



Peningkatan Kinerja *Microgrid* Bangunan Kampus dengan Simulasi Multi Skenario dan Analisis Sensitivitas

Justin Pradipta ^{a*}, Koko Friansa ^{a,b}, Irsyad Nashirul Haq ^a, Edi Leksono ^a, Hanafi Kusumayudha ^a, Salsabila ^a, Meditya Wasesa ^c

^a Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung

^b Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

^c Sekolah Bisnis dan Manajemen, Institut Teknologi Bandung, Bandung

* Corresponding E-mail: jpradipta@tf.itb.ac.id

Received 4th May 2021
Accepted 27th May 2021
Published 12th July 2021

Open Access

DOI: 10.35472/jsat.v5i2.458

Abstract: This research evaluates the performance of smart microgrids to increase the availability of electricity supply and renewable fraction (RF). The evaluation is done by energy analysis and multi-scenario simulation. Three scenarios are simulated: basic, test, and recommended. The test scenarios consist of system capacity test, component replacement, and sensitivity analysis. The basic scenario simulation shows that the availability of electricity supply for one year profile is fulfilled, with a RF of 30.5%; the cost of energy (CoE) Rp2,019/kWh; and battery autonomy (BA) of 11.1 hours. The analysis yields several recommendations, namely replacing battery components and PV modules, adding battery capacity, and setting the battery state of charge (SoC) limits to increase the RF. The results of the recommendation scenario simulation show that it is succeeded in increasing the availability of electricity supply and reaching the target with a BA value of 37 hours and an RF value of 46.4% at the start of the project cycle period; and BA of 25.5 hours and RF of 29.1% at the end of 25th year, with CoE of Rp6,448/kWh. To obtain maximum RF the sensitivity analysis suggest for lead-acid battery operation to keep the SoC within 0-20%, whereas for Li-Ion within 0-25%.

Keywords: Smart microgrid, energy analysis, economic analysis, renewable fraction

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi kinerja *microgrid* cerdas dengan tujuan untuk meningkatkan ketersediaan pasokan listrik dan *renewable fraction* (RF). Evaluasi dilakukan dengan simulasi multi skenario yang mencakup produksi dan konsumsi energi. Simulasi dibagi tiga, yaitu skenario dasar, skenario uji, dan skenario rekomendasi. Skenario uji terdiri dari uji kapasitas sistem, penggantian komponen, dan analisis sensitivitas. Didapatkan dari skenario dasar bahwa ketersediaan pasokan listrik selama setahun telah terpenuhi, dengan RF 30,5%; *cost of energy* (CoE) Rp2.019/kWh; dan waktu otonomi baterai (WOB) 11,1 jam. Dari hasil analisis didapatkan beberapa rekomendasi berupa penggantian komponen baterai dan modul surya, penambahan kapasitas baterai, dan pengaturan batas *state of charge* (SoC) pada baterai untuk meningkatkan RF. Skenario rekomendasi tersebut berhasil meningkatkan ketersediaan pasokan listrik dan mencapai target dengan nilai WOB sebesar 37 jam dan RF sebesar 46,4% pada awal siklus hidup proyek; serta WOB sebesar 25,5 jam dan RF sebesar 29,1% pada akhir tahun ke 25, dengan CoE sebesar Rp6.448/kWh. Analisis sensitivitas operasi baterai *lead-acid* menunjukkan bahwa untuk mendapatkan RF maksimal rentang pengaturan SoC berada pada 0-20%, sedangkan untuk baterai *Li-Ion*, rentang SoC adalah 0-25%.

Kata Kunci : *Microgrid* cerdas, ketersediaan pasokan listrik, analisis energi, analisis keekonomian, *renewable fraction*

Pendahuluan

Dalam Rancangan Umum Energi Nasional (RUEN), pemerintah Indonesia memiliki target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 31% pada tahun 2050 [1]. Terdapat beberapa upaya dari peneliti maupun pemerintah untuk meningkatkan penggunaan EBT, salah satunya penerapan

microgrid cerdas [2]. *Microgrid* cerdas didefinisikan sebagai sistem pembangkit lokal dan beban listrik yang saling terinterkoneksi [3]. Sistem pembangkit lokal *microgrid* cerdas biasanya menggunakan sumber energi terbarukan alternatif seperti *photovoltaic* (PV) yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Salah satu fungsi sumber energi terbarukan alternatif pada *microgrid* cerdas yaitu untuk



menyediakan ketersediaan listrik alternatif ketika pasokan listrik utama padam.

Umumnya, sistem jaringan listrik (*grid*) konvensional bersifat satu arah (*unidirectional*) dan tersentralisasi. Sistem jaringan listrik konvensional mengalami rugi-rugi saat proses transmisi dan distribusinya karena letaknya jauh dari pelanggan. Pada sistem ini, satu kegagalan komponen atau bagian dari suatu sistem bisa menimbulkan efek domino gangguan pemadaman listrik dalam skala yang besar [4]. Tantangan dalam menjaga ketersediaan listrik ada pada metode penanganan gangguan/pemadaman listrik. Dalam istilah utilitas jaringan listrik, ada dua kategori gangguan listrik secara umum, yaitu gangguan rutin (gangguan keandalan) dan *major outages* (gangguan ketahanan). Keandalan pasokan listrik (*reliability*) artinya kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga kontinuitas aliran listrik kepada pelanggan [4]. Gangguan keandalan mengacu pada peristiwa pemadaman listrik secara rutin dalam wilayah yang sempit dan durasi waktu yang tidak terlalu lama, sedangkan ketahanan (*resiliency*) adalah kemampuan suatu sistem untuk bertahan dan kembali pulih dari kejadian tak terduga [5]. Gangguan ketahanan mengacu pada peristiwa pemadaman listrik yang meluas, besar-besaran (*major outage*), durasinya lama, dan terjadi maksimum satu kali per tahun.

Grid cerdas (*smart grid/intelligent grid*) diciptakan dengan mengatasi masalah pada jaringan listrik (*grid*) konvensional. Hal ini karena jaringan listrik konvensional tidak memiliki akses kontrol pada beban, sedangkan pada *grid* cerdas, informasi setiap saat mengenai beban diakuisisi oleh sensor untuk kemudian digunakan sebagai *input* sistem kontrol untuk mengoptimalkan keseimbangan pembangkitan listrik dan kebutuhan beban listrik. Istilah *microgrid* muncul dari kritik bahwa banyak rugi-rugi akibat jauhnya jarak transmisi dan distribusi antara pembangkit listrik dan beban listrik pada pelanggan. Untuk masalah tersebut solusinya adalah menciptakan sistem pembangkit listrik skala kecil yang dekat dengan pelanggan, bahkan setiap pelanggan bisa memiliki pembangkit listriknya masing-masing secara lokal [6].

Penelitian mengenai integrasi pembangkitan listrik tenaga surya ke jaringan listrik di negara berkembang serta tantangannya dilakukan oleh Nwaigwe dkk [7]. Behura dkk. merancang sistem PV *rooftop* untuk mendapatkan efisiensi tinggi di Vellore, India yang memiliki lintang 12° Utara, dan mendapatkan nilai *performance ratio* 0,791 [8]. Ghenai dan Bettayeb melakukan pengembangan desain optimal untuk aplikasi PLTS *grid-tied* pada bangunan kampus. Mereka

Tabel 1. Daftar simbol dan singkatan

Simbol/singkatan	Definisi
V_{nom}	Tegangan nominal satu buah baterai (V)
Q_{nom}	Kapasitas nominal satu buah baterai (Ah)
q_{min}	Soc minimal dari rangkaian baterai(%)
$L_{prim,ave}$	Rata-rata beban listrik (kWh/hari)
E_{grid}	Energi modul surya yang masuk ke grid (kWh)
P_{nom}	Energi teoritis modul surya (kWh)
G_{lobInc}	Iradiasi datang (jam)
G_{ref}	1000 W/m ²
μ_{Pmpp}	Koefisien suhu Pmpp dari modul PV
T_{array}	Suhu <i>array</i> (°C)
$T_{arrayAver}$	Suhu <i>array</i> rata-rata (°C)
E_{nonebt}	Produksi listrik non-terbarukan (kWh/tahun)
E_{beban}	Produksi listrik non-terbarukan (kWh/tahun)
A_{batt}	Waktu otonomi baterai (jam)
N_{batt}	Jumlah baterai
R_t	Total arus kas
t	Waktu arus kas
i	Tingkat suku bunga
N	Umur pakai pembangkit
t	Lama waktu proyek
i_t	Biaya investasi tahun ke-t
M_t	Biaya operasi dan perawatan tahun ke-t
e_t	Produksi listrik tahun ke-t
$C_{operating}$	biaya akumulasi tahunan dari semua biaya dan pendapatan selain biaya modal awal
$C_{ann,cap}$	Total biaya modal tahunan (Rp/tahun)
$C_{ann,tot}$	Total biaya operasi tahunan sistem (Rp/tahun)
C_{bw}	Biaya keausan baterai (Rp/kWh)
$C_{rep,batt}$	Biaya penggantian baterai (Rp)
$Q_{lifetime}$	<i>Lifetime throughput</i> dari satu baterai (kWh)
η_{rt}	Efisiensi <i>roundtrip</i> (pecahan)

menggunakan PV berkapasitas 500kW dan mendapatkan 40,4% *renewable fraction* [9]. Chedid dkk. mengusulkan metode desain optimal untuk bangunan kampus yang memiliki PLTS dan menyimpan energi berbasis baterai. Hasil menunjukkan PLTS dapat menjadi sistem *backup* menggantikan generator diesel. Dengan menggunakan PLTS biaya operasional dapat ditekan [10].

Penggunaan model dan simulasi merupakan pendekatan yang menjadi pilihan utama karena alasan kepraktisan dan finansial, selain itu, rancangan PLTS dapat dioptimalkan menggunakan pendekatan simulasi. Perhitungan modal dan biaya operasi pun dapat dimodelkan untuk membantu mengambil keputusan dalam berinvestasi dalam sistem PLTS. Beberapa penelitian menggunakan berbagai macam *software* untuk melakukan modeling seperti Matlab oleh Abdel Hady [11], dan yang lebih populer untuk desain PLTS adalah dengan menggunakan *software* PVSyst, serta

penelitian yang telah dilakukan oleh Kumar dkk. [8], dan Dey dkk. [12].

Pada penelitian ini digunakan *microgrid* cerdas dengan konfigurasi *grid-connected*, sumber energi listrik yang digunakan oleh beban berasal dari PLTS dan juga utilitas jaringan listrik sentral. *Smart Grid Architecture Model* (SGAM) yaitu sebuah standar arsitektur sistem digunakan untuk membantu merancang maupun mengevaluasi suatu jaringan listrik, kemampuan tiap komponen untuk bekerja dengan komponen lain dapat direpresentasikan [13], [14]. SGAM dapat digunakan untuk merancang sebuah *microgrid* cerdas. Sistem *microgrid* cerdas yang digunakan telah terpasang pada Bangunan CAS ITB yang memiliki fungsi utama untuk menjaga ketersediaan pasokan listrik beban *Transmission Electron Microscope* (TEM), yang merupakan fasilitas kritis. Kinerja *microgrid* cerdas dapat mempengaruhi keandalan distribusi listrik sehingga mekanismenya perlu diselidiki dengan cermat dan dievaluasi untuk memperoleh konfigurasi sistem *microgrid* cerdas yang optimal sehingga bisa memaksimalkan ketersediaan pasokan listrik dan potensi pembangkitan EBT terserap dengan maksimal.

Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *microgrid* cerdas untuk meningkatkan ketersediaan pasokan listrik dan *renewable fraction* dengan melakukan simulasi produksi dan konsumsi energi dalam uji gangguan keandalan dan ketahanan pasokan listrik. Adapun sasaran penelitian ini yaitu menguji ketersediaan pasokan listrik dari sistem *microgrid* cerdas yang terpasang di Bangunan CAS ITB untuk memenuhi profil beban dan profil gangguan listrik pada tahun 2019, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan ketersediaan pasokan listrik dan mengoptimalkan parameter keluaran *Renewable Fraction* (RF) pada sistem *microgrid cerdas* dalam jangka 25 tahun di Bangunan CAS ITB.

Kinerja Sistem Microgrid Cerdas

Terdapat beberapa kinerja sistem *microgrid* cerdas yang akan dievaluasi dari penelitian ini, yaitu: *Performance Ratio* (PR), Evaluasi Konsumsi Energi, Analisis Sensitivitas, Evaluasi Ekonomi.

a. Performance Ratio

$$PR = \frac{E_{grid}}{(P_{nom} \times \sum_{jam} (\frac{GlobInc}{Gref} \times 1 - \mu_{Pmpp}) \times (T_{array} - T_{arrayAver}))} \quad (1)$$

Performance Ratio (PR) adalah perbandingan antara energi aktual yang dihasilkan dengan energi teoritis yang dapat dihasilkan modul surya [15]. Rugi-rugi tersebut antara lain adalah rugi-rugi iradiasi, rugi-rugi termal, rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi *inverter*. PR dihitung dengan persamaan (1), dengan suhu array rata-rata pada PV ditampilkan pada persamaan (2) berikut, semakin tinggi nilai PR maka semakin rendah rugi-rugi yang dihasilkan oleh PLTS.

$$T_{arrayAver} = \frac{\sum_{jam} (GlobInc \times T_{array})}{\sum_{jam} GlobInc} \quad (2)$$

b. Evaluasi Konsumsi Energi

1) Renewable Fraction

Renewable fraction adalah fraksi dari energi yang dikirim ke beban yang berasal dari pembangkit energi terbarukan [16], semakin tinggi nilai RF maka semakin banyak energi yang dihasilkan dari pembangkit energi terbarukan. RF didefinisikan dengan persamaan (3) berikut.

$$RF = \left(1 - \frac{E_{nonebt}}{E_{beban}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

2) Waktu otonomi baterai (WOB)

Didefinisikan sebagai rasio antara kapasitas total baterai yang bisa digunakan dengan beban listrik yang ditanggung. Besaran ini menunjukkan waktu pakai baterai dari keadaan penuh hingga mencapai *state of charge* (SoC) minimum ketika beban listrik tidak dipasok oleh utilitas jaringan listrik (dalam keadaan gangguan pemadaman listrik) [17]. Persamaan WOB ditampilkan pada persamaan (4) berikut.

$$A_{batt} = \frac{N_{batt} \times V_{nom} \times Q_{nom} \times \left(1 - \frac{q_{min}}{100}\right) \times 24 \frac{jam}{hari}}{L_{prim,ave} \times \left(1000 \frac{Wh}{kWh}\right)} \quad (4)$$

c. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas merupakan metode untuk mengetahui efek dari perubahan satu atau lebih parameter *input*, terhadap suatu parameter *output*. Perangkat lunak HOMER-Pro [17] dapat menganalisis banyak nilai sensitif sekaligus untuk menemukan hasil ekonomis terbaik [18].

d. Evaluasi Ekonomi

Terdapat 5 besaran yang akan digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi sistem dari sisi ekonomi. Besaran-besaran tersebut adalah *Net Present Cost (NPC)*, *Cost of Energy (CoE)*, *Initial Capital Cost (ICC)*, *Operating Cost (OC)*, dan biaya keausan baterai (*Battery Wear Cost*).

1) Net Present Cost (NPC)

NPC adalah nilai sekarang dari semua biaya pemasangan dan pengoperasian komponen selama masa pakai sistem, dikurangi nilai sekarang dari semua pendapatan yang dihasilkan selama masa pakai [16]. Konfigurasi sistem pembangkit yang paling optimal adalah yang memiliki NPC yang paling kecil. NPC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$NPC = \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

2) Biaya Energi (CoE)

Biaya Energi didefinisikan sebagai biaya rata-rata per kWh produksi energi listrik yang terpakai oleh sistem [10], yang bentuk umumnya dirumuskan pada persamaan (6) sebagai berikut.

$$CoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (6)$$

3) Initial Capital Cost (ICC)

ICC merupakan biaya modal awal yang dikeluarkan untuk pengerjaan proyek *microgrid* cerdas. Biaya modal awal sistem *microgrid* cerdas mencakup seluruh komponen sistem termasuk pekerjaan sipil, biaya pemasangan, dan sambungan dan pengujian listrik. Harga setiap komponen sistem *microgrid* serta masa pakai dan efisiensinya [19].

4) Operating Cost (OC)

Operating Cost (OC) [18] merupakan biaya operasi atau akumulasi tahunan dari semua biaya dan pendapatan selain biaya modal awal. Persamaan biaya operasi ditampilkan pada persamaan (7).

$$C_{operating} = C_{ann,tot} - C_{ann,cap} \quad (7)$$

5) Biaya Keausan Baterai

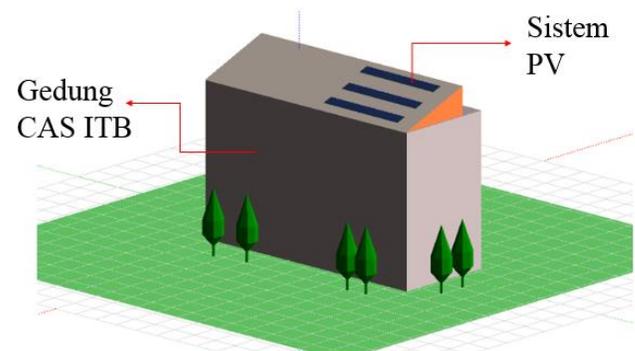
Biaya Keausan Baterai (*Battery Wear Cost*) merupakan biaya penggunaan siklus baterai karena umur baterai terbatas *lifetime throughput* akibat efek degradasi baterai [17-18]. Persamaan Biaya keausan baterai ditampilkan pada persamaan (8).

$$C_{bw} = \frac{C_{rep,batt}}{N_{batt} \times Q_{lifetime} \times \sqrt{\eta_{rt}}} \quad (8)$$

Metodologi

a. *Microgrid* Cerdas di Bangunan CAS ITB

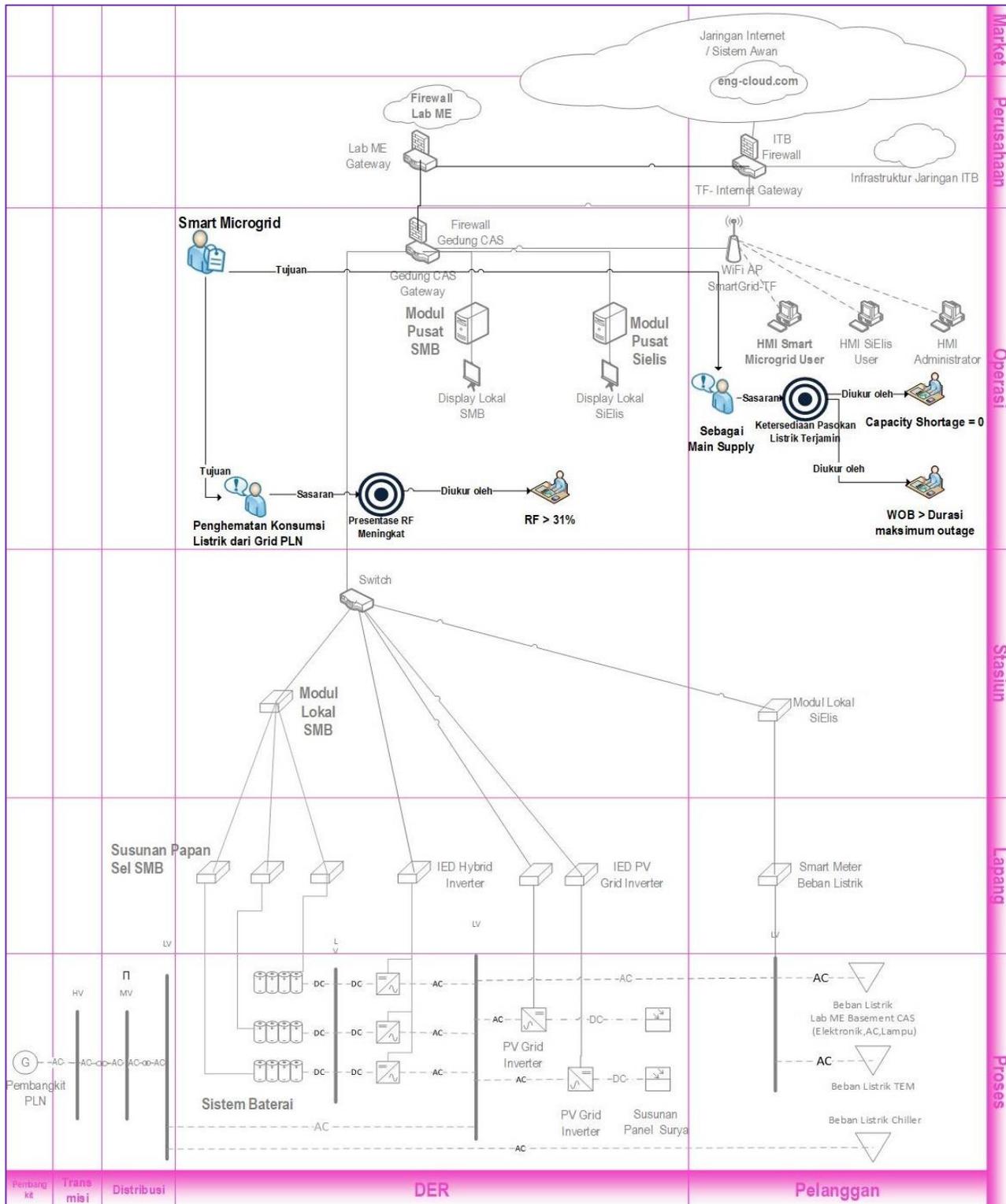
Bangunan CAS ITB telah dipasang *microgrid* cerdas yang terdiri dari PV, *Inverter*, *Hybrid Inverter*, baterai, dan beban untuk satu ruangan Laboratorium dan beban *Transmission Electron Microscopy (TEM)*). Skema sistem *microgrid* cerdas yang terdapat di Bangunan CAS ITB ditampilkan pada **Gambar 1**, sedangkan untuk spesifikasi komponen ditampilkan pada **Tabel 2**. Secara detail *microgrid* cerdas yang digunakan memiliki enam lapisan, yaitu lapisan proses, lapang, stasiun, operasi, perusahaan, dan market (Lihat **Gambar 2**). Lapisan-lapisan tersebut dikelompokkan untuk mengevaluasi komponen-komponen penyusun dan memudahkan untuk perbaikan atau *maintenance*.



Gambar 1. Ilustrasi instalasi modul surya di atap Bangunan CAS ITB

Tabel 2. Lapisan bisnis dan komponen pada *microgrid* cerdas

Lapisan Bisnis
Target RF > 31%
Capacity shortage = 0
WOB > durasi maksimum gangguan
Lapisan Komponen
PV SIM 210 Wp 48 buah, 12 seri 4 paralel
Grid-inverter Sunny Boy 5000TL 2 buah
Hybrid inverter Sunny Island 8.0H 3 buah
VRLA Nagoya LFP12100D 12V 100 Ah, 48 buah dengan 4 seri 12 paralel
Beban listrik Lab. ME basement Gedung CAS ITB dan TEM dengan rata-rata 75,25 kWh/hari dan beban puncak 11,71 kW.



Gambar 2. Microgrid cerdas pada bangunan CAS ITB

Simulasi dilakukan dalam dua tahap, pertama yaitu simulasi produksi energi menggunakan perangkat lunak PVSyst [20], kemudian *output* simulasi produksi akan dijadikan *input* untuk simulasi konsumsi dan manajemen energi menggunakan perangkat lunak Homer Grid 1.8 [17]. **Gambar 3-4** berikut merupakan skema proses simulasi produksi dan konsumsi energi dalam penelitian ini. Pada proses pemodelan produksi energi menggunakan PVSyst, data yang dibutuhkan untuk dimasukkan ke dalam sistem yaitu data orientasi dan spesifikasi PV, *Inverter* beserta data baterai. Lokasi PV yang dipasang di atap bangunan CAS memiliki letak geografis $-6,89^\circ$ Lintang Utara dan $107,61^\circ$ Bujur Timur. Pemasangan PV memiliki azimut -90° (Timur) dan kemiringan

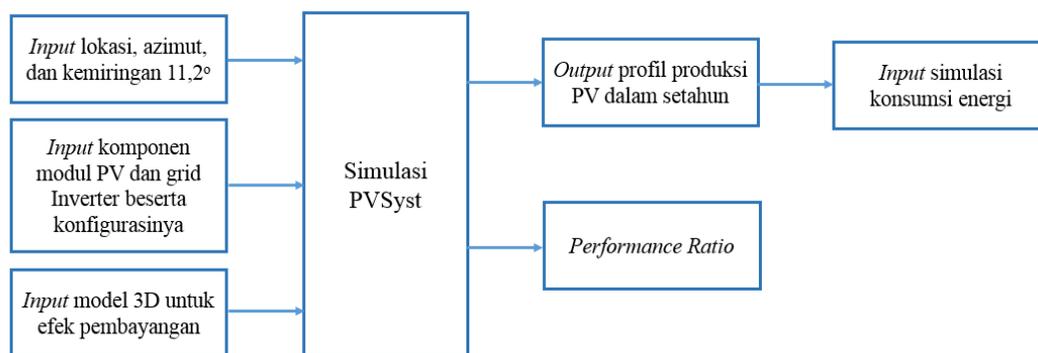
$11,2^\circ$. Spesifikasi komponen yang dimasukkan ke dalam PVSyst sesuai dengan data yang ditampilkan pada **Tabel 2**.

c. Simulasi Skenario Uji

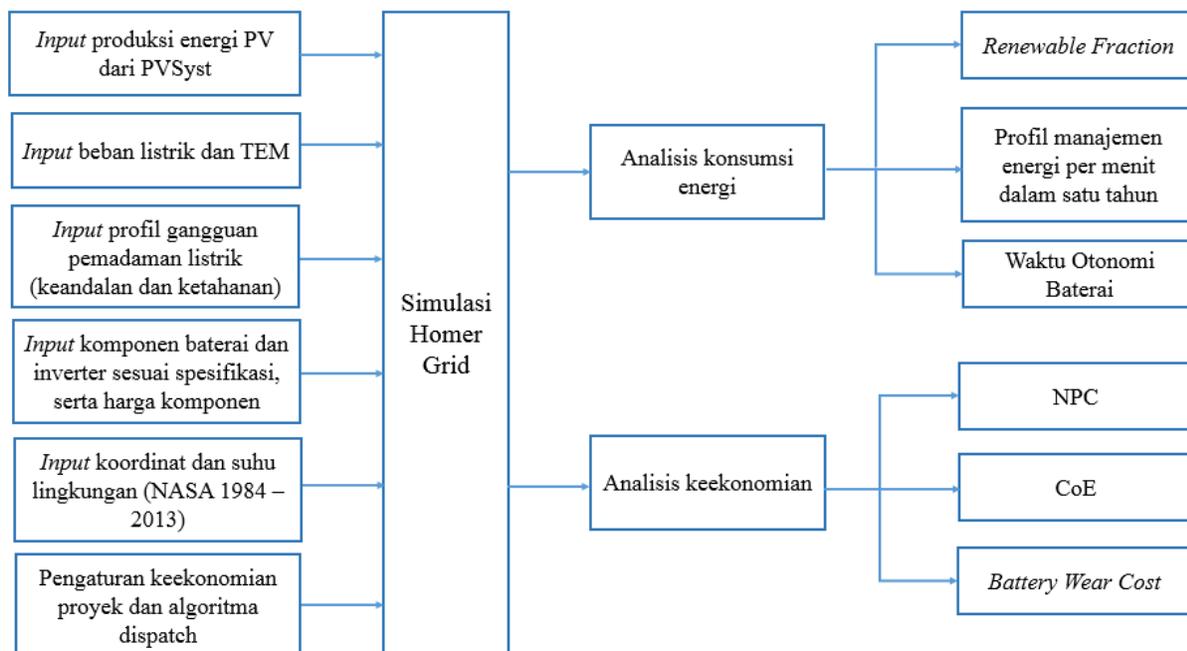
Pada perangkat lunak Homer Grid akan disimulasikan skenario untuk menguji keandalan dan ketahanan sistem. Skenario-skenario yang akan diujikan adalah sebagai berikut:

1) Skenario Uji 1 (Uji Kapasitas Sistem)

Skenario ini akan menguji kapasitas sistem apakah cukup atau tidak apabila dua perubahan diterapkan, yaitu menaikkan durasi *major outage* menjadi 1 hari dan mempertimbangkan efek *multiyear* dengan parameter



Gambar 3. Skema proses pemodelan produksi energi



Gambar 4. Skema proses pemodelan konsumsi energi

masuk degradasi modul PV sebesar 0,5% per tahun [6] dan kenaikan beban sebesar 1,57% setiap tahunnya dalam jangka waktu 25 tahun.

2) Skenario Uji 2 (Perubahan Komponen)

Pada skenario ini, baterai VRLA sistem yang terpasang akan digantikan dengan 3 jenis baterai Li-ion sebagai pembanding. Ketiga jenis baterai tersebut adalah LGChem RESU 3.3, LGChem RESU 6.4, dan LGChem RESU 10H 9.8. Modul surya juga akan digantikan dengan tipe polycrystalline Canadian Solar CS6U-330Wp.

3) Skenario Uji 3 (Analisis Sensitivitas)

Frekuensi Pemadaman Listrik dan Pengaturan SoC Baterai Pada skenario ini divariasikan frekuensi pemadaman listrik dan pengaturan minimum SoC serta battery outage reserve pada baterai untuk menghasilkan RF yang maksimal.

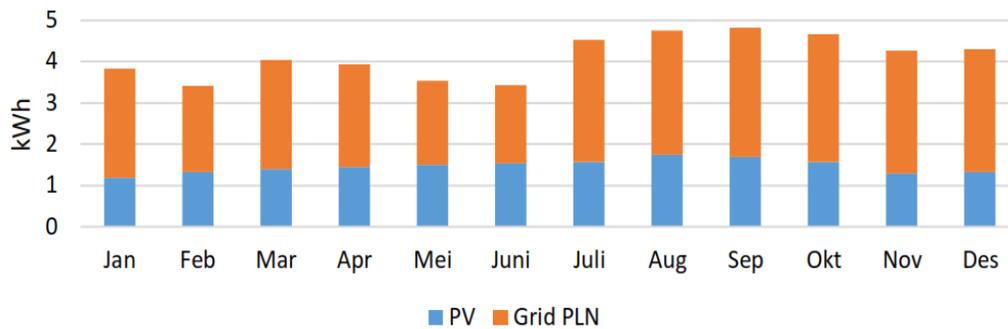
4) Simulasi Skenario Rekomendasi

Setelah mendapatkan hasil dari skenario uji, dirumuskan beberapa rekomendasi sistem yang kemudian akan disimulasikan dan dibandingkan hasilnya dengan skenario uji.

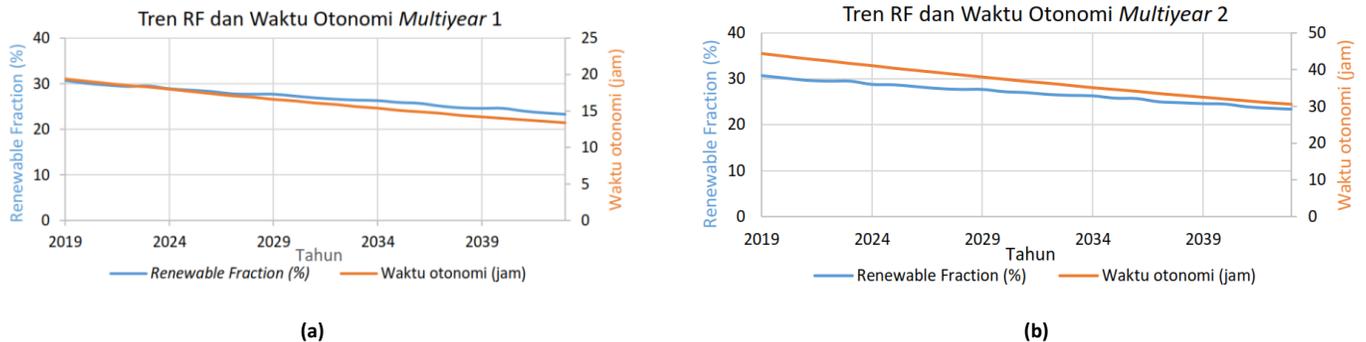
Hasil Simulasi dan Pembahasan

a. Analisis Simulasi Skenario Dasar

Dari hasil simulasi PVSyst didapat PR (performance ratio) 0,77 dan energi yang dialirkan ke grid adalah 12.299 kWh per tahun. Sedangkan untuk rugi-rugi sistem yang biasanya disebabkan oleh inverter, kabel, dll yaitu sebesar 0,13 kWh/kWp/hari dan rugi-rugi pengumpulan yang disebabkan oleh PV array dari sistem yaitu sebesar 0,87 kWh/kWp/hari. Didapatkan dari Homer Grid, produksi energi untuk beban yang dihasilkan oleh modul surya adalah 40,2 % dan 59,8 % dari grid PLN. Didapat RF sebesar 30,5 % dan WOB sebesar 11,1 jam, nilai ini belum memenuhi target desain. Dalam setahun, sistem microgrid cerdas menghasilkan kelebihan energi yang terbuang dari PV sebesar 4.382 kWh/tahun. Pada skenario 0 ini sistem mampu untuk menangani pemadaman rutin dan major outage dalam setahun namun gagal mencapai target RF & WOB. Sistem skenario 0 menghasilkan CoE Rp2.019/kWh dan biaya keausan baterai Rp74.376/kWh dengan masa pakai baterai 5,56 tahun.



Gambar 5. Grafik produksi energi oleh sistem PV dan grid PLN yang terpasang



Gambar 6. Grafik renewable fraction dan waktu otonomi (a) Multiyear 1, (b) Multiyear 2

b. Analisis Simulasi Skenario Uji 1

Hasil simulasi Homer Grid digunakan untuk menganalisis penggunaan energi dari modul surya terhadap beban. Pada sistem skenario dasar hasil simulasi untuk pasokan energinya tertera pada **Gambar 5**. Total beban yang ditanggung sebesar 27.468 kWh/tahun, dengan persentase produksi energi sekitar 40,2 % dihasilkan oleh modul surya dan 59,8 % dari *grid* PLN.

Hasil dari simulasi PVSyst menunjukkan RF sebesar 30,5 %, sehingga nilai ini belum mencapai target desain yaitu sebesar 31%. Diperlukan skenario uji untuk meningkatkan nilai RF. Dalam setahun, sistem *microgrid* cerdas menghasilkan kelebihan energi sebesar 4.382 kWh/tahun yang terbuang. Energi yang terbuang ini dihasilkan karena baterai tidak mampu menyimpan kelebihan pasokan energi dari PV. Hal ini dijelaskan dalam analisis keekonomian diakibatkan mahalnnya *battery wear cost*.

Hasil simulasi Homer Grid menunjukkan bahwa sistem yang terpasang gagal menangani gangguan kasus ketahanan selama 24 jam. Baterai pada sistem tersebut tidak cukup untuk menyuplai beban selama gangguan sehingga diperlukan modifikasi komponen sistem dengan menambah 36 baterai. Ketika ditambah dengan efek *multiyear* ternyata sistem tidak bisa memenuhi kebutuhan beban listrik dalam jangka waktu 25 tahun. Hal ini disebabkan karena kenaikan beban listrik setiap tahunnya akan membuat beban listrik yang harus ditanggung sistem saat terjadi mati listrik bertambah setiap tahunnya. Dibutuhkan total 192 baterai agar dapat beroperasi. Untuk skenario dasar ditambah dengan efek *multiyear*, sistem membutuhkan tambahan 36 baterai (Lihat **Gambar 6**).

c. Analisis Simulasi Skenario Uji 2

Dari hasil simulasi ketiga baterai di Homer Grid pada **Tabel 3**, baterai LG Chem RESU 10H 9.8 dipilih sebagai yang terbaik karena menghasilkan *renewable fraction* tertinggi yaitu sebesar 44,1 % dan CoE terendah yaitu Rp 3.604/kWh. Apabila dibandingkan dengan baterai VRLA, penggantian baterai Li-Ion berpengaruh besar terhadap RF dan juga biaya keausan baterai berkurang menjadi Rp3.518 serta masa pakai baterai yang lebih tahan lama.

Perbandingan hasil simulasi ketika modul surya digantikan dengan tipe CS6U-330 terhadap skenario 0 ditunjukkan pada **Tabel 4**. Terlihat bahwa *performance ratio*, *renewable fraction* meningkat dan rugi-rugi menurun. PV tipe ini lebih memiliki performa yang lebih baik.

Tabel 3. Hasil Simulasi Baterai Li-Ion

Parameter analisis energi	Canadian Solar CS6U-330	SIM 210
Performance ratio	0,824	0,77
Efisiensi PV pada STC (%)	16,99	16,18
Rugi-Rugi temperatur (%)	-7,8	-8,4
Rugi-Rugi sistem (kWh/kWp/Hari)	0,13	0,13
Rugi-Rugi Pengumpulan (kWh/kWp/Hari)	0,6	0,87
Renewable Fraction (%)	31,4	30,5

Tabel 4. Data Keekonomian Skenario Rekomendasi

Kriteria	Analisis ekonomi
NPC	Rp4.400.879.000
Biaya Awal	Rp1.961.837.530
COE (per kWh)	Rp6.448
Biaya Penggantian Baterai	Rp990.688.591
Biaya Operasi dan Perawatan	Rp117.656.000
Penghematan Tahunan	Rp9.890.160

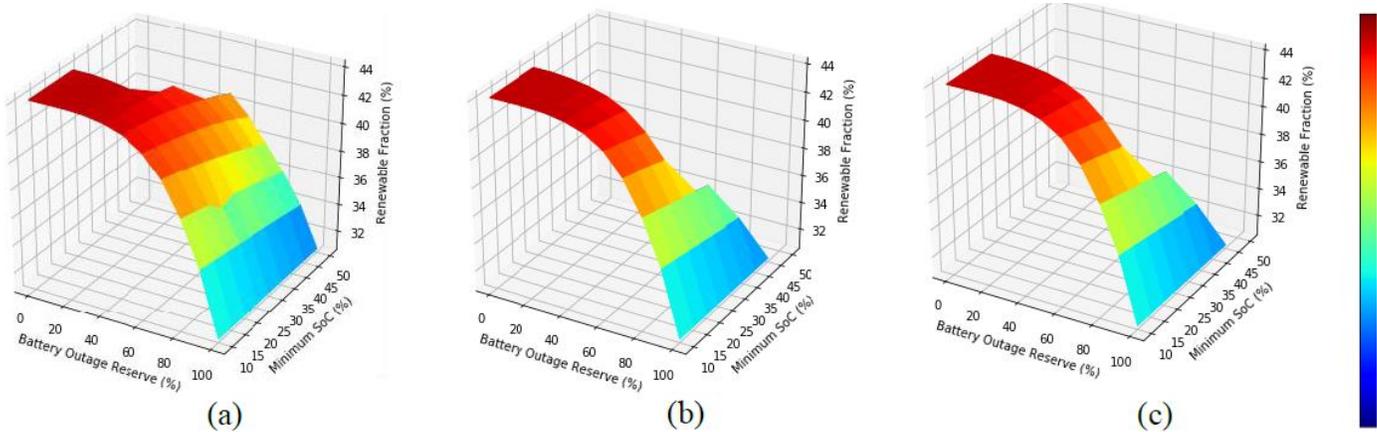
d. Analisis Simulasi Skenario Uji 3

Hasil analisis sensitivitas baterai VRLA menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh pengaturan SoC terhadap *renewable fraction*. Rentang pengaturan SoC harus berada antara 0-40 % agar sistem dapat dioperasikan, namun untuk mendapatkan RF yang maksimal rentang pengaturan SoC harus berada pada 0-20% (*hybrid inverter* juga merekomendasikan minimum SoC 20%).

Berbeda halnya dengan baterai Li-Ion, pengaturan SoC sangat berpengaruh terhadap *renewable fraction* sistem seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. Pada baterai Li-ion ini rentang minimum SoC yang disarankan untuk mendapatkan nilai RF tertinggi adalah 0-25 % dan 0-20 % untuk *battery outage reserve*, nilai tersebut berlaku di semua rentang frekuensi pemadaman listrik.

e. Analisis Simulasi Skenario Rekomendasi

Dengan dilakukannya simulasi dengan skenario uji, maka didapatkan beberapa rekomendasi untuk perbaikan maupun saran penggunaan sistem *microgrid* cerdas. Telah disimulasikan secara keseluruhan rekomendasi yang akan diterapkan. Pada sisi energi hasilnya RF sistem rekomendasi selalu lebih tinggi daripada RF sistem yang terpasang dengan selisih 6-15% yang menurun setiap tahunnya.



Gbr. 7. Analisis sensitivitas Li-Ion untuk frekuensi pemadaman listrik : (a) 20 kali/tahun ; (b) 40 kali/tahun ; (c) 80 kali/tahun

Baik baterai VRLA ataupun Li-ion, hingga tahun ke-25 WOB-nya masih lebih dari 24 jam sehingga masih memenuhi target desain. WOB VRLA lebih tinggi daripada WOB Li-Ion karena kapasitas VRLA yang lebih tinggi (230,4 kWh *nominal capacity*) daripada kapasitas Li-Ion (156,8 kWh *nominal capacity*). Selain sisi energi, tertera analisis ekonomi dari sistem rekomendasi pada **Tabel 4**.

Kesimpulan

Sistem *microgrid* cerdas yang terpasang di Bangunan CAS ITB (sistem skenario dasar) berhasil memenuhi ketersediaan pasokan listrik selama setahun menggunakan profil beban dan gangguan tahun 2019 dengan CoE Rp2.019/kWh, namun gagal memenuhi target desain dengan RF 30,5 % dan WOB 11,1 jam.

Pada skenario 1, untuk memenuhi penambahan efek *multiyear* dan gangguan ketahanan 1 hari dibutuhkan sejumlah 192 baterai VRLA Nagoya LFP12100D dengan total kapasitas nominal 230,4 kWh. Pada skenario 2, didapatkan peningkatan RF sebesar 0,9% pada penggantian PV Canadian Solar CS6U-330 dan peningkatan RF sebesar 13,6% pada penggantian baterai Li-Ion LGChem RESU 10H 9.8. Pada skenario 3 dengan baterai Li-ion, didapat nilai untuk memaksimalkan *renewable fraction* yaitu minimum SoC pada rentang 0-25% dan *battery outage reserve* pada rentang 0-20%.

Sistem skenario rekomendasi dengan nilai keekonomian CoE sebesar Rp6.448/kWh berhasil meningkatkan ketersediaan pasokan listrik dan mencapai target desain dengan nilai WOB sebesar 37 jam dan RF sebesar 46,4% pada awal proyek, namun mengalami penurunan setiap tahunnya sehingga

target RF tidak terpenuhi sejak tahun ke-23. Pada akhir jangka waktu proyek selama 25 tahun, didapatkan nilai WOB sebesar 25,5 jam dan RF sebesar 29,1%.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Program Penelitian ITB, Program Hibah Pemerintah Provinsi Jawa Barat, dan Penelitian Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*. Presiden Republik Indonesia, 2017.
- [2] J. Wang, B. M. Cisse, D. Brown, dan A. Crabb, "Development of a microgrid control system for a solar-plus-battery microgrid to support a critical facility," Okt 2017, doi: 10.1109/ISGT.2017.8086060.
- [3] "Smart Microgrids: Lessons from Campus Microgrid Design and Implementat." <https://www.routledge.com/Smart-Microgrids-Lessons-from-Campus-Microgrid-Design-and-Implementation/Farhangi/p/book/9780367574512> (diakses Mar 09, 2021).
- [4] H. Chao dan R. J. Ringlee, "Analytical challenges in reliability and resiliency modeling," Agu 2018, doi: 10.1109/PMAPS.2018.8440230.
- [5] D. E. Alexander, "Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, no. 11, hal. 2707–2716, 2013, doi: 10.5194/nhess-13-2707-2013.
- [6] D. C. Jordan, S. R. Kurtz, K. VanSant, dan J. Newmiller, "Compendium of photovoltaic degradation rates," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 24, no. 7, hal. 978–989, Jul 2016, doi: 10.1002/pip.2744.
- [7] K. N. Nwaigwe, P. Mutabilwa, dan E. Dintwa, "An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, hal. 629–633, Des 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.07.002.
- [8] A. Kumar Behura, A. Kumar, D. Kumar Rajak, C. I. Pruncu, dan L.

- Lamberti, "Towards better performances for a novel rooftop solar PV system," *Sol. Energy*, vol. 216, hal. 518–529, Mar 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.01.045.
- [9] C. Ghenai dan M. Bettayeb, "Grid-Tied Solar PV/Fuel Cell Hybrid Power System for University Building," in *Energy Procedia*, Feb 2019, vol. 159, hal. 96–103, doi: 10.1016/j.egypro.2018.12.025.
- [10] R. Chedid, A. Sawwas, dan D. Fares, "Optimal design of a university campus micro-grid operating under unreliable grid considering PV and battery storage," *Energy*, vol. 200, hal. 117510, Jun 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117510.
- [11] R. AbdelHady, "Modeling and simulation of a micro grid-connected solar PV system," *Water Sci.*, vol. 31, no. 1, hal. 1–10, Apr 2017, doi: 10.1016/j.wsj.2017.04.001.
- [12] D. Dey dan B. Subudhi, "Design, simulation and economic evaluation of 90 kW grid connected Photovoltaic system," *Energy Reports*, vol. 6, hal. 1778–1787, Nov 2020, doi: 10.1016/j.egypro.2020.04.027.
- [13] I. N. Haq, "Pengembangan Model Arsitektur Sistem Manajemen Baterai Cerdas Untuk Pemantauan dan Peningkatan Kondisi Operasi Penyimpan Energi," 2019.
- [14] M. UsLAR *et al.*, "Applying the Smart Grid Architecture Model for Designing and Validating System-of-Systems in the Power and Energy Domain: A European Perspective," *Energies*, vol. 12, no. 2, hal. 258, Jan 2019, doi: 10.3390/en12020258.
- [15] IEC, "IEC 61724-1:2017 | Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring." Diakses: Mar 09, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://webstore.iec.ch/publication/33622>.
- [16] B. Kirpes, P. Danner, R. Basmadjian, H. de Meer, dan C. Becker, "E-Mobility Systems Architecture: a model-based framework for managing complexity and interoperability," *Energy Informatics*, vol. 2, no. 1, hal. 1–31, Des 2019, doi: 10.1186/s42162-019-0072-4.
- [17] Homer Energy, "HOMER Grid 1.8." <https://www.homerenergy.com/products/grid/docs/latest/index.html> (diakses Mar 09, 2021).
- [18] R. L. Dash, L. Behera, B. Mohanty and P. Kumar Hota, "Cost and sensitivity analysis of a microgrid using HOMER-Pro software in both grid connected and standalone mode," *2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, 2018
- [19] Ali M. Eltamaly, Mohamed A. Mohamed, Chapter 8 - Optimal Sizing and Designing of Hybrid Renewable Energy Systems in Smart Grid Applications, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Elsevier, 2018.
- [20] Ashok Kumar L., Indragandhi V., dan Uma Maheswari Y., "PVSYST," in *Software Tools for the Simulation of Electrical Systems*, Elsevier, 2020, hal. 349–392.