

Sistem DC *Microgrid* Berbasis PLTS dan Baterai

Akhbar Candra Mulyana^{*a)}, Putu Agus Aditya Pramana^{a)}, Sriyono^{a)}

(Received 17 April 2025 || Revised 23 Mei 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: Renewable energy in microgrid systems naturally uses direct current (DC) voltage sources such as solar, hydrogen, fuel cells and wind. On the other hand, electronic device technology is also increasingly developed with the emergence of devices based on DC voltage sources. However, integration between DC voltage sources and DC electronic equipment has not been widely developed in Indonesia. Based on these problems, research will be conducted on the implementation of the DC microgrid system. The methodology of this research is to create a minimum DC microgrid system consisting of photovoltaic (PV), solar charge controller (SCC), battery and dummy load which are integrated and tested using two test scenarios. During the test, the characteristics of voltage, power flow, and battery charge discharge process were observed against load variation. The results showed that under low-load conditions, mutual charging occurred between batteries connected in parallel. When the PV power exceeds the load power, the load is supplied by the PV but when the PV power is less than the load power, the load is supplied by the PV and battery. The contribution of power flow to the load is determined by the PV supply capacity, battery voltage, and impedance. The state of charge (SOC) of a battery cannot be used as a representation of the battery voltage when the circuit is closed circuit. These findings highlight the importance of impedance and PV capacity management in DC microgrid design and support further development of efficient and resilient DC based energy systems in Indonesia.

Keywords: DC Microgrid, PV, Voltage, Load Flow and Load.

1. Pendahuluan

Proses penyediaan tenaga listrik saat ini sangat terpengaruh oleh isu global mengenai perubahan iklim dan transisi energi. Pemanfaatan sumber energi yang bersifat baru terbarukan atau dengan istilah Energi Baru Terbarukan (EBT) dan berkelanjutan adalah jawaban untuk isu permasalahan ini, dikarenakan produksi energi listrik dari EBT yang bersifat lebih ramah lingkungan dan rendah emisi [1], [2], [3]. Berdasarkan tinjauan energi nasional tahun 2025, potensi EBT tersebar di seluruh wilayah kepulauan Indonesia termasuk di wilayah daerah 3T (Terdepan, Terpencil, dan Tertinggal) [4]. Pembangunan pembangkit EBT skala besar tidak dapat dilakukan di seluruh wilayah daerah 3T. Hal ini membutuhkan beberapa aspek pertimbangan seperti kondisi geografis, kerapatan beban, biaya investasi, dan faktor-faktor penting lainnya. Padahal mayoritas daerah 3T memiliki potensi EBT yang cukup baik yang dapat dioptimalkan pemanfaatannya dalam skala yang lebih kecil atau *microgrid*. EBT yang ada pada sistem *microgrid* secara alami menggunakan sistem tegangan DC seperti energi surya, hidrogen, fuel cell, angin, dan lain – lain. Di sisi lain, saat ini peralatan pendukung seperti baterai dan beban dalam sistem tegangan DC juga mulai masif digunakan dalam operasi sistem tenaga listrik dan dapat dengan mudah didapatkan di pasaran [5], [6]. Beban DC tersebut seperti TV, laptop, kulkas, *air conditioner* dan pompa [7].

Integrasi antara pembangkit bersumber tegangan DC dan peralatan elektronik bersumber DC belum banyak dikembangkan di Indonesia. Seperti pada penelitian kajian karakteristik kinerja *microgrid* [8], penelitian ini membahas mengenai integrasi PV dan baterai pada sistem AC tanpa mengamati karakteristik listrik mendetail dalam konfigurasi DC murni. Beberapa penelitian lain di luar negeri pun umumnya membahas mengenai efisiensi dan level tegangan pada sistem DC *microgrid* [7], [9]. Di samping itu telah dilakukan penelitian mengenai studi sistem DC *microgrid* yang menghasilkan konsep atau desain rencana sistem *microgrid* belum kepada implementasinya [10].

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka akan dilakukan penelitian mengenai implementasi sistem DC *microgrid* sehingga dapat melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya dan menjadi langkah preventif terhadap perkembangan sistem DC ke depan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik sistem DC *microgrid* dari segi karakteristik tegangan, aliran daya, dan proses

charge-discharge baterai terhadap perubahan beban. Dalam penelitian ini batasannya adalah mengenai karakteristik sistem DC *microgrid* sesuai dengan sifat alami peralatan dan proses pengujian terbatas pada sistem DC *microgrid* yang dikembangkan di laboratorium PLN Puslitbang.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan secara bertahap yaitu dimulai dari studi literatur, konsep sistem DC *microgrid*, integrasi sistem DC *microgrid*, dan pengujian skenario operasi DC *microgrid*.

2.1 Desain Sistem DC *Microgrid*

Pada sistem DC *microgrid*, terdapat empat komponen penting yaitu pembangkit, kontroler, baterai dan beban. Prinsip sistem DC *microgrid* sama dengan *microgrid* pada umumnya yaitu merupakan sistem kelistrikan yang sudah dapat berdiri sendiri sehingga dapat berinteraksi secara aktif dengan grid utama dalam melakukan penentuan aliran daya [12], [13], [14]. Daya dapat mengalir dari grid utama ke dalam sistem DC *microgrid* apabila dalam sistem DC *microgrid* kekurangan daya. Demikian juga sebaliknya, sistem DC *microgrid* dapat mensuplai daya ke grid utama apabila terdapat kelebihan daya yang dihasilkan pada sistem DC *microgrid* [9]. Pengoperasian sistem DC *microgrid* juga dapat dilakukan secara *stand alone* maupun paralel dengan grid [15], [16]. Sistem DC *microgrid* yang akan dibangun pada penelitian ini adalah bersifat *stand alone* yaitu beroperasi tanpa terhubung dengan *microgrid* lain atau grid PLN. Dengan sistem *stand alone* ini diharapkan ketersediaan listrik dapat terus dilakukan walaupun tidak terdapat suplai dari grid utama dan didapatkan sifat alami dari sistem tanpa bantuan eksternal [8].

Integrasi PLTS dan beban yang berfokus pada penggunaan *Solar Charged Controller* (SCC) dan baterai sebagai pembangkit maupun sebagai beban. Hal itu berarti bahwa nilai daya yang disuplai dan diserap pada baterai dapat dikontrol secara penuh. Sistem baterai akan bekerja sebagai beban apabila seluruh daya yang dihasilkan dari keseluruhan sistem pembangkitan (selain baterai) memiliki nilai yang lebih besar dari beban sehingga kelebihan daya tersebut akan disimpan ke dalam baterai. Namun, apabila kondisi sebaliknya terjadi, yaitu daya dari sistem pembangkitan (selain baterai) lebih kecil dari beban, maka baterai akan bekerja sebagai pembangkit dan menyuplai daya untuk

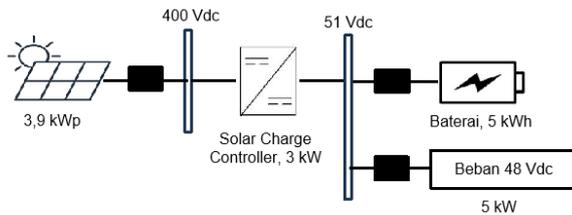
*Korespondensi: akhbar.candra@pln.co.id

a) PT. PLN Puslitbang Ketenagalistrikan, Jakarta, Indonesia.

memenuhi kebutuhan sistem. Selain itu, dengan konfigurasi ini baterai mampu menjadi penyangga ketika terjadi kehilangan daya secara tiba-tiba karena intermitensi PLTS [17].

2.2 Proses Integrasi Sistem DC *Microgrid*

Tahapan integrasi sistem DC *microgrid* meliputi integrasi modul PV, perakitan dan pengaturan SCC, perakitan dan pengujian baterai, serta instalasi perkabelan dan pembebanan. Konfigurasi sistem DC *microgrid* di PLN Puslitbang yang akan dibangun ditunjukkan pada Gambar 2.1.



GAMBAR 2.1 KONFIGURASI SISTEM DC *MICROGRID*

2.2.1 PLTS Atap

PLTS ini terdiri 60 modul dengan masing-masing modul memiliki output *power* sebesar 260 Wp pada kondisi iradiasi 1000W/m² dan temperatur internal modul sebesar 25°C. Modul surya dirakit menjadi empat baris atau *array* dengan jumlah masing-masing *array* terdiri dari 15 modul surya. Sehingga untuk satu *array* PLTS memiliki kapasitas sebesar 3,9 kWp dengan nilai tegangan *ouput* sebesar 565 volt. PLTS atap dipasang disalah satu gedung PLN Puslitbang seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



GAMBAR 2.2 PLTS ATAP SUMBER SISTEM DC *MICROGRID*

2.2.2 Solar Charge Controller (SCC)

SCC yang digunakan telah mengakomodir syarat minimum PLTS dan baterai sehingga sistem DC *microgrid* dapat berfungsi. SCC ini memiliki detail spesifikasi sebagaimana disebutkan dalam Tabel 2.1 [18].

TABEL 2.1 SPESIFIKASI SCC

Item	Parameter
Peak Efficiency	97,9 %
Maximum Battery Current	60 A
Maximum Input Operating Current	15 A (self limiting)
Maximum Solar Open Circuit Voltage	600 V
Nominal Maximum Operating Power	3200 Wp, 48 Volt
Nominal System Voltage	24 V, 36 V, 48 V and 60 V
Battery Operating Voltage Range	16 - 72 Vdc
PV Input Operating Voltage Range	100 - 525 V

Tabel 2.1 menjelaskan mengenai spesifikasi SCC yang beroperasi di tegangan input dengan rentang 100 volt sampai

dengan 525 volt dan *ouput* sistem yang bisa dipilih di antara 24 volt, 36 volt, 48 volt dan 60 volt. SCC ini menggunakan algoritma *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), dimana terdapat empat tahap *charging* yang mengoptimalkan kesehatan baterai. Fitur ini memiliki algoritma pelacakan cerdas yang menemukan dan mempertahankan operasi pada titik daya puncak sel surya dan memaksimalkan pemanenan energi. Selain itu, meskipun daya PV melebihi daya pengoperasian nominal, SCC akan membatasi dan memberikan arus keluaran maksimum terus menerus ke dalam baterai.

2.2.3 Baterai

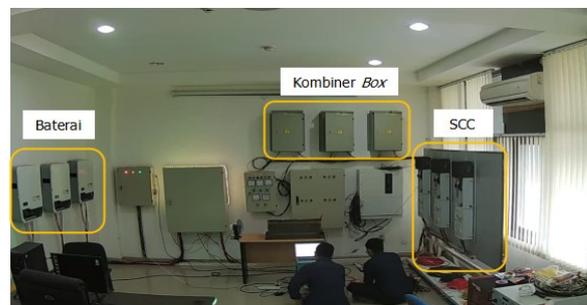
Baterai yang akan digunakan adalah baterai dengan jenis *lithium fosfat* (LifePO4) dengan level tegangan 51 Vdc dan kapasitas 100 Ah. Untuk detail spesifikasi baterai ditunjukkan pada Tabel 2.2 [19]. Selain spesifikasi baterai, hal yang harus diperhatikan selain tegangan nominal adalah tegangan *cut off* saat proses *discharge*, nilainya berada pada 44,8 volt.

TABEL 2.2 SPESIFIKASI BATERAI

Item	Parameter
Nominal Voltage (V)	51,2
Max. Work Voltage Range (V)	40 – 58,4
Nominal Capacity (Ah)	100
Nominal Energi (kWh)	5
C Rating	1,0
Discharge Cut off Voltage (V)	44,8
Equalized Charge Voltage (V)	58,4
Nominal Voltage (V)	51,2

2.2.4 Beban DC

Beban DC di sini menggunakan sebuah *dummy load* agar dapat mensimulasikan perubahan beban yang terjadi pada sistem DC *microgrid*. Beban DC ini mempunyai nilai kurang lebih sebesar 5 kW dengan *toggle switch* sebanyak 8 buah yang masing-masing *toggle switch* bernilai 15 A. Setelah mengetahui dan menguji masing-masing perangkat pembentuk sistem DC *microgrid*, maka sistem DC *microgrid* dibangun di laboratorium PLN Puslitbang [20]. Gambar 2.3 menjelaskan mengenai sistem DC *microgrid* yang telah terpasang. Posisi tengah atas merupakan kotak kombinasi yang menghubungkan antara PV dengan SCC yang terletak pada sisi kanan dan baterai pada sisi kiri. Untuk posisi beban DC berada di tengah bawah.

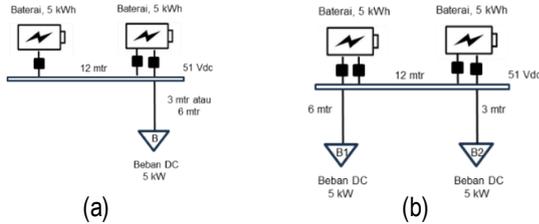


GAMBAR 2.3 LABORATORIUM DC *MICROGRID* YANG SUDAH SELESAI INTEGRASI

2.3 Skenario Uji Operasi Sistem DC *Microgrid*

Skenario operasi sistem DC *microgrid* dibagi menjadi dua yaitu skenario tanpa PV dan dengan PV. Dengan beberapa pengujian skenario operasi DC *microgrid* ini, akan didapatkan karakteristik tegangan, arus, serta aliran daya pada sistem DC *microgrid*.

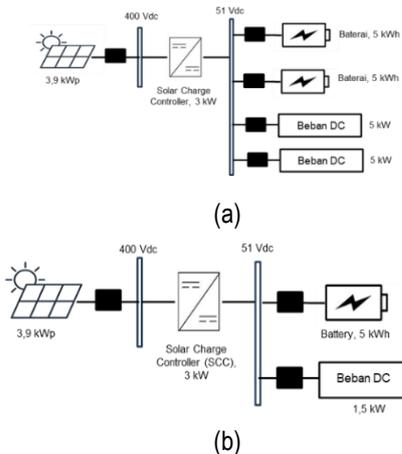
Gambar 2.4 menunjukkan skenario operasi DC *microgrid* tanpa PV dan Gambar 2.5 menunjukkan skenario operasi DC *microgrid* dengan PV. Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 menjelaskan mengenai detail skenario pengujian operasi DC *microgrid*. Masing-masing skenario digunakan untuk kondisi yang berbeda dan ditentukan oleh status PV, jumlah baterai, tegangan baterai, SOC baterai, jumlah beban, nilai beban, serta jarak beban.



GAMBAR 2.4 KONFIGURASI SKENARIO DC MICROGRID TANPA PV (A) SATU BEBAN (B) DUA BEBAN

TABEL 2.3 SKENARIO UJI TANPA PV

No.	Baterai			Beban	
	Tegangan	SoC 1	SoC 2	Nilai	Jarak
1	Berbeda	80%	20%	0 sd 3 kW	3 meter
2	Berbeda	80%	20%	0 sd 3 kW	6 meter
3	Sama	100%	100%	0 sd 3 kW	3 meter
4	Sama	100%	100%	0 sd 3 kW	6 meter
5	Berbeda	7%	15%	0 sd 3 kW	3 meter
6	Berbeda	7%	15%	0 sd 3 kW	6 meter
7	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
8	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
9	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
10	Berbeda	20%	80%	1 kW (konstan)	3 meter
11	Berbeda	20%	80%	1 sd 4 kW	3 meter
12	Sama	100%	100%	1 kW (konstan)	3 meter
13	Sama	100%	100%	1 sd 4 kW	3 meter
14	Sama	100%	100%	1 kW (konstan)	6 meter
15	Sama	100%	100%	1 kW (konstan)	3 meter
16	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
17	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter



GAMBAR 2.5 KONFIGURASI SKENARIO DC MICROGRID DENGAN PV (A) DUA BEBAN DAN DUA BATERAI (B) SATU BEBAN DAN SATU BATERAI

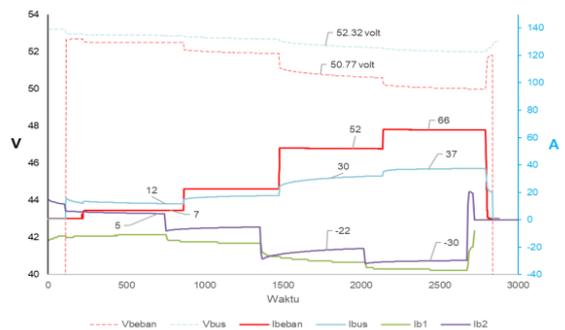
TABEL 2.4 SKENARIO UJI DENGAN PV

No.	Baterai				Beban	
	Jumlah	Tegangan	SoC 1	SoC 2	Nilai	Jarak
13	1	-	20%	-	1 sd 1.5 kW	3 meter
14	2	Sama	100%	100%	1 sd 4 kW	3 meter
15	2	Sama	100%	100%	1 kW (konstan)	6 meter
16	2	Sama	100%	100%	1 sd 4 kW	6 meter
17	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
18	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
19	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
20	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
21	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
22	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
23	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
24	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
25	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
26	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
27	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
28	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
29	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
30	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
31	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
32	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
33	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
34	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
35	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
36	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
37	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
38	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
39	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
40	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
41	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
42	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
43	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
44	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
45	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
46	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
47	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
48	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
49	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
50	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
51	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
52	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
53	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
54	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
55	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
56	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
57	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
58	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
59	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
60	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
61	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
62	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
63	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
64	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
65	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
66	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
67	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
68	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
69	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
70	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
71	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
72	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
73	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
74	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
75	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
76	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
77	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
78	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
79	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
80	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
81	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
82	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
83	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
84	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
85	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
86	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
87	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
88	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
89	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
90	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
91	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
92	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
93	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
94	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
95	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
96	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter
97	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	6 meter
98	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	6 meter
99	2	Berbeda	80%	20%	1 kW (konstan)	3 meter
100	2	Berbeda	80%	20%	1 sd 4 kW	3 meter

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian DC Microgrid Tanpa PV

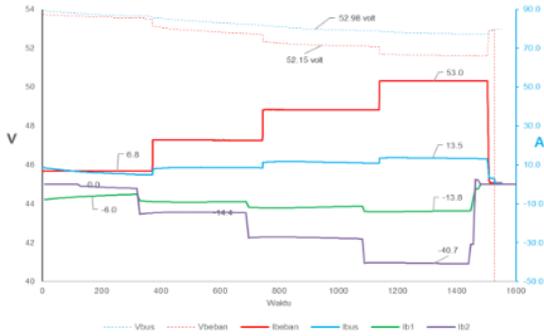
Skenario ini merupakan skenario tanpa PV yaitu sistem DC *microgrid* terdiri dari baterai dan beban. Skenario yang dijalankan adalah skenario nomor 1 sampai dengan 12 di Tabel 2.3. Pada skenario 1 yaitu kondisi dua buah baterai berbeda tegangan dan SOC adalah SOC baterai 1 = 80 %, SOC baterai 2 = 20 % dan beban = 0 sd 3 kW dengan jarak 3 meter dari bus. Hasilnya adalah saat beban naik maka tegangan bus akan turun, begitu pula pada tegangan bus akan mengalami penurunan. Saat beban rendah maka aliran daya full disuplai dari baterai SOC tinggi dan terjadi pengisian ke baterai SOC rendah. Tetapi ketika beban tinggi maka aliran daya ke beban disuplai dari kedua baterai. Selain itu suplai daya terhadap beban, didominasi oleh baterai dengan SOC dan tegangan lebih tinggi. Gambar 3.1 menunjukkan hasil uji Skenario 1.



GAMBAR 3.1 HASIL UJI SKENARIO 1

Skenario 2 merupakan modifikasi dari skenario 1 dengan mengubah jarak antara bus, baterai, dan beban menjadi 6 meter. Hasil pengujian skenario 2 menunjukkan bahwa untuk hubungan tegangan dan aliran daya sama seperti pengujian skenario 1.

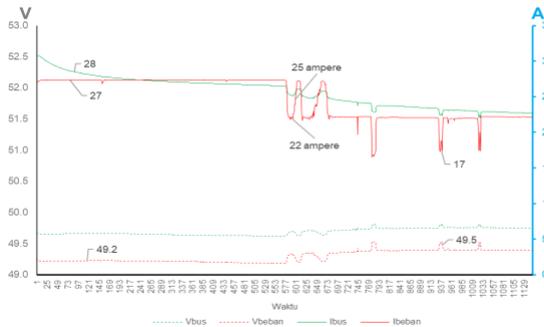
Pada Skenario 3, kondisi dua baterai sama baik tegangan maupun SOC. SOC baterai 1 = 100 %, SOC baterai 2 = 100 % dan beban = 0 sd 3 kW dengan jarak 3 meter dari bus. Hasil pengujian atau pada Gambar 3.2 menunjukkan bahwa ada perbedaan hasil dengan dua skenario sebelumnya yaitu suplai daya terhadap beban didominasi oleh baterai terdekat dengan beban dan nilai arus baterai 1 sama dengan arus bus.



GAMBAR 3.2 HASIL UJI SKENARIO 3

Skenario 4 merupakan modifikasi skenario 3 dengan mengubah parameter antara bus, baterai, dan beban. Hasil pengujian skenario 4 adalah hubungan tegangan dan aliran daya sama seperti pengujian skenario 3.

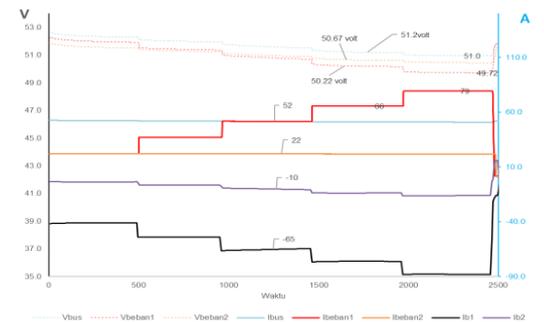
Pada skenario 5 atau Gambar 3.3, kondisi dua baterai berbeda tegangan dan SOC. SOC baterai 1 = 7 % dan $V_{baterai\ 1} = 51.3$ Volt, SOC baterai 2 = 15 % dan $V_{baterai\ 2} = 50.2$ Volt, beban = 0 sd 3 kW dengan jarak 3 dan 6 meter dari bus.



GAMBAR 3.3 HASIL UJI SKENARIO 5

Hubungan tegangan akan sama seperti pengujian Skenario 1, 2, 3, dan 4, akan tetapi suplai daya terhadap beban didominasi oleh baterai dengan tegangan tertinggi meskipun kapasitasnya lebih rendah. Ketika beban turun menjadi 22 A, arus bus tidak turun sebesar nilai beban, karena arus masih mengalir atau charging ke baterai tegangan lebih rendah. Untuk pengujian skenario 6 menghasilkan hasil yang sama seperti skenario 5.

Pada Skenario 7 sesuai Gambar 3.4, kondisi dua baterai berbeda tegangan dan SOC. SOC baterai 1 = 80 %, SOC baterai 2 = 20 %, beban variabel $B1 = 1$ sd 4 kW dengan jarak 6 meter dari baterai 1, beban konstan $B2 = 1$ kW dengan jarak 3 meter dari baterai 2.

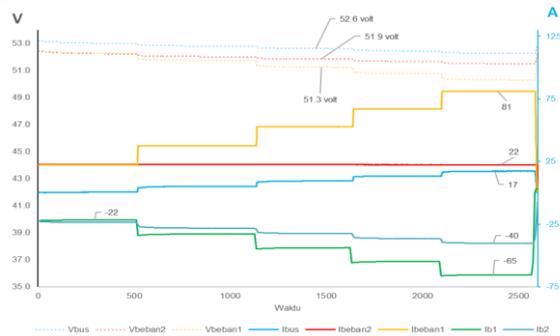


GAMBAR 3.4 HASIL UJI SKENARIO 7

Ketika beban B1 naik maka tegangan beban atau V_{B1} akan turun. Adapun pada tegangan bus dan tegangan beban di titik lainnya akan mengalami penurunan juga. Selain itu masing-masing baterai berkontribusi kepada beban, dengan arus kontribusi terbesar dari baterai kapasitas tinggi.

Pada Skenario 8, kondisi dua baterai berbeda tegangan dan SOC dan nilai SOC baterai 1 = 80 %, SOC baterai 2 = 20 %, beban konstan $B1 = 1$ kW dengan jarak 3 meter dari baterai 1, beban variabel $B2 = 1$ sd 4 kW dengan jarak 6 meter dari baterai 2. Hubungan tegangan dan aliran daya sama seperti pengujian Skenario 7. Akan tetapi untuk arus kontribusi terbesar dari baterai kapasitas tinggi, meskipun titik lokasi beban jauh dan lebih dekat terhadap baterai kapasitas lebih rendah.

Pada Skenario 11 dengan hasil uji seperti di Gambar 3.5, kondisi dua baterai sama tegangan dan SOC dan nilai SOC $b1 = 100$ %, SOC baterai 2 = 100 %, beban konstan $B2 = 1$ kW dengan jarak 3 meter dari baterai 1, beban variabel $B1 = 1$ sd 4 kW dengan jarak 6 meter dari baterai 2. Hubungan tegangan sama seperti pengujian skenario 7, 8, 9, dan 10. Untuk arus kontribusi terbesar dari baterai terdekat dan pengujian Skenario 12 menghasilkan hasil yang sama seperti Skenario 11.

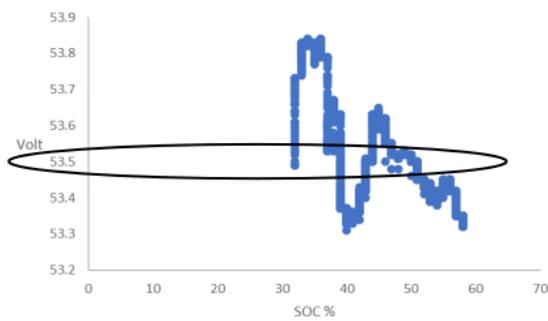


GAMBAR 3.5 HASIL UJI SKENARIO 11

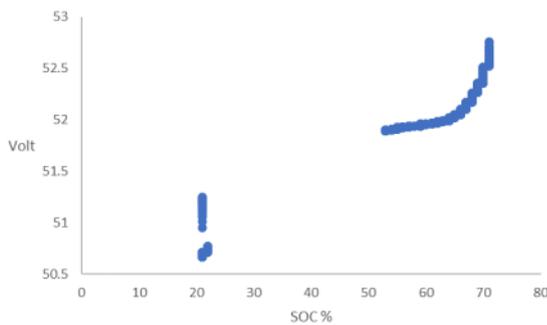
Selain itu ditemukan juga hasil bahwa saat kondisi *close circuit* baik itu pada saat proses *charge* atau *discharge* hubungan antara tegangan baterai dan SOC baterai ditunjukkan pada Gambar 3.6. Gambar 3.6 (a) adalah hubungan antara tegangan dan SOC baterai saat posisi *charging* serta Gambar 3.6 (b) adalah saat posisi *discharging*. Ketika misal nilai tegangan saat *charging* adalah 53.5 volt maka untuk nilai SOC nya bisa berada pada beberapa nilai seperti SOC 30 %, 40 %, dan 50 %. Hal ini menunjukkan bahwa SOC baterai tidak dapat digunakan sebagai representasi dari tegangan baterai saat kondisi *close circuit*. Begitu pula saat proses *discharging*, nilai tegangan berada pada nilai 52 volt dan nilai SOC berada pada nilai diantara 50 sampai dengan 60 %.

3.2 Pengujian DC Microgrid Dengan PV

Pada pengujian ini skenario melibatkan PV, SCC, baterai, dan beban. Skenario yang dilakukan adalah Skenario nomor 13 sampai dengan nomor 17 pada Tabel 2.4. Pada Skenario 13 dengan kondisi satu baterai dengan SOC awal 20 % dan beban variabel dari 0 sampai dengan 1.5 kW dengan jarak 3 meter dari bus mendapatkan hasil seperti pada Gambar 3.7.

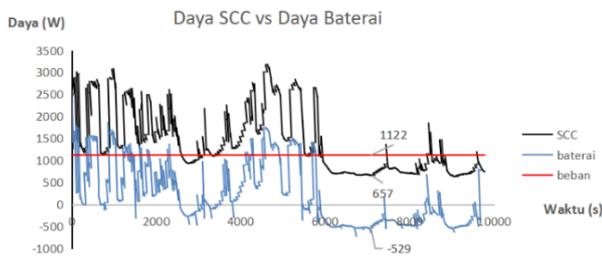


(a)



(b)

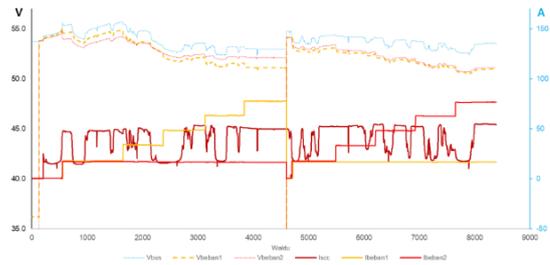
GAMBAR 3.6 HUBUNGAN ANTARA TEGANGAN DAN SOC BATERAI (A) SAAT CHARGING, (B) SAAT DISCHARGING



GAMBAR 3.7 HASIL UJI SKENARIO 13

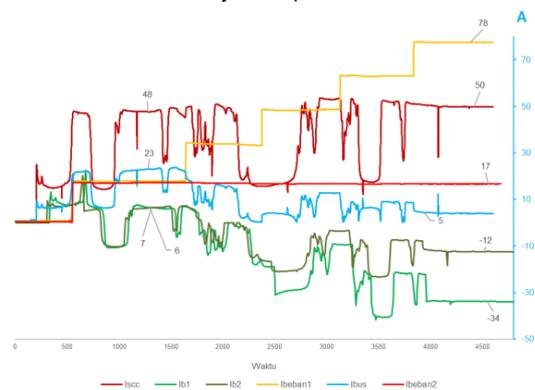
Saat kondisi sistem DC *microgrid* memiliki beban konstan sebesar 1122 W, aliran daya mengalir ke beban dan baterai secara bersamaan. Hal ini ditunjukkan ketika produksi daya PV yang disalurkan oleh SCC lebih besar daripada daya beban, maka aliran daya akan mengalir ke beban dan baterai. Nilai daya pada baterai positif yang berarti bahwa baterai menerima aliran daya. Ketika kondisi sebaliknya yaitu daya PV atau daya SCC lebih kecil daripada beban, maka aliran daya ke beban disuplai dari PV dan baterai. Nilai negatif pada kurva daya baterai di Gambar 3.7 menunjukkan bahwa baterai sedang mengeluarkan daya. Pada skenario ini pengujian dilakukan tiga kali dengan tiga kondisi beban konstan berbeda yaitu beban 0 kW, 1 kW dan 1,5 kW.

Pada Skenario 14 dan 15 dengan kondisi dua baterai sama, yaitu SOC baterai 1 = 100 %, SOC baterai 2 = 100 %, beban variabel B1 = 1 sd 4 kW, beban variabel B2 = 1 sd 4 kW, dengan jarak bervariasi 3 atau 6 meter dari bus ditemukan hasil karakteristik tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



GAMBAR 3.8 KARAKTERISTIK TEGANGAN HASIL UJI SKENARIO 14 DAN 15

Sesuai grafik Gambar 3.8 mengenai karakteristik tegangan hasil pengujian skenario 14 dan 15 adalah ketika beban naik disalah satu titik maka penurunan tegangan akan terjadi di seluruh titik dengan besar penurunan berbeda-beda. Garis putus-putus pada Gambar 3.8 menggambarkan nilai tegangan. Garis putus biru adalah tegangan bus, garis putus merah adalah tegangan beban 2, dan garis putus kuning adalah tegangan beban 1. Sedangkan untuk karakteristik arus ditunjukkan pada Gambar 3.9.



GAMBAR 3.9 KARAKTERISTIK ARUS HASIL UJI SKENARIO 14 DAN 15

Karakteristik arus dan aliran daya sesuai hasil pengujian Skenario 14 dan 15 adalah ketika daya PV melebihi daya total beban, maka beban hanya akan disuplai oleh PV dan sisa daya produksi PV akan mengalir ke baterai atau charging. Lalu ketika daya PV kurang dari daya beban, maka beban akan disuplai oleh PV dan baterai. Besarnya kontribusi arus dari baterai ditentukan oleh nilai tegangan baterai dan jarak terhadap beban. Skenario 16 dan 17 adalah kondisi dua baterai berbeda tegangan dan SOC, yaitu SOC baterai 1 = 80 %, SOC baterai 2 = 20 %, beban variabel B1 = 1 sd 4 kW, beban variabel B2 = 1 sd 4 kW, dengan jarak bervariasi 3 atau 6 meter dari bus.

Hasilnya adalah karakteristik tegangan, arus, dan aliran daya pada pengujian skenario 16 dan 17 memiliki hasil atau karakteristik yang sama dengan hasil skenario 14 dan 15 yaitu ketika beban naik disalah satu titik maka penurunan tegangan akan terjadi di seluruh titik dengan besar penurunan berbeda-beda dan saat daya PV melebihi daya total beban, maka beban hanya akan disuplai oleh PV dan sisa daya produksi PV akan mengalir ke baterai atau *charging*. Lalu ketika daya PV kurang dari daya beban, maka beban akan disuplai oleh PV dan baterai. Karakteristik yang sama ini terjadi karena yang berbeda hanya kondisi awal dari SoC baterai sedangkan pola pembebanan dan arsitektur sistem tidak berubah.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa karakteristik tegangan adalah ketika beban naik di salah satu titik maka penurunan tegangan akan terjadi di seluruh titik dengan besar penurunan berbeda-beda. Hubungan antara tegangan beban dan tegangan bus atau sistem cenderung linier baik pada daya konstan maupun berubah-ubah, karena dipengaruhi oleh arus dan impedansi pada sisi beban maupun sisi bus yang mengalami perubahan tersebut. Namun perbedaan impedansi dan arus yang mengalir menyebabkan perbedaan besarnya perubahan tersebut.

SOC baterai tidak dapat digunakan sebagai representasi dari tegangan baterai ketika rangkaian *close circuit*. Ada nilai SOC sama tetapi nilai tegangan berbeda. SOC ditentukan menggunakan prediksi yang dibangun oleh BMS pada baterai. Algoritma dalam menentukan prediksi nilai SOC dapat berbeda-beda untuk setiap produk dan tidak hanya mengacu pada nilai tegangan, sehingga nilai tegangan belum tentu linier dengan nilai SOC.

Pada saat beban rendah terjadi proses pengisian atau *charging* antar baterai ketika baterai posisi paralel. Hal ini terjadi dikarenakan perbedaan potensial tegangan antar baterai. Ketika daya PV melebihi daya beban, maka beban disuplai oleh PV, sedangkan ketika daya PV kurang dari daya beban, maka beban disuplai oleh PV dan baterai. Kontribusi aliran daya terhadap beban ditentukan oleh kapasitas suplai PV, tegangan baterai dan impedansi.

Hasil temuan-temuan ini menunjukkan pentingnya manajemen impedansi dan penentuan kapasitas PV dalam penyempurnaan desain sistem DC *microgrid*. [5]

Saran untuk pengembangan kedepan adalah untuk menjaga keberlanjutan sistem DC *microgrid* dibutuhkan DC *controller* sebagai sebuah modul prosesor universal yang dapat digunakan untuk mengontrol berbagai peralatan dalam sistem DC *microgrid*, sehingga aliran daya bisa disesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan tidak mengalir alami seperti hasil pengujian skenario di atas. Selain itu untuk mengintegrasikan klaster DC *microgrid* dalam jarak yang jauh diperlukan DC *converter* untuk meningkatkan tegangan grid DC agar *losses* jaringan rendah.

Referensi

- [1] S. You, Q. Wu, dan H. Zhang, "Renewable Energy and CO₂ Emissions: Analysis of the Life Cycle and Impact on the Ecosystem under Climate Change," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 28355–28368, 2022. doi: 10.1007/s11356-022-18802-6.
- [2] H. Li, J. Zhang, Y. Xue, dan Y. Wang, "Renewable energy development and carbon emissions: The role of electricity exchange," *Journal of Cleaner Production*, vol. 421, 2024, Art. no. 139654. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139654
- [3] R. Liu, Y. Wang, dan X. Zhang, "A comparative study on the combination of LCA and ecological footprints: solar PV vs. coal in Ningxia," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, Apr. 2024. doi: 10.3389/fenrg.2024.1375820
- [4] A. P. Sisdwinugraha, A. Hapsari, and al Et, "Indonesia Energy Transition Outlook 2025 Navigating Indonesia's Energy Transition at the Crossroads: A Pivotal Moment for Redefining the Future," vol. 5, p. 2025, 2025, [Online]. Available: www.iesr.or.id/jiesr@iesr.or.id
- [5] B. S. Gumilang, S. Djulihenanto, S. L. Hermawan, K. L. Andinia, Y. I. Wardania, "Sistem Pengisian Baterai VRLA 200Ah 24 V Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya 6×100 Wp di PPYD Al-Ikhlas, Singosari, Kabupaten Malang," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 3, pp. 213–218, Okt. 2024, doi:10.33795/elposys.v11i3.6308.
- [6] G. P. C. Handani, B. S. Gumilang, A. Zuroida, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Suplai Daya Sistem Pemberian Pakan Ikan Otomatis," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, 2022, doi:10.33795/elposys.v9i3.655.
- [7] F. S. Al-Ismael, "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 36154–36172, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062840.
- [8] B. S. Munir, M. S. Al Manshury, G. Supriyadi, and all et, "Kajian Karakteristik Kinerja Microgrid PLN," 2017.
- [9] M. Alam, K. Kumar, J. Srivastava, and V. Dutta, "A Study on DC Microgrids Voltages based on Photovoltaic and Fuel Cell Power Generators," 2018.
- [10] H. B. Tambunan and P. A. A. Pramana, "Studi dan Pengembangan Konsep DC Microgrid," 2021.
- [11] M. A. Chowdhury, S. Mekhilef, M. Mubin, dan F. M. Mueeen, "Energy Management of a DC Microgrid Composed of Photovoltaic/Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Systems," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, pp. 1–13, 2021.
- [12] A. Rahimi dan H. R. Baghaee, "DC Microgrid based on Battery, Photovoltaic, and Fuel Cells; Design and Control," *arXiv preprint, arXiv:2212.14803*, 2022.
- [13] M. Saleh, A. H. Elnaggar, dan A. A. M. Elbaset, "Comparative Analysis and Implementation of DC Microgrid Systems Versus AC Microgrid Performance," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024. doi: 10.3389/fenrg.2024.1370547
- [14] J. P. Chandak et al., "Seamless transition of microgrid between islanded and grid-connected mode of operation," *IET Energy Systems Integration*, 2021.
- [15] M. Y. A. Khan, "A unified distributed hierarchal control of a microgrid operating in islanded and grid connected modes," *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 10, pp. 2489–2511, Mar. 2023.
- [16] M. I. M. Marei, A. A. El-Sattar, and M. Mokhtar, "A control scheme for islanded and grid-connected DC microgrids," in *Proc. MEPCON 2017 (2018 IEEE Conf.)*, 2017.
- [17] B. Ramadhani, "Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dos & Don'ts," 2018.
- [18] "Installation, Operation and Maintenance Manual SSC Morningstar," 2023. [Online]. Available: www.morningstarcorp.com
- [19] "LifePO4 Lithium Iron Phosphate Battery User Manual," 2023.
- [20] H. B. Tambunan and P. A. A. Pramana, "Studi Dampak Penetrasi PLTS Pada Jaringan Distribusi PLN," 2022.