

Pemodelan Manajemen Energi *Microgrid* pada Sistem Bangunan Cerdas

(*Energy Management Modeling for Microgrid System in a Smart Building*)

FX Nugroho Soelami^{1*}, Edi Leksono¹, Irsyad Nashirul Haq¹, Justin Pradipta¹, Putu Handre Kertha Utama¹, Aretha Fieradiella Pahrevi¹, Faizatu Zahrah Rahmaniah¹, Meditya Wasesa²

Abstract—From the electricity system point of view, smart buildings can be seen as an integration of a microgrid electricity network that connects solar PV, storage system, and building load distribution. The operation condition of the microgrid needs to be evaluated and optimized to obtain efficient and reliable performance. This contribution presents an energy management modeling for the microgrid optimization process in a smart building system. The energy sources connected to the microgrid are solar PV, battery storage system, and the PLN (utility) grid. Combinations of load scenarios are evaluated, which consists of building a lighting system, water pump, dan HVAC system. The optimization goal is to find the optimal estimation of Self Consumption (SC) and Self Sufficiency (SS) values. A simulation result before the optimization shows that the system is operating with SC of 63.2% and SS of 96.32%. After the optimization, the values become SC = 84.68% and SS = 83.27%. Therefore, the amount of energy sourced from the Solar PV system is increased and the microgrid is working more optimally.

Intisari—Dari sudut pandang sistem kelistrikan, sistem bangunan pintar dapat dilihat sebagai integrasi jaringan listrik *microgrid* yang menghubungkan sistem PLTS, sistem penyimpanan energi, dan distribusi beban listrik pada bangunan. Kondisi operasi *microgrid* perlu dievaluasi dan dioptimasi agar dapat mencapai kinerja yang andal, tetapi tetap efisien. Makalah ini mengembangkan pemodelan manajemen energi untuk optimasi *microgrid* pada sistem bangunan cerdas. Sumber daya yang terhubung pada *microgrid* terdiri atas sistem PLTS, sistem baterai, dan listrik dari jaringan publik. Dilakukan skenario kombinasi beban listrik yang terdiri atas beban pencahayaan, beban pompa air, dan beban pendinginan bangunan. Optimasi dilakukan berdasarkan estimasi *Self Consumption* (SC) dan *Self Sufficiency* (SS) antara daya yang dihasilkan sistem PLTS dan kebutuhan beban yang bervariasi. Dari simulasi sebelum dilakukan optimasi diperoleh hasil yaitu persentase SC sebesar 63,2% dan persentase SS sebesar 96,32%. Setelah dilakukan optimasi manajemen energi, persentase sistem SC menjadi 84,68% dan SS menjadi 83,27%. Dari hasil optimasi tersebut, terlihat bahwa banyaknya energi yang dapat dimanfaatkan dari sistem PLTS menjadi meningkat dan *microgrid* bekerja lebih optimal.

Kata Kunci—*Microgrid*, Bangunan Cerdas, *Self Consumption*, *Self Sufficiency*, Manajemen Energi.

I. PENDAHULUAN

Berkembang pesatnya teknologi dan pertumbuhan kota meningkatkan konsumsi energi pada bangunan, terutama listrik. Pada saat yang sama, pemanasan global dan kebijakan reduksi emisi CO₂ di seluruh dunia memaksa transisi teknologi dari bahan bakar fosil ke sumber energi terbarukan [1]. Berdasarkan kebijakan tersebut, penggunaan sumber energi terbarukan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah salah satu cara yang paling berkontribusi dalam mengurangi konsumsi energi pada bangunan, sehingga sistem PLTS dapat menjadi komponen kunci dalam menyuplai kebutuhan energi listrik di bangunan [2]-[4].

Daya yang dihasilkan (PLTS) bersifat intermiten karena bergantung pada kondisi lingkungan. Sementara itu, kebutuhan listrik untuk menyuplai pada PLTS dapat muncul setiap saat, sehingga PLTS perlu diintegrasikan dengan jaringan listrik utama (*main grid*) yang disediakan oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan sistem penyimpanan energi agar dapat beroperasi baik secara *on grid* ataupun *off grid* [5]. Integrasi berbagai sistem tersebut dalam skala kecil baik biasa dikenal dengan istilah *microgrid*.

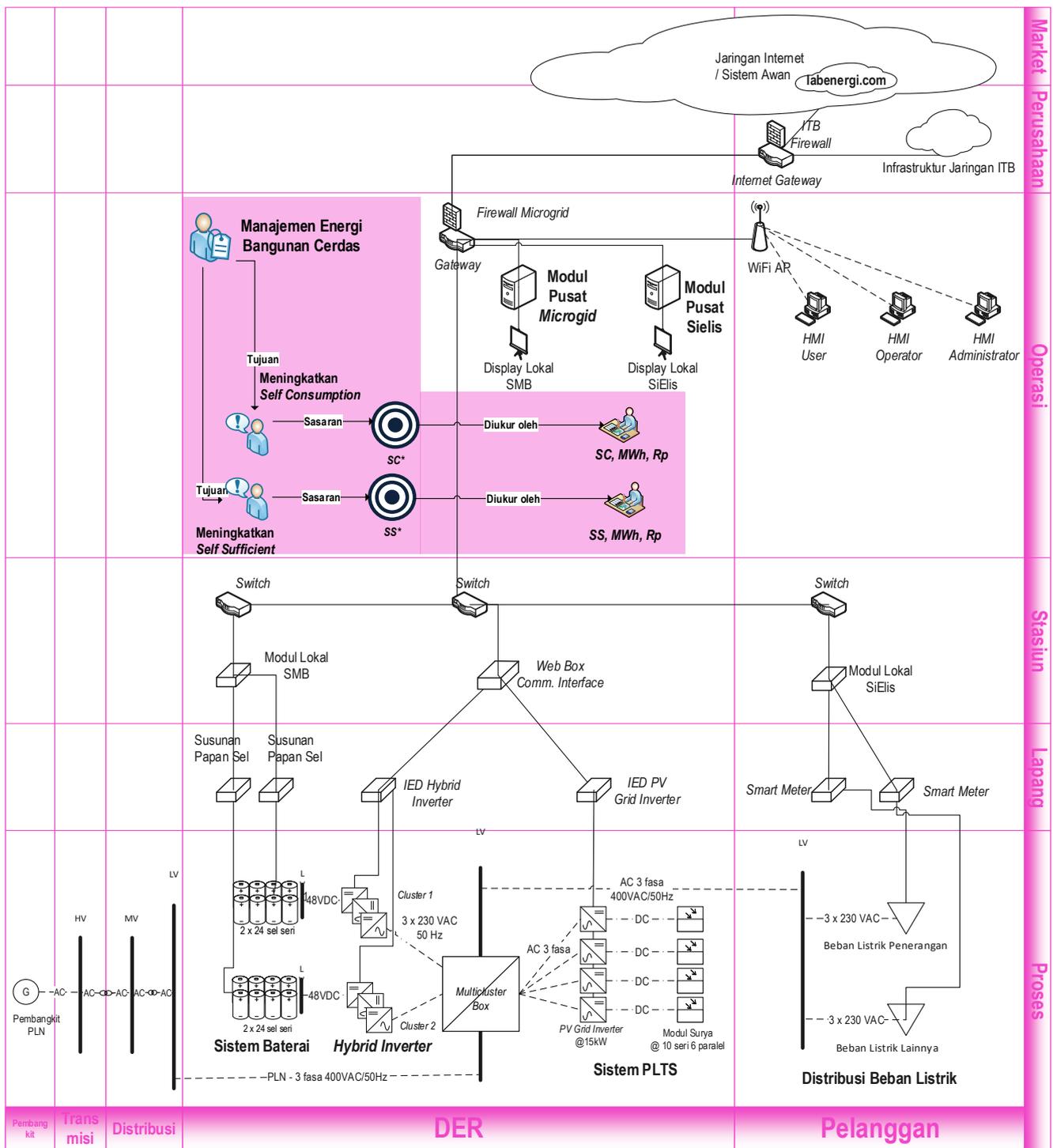
Pemanfaatan jaringan listrik di masa depan harus memiliki kemampuan yang “*smart*” dalam menjaga kondisi operasi jaringan listrik. Sebuah “*smart grid*” atau jaringan listrik cerdas dapat menyatukan berbagai sumber energi, berbagai *platform* interkoneksi antarmuka elektronik daya, sistem manajemen energi, sistem kontrol, dan antarmuka mesin manusia [6]. Salah satu metodologi dalam mengembangkan arsitektur jaringan listrik cerdas adalah *Smart Grid Architectural Model* (SGAM) yang dikeluarkan oleh CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group [7].

SGAM adalah model yang dapat digunakan untuk merancang atau mengevaluasi arsitektur jaringan listrik cerdas. SGAM terdiri atas lapisan interoperabilitas seperti lapisan komponen, fungsional, komunikasi, informasi, dan lapisan bisnis yang dapat saling berinteraksi satu sama lainnya. Implementasi skala kecil jaringan listrik cerdas disebut juga sebagai *smart microgrid*. Salah satu implementasi dan evaluasi sistem komunikasi data pada sistem *smart microgrid* berbasis *internet of things* (IoT) [8].

Dalam proses integrasi komponen sistem, *smart microgrid* perlu dirancang dengan teliti supaya sistem bekerja dengan efisien. Efisiensi sistem tersebut dinilai dari dua parameter, yaitu (1) *self consumption* (SC) dan (2) *self sufficiency* (SS) [9]-[11]. SC menunjukkan banyaknya energi yang dapat dimanfaatkan oleh beban lokal dari total energi yang dihasilkan

¹ Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, (e-mail: *nugroho@tf.itb.ac.id)

² Sekolah Bisnis dan Manajemen, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132



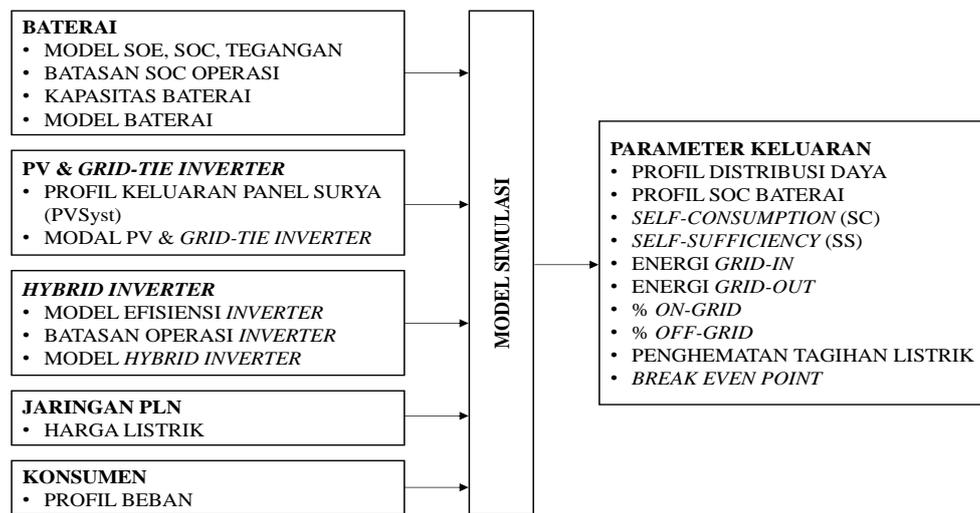
Gbr. 1 Microgrid pada sistem bangunan cerdas.

oleh PLTS, sedangkan parameter SS menyatakan persentase kebutuhan beban yang dapat dipenuhi tanpa disuplai oleh jaringan PLN.

Implementasi *smart microgrid* dalam sebuah bangunan dapat menjadikan bangunan tersebut menjadi “cerdas” dalam hal pengelolaan penggunaan energi listrik di bangunan. Hal tersebut mendorong munculnya model *smart building* atau

bangunan pintar [12]. Dari sudut pandang sistem kelistrikan, bangunan pintar dapat dilihat sebagai jaringan *microgrid* yang menghubungkan PLTS, penyimpanan energi, dan beban listrik bangunan.

Referensi [13] menjelaskan optimasi manajemen energi pada *smart microgrid* berdasarkan analisis segi ekonomi dan efisiensi energi dalam penggunaan sistem penyimpanan energi.

Gbr. 2 Struktur model simulasi *microgrid*.

Penelitian dilakukan dengan mengombinasikan besaran fisis komponen sistem yang terdiri atas tipe pembangkit, ukuran pembangkit, besar beban yang dapat disuplai, dan kapasitas penyimpanan energi dari sistem baterai untuk memperoleh kondisi distribusi energi sistem yang optimal.

Referensi [14] menjelaskan tentang pembagian tipe beban yang dapat dikontrol dan tersambung ke dalam jaringan listrik cerdas. Dijelaskan bahwa metode manajemen beban merupakan sebuah cara yang efektif untuk memperoleh kinerja sistem yang lebih seimbang antara kebutuhan dan suplai pada model sistem terdistribusi.

Makalah ini mengusulkan algoritme manajemen energi untuk mengontrol sistem *smart microgrid* pada bangunan cerdas seperti pada Gbr. 1. Algoritme tersebut digunakan agar *smart microgrid* dapat menyuplai energi listrik ke beban setiap saat ketika dibutuhkan dan dapat beroperasi secara optimal dan efisien. Energi listrik tersebut bersumber dari PLTS, jaringan listrik PLN, dan sistem baterai. PLTS digunakan sebagai suplai energi utama sementara baterai dan jaringan listrik PLN sebagai sumber energi cadangan. Operasional sistem baterai harus mampu memperhitungkan setiap kondisi dari PLTS, sehingga dapat diperoleh nilai SC dan SS yang optimal.

II. PEMODELAN SISTEM *MICROGRID* PADA SISTEM BANGUNAN CERDAS

A. Sistem *Smart Microgrid*

Sistem *smart microgrid* merupakan pengembangan dari *microgrid*. Sistem ini memiliki kemampuan untuk mengatur distribusi daya listrik dari pembangkit ke beban berdasarkan informasi besaran fisis listrik melalui *Intelligent Electrical Device* (IED). Komponen sistem *smart microgrid* terdiri atas: (1) sumber energi, (2) penyimpan energi, (3) *inverter*, (4) sistem manajemen energi, (5) beban listrik, dan (6) infrastruktur komunikasi antar-komponen untuk mengoptimalkan manajemen energi.

Sistem bangunan cerdas yang menjadi objek dalam makalah ini adalah bangunan Laboratorium Teknik XIV - SBM ITB pada posisi 6,888314° lintang selatan dan 107,608395° bujur

timur. Pada bangunan ini diimplementasikan sistem kelistrikan *microgrid* seperti pada Gbr. 1, sistem *access control* berbasis RFID dan *fingerprint*, sistem informasi energi listrik (SiElis) secara terpusat, sistem pemantauan berbasis CCTV, sistem pendingin bangunan terpusat, sistem *fire alarm*, sistem *public address*, dan juga sistem *booking* ruangan secara *online*.

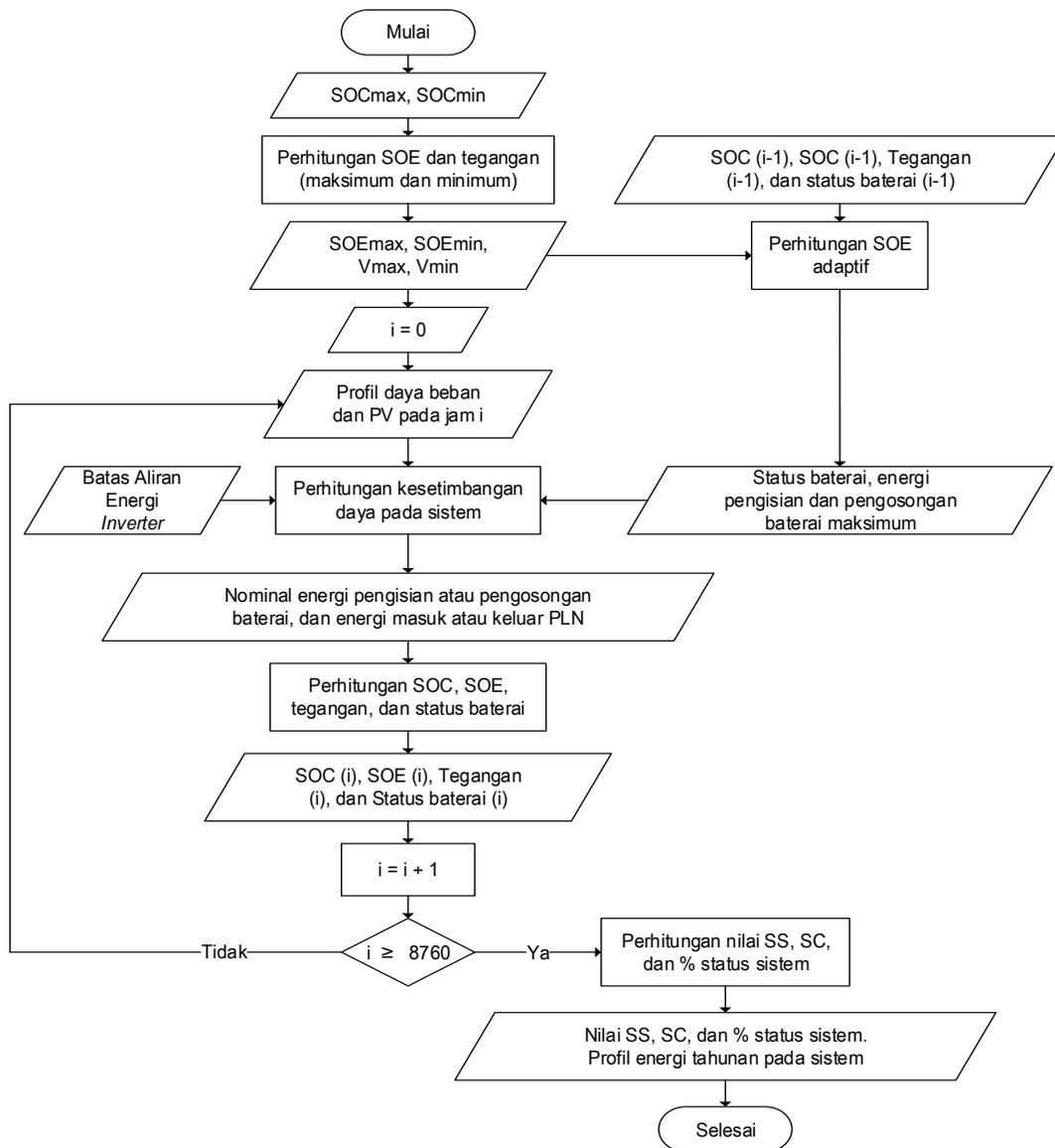
Sumber energi listrik bangunan tersebut berasal dari jaringan listrik PLN dan sumber energi terbarukan dari sistem PLTS yang terdiri atas 240 buah modul panel surya. Kapasitas masing-masing modul adalah 240 Wp dengan luas permukaan 1,26 m². Modul panel surya disusun ke dalam empat buah *sub-array* dengan jumlah enam puluh buah modul setiap *sub-array* yang disusun sepuluh seri dan enam paralel. Sementara, penyimpanan energi dari sistem *smart microgrid* ini menggunakan baterai sekunder tipe *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) dengan tegangan kerja 2 V dan kapasitas 1.000 Ah. Baterai yang digunakan berjumlah 96 buah baterai dengan susunan 24 rangkaian seri dalam empat rangkaian paralel.

Pada sistem PLTS digunakan empat buah *grid-tie inverter* (Sunny Tripower 15000TL-100), dengan masing-masing *sub-array* panel surya terhubung dengan satu buah *grid-tie inverter*. Daya maksimum sinyal AC keluaran *inverter* ini sebesar 15.000 W (230/400 VAC, 50 Hz). *Hybrid inverter* yang digunakan dalam sistem ini adalah Sunny Island 4.4M (230VAC, 50Hz) dengan rentang kapasitas daya yang dapat dialirkan sebesar 2–13 kW dan efisiensi kerja maksimumnya adalah 95% [15].

B. Pemodelan Sistem *Microgrid*

Model sistem *microgrid* diperoleh berdasarkan informasi fisis yang tersedia dan karakteristik setiap komponen sistem. Parameter masukan yang diperlukan untuk membangun model simulasi dan parameter keluaran yang diinginkan dari model simulasi diperlihatkan pada Gbr. 2.

Estimasi beban pencahayaan, beban pompa air, dan beban pendinginan pada bangunan Labtek XIV SBM ITB diperoleh berdasarkan daya yang dibutuhkan dan lama waktu operasi masing-masing beban tersebut. Sedangkan profil produksi



Gbr. 3 Algoritme pemodelan manajemen energi pada sistem bangunan cerdas.

PLTS diperoleh dengan melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst. Simulasi dilakukan berdasarkan data teknis sistem PLTS terpasang dan data iklim yang dimasukkan secara manual.

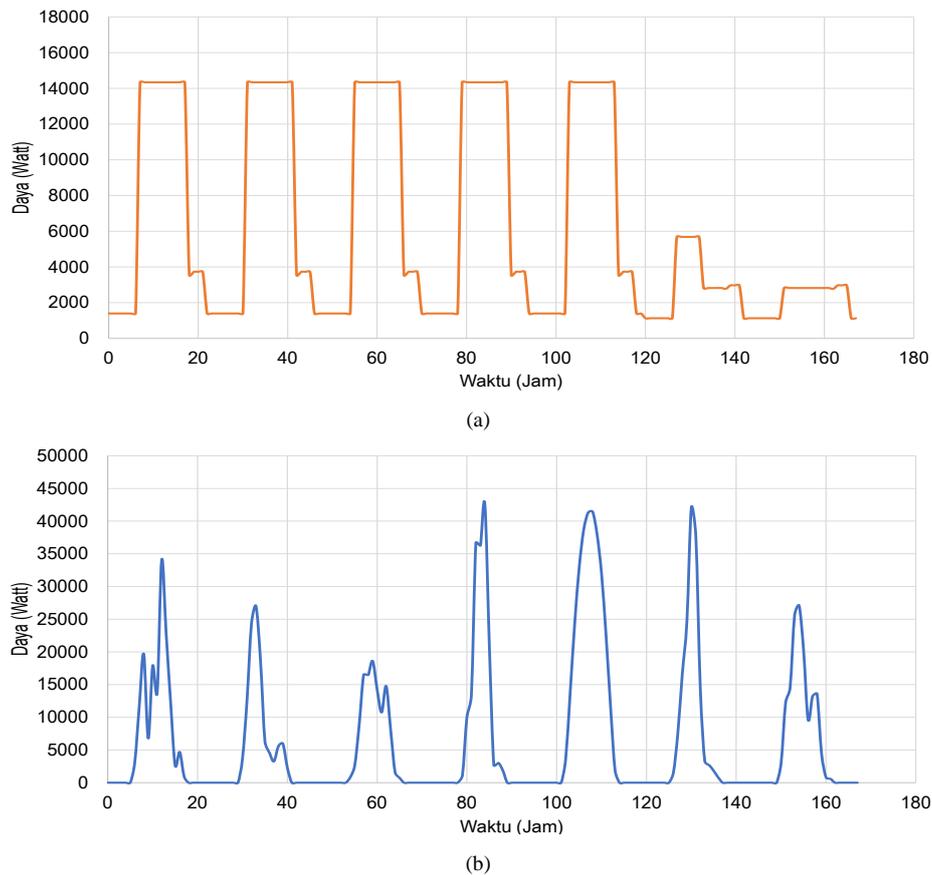
Sistem baterai sebagai penyimpan energi dapat menyimpan kelebihan produksi listrik dari panel surya dan menyuplai listrik ketika dibutuhkan oleh beban. Fenomena tersebut berhubungan dengan dua siklus penting pada baterai, yaitu: (1) siklus pengisian (*charging*) dan (2) siklus pemakaian (*discharging*).

Kondisi baterai dapat diketahui dari nilai *State of Charge* (SOC) dan *State of Energy* (SOE) baterai saat itu. SOC menyatakan persentase sisa muatan dalam sel baterai terhadap total kapasitas nominal baterai, sementara SOE merupakan ukuran yang menyatakan persentase sisa energi dalam baterai dibandingkan energi nominal baterai saat penuh [16], [17]. Model yang menghubungkan SOC dan SOE terhadap hasil pengukuran parameter fisis baterai diperoleh menggunakan metode *Support Vector Regression* (SVR) [18]. Program SVR

digunakan untuk mencari hubungan antara SOE dan tegangan baterai.

Komponen yang dimodelkan berikutnya adalah sistem *inverter*, yaitu: (1) *hybrid inverter* dan (2) *grid-tie inverter*. *Grid-tie inverter* adalah perangkat yang digunakan untuk melakukan konversi dari sinyal listrik DC yang dihasilkan oleh modul panel surya untuk menjadi sinyal listrik AC yang dapat didistribusikan masuk ke dalam jaringan, sedangkan *hybrid inverter* adalah perangkat yang digunakan untuk melakukan integrasi kontrol dan manajemen distribusi aliran listrik yang ada di jaringan *smart microgrid*.

Dalam sistem *smart microgrid*, terdapat faktor efisiensi dari *hybrid inverter* ketika terjadi konversi bentuk listrik untuk menghubungkan komponen jaringan PLN, beban, dan keluaran *grid-tie inverter* yang mengalirkan listrik AC dengan sistem baterai yang mengalirkan listrik DC. Nilai keluaran sistem *hybrid inverter* bervariasi sesuai dengan daya beban yang dibutuhkan dan daya modul surya yang dihasilkan. Sistem



Gbr. 4 Profil mingguan, (a) daya beban pencahayaan bangunan, (b) daya keluaran sistem PLTS.

inverter dimodelkan dengan pendekatan regresi orde banyak untuk menentukan fungsi efisiensi *hybrid inverter* dari data yang ada pada *datasheet* [15].

Setelah seluruh parameter masukan untuk model diperoleh, dilakukan simulasi menggunakan model tersebut untuk memperoleh parameter keluaran dari model. Parameter keluaran tersebut merupakan parameter efisiensi kinerja sistem *smart microgrid*, yaitu: (1) SC dan (2) SS. Kedua parameter ini merupakan ukuran untuk menyatakan tingkat efisiensi penggunaan energi dan keandalan yang terdapat pada sistem *smart microgrid*. Nilai SC dan SS pada setiap sistem dapat bervariasi dari 0–100%. Algoritme pemodelan aliran energi pada sistem *smart microgrid* ditunjukkan pada Gbr. 3.

III. PENGOLAH DATA DAN ANALISIS

A. Profil Beban Listrik

Estimasi beban pencahayaan pada bangunan diperoleh dengan menghitung jumlah lampu dan daya dari tiap lampu kemudian menentukan waktu operasi dari lampu-lampu tersebut. Profil beban pencahayaan ditunjukkan pada Gbr. 4. Dalam memperoleh data cuaca, diperlukan informasi koordinat bangunan Labtek IV SBM – ITB yang berada di posisi $6,888314^\circ$ lintang selatan dan $107,608395^\circ$ bujur timur serta dengan elevasi 768 m di atas permukaan laut. Pada simulasi ini digunakan data cuaca lokasi Bandung yang dimasukkan secara manual dengan menggunakan data dari NASA. Menggunakan

perangkat lunak PV Syst, estimasi perolehan energi dari sistem PLTS dalam satu tahun adalah sebesar 84,41 MWh/tahun.

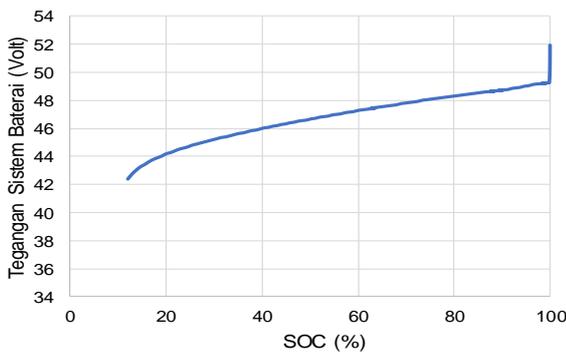
B. Sistem Baterai

Model hubungan antara SOC dengan SOE baterai dibuat dengan pendekatan pemodelan SOE baterai dan dilakukan dengan menggunakan data pemakaian baterai $4 \times 12 \text{ V } 100 \text{ Ah}$ [18] yang kemudian disesuaikan dengan yang digunakan di *smart microgrid*, dengan nilai SOC merepresentasikan muatan total 96.000 Ah pada susunan $2 \text{ VDC} \times 24$ seri. Hubungan SOC terhadap SOE baterai dijelaskan dengan (1) dan (2).

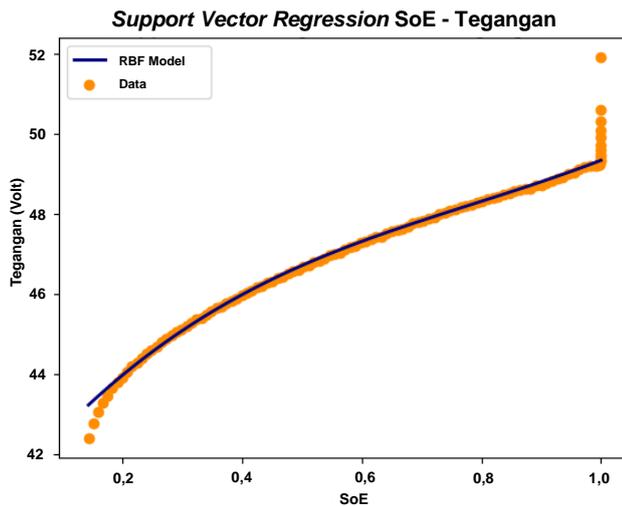
$$SOC(t) = SOC_{(t-1)} + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t \quad (1)$$

$$SOE(t) = SOE_{(t-1)} + \frac{I(t)V(t)}{Q_n V_n} \Delta t. \quad (2)$$

Dikarenakan hubungan SOC dan SOE dengan baterai *microgrid* belum tersedia data pengukurannya, maka dilakukan estimasi berdasarkan pemodelan [18]. Data yang dijadikan masukan pemodelan adalah sebanyak 113 baris di basis data. Agar dapat digunakan sebagai data latih, data tersebut melalui tahap *pre-processing* terlebih dahulu. Data latih kemudian digunakan untuk membuat model baterai menggunakan algoritme SVR. Dengan pemrograman Python dan *library sklearn*, nilai parameter yang paling optimal ditentukan dengan metode *grid search* sehingga diperoleh $C = 695.192,7962$ dan $\epsilon = 0,001$. Untuk fungsi *kernel* dipilih *kernel Radial Basis*



(a)



(b)

Gbr. 5 Pemodelan operasi sistem baterai, (a) grafik hubungan SOC dan tegangan baterai, (b) model hubungan SOE terhadap baterai.

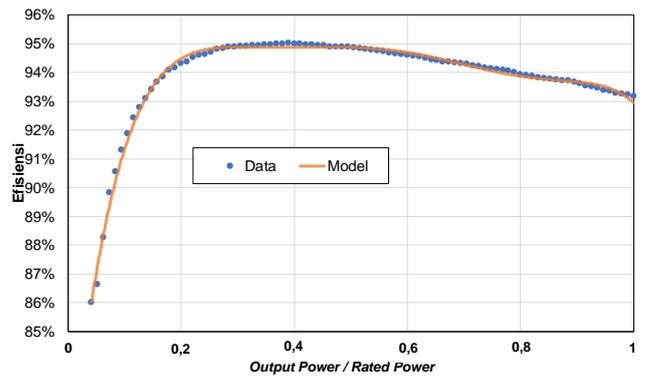
Function (RBF) yang teruji memiliki kinerja yang relatif lebih baik dibanding fungsi-fungsi *kernel* lainnya [19]. Nilai $\gamma = 0,0599484$ dipilih untuk parameter RBF. Grafik hubungan SOC, SOE, dan tegangan baterai menggunakan data tes ditunjukkan pada Gbr. 5.

C. Hybrid Inverter

Nilai maksimum efisiensi yang dimiliki *hybrid inverter* jika dipasang pada sistem baterai dengan tegangan 48 V adalah 95%. Sementara itu, nilai efisiensi minimal sebesar 85% terjadi pada saat daya keluaran dari sistemnya bernilai 4,2% dari keluaran maksimum sistem.

Pada simulasi yang dilakukan, nilai keluaran sistem *hybrid inverter* bervariasi sesuai dengan daya beban yang dibutuhkan dan daya modul surya yang dihasilkan. Dari data yang didapat, dilakukan pendekatan regresi orde tinggi untuk menentukan fungsi dari efisiensi *hybrid inverter* tersebut. Regresi data yang ditampilkan di Gbr. 6 menghasilkan fungsi efisiensi terhadap daya keluaran sistem seperti pada (3).

$$y = -759,29x^6 + 2665,9x^5 - 3728,9x^4 + 2651x^3 - 1013,2x^2 + 198,18x + 79,32. \tag{3}$$



Gbr. 6 Model efisiensi konversi daya pada *hybrid inverter*.

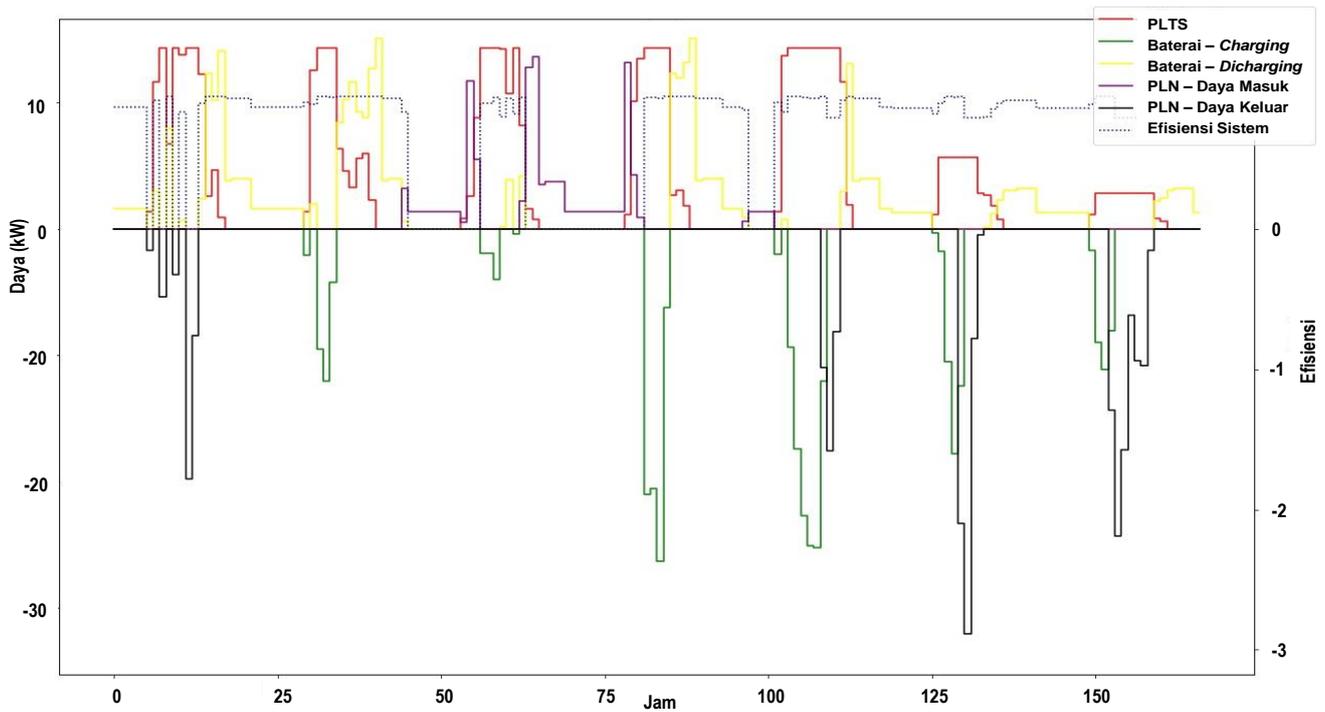
D. Algoritme Manajemen Energi

Alur distribusi daya yang diaplikasikan pada bangunan Labtek XIV - SBM ITB dibuat dengan mengacu pada penelitian sebelumnya [13]. Terdapat delapan status yang diklasifikasikan pada algoritme manajemen energi seperti penjelasan berikut ini.

- Status A : semua daya berlebih mengalir dari panel surya ke jaringan listrik PLN.
- Status B : semua daya berlebih mengalir dari panel surya ke baterai.
- Status C : semua daya berlebih mengalir dari panel surya ke baterai sejumlah maksimum yang diizinkan *hybrid inverter* dan sisanya mengalir ke jaringan listrik PLN.
- Status D : semua daya berlebih mengalir dari panel surya ke baterai sejumlah maksimum yang diizinkan baterai dan sisanya mengalir ke jaringan listrik PLN.
- Status E : semua daya tambahan mengalir dari baterai ke beban.
- Status F : daya yang mengalir dari baterai ke beban sejumlah yang diizinkan *hybrid inverter* dan sisanya mengalir dari jaringan listrik PLN.
- Status G : daya yang mengalir dari baterai ke beban sejumlah yang diizinkan baterai dan sisanya mengalir dari jaringan listrik PLN.
- Status H : semua daya tambahan mengalir dari jaringan listrik PLN ke beban.

Syarat batas yang digunakan dalam pembuatan model ini adalah adanya batas rentang SOC kerja baterai yang berada di rentang 20-80% untuk menghindari kondisi pemakaian maupun pengisian berlebih pada baterai.

Berdasarkan algoritme manajemen energi yang telah dibuat, kinerja sistem *smart microgrid* pada bangunan Labtek XIV-SBM ITB per tahunnya yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel I. Hasil simulasi tersebut menunjukkan sistem panel surya yang menghasilkan energi sebesar 84,41 MWh/tahun, sedangkan beban pencahayaan membutuhkan energi sebesar 54,68 MWh/tahun. Terdapat selisih energi yang cukup besar pada kondisi ini, dapat dilihat pada nilai SC sistem yang relatif kecil dan jumlah energi yang disalurkan ke *grid* masih besar,



Gbr. 7 Profil distribusi daya *microgrid* kondisi sebelum optimasi.

TABEL I
PARAMETER KINERJA SISTEM KONDISI SEBELUM DAN SESUDAH OPTIMASI

Parameter Kinerja Smart Microgrid	% On Grid	% Off Grid	% SC	% SS	Energi Grid In (MWh)	Energi Grid Out (MWh)
Nilai sebelum optimasi	25,20	74,80	62,39	96,32	2,01	29,46
Nilai sesudah optimasi	37,26	62,74	84,68	83,27	14,36	10,52

sebesar 29,46 MWh. SC sebesar 62,39% ini menunjukkan efisiensi sistem *smart microgrid* yang masih tergolong rendah. Dengan nilai kapasitas panel surya yang mencapai 56,7 kWp, jumlah beban yang dipenuhi sebenarnya dapat lebih besar.

Kelebihan energi ini masih dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan beban yang lain, sehingga lebih banyak jumlah beban lain dalam bangunan yang dapat dipenuhi kebutuhan listriknya, meskipun PLN tidak dapat menyuplai energi. Metode manajemen beban tersebut dapat menghasilkan kinerja sistem yang lebih seimbang antara kebutuhan dan suplai pada model sistem terdistribusi [14]. Penentuan skenario kombinasi beban yang paling optimal dilakukan dengan memilih kombinasi yang memiliki persentase SC dan SS paling optimal dengan melakukan pembobotan dengan nilai bobot yang setara (50%). Pada makalah ini dirancang tiga belas skenario kombinasi berdasarkan beban pencahayaan, beban pompa air, dan beban pendinginan pada beberapa lantai. Ketiga belas skenario tersebut tercantum di Tabel II.

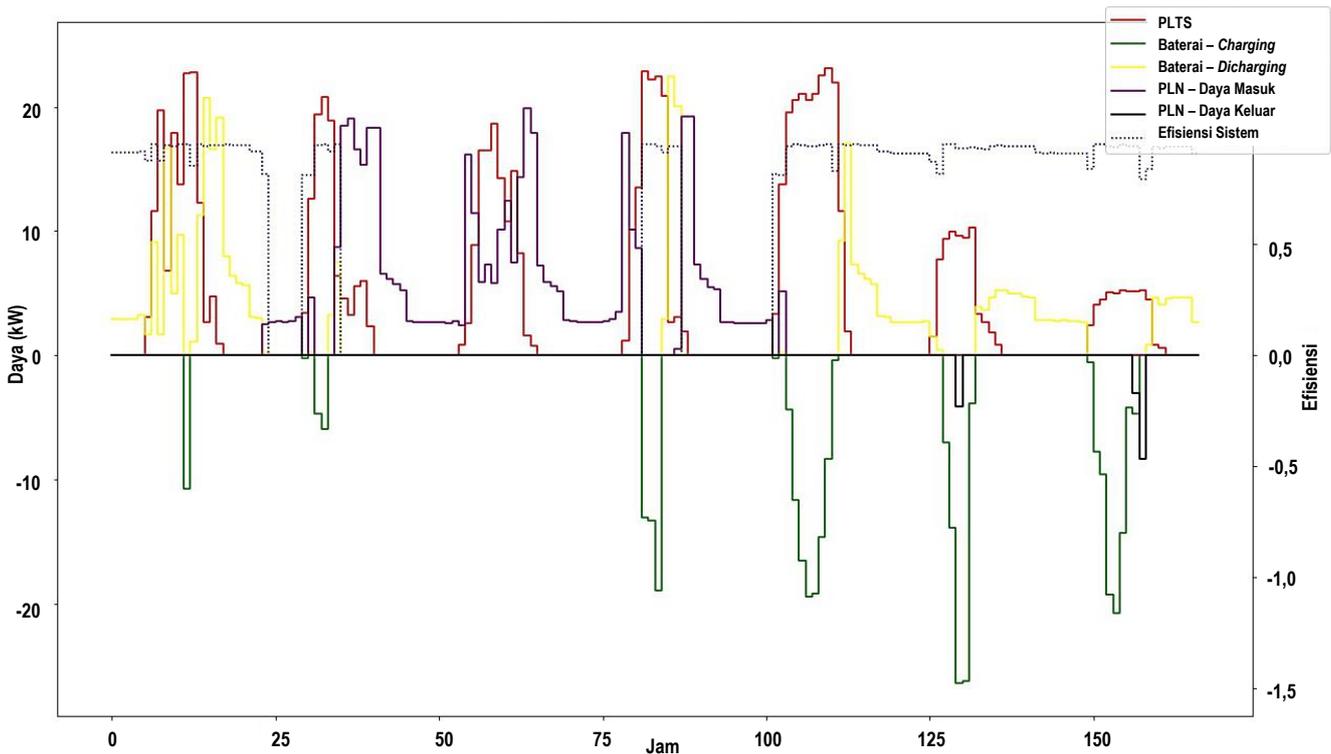
TABEL II
SKENARIO KOMBINASI BEBAN LISTRIK

Skenario	Keterangan Beban
1	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air
2	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai Dasar
3	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai 1
4	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai 2
5	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai 3
6	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai 4
7	Beban Pencahayaan + Beban Pendinginan Lantai 5
8	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai Dasar
9	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai 1
10	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai 2
11	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai 3
12	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai 4
13	Beban Pencahayaan + Beban Pompa Air + Beban Pendinginan Lantai 5

Tahapan selanjutnya adalah menghitung persentase SC, SS, *on grid*, dan *off grid* dari semua skenario di atas menggunakan algoritme manajemen energi yang sudah ditentukan seperti pada Gbr. 3. Selain itu, dihitung juga biaya penghematan dari setiap skenario. Hasil perhitungan dari setiap skenario disajikan dalam Tabel III.

TABEL III
HASIL KINERJA SISTEM UNTUK SETIAP SKENARIO PELUANG OPTIMASI

Skenario	Total Beban (MWh)	% SC	% SS	Pembobotan	% On Grid	% Off Grid	Penghematan (Juta Rp)	% Penghematan
1	74,947	78,78	88,73	83,76	31,38	68,62	73,5	38,81
2	65,570	71,59	92,16	81,88	29,30	70,70	73,8	38,96
3	78,527	80,11	86,11	83,11	35,78	64,22	73,9	39,00
4	77,241	79,40	86,77	83,09	35,17	64,83	73,9	39,00
5	82,222	81,94	84,11	83,03	37,56	62,44	74,0	39,03
6	71,675	75,93	89,42	82,68	32,34	67,66	73,9	38,97
7	88,604	84,24	80,25	82,25	42,73	57,27	74,1	39,11
8*	85,839	84,68	83,27	83,98	37,26	62,74	73,8	38,91
9	98,795	88,26	75,41	81,84	48,96	51,04	74,1	39,12
10	97,509	88,03	76,21	82,12	47,73	52,27	74,1	39,10
11	102,490	88,85	73,18	81,02	52,43	47,59	74,3	39,18
12	91,943	86,79	79,68	83,24	42,20	57,80	73,9	39,00
13	108,873	89,61	69,48	79,55	57,79	42,22	74,5	39,28



Gbr. 8 Profil distribusi daya *microgrid* kondisi setelah optimasi.

Arti skenario optimum tersebut adalah kombinasi yang memiliki persentase SC dan SS yang paling optimal. Nilai SS yang paling optimal dipilih untuk menciptakan sistem *smart microgrid* yang mampu memenuhi hampir seluruh kebutuhan bebannya dengan energi yang berasal dari panel surya. Namun, dalam pemilihan nilai SS yang optimal, dipilih juga nilai SC yang paling optimal agar energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk memenuhi kebutuhan beban secara langsung maupun disuplai ke baterai. Selain kedua parameter tersebut, persentase *off grid* yang lebih tinggi dibanding persentase *on grid* juga diinginkan untuk mencapai sistem yang tidak selalu bergantung pada jaringan listrik PLN. Dari hasil analisis diperoleh skenario 8 sebagai adalah skenario yang paling optimum.

Berdasarkan besar energi yang disuplai dari jaringan PLN (*grid in*), terdapat peningkatan pada nilainya sebesar 12,35 MWh dalam satu tahun dari nilai 2,01 MWh di kondisi awal, dengan kondisi awal sebelum optimasi seperti ditunjukkan pada Gbr. 7. Meskipun demikian, jumlah energi yang dikembalikan ke jaringan PLN (*grid out*) berkurang sebesar 18,94 MWh, menjadi 10,52 MWh. Selisih energi ini adalah energi yang dimanfaatkan oleh sistem *smart microgrid* untuk memenuhi kebutuhan bebannya.

Berdasarkan Tabel III dan Gbr. 8, dapat dilihat bahwa jumlah energi yang dialirkan ke jaringan listrik PLN setelah optimasi lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi sebelumnya. Besar energi panel surya yang dialirkan langsung dari *grid-tie* inverter untuk memenuhi kebutuhan beban

berjumlah lebih banyak, tetapi besar energi yang dialirkan dari *grid* untuk memenuhi kebutuhan beban lebih banyak dibandingkan dengan kondisi sebelumnya. Dari segi analisis ekonomi, bangunan SBM ITB dapat menghemat biaya pembelian listrik PLN sebesar 73 juta rupiah, dengan tagihan listrik untuk beban pencahayaan, pendinginan, dan pompa air sebelum menggunakan sistem *smart microgrid* adalah sebesar 189 juta rupiah setiap tahunnya.

IV. KESIMPULAN

Telah dirancang algoritme manajemen energi untuk *microgrid* pada sistem bangunan cerdas. Algoritme dikembangkan berdasarkan pemodelan *microgrid* berdasarkan suplai dan konsumsi energi listrik ke beban agar dapat beroperasi secara optimal dan efisien. Energi listrik tersebut bersumber dari PLTS, jaringan listrik PLN, dan sistem baterai. Masukan data untuk pemodelan ini berdasarkan data estimasi pembebanan listrik dari sistem pencahayaan, estimasi kondisi sistem baterai menggunakan metode SVR, dan mengakomodasi adanya penurunan efisiensi dari *inverter*. Keluaran dari pemodelan ini adalah parameter SC dan SS yang diberikan pembobotan sesuai dengan kemungkinan adanya aliran energi listrik dari atau ke jaringan listrik. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dari tiga belas skenario, dengan menggunakan algoritme pemodelan manajemen energi, diperoleh skenario 8 sebagai skenario yang paling optimal. Kondisi optimal tersebut merupakan kombinasi penggunaan beban listrik dari lampu, pompa air, dan pendinginan untuk lantai dasar, dengan nilai SC 84,68%, SS 83,27%, *on grid* 37,26%, *off grid* 62,74%, dan suplai energi ke *grid* menjadi 10,52 MWh/tahun. Energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk memenuhi kebutuhan beban secara langsung maupun disuplai ke baterai. Persentase *off grid* yang lebih tinggi dibanding persentase *on grid* juga diinginkan untuk mencapai sistem yang tidak selalu bergantung pada jaringan listrik PLN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Program Penelitian ITB, Pusat Penelitian Kebijakan Keenergian ITB, dan Penelitian Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Penelitian dan Inovasi Nasional Indonesia.

REFERENSI

- [1] P. Lazzeroni, S. Olivero, F. Stirano, M. Repetto, C. Micono, P. Montaldo, dan G. Zanzottera, "PV and Building Energy Efficiency Measures Impact on the Grid in a Middle East Case Study," *AEIT 2016 - Int. Annu. Conf. Sustain. Dev. Mediterr. Area, Energy ICT Networks Futur.*, 2016, pp. 1–6.
- [2] L. Shi dan M.Y.L. Chew, "A Review on Sustainable Design of Renewable Energy Systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 16, No. 1, hal. 192–207, 2012.
- [3] A. Ghaffarianhoseini, N.D. Dahlan, U. Berardi, A. Ghaffarianhoseini, N. Makaremi, dan M. Ghaffarianhoseini, "Sustainable Energy Performances of Green Buildings: A Review of Current Theories, Implementations, and Challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 25, pp. 1–17, 2013.
- [4] S. Deng, Y.J. Dai, R.Z. Wang, dan X.Q. Zhai, "Case Study of Green Energy System Design for a Multi-Function Building in Campus," *Sustain. Cities Soc.*, Vol. 1, No. 3, hal. 152–163, 2011.
- [5] F. Wurtz dan B. Delinchant, "'Smart Buildings' Integrated in 'Smart Grids': A Key Challenge for the Energy Transition by Using Physical Models and Optimization with a 'Human-in-the-Loop' Approach," *Comptes Rendus Phys.*, V. 18, No. 7–8, hal. 428–444, 2017.
- [6] X. Tan, Q. Li, dan H. Wang, "Advances and Trends of Energy Storage Technology in Microgrid," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 44, No. 1, hal. 179–191, 2013.
- [7] I.N. Haq, "Pengembangan Model Arsitektur Sistem Manajemen Baterai Cerdas untuk Pemantauan dan Peningkatan Kondisi Operasi Penyimpan Energi," Disertasi Program Doktor Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, Juli 2019.
- [8] K. Friansa, I.N. Haq, B.M. Santi, D. Kurniadi, E. Leksono, dan B. Yulianto, "Development of Battery Monitoring System in Smart Microgrid Based on Internet of Things (IoT)," *Procedia Eng.*, Vol. 170, hal. 482–487, 2017.
- [9] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, dan J. Palm, "Photovoltaic Self-Consumption in Buildings: A Review," *Appl. Energy*, Vol. 142, hal. 80–94, 2015.
- [10] G. Masson, J.I. Briano, dan M.J. Baez, "Review and Analysis of Self-consumption Policies," International Energy Agency, Report IEA-PVPS T1-282016, 2016.
- [11] C.J. Sarasa-Maestro, R. Dufo-López, dan J.L. Bernal-Agustín, "Analysis of Photovoltaic Self-Consumption Systems," *Energies*, Vol. 9, No. 9, hal. 1–18, 2016.
- [12] D. Zhang, N. Shah, dan L.G. Papageorgiou, "Efficient Energy Consumption and Operation Management in a Smart Building with Microgrid," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 74, hal. 209–222, Okt. 2013.
- [13] L. Barelli, G. Bidini, dan F. Bonucci, "A Micro-Grid Operation Analysis for Cost-Effective Battery Energy Storage and RES Plants Integration," *Energy*, Vol. 113, hal. 831–844, 2016.
- [14] J. Shen, C. Jiang, dan B. Li, "Controllable Load Management Approaches in Smart Grids," *Energies*, Vol. 8, No. 10, hal. 11187–11202, 2015.
- [15] "Sunny Island 4.4M / 6.0H / 8.0H for On-Grid and Off-Grid Applications Datasheet," SMA Solar Technology, Germany, 2020.
- [16] F. Edison, I.N. Haq, E. Leksono, N. Tapran, D. Kurniadi, dan B. Yulianto, "State of Energy (SOE) Estimation of LiNiCoAlO2 Battery Module Considering Cells Unbalance and Energy Efficiency," *Proceeding - 4th Int. Conf. Electr. Veh. Technol. ICEVT 2017*, 2017, hal. 100–106.
- [17] W.-Y. Chang, "The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review," *ISRN Appl. Math.*, Vol. 2013, hal. 1–7, 2013.
- [18] I.N. Haq, R.H. Saputra, F. Edison, D. Kurniadi, E. Leksono, dan B. Yulianto, "State of Charge (SoC) Estimation of LiFePO4 Battery Module Using Support Vector Regression," *Proc. - Jt. Int. Conf. Electr. Veh. Technol. Ind. Mech. Electr. Chem. Eng. ICEVT 2015 IMECE 2015*, 2015, hal. 16–21.
- [19] C. Cecati, J. Kolbusz, P. Rózycki, P. Siano, dan B.M. Wilamowski, "A Novel RBF Training Algorithm for Short-Term Electric Load Forecasting and Comparative Studies," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 62, No. 10, hal. 6519–6529, 2015.