26 Juni 2023]

Corresponding Author: Adhi Kusmanto

**INTISARI** — *DC microgrid* menjadi solusi yang baik untuk meningkatkan permintaan beban listrik dan merupakan cara yang efektif untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan ke dalam sistem pembangkit terdistribusi. Energi matahari mempunyai sifat terputus-putus ketika digunakan dalam *DC microgrid*. Dalam penelitian sebelumnya, untuk mengatasi fluktuasi daya keluaran *photovoltaic (PV) array*, baterai digunakan sebagai cadangan energi. Namun, penggunaan banyak baterai membutuhkan biaya yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi fluktuasi daya pada *DC bus* ketika sumber *DC microgrid* dari *PV array* dan baterai terputus. Penelitian dilakukan menggunakan simulasi MATLAB, dengan merancang konfigurasi campuran (*hybrid DC/AC coupling*). Pada konfigurasi ini, digunakan dua *PV array* sebagai sumber, dua multibaterai, dan jaringan utilitas. Pengaturan *DC microgrid* dilakukan secara terpisah oleh masing-masing konverter dengan mengirim sinyal referensi ke kontrol konverter. Pada kondisi pertama, beban DC dan beban AC disuplai dari *PV array*, pada kondisi kedua, beban disuplai dari baterai, sedangkan pada kondisi ketiga, beban disuplai dari jaringan utilitas. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ketika sumber *PV array* digunakan, tegangan *DC bus* tetap stabil 48 V, walaupun terjadi lonjakan pada pukul 08.00 dan pukul 15.00. Demikian juga ketika digunakan sumber baterai dan jaringan utilitas, tegangan *DC bus* dipertahankan pada level 48 V. Dalam penelitian ini, dengan tiga kondisi atau mode, *DC microgrid* mampu menyuplai beban tanpa terputus. Oleh karena itu, konfigurasi campuran *DC microgrid* mampu menyediakan daya listrik secara terus menerus.

**KATA KUNCI** — *Microgrid*, Baterai, PV, Konverter, MPPT.

## I. PENDAHULUAN

Meningkatnya jumlah penduduk dan perkembangan teknologi menyebabkan kebutuhan sumber listrik meningkat secara signifikan, sedangkan pembangkit listrik besar menggunakan bahan bakar fosil yang makin lama makin menipis. Indonesia merupakan negara yang mempunyai sumber energi terbarukan melimpah, khususnya potensi energi matahari sebagai sumber *microgrid*. *DC microgrid* mempunyai banyak kelebihan dibandingkan dengan *AC microgrid*, sehingga banyak mendapat perhatian untuk dikembangkan [1].

*Microgrid* beroperasi dengan mengintegrasikan banyak sumber energi baru terbarukan, contohnya energi surya, angin, dan biodiesel. Integrasi sumber energi terbarukan dalam *microgrid* ini akan terus meningkat setiap tahunnya, sehingga memengaruhi ketersediaan sumber listrik. Di masa mendatang, seluruh sumber listrik diperoleh dari energi terbarukan [2], [3]. *DC microgrid* dapat beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan utilitas. Metode ini banyak digunakan untuk daerah yang tidak terjangkau jaringan utilitas. Akan tetapi, diperlukan strategi kontrol optimal pada konverter DC-DC untuk meningkatkan kinerja *DC microgrid*. Hal ini disebabkan oleh banyaknya konverter dalam *DC microgrid* yang terhubung secara paralel untuk menyuplai beban [4].

Walaupun tersedia banyak energi terbarukan, energi matahari dan energi angin adalah energi yang sering digunakan sebagai sumber *microgrid*. Namun, energi tersebut mempunyai sifat intermiten, sehingga diperlukan sistem penyimpanan energi yang sesuai kapasitas beban [5]. Dalam pemanfaatan energi matahari sebagai sumber listrik, digunakan *photovoltaic (PV)*. Ada banyak faktor yang berpengaruh terhadap penggunaan PV agar diperoleh daya keluaran maksimum, di antaranya posisi PV terhadap matahari dan suhu lingkungan. Salah satu metode untuk meningkatkan keluaran PV adalah mengatur posisi PV

secara tepat terhadap matahari menggunakan *solar tracker*. Dengan *solar tracker*, posisi PV dapat disesuaikan terhadap matahari, sehingga intensitas iradiasi matahari akan mencapai titik geometris [6], [7]. *Solar tracker* akan mengatur pelacakan pada titik daya maksimum, sesuai dengan kurva PV yang digunakan. Dengan metode ini, efisiensi PV akan meningkat. Kelemahan metode ini terletak pada kualitas dan kemampuan sensor dalam mendeteksi matahari secara akurat serta ketersediaan energi pada motor penggerak PV. Metode ini juga hanya sesuai digunakan ketika cuaca cerah [8].

*DC microgrid* menggunakan konverter DC-DC untuk mengatur aliran energi dari sumber energi terbarukan ke beban dan penyimpan energi. Biasanya *DC microgrid* menggunakan konverter dengan masukan tunggal (*single input*). Untuk meningkatkan kinerja *DC microgrid*, dapat digunakan banyak masukan konverter dengan kontrol terpusat [9]. Ketika *microgrid* menggunakan PV tanpa penyimpan energi, walaupun digunakan *solar tracker* agar dihasilkan daya keluaran maksimum, suplai energi ke beban akan terputus. Oleh karena itu, sangat diperlukan penyimpan energi untuk suplai beban pada malam hari atau ketika PV tidak menghasilkan energi yang cukup. Baterai dapat digunakan untuk menyimpan energi PV. Baterai menggunakan konverter DC-DC *bidirectional* untuk proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). Kelemahan metode ini adalah dibutuhkannya baterai yang besar, yang harganya masih mahal [10]. Untuk meningkatkan efisiensi penyaluran daya ke beban, digunakan metode linierisasi pada konverter DC-DC. Pemodelan linierisasi dilakukan pada konverter yang terhubung dengan PV. Dengan metode ini, terjadi peningkatan daya keluaran ke beban. Metode ini digunakan pada *boost converter* [11]-[13].

Metode lainnya dilakukan dengan mendesain konverter DC-DC *interleaved* empat fase, dengan kombinasi konverter *single ended primary converter* (SEPIC)-Cuk. Desain konverter dilakukan untuk *single input multi-output* (SIMO). Dengan penggabungan konverter, diperoleh peningkatan tegangan yang sesuai ke *DC bus*. Metode konverter *interleaved* dapat meningkatkan kinerja *DC microgrid*, yaitu respons sistem menjadi lebih baik dan efisiensi meningkat. Kelemahan sistem yang digunakan adalah kerugian daya yang lebih besar karena lebih banyak menggunakan konverter [14], [15]. Untuk meningkatkan efisiensi konverter DC-DC, digunakan banyak masukan konverter Cuk dengan pengaturan *soft switching*. Metode ini meningkatkan stabilitas tegangan *DC bus*. Ketika salah satu tegangan keluaran energi terbarukan rendah, konverter akan menaikkan tegangan, sehingga tegangan keluarannya sama dengan tegangan keluaran sumber energi terbarukan lainnya. Metode konverter Cuk dengan *soft switching* menghasilkan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan konverter Cuk konvensional. Konverter ini mampu mengirim daya ke *DC bus* secara optimal. Namun, metode ini membutuhkan desain konverter dan pengaturan yang lebih kompleks [16]-[19].

Penelitian sebelumnya banyak yang berfokus pada desain konverter dan konfigurasi *DC microgrid* yang sudah banyak digunakan. Dalam makalah ini, dirancang *DC microgrid* dengan konfigurasi campuran (*hybrid*) *DC/AC coupling*. *DC microgrid* yang diusulkan terdiri atas dua *PV array* serta dua multibaterai yang dapat terhubung dan terputus dari jaringan utilitas. Pada desain ini, digunakan modul PV 100 Wp dan modul baterai 200 Ah. Skema yang diusulkan bertujuan untuk mengurangi fluktuasi daya pada *DC bus* ketika sumber *microgrid* dari *PV array* dan baterai terputus.

## II. PV ARRAY

Dalam studi ini, digunakan dua *PV array* dan masing-masing *PV array* tersusun atas modul PV serta terhubung secara seri dan paralel. Kapasitas masing-masing modul PV yang digunakan sebesar 100 Wp dan masing-masing *PV array* tersusun atas 14 modul PV. Sebuah modul PV terdiri atas sel PV yang dapat dimodelkan dengan sebuah diode yang terhubung paralel dengan sumber arus, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam model tersebut, digunakan dua diode yang dapat menunjukkan kinerja modul PV pada tingkat intensitas iradiasi yang rendah [20]-[22].

Dalam model PV ini terdapat resistansi *shunt* ( $R_{sh}$ ) yang dihubungkan secara paralel. Sebuah sel PV digambarkan sebagai sumber arus karena sel PV merupakan komponen tidak linier. Dalam model PV, nilai  $R_{sh}$  biasanya sangat besar dan nilai resistansi seri ( $R_s$ ) sangat kecil untuk mengurangi turunnya tegangan keluaran [23], [24]. Arus yang mengalir melalui  $R_{sh}$  dapat dinyatakan menggunakan (1).

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

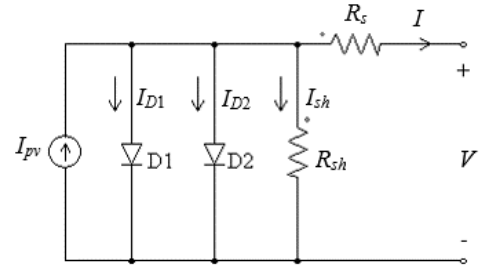
sedangkan persamaan arus diode pada model PV dinyatakan dalam (2).

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V + I R_s}{n N_s V_t} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$

Dengan menggunakan persamaan Kirchoff arus, persamaan arus keluaran model PV dinyatakan sebagai berikut [25], [26].

$$I = I_{pv} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (3)$$

$$I = I_{pv} - I_{D1} - I_{D2} - \left\{ \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right\} \quad (4)$$



Gambar 1. Model PV dengan  $R_s$  dan  $R_{sh}$ .

## III. STRUKTUR DC MICROGRID

Skema peningkatan kinerja *DC microgrid* yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 2. *DC microgrid* yang diusulkan merupakan konfigurasi campuran antara *DC coupling* dan *AC coupling*. Dalam konfigurasi *DC coupling*, keluaran PV disimpan pada baterai, lalu baterai yang menyuplai ke beban. Sementara itu, pada konfigurasi *AC coupling*, keluaran PV terhubung ke beban. Jika terjadi kelebihan energi pada PV, energi disimpan pada baterai. Masing-masing konfigurasi mempunyai kelebihan dan kelemahan, sehingga untuk meningkatkan suplai daya ke beban digunakan konfigurasi campuran.

Konfigurasi *DC microgrid* yang diusulkan terdiri atas dua *PV array*, baterai, konverter DC-DC, konverter DC-AC, dan beban. *PV array* terhubung ke konverter DC-DC dengan algoritma *maximum power point tracking* (MPPT), yang berfungsi untuk mengekstraksi daya keluaran PV pada titik maksimum. Konverter DC-DC yang terhubung dengan baterai merupakan konverter *bidirectional*, yang berfungsi untuk proses pengisian dan pengosongan baterai. *DC microgrid* terhubung ke jaringan utilitas melalui konverter DC-AC. Pada saat sumber *microgrid* terputus akibat perubahan cuaca untuk waktu yang lama dan energi baterai habis, konverter DC-AC akan bekerja sebagai penyearah. Filter LC dihubungkan pada keluaran konverter DC-AC untuk mengurangi harmonik akibat proses *switching* pada konverter.

*DC microgrid* dalam konfigurasi baru beroperasi secara otonom dalam menyuplai daya ke beban. Metode yang diusulkan dapat memenuhi permintaan beban, tergantung pada cuaca atau potensi intensitas iradiasi matahari. Berdasarkan Gambar 2, hubungan arus sumber dan beban dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$i_{PVAA} + i_{PVAB} + i_{B1} + i_{B2} + i_{DCG} + i_{DCB} = 0 \quad (5)$$

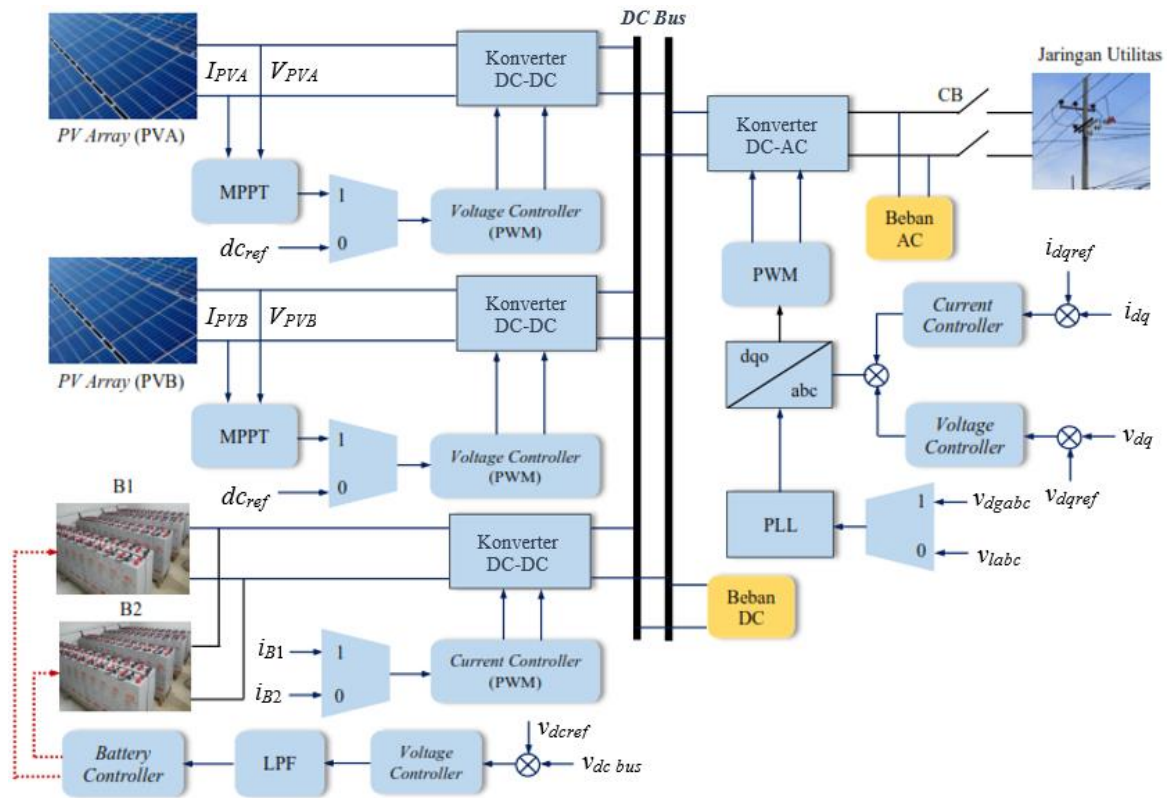
dengan  $i_{PVAA}$  adalah arus *PV array* A (PVAA),  $i_{PVAB}$  adalah arus *PV array* B (PVAB),  $i_{B1}$  adalah arus baterai 1,  $i_{B2}$  adalah arus baterai 2,  $i_{DCG}$  adalah arus DC pada sisi jaringan utilitas, dan  $i_{DCB}$  adalah arus beban DC. Daya keluarannya dinyatakan dengan (6).

$$P_{PVAA} + P_{PVAB} + P_{B1} + P_{B2} + P_{DCG} + P_{DCB} = 0 \quad (6)$$

dengan  $P_{PVAA}$  adalah daya *PV array* A,  $P_{PVAB}$  adalah daya *PV array* B,  $P_{B1}$  adalah daya baterai 1,  $P_{B2}$  adalah daya baterai 2,  $P_{DCG}$  adalah daya jaringan utilitas, dan  $P_{DCB}$  adalah daya beban. Tanda negatif dan positif dalam persamaan menyatakan proses pengambilan dari *microgrid* atau suplai ke dalam *microgrid*.

## IV. PENGATURAN DC MICROGRID

Skema pengaturan berperan penting dalam mengatur aliran energi pada *DC microgrid*. Hal ini dilakukan dengan mengatur semua sumber dan beban yang terhubung ke *DC bus*.



Gambar 2. Skema DC microgrid yang diusulkan.

TABEL I  
PARAMETER DC MICROGRID

Komponen	Parameter	Nilai
PV array A	Daya maksimum @ 1.000 W/m <sup>2</sup>	6 kWp
PV array B	Daya maksimum @ 1.000 W/m <sup>2</sup>	4 kWp
Baterai 1 dan 2	Kapasitas	@ 150 Ah
	Tegangan	@ 12 V
	Hubungan seri	8
	Hubungan parallel	8
DC bus	Tegangan	48 V
Jaringan utilitas	Kapasitas daya	8 kW
	Tegangan, frekuensi	220 V, 50 Hz
Beban	Beban DC	2 kW
	Beban AC	1 kW

Pengaturan DC microgrid dilakukan secara terpisah oleh masing-masing konverter dengan mengirim sinyal referensi ke kontrol konverter. PV beroperasi dengan mode MPPT dengan sinyal referensi tegangan DC bus untuk memberikan sinyal ke voltage controller (VC), lalu keluaran VC akan mengatur pembangkit pulse width modulation (PWM) ke konverter. Ketika cuaca mendung atau pada malam hari, kontrol PV akan berhenti bekerja dan PV tidak memberikan energi ke DC bus. Pada baterai dilakukan pengaturan secara bergantian antara baterai 1 dan baterai 2. Dalam pengaturan baterai ini, digunakan sensor tegangan untuk mengetahui stabilitas tegangan DC bus. Sensor ini memberikan sinyal ke battery controller (BC) melalui low pass filter (LPF) dalam mengatur kinerja baterai. BC akan mengatur pelepasan energi baterai dengan membandingkan tegangan baterai 1 dan baterai 2. Ketika tegangan baterai 1 lebih besar, baterai 1 akan bekerja. Sementara itu, current controller (CC) mengatur pembangkit PWM sebagai sinyal konverter. Konverter DC-AC bekerja secara bidirectional. Ketika sumber PV dan baterai mampu menyuplai beban, konverter DC-AC bekerja sebagai inverter dan langsung terhubung dengan beban AC. Pada keadaan ini,

TABEL II  
PARAMETER BEBAN DC

Tipe Beban	Rating Daya (W)	Kapasitas Beban (W)
12 lampu LED	18	216
4 LED outdoor	200	800
14 lampu CFL	30	420
2 TV 40"	97	194
2 kompor DC	185	370

TABEL III  
PARAMETER BEBAN AC

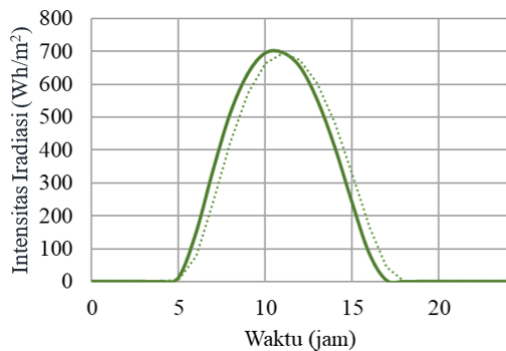
Tipe Beban	Rating Daya (W)	Kapasitas Beban (W)
1 pompa air	300	300
1 mesin cuci	340	340
1 freezer box	360	360

sakelar/pemutus tenaga, yaitu circuit breaker (CB), pada jaringan utilitas dalam kondisi terbuka. Inverter yang digunakan bekerja dengan algoritma phase locked loop (PLL). Pada saat sumber PV dan baterai terputus, CB akan tertutup dan konverter DC-AC akan bekerja sebagai penyearah. Dalam keadaan ini, konverter DC-AC akan menyuplai sumber DC ke dalam DC bus. Demikian seterusnya sehingga suplai energi ke beban DC dan beban AC dapat terpenuhi. Penelitian ini dilakukan di Semarang, sedangkan waktu pelaksanaan penelitian adalah pada bulan Oktober 2022.

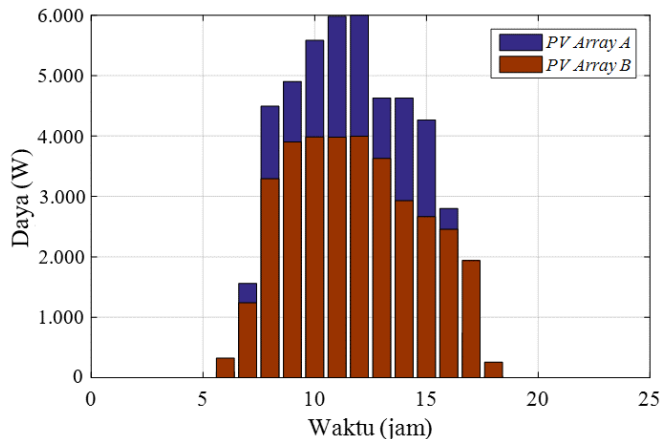
Tabel I memperlihatkan parameter sumber PV array, baterai, dan jaringan utilitas dalam sistem DC microgrid, sedangkan Tabel II dan Tabel III memperlihatkan berbagai jenis beban DC dan beban AC yang digunakan untuk menguji kinerja DC microgrid dengan konfigurasi campuran.

## V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian DC microgrid dengan konfigurasi campuran DC/AC coupling dilaksanakan sesuai dengan lokasi dan waktu yang telah ditentukan. Pada tanggal 10 Oktober 2022, intensitas



Gambar 3. Intensitas iradiasi matahari pada 10 Oktober 2022.



Gambar 4. Daya keluaran PV array A dan PV array B.

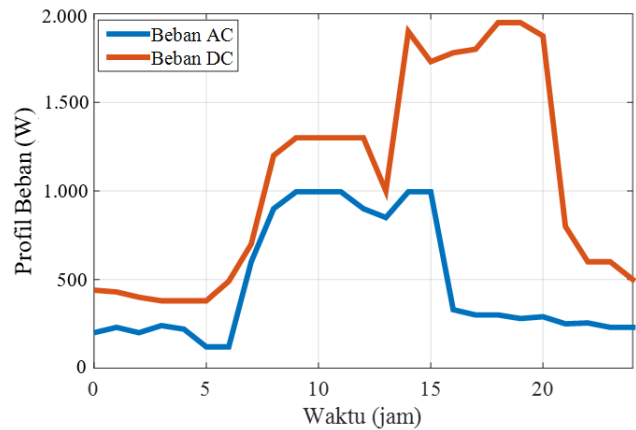
iradiasi matahari harian adalah  $4,97 \text{ kWh/m}^2$ . Gambar 3 memperlihatkan profil intensitas iradiasi matahari harian pada bulan Oktober 2022. Dalam profil terlihat puncak intensitas iradiasi matahari terjadi pada pukul 11.00. Kota Semarang mempunyai potensi pengembangan *microgrid* dengan menggunakan energi matahari.

Kota Semarang mempunyai profil potensi intensitas iradiasi matahari rata-rata setiap bulan pada tahun 2022 yang cukup besar, yaitu pada bulan Januari  $131 \text{ kWh/m}^2$ , Februari  $141 \text{ kWh/m}^2$ , Maret  $151 \text{ kWh/m}^2$ , April  $159 \text{ kWh/m}^2$ , Mei  $158 \text{ kWh/m}^2$ , Juni  $158 \text{ kWh/m}^2$ , Juli  $164 \text{ kWh/m}^2$ , Agustus  $171 \text{ kWh/m}^2$ , September  $180 \text{ kWh/m}^2$ , Oktober  $191 \text{ kWh/m}^2$ , November  $161 \text{ kWh/m}^2$ , dan Desember  $156 \text{ kWh/m}^2$ .

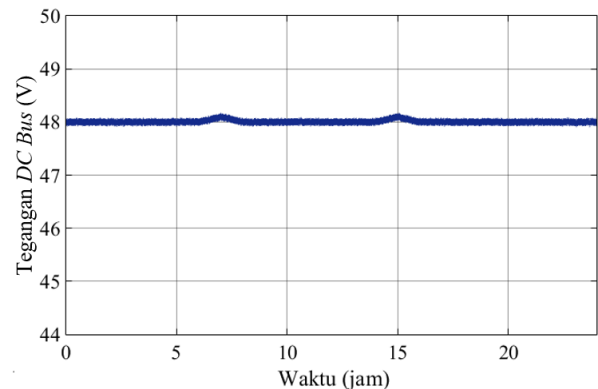
#### A. PV ARRAY TERHUBUNG DC BUS

Pada studi ini, *microgrid* menggunakan PV array A (PVAA)  $6.000 \text{ Wp}$  dan PV array B (PVAB)  $4.000 \text{ Wp}$ . Untuk menguji kinerja sistem, digunakan intensitas penyinaran matahari  $1.000 \text{ W/m}^2$ . MPPT yang digunakan secara otomatis mengekstraksi daya maksimum dari PVAA dan PVAB. Pada pukul 07.00 MPPT mulai bekerja, sehingga PVAA dan PVAB menyediakan daya untuk beban DC dan beban AC melalui DC bus. Selain itu, sebagian daya keluaran PV disimpan di baterai melalui konverter DC-DC *bidirectional*. Hal ini terlihat pada Gambar 4. Pada gambar tersebut terlihat PVAA menghasilkan daya keluaran maksimum pada pukul 11.00 hingga pukul 12.00, sedangkan PVAB memberikan daya keluaran maksimum pada pukul 10.00 hingga pukul 12.00.

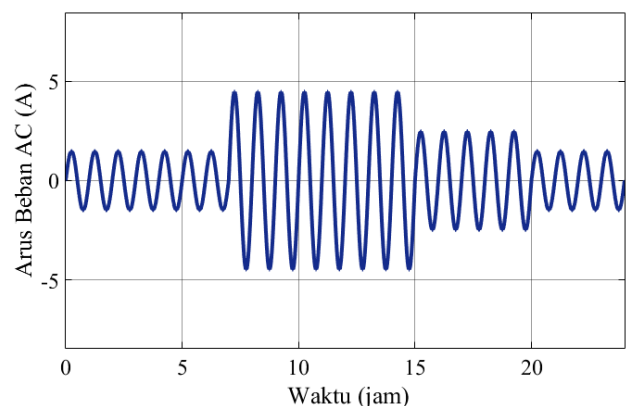
Pengoperasian awal DC *microgrid* menggunakan energi matahari, dalam hal ini PVAA dan PVAB terhubung ke DC bus melalui konverter DC-DC. Pada pengoperasian awal ini, baterai dan jaringan utilitas tidak menyuplai daya ke beban. Beban pada *microgrid* ini berupa beban DC dengan kapasitas  $2 \text{ kW}$  dan beban AC  $1 \text{ kW}$ . Gambar 5 memperlihatkan profil pada



Gambar 5. Profil beban.



Gambar 6. Tegangan DC bus.



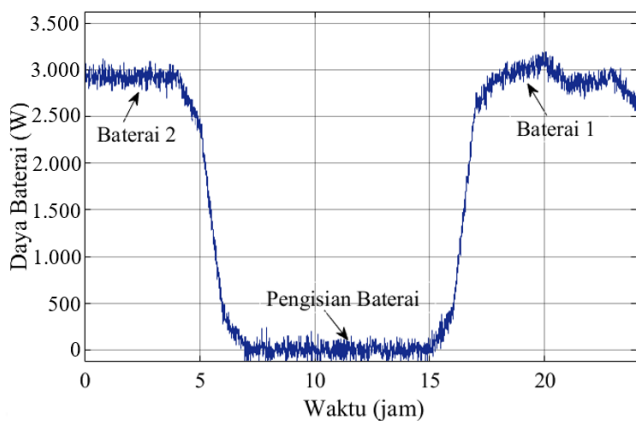
Gambar 7. Arus beban AC, sumber PV array.

beban DC dan beban AC. Ketika beban DC dan beban AC terhubung ke DC bus, beban DC meningkat, yaitu pada pukul 14.00 hingga pukul 20.00, sedangkan beban AC meningkat pada pukul 08.00 hingga pukul 15.00.

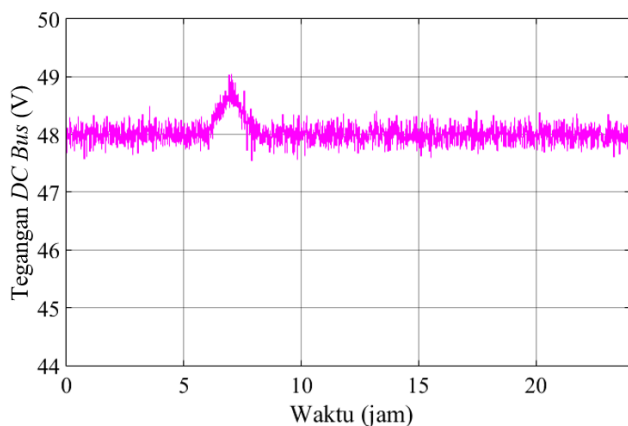
Gambar 6 memperlihatkan tegangan DC dengan sumber dari PV array. Pada pukul 08.00 dan pukul 15.00, terjadi perubahan tegangan DC bus sebagai akibat perubahan keluaran PV array. Sementara itu, Gambar 7 memperlihatkan arus beban AC. Pada gambar tersebut terlihat bahwa arus maksimum beban AC terjadi pada pukul 08.00 hingga pukul 15.00, sebesar  $4,9 \text{ A}$ , sedangkan beban terendah terjadi pada pukul 20.00 hingga pukul 08.00. Namun, konfigurasi campuran pada DC *microgrid* dapat membuat tegangan DC bus stabil pada  $48 \text{ V}$  dan mampu menyuplai beban AC secara maksimal.

#### B. BATERAI TERHUBUNG DC BUS

Pada kondisi kedua, ketika tidak ada energi matahari pada malam hari atau Kota Semarang dalam cuaca mendung dan



Gambar 8. Penyediaan daya baterai ke beban.



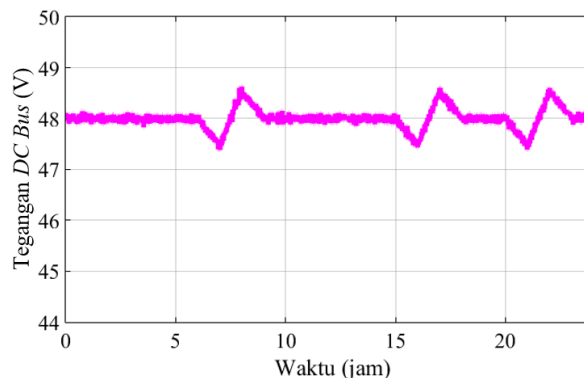
Gambar 9. Tegangan DC bus dengan sumber dari baterai.

hujan, DC microgrid bekerja dalam mode terhubung dengan baterai. Dalam mode ini, energi yang disimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai daya ke beban melalui DC bus. Pada kondisi ini, keluaran PV array terputus dan tidak menyuplai daya ke beban. Gambar 8 memperlihatkan pergantian aliran sumber baterai 1 dan baterai 2 ke beban. Baterai 1 menyuplai daya ke beban dari pukul 18.00 hingga pukul 24.00, sedangkan baterai 2 menyuplai daya ke beban dari pukul 24.00 hingga pukul 07.00. Pengisian baterai 1 dan baterai 2 terjadi pada pukul 07.00 hingga pukul 18.00.

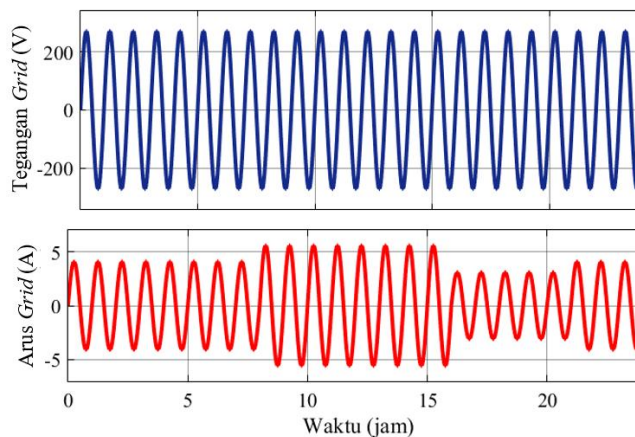
Dengan menggunakan konfigurasi campuran DC/AC coupling pada DC microgrid, perubahan tegangan yang terjadi pada pukul 07.00 dapat kembali stabil pada tegangan 48 V, seperti terlihat pada Gambar 9. Pada kondisi kedua ini, baterai 1 dan baterai 2 mampu menyuplai beban DC dan beban AC serta suplai daya ke beban tidak terputus.

### C. JARINGAN UTILITAS TERHUBUNG DC BUS

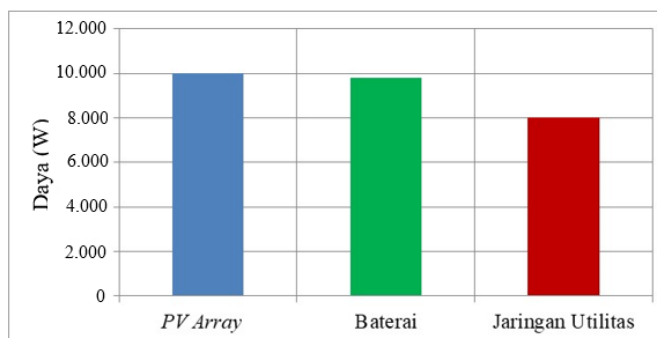
Kondisi ketiga adalah ketika sumber PV dan baterai terputus dan tidak menyuplai daya ke beban. Pada kondisi ini, CB menghubungkan sumber jaringan utilitas ke DC bus melalui konverter AC-DC. Beban sepenuhnya disuplai dari jaringan utilitas. Gambar 10 memperlihatkan lonjakan tegangan DC bus sebagai akibat perubahan beban. Terlihat dengan konfigurasi campuran yang diusulkan bahwa tegangan DC bus tetap stabil pada tegangan 48 V. Lonjakan tegangan DC bus terjadi pada pukul 07.30, pukul 16.00, dan pukul 21.30. Gambar 11 memperlihatkan tegangan jaringan sebesar 220 V dan perubahan arus jaringan utilitas. Arus maksimum dari jaringan ke beban terjadi pada pukul 09.00 hingga pukul 16.00, sedangkan arus paling rendah terjadi pada pukul 16.00 hingga pukul 21.00. Dalam studi ini terlihat dengan tiga kondisi atau



Gambar 10. Tegangan DC bus dengan sumber dari jaringan utilitas.



Gambar 11. Tegangan dan arus jaringan utilitas.



Gambar 12. Kapasitas daya sumber DC microgrid.

tiga mode bahwa DC microgrid mampu menyuplai beban tanpa terputus. Oleh karena itu, konfigurasi campuran DC/AC coupling pada DC microgrid mampu menyediakan sumber listrik secara terus menerus.

Gambar 12 memperlihatkan daya yang dibangkitkan dari PV array, baterai, dan jaringan utilitas, yang tersaji dalam grafik batang. Terlihat bahwa kapasitas daya yang disediakan DC microgrid cukup untuk memenuhi permintaan beban DC dan beban AC.

## VI. KESIMPULAN

Peningkatan permintaan beban pada DC microgrid dikembangkan dengan konfigurasi campuran DC/AC coupling. Skema yang diusulkan bertujuan untuk mengurangi fluktuasi daya pada DC bus ketika keluaran PV array dan baterai terputus. Skema yang diusulkan dalam makalah ini mampu memberikan daya dan tegangan yang stabil ke beban DC dan beban AC. Terlihat bahwa kapasitas energi yang tersimpan dalam baterai memengaruhi suplai ke beban. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa lonjakan tegangan pada DC bus dapat

diminimalkan dengan skema kontrol pada masing-masing konverter. Selain itu, kapasitas daya yang disediakan *DC microgrid* cukup untuk memenuhi permintaan beban DC dan beban AC. Penelitian ini berfokus pada kinerja *DC microgrid* dalam memenuhi permintaan beban. Skema yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan mempertimbangkan faktor biaya dan strategi kontrol baru pada *DC microgrid*.

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis memberikan pernyataan tidak adanya konflik kepentingan pada penelitian ini.

#### KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Adhi Kusmantoro dan Ardyono Priyadi; metodologi, Adhi Kusmantoro dan Ardyono Priyadi; perangkat lunak, Adhi Kusmantoro; validasi, Adhi Kusmantoro dan Ardyono Priyadi; analisis formal, Adhi Kusmantoro; investigasi, Adhi Kusmantoro; sumber daya, Ardyono Priyadi; kurasi data, Adhi Kusmantoro; penulisan—penyusunan draf asli, Adhi Kusmantoro dan Ardyono Priyadi; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Adhi Kusmantoro.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas PGRI Semarang yang telah memberikan dukungan biaya dalam penelitian ini.

#### REFERENSI

- [1] S. Pannala, N. Patari, A.K. Srivastava, dan N.P. Padhy, "Effective Control and Management Scheme for Isolated and Grid Connected DC Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 6, hal. 6767-6780, Nov.-Des. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3015819.
- [2] Z. Tang, Y. Yang, dan F. Blaabjerg, "Power Electronics: The Enabling Technology for Renewable Energy Integration," *CSEE J. Power, Energy Syst.*, Vol. 8, No. 1, hal. 39-52, Jan. 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
- [3] M. Nasir dkk., "Solar PV-Based Scalable DC Microgrid for Rural Electrification in Developing Regions," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 9, No. 1, hal. 390-399, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2736160.
- [4] S. Abdullahi, T. Jin, dan P.M. Lingom, "Robust Control Strategy for Inductive Parametric Uncertainties of DC/DC Converters in Islanded DC Microgrid," *J. Modern Power Syst., Clean Energy*, Vol. 11, No. 1, hal. 335-344, Jan. 2023, doi: 10.35833/MPCE.2021.000241.
- [5] S.B.Q. Naqvi dan B. Singh, "A PV-Battery System Resilient to Weak Grid Conditions with Regulated Power Injection and Grid Supportive Features," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 13, No. 3, hal. 1408-1419, Jul. 2022, doi: 10.1109/TSTE.2022.3159110.
- [6] A. Suryanto dkk., "Optimalisasi Keluaran Panel Surya Menggunakan Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi," *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 10, No. 3, hal. 282-290, Agu. 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i3.1142.
- [7] H. Silva-Saravia dkk., "Enabling Utility-Scale Solar PV Plants for Electromechanical Oscillation Damping," *IEEE Trans., Sustain. Energy*, Vol. 12, No. 1, hal. 138-147, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2985999.
- [8] R. Bakhshi-Jafarabadi, J. Sadeh, dan M. Popov, "Maximum Power Point Tracking Injection Method for Islanding Detection of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Microgrid," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 36, No. 1, hal. 168-179, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2976739.
- [9] A. Affam dkk., "A Review of Multiple Input DC-DC Converter Topologies Linked with Hybrid Electric Vehicles and Renewable Energy Systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 135, hal. 1-23, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110186.
- [10] A.S. Pratiwi, S.D. Nugraha, dan E. Sunarno, "Desain dan Simulasi Bidirectional DC-DC Converter untuk Penyimpanan Energi pada Sistem Fotovoltaik," *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 9, No. 3, hal. 305-310, Agu. 2020, doi: 10.22146/v9i3.377.
- [11] R. Aliaga dkk., "Implementation of Exact Linearization Technique for Modeling and Control of DC/DC Converters in Rural PV Microgrid Application," *IEEE Access*, Vol. 10, hal. 56925-56936, Mei 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3178425.
- [12] W. El Aouni dan L.-A. Dessaint, "Real-Time Implementation of Input-State Linearization and Model Predictive Control for Robust Voltage Regulation of a DC-DC Boost Converter," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 192101-192108, Okt. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032327.
- [13] L. Callegaro, M. Ciobotaru, D.J. Pagano, dan J.E. Fletcher, "Feedback Linearization Control in Photovoltaic Module Integrated Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, No. 7, hal. 6876-6889, Jul. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2872677.
- [14] E.D. Aranda, S.P. Litrán, dan M.B.F. Prieto, "Combination of Interleaved Single-Input Multiple-Output DC-DC Converters," *CSEE J. Power, Energy Syst.*, Vol. 8, No. 1, hal. 132-142, Jan. 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.00300.
- [15] M. Dhananjaya dan S. Pattnaik, "Design and Implementation of a SIMO DC-DC Converter," *IET Power Electron.*, Vol. 12, No. 8, hal. 1868-1879, Jul. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.6217.
- [16] Z. Sun dan S. Bae, "Multiple-Input Soft-Switching DC-DC Converter to Connect Renewable Energy Sources in a DC Microgrid," *IEEE Access*, Vol. 10, hal. 128380-128391, Des. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3227439.
- [17] K.R. Kothapalli dkk., "Soft-Switched Ultrahigh Gain DC-DC Converter with Voltage Multiplier Cell for DC Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 68, No. 11, hal. 11063-11075, Nov. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3031453.
- [18] S.B. Santra, D. Chatterjee, dan Y.P. Siwakoti, "Coupled Inductor Based Soft Switched High Gain Bidirectional DC-DC Converter with Reduced Input Current Ripple," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 70, No. 2, hal. 1431-1443, Feb. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3156153.
- [19] V. Sidorov, A. Chub, dan D. Vinnikov, "High-Efficiency Quad-Mode Parallel PV Power Optimizer for DC Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 59, No. 1, hal. 1002-1012, Jan.-Feb. 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3208879.
- [20] M. Kermadi, V.J. Chin, S. Mekhilef, dan Z. Salam, "A fast and Accurate Generalized Analytical Approach for PV Arrays Modeling Under Partial Shading Conditions," *Solar Energy*, Vol. 208, hal. 753-765, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.077.
- [21] R. Abbassi, A. Abbassi, A.A. Heidari, dan S. Mirjalili, "An Efficient Salp Swarm-Inspired Algorithm for Parameters Identification of Photovoltaic Cell Models," *Energy Convers., Manage.*, Vol. 179, hal. 362-372, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.069.
- [22] C. Zhang dkk., "Modeling and Prediction of PV Module Performance Under Different Operating Conditions Based on Power-Law I-V Model," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 10, No. 6, hal. 1816-1827, Nov. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3016607.
- [23] A.A.Z. Diab dkk., "Coyote Optimization Algorithm for Parameters Estimation of Various Models of Solar Cells and PV Modules," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 111102-111140, Jun. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000770.
- [24] D. Yousri dkk., "Reliable Applied Objective for Identifying Simple and Detailed Photovoltaic Models Using Modern Metaheuristics: Comparative Study," *Energy Convers., Manage.*, Vol. 223, hal. 1-20, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113279.
- [25] D. Yousri dkk., "Modified Interactive Algorithm Based on Runge Kutta Optimizer for Photovoltaic Modeling: Justification Under Partial Shading and Varied Temperature Conditions," *IEEE Access*, Vol. 10, hal. 20793-20815, Feb. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152160.
- [26] Z. Wu, S. Lv, H. Song, dan M. Yun, "Statistical Modeling of UV-Induced PV Module Power Degradation Based on Acceleration Tests," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 10, No. 1, hal. 144-149, Jan. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2950590.