

Penetrasi Fotovoltaik dengan Metode MILP dan Pertimbangan Pembebanan Minimal Teknis

Alfi Bahar¹, Muhammad Yasirroni², Sarjija³, M. Isnaeni Bambang Setyonegoro⁴

^{1,2,3,4} Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No 2, Bulaksumur, Yogyakarta 55281 (tel: 0274-552305; fax: 0274-552305; e-mail: ¹alfibahar@mail.ugm.ac.id, ²muhammad.yasirroni@mail.ugm.ac.id, ³sarjija@ugm.ac.id, ⁴isnaeni@ugm.ac.id)

[Diterima: 20 Juni 2022, Revisi: 9 Desember 2022]

Corresponding Author: Alfi Bahar

INTISARI — Perkembangan teknologi dan turunnya biaya instalasi mengakibatkan cepatnya pertumbuhan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Indonesia. Perusahaan Listrik Negara (PLN) terus berusaha untuk mencapai bauran energi terbarukan hingga 23% pada 2025. PLTS memiliki karakteristik unik, yaitu hanya menghasilkan daya pada siang hari. Hal ini menyebabkan PLTS yang terhubung dengan sistem *grid* akan mengubah profil daya sistem Jawa-Bali. Pada makalah ini, penetrasi PLTS akan mengubah penjadwalan sistem Jawa-Bali karena penetrasi PLTS pada pembebanan minimal teknis dari pembangkit listrik *existing* (yang sudah ada). Jika penetrasi terlalu besar, dapat terjadi kegagalan penjadwalan pembangkit listrik termal. *Unit commitment* dan *economic dispatch* dengan metode *mixed-integer linear programming* (MILP) menggunakan CPLEX dan Python dilakukan untuk menghitung biaya bahan bakar dan biaya pembangkitan per kWh, sebelum dan sesudah penetrasi PLTS. MILP digunakan untuk menyelesaikan persamaan biaya bahan bakar, sebuah persamaan campuran bilangan bulat dan nonlinear yang sulit diselesaikan dengan metode pemrograman nonlinear standar. Karena menggunakan MILP *unit commitment* (MILP-UC), semua persamaan fungsi tujuan (*objective function*) dan fungsi kekangan harus berupa fungsi linear. Simulasi pengujian dilakukan selama tiga tahun, dari tahun 2023 hingga 2025. Hasil simulasi pada sistem Jawa-Bali menunjukkan bahwa kapasitas PLTS yang masuk pada sistem Jawa-Bali terhadap beban puncak adalah 52% pada 2023, 52% pada 2024, dan 50% pada 2025. Sementara itu, penetrasi PLTS pada pembebanan minimal teknis dari pembangkit listrik *existing* menyebabkan turunnya biaya bahan bakar sebesar 23% pada 2023 serta 22% pada 2024 dan 2025. Biaya pembangkitan per kWh menurun sebanyak 8% pada 2023 dan 7% pada 2024 serta 2025.

KATA KUNCI — Penetrasi PV, MILP, Pembebanan Minimal Teknis, *Unit Commitment*, *Economic Dispatch*.

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan listrik di sistem Jawa-Bali mengalami peningkatan sebesar 3,9% per tahun [1], [2]. Sistem listrik Jawa-Bali didominasi oleh pembangkit listrik tenaga batu bara. Pada tahun 2025, pembangkit listrik tenaga batu bara diprediksi akan mendominasi sistem listrik Jawa-Bali sebesar 67% [3].

Pada skala nasional, Perusahaan Listrik Negara (PLN) berusaha mencapai bauran energi dengan energi terbarukan hingga 23% pada tahun 2025. PLN juga mendukung bagian energi terbarukan hingga lebih dari 50%. Di wilayah Jawa dan Bali, PLN mencoba mencapai bauran energi surya sebanyak 6% pada 2025 sebagai bagian dari rencana PLN tahun 2025, yang menargetkan pembangkitan listrik energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 17,1%, pembangkit listrik tenaga gas sebesar 15,3%, pembangkit listrik tenaga uap (berbahan bakar batu bara) sebesar 67,4%, dan pembangkit listrik tenaga bahan bakar minyak (BBM) sebesar 0,2%. Pada 2030, PLN menargetkan pembangkitan listrik EBT sebesar 16,1%, pembangkitan listrik tenaga gas sebesar 17,1%, persentase pembangkit listrik tenaga batu bara menurun 0,8% hingga hanya 66,6%, dan pembangkit listrik tenaga BBM hanya 0,2% [4]. Penambahan PLTS kini mengalami penurunan harga akibat perkembangan teknologi dan investasi, sehingga mengalami pertumbuhan instalasi yang sangat baik [5]–[8]. Pembangunan PLTS adalah usaha pemerintah Indonesia untuk mempercepat pembangunan pembangkit listrik EBT [9]. Pemerintah Indonesia berencana mengurangi produksi emisi sebesar 29% pada 2030 [10]. Saat ini, PLN sedang berusaha mencapai netralitas karbon pada 2060, yang diimplementasikan dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030. PLN akan memanfaatkan berbagai macam sumber energi terbarukan, dari energi air, *biofuel*, energi panas bumi (termasuk skala kecil/modular), energi cahaya matahari, energi

angin, energi biomassa dan sampah, dan energi-energi lainnya, serta mendukung usaha *renewable energy based on industrial development* (RE-BID).

PLN juga terus menjaga jumlah bauran energi dengan energi terbarukan di atas 23% setelah tahun 2025 [11]. Bauran energi dengan energi terbarukan akan mencapai angka lebih dari 24% di akhir 2030. Jumlah pembangkit listrik bertenaga batu bara diperkirakan akan turun pada 2026. Pembangkit listrik tenaga diesel diharapkan tetap pada kondisi minimal setelah 2025 dan hanya menyuplai pada kebutuhan puncak serta daerah terpencil.

Dalam penetrasi PLTS pada pembangkit *existing* (yang sudah ada), PLN mensyaratkan waktu operasi PLTS. Pembangkit lain harus mengurangi produksinya, tetapi tidak melebihi batas *trip* atau pembebanan minimal teknis (*technical minimum loading*, TML). PLTS akan mengalami penurunan produksi pada sore hari, sehingga akan terjadi peningkatan beban. Pembangkit *existing* harus memenuhi kebutuhan daya dengan cepat, sehingga pembangkit listrik akan membutuhkan kemampuan puncak yang signifikan.

Penetrasi PLTS juga akan mengubah profil beban. PLTS akan menghasilkan beban negatif dan kebutuhan sistem dikurangi beban negatif menghasilkan beban bersih [12], [13]. Penetrasi PLTS yang lebih besar akan menyebabkan kebutuhan yang lebih rendah pada siang hari [14], [15]. *Unit commitment* dan *economic dispatch* menunjukkan status pembangkit listrik yang *online* dan *offline* tiap jam. *Unit commitment* dan *economic dispatch* bertujuan meminimalkan biaya operasional pembangkit listrik. Namun, *unit commitment* merupakan hal yang sulit karena formulasi campuran bilangan bulat dan nonlinear yang kompleks.

Di sisi lain, telah banyak penelitian yang dilakukan untuk menentukan penetrasi PLTS pada sistem. Penelitian

sebelumnya telah meneliti peningkatan kualitas daya dari penetrasi PLTS [16], [17]. Penelitian yang lain mempelajari penetrasi PLTS untuk tujuan tertentu, seperti pengisian daya kendaraan listrik [18], [19].

Penelitian-penelitian tentang kasus aktual penetrasi PLTS di beberapa negara dan kota menunjukkan bahwa di Texas, AS, tegangan keluaran dapat turun drastis ketika kapasitas konverter habis [20]. Di Malta, simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa tidak ada masalah yang terjadi sampai penetrasi PLTS sebesar 40% [21]. Di Yordania, penetrasi PLTS dianalisis menggunakan DIgSILENT, dengan tingkat pertumbuhan kebutuhan energi listrik sebesar 7%. Hasil analisis menunjukkan bahwa penetrasi PLTS maksimum adalah 26,5% pada 2020 [22]. Di Vietnam, penetrasi PLTS sebesar 35 MW menunjukkan hasil positif dalam menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan pembangkit *existing* [23]. Di Siprus, gabungan PLTS 25 kWp dan baterai 50 kWh dipasang untuk membuat sistem penyimpanan komunitas [24]. Sebuah penelitian lain menunjukkan bahwa dengan menggunakan *mixed-integer quadratic programming* (MIQP), batas penetrasi PLTS dapat mencapai 68% dari kebutuhan sebelum *load ramping* lebih tinggi daripada *maximum ramping capability*. Biaya operasi pembangkit juga turun 40% karena instalasi PLTS [25].

Penelitian ini menggunakan metode *mixed-integer linear programming* (MILP) karena penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa terdapat berbagai macam metode optimasi untuk menyelesaikan permasalahan *unit commitment*, seperti *genetic algorithms* (GA), *Lagrangian relaxation* (LR), *evolutionary programming* (EP), *hybrid Lagrangian relaxation and genetic algorithms* (LRGA), *enhanced adaptive Lagrangian relaxation* (ELR), dan *priority list* (PL). MILP memiliki efisiensi yang paling baik dalam komputasi, dalam hal kecepatan komputasi. Selain itu, biaya operasional paling rendah juga dihasilkan oleh metode MILP [26]. Terakhir, penetrasi PLTS dapat mengurangi biaya bahan bakar pembangkit *existing* [27], [28].

Penelitian ini bertujuan menemukan batas penetrasi PLTS berdasarkan TML serta penjadwalan pembangkit tidak boleh melampaui batasan operasional sistem dan batasan fisik pembangkit.

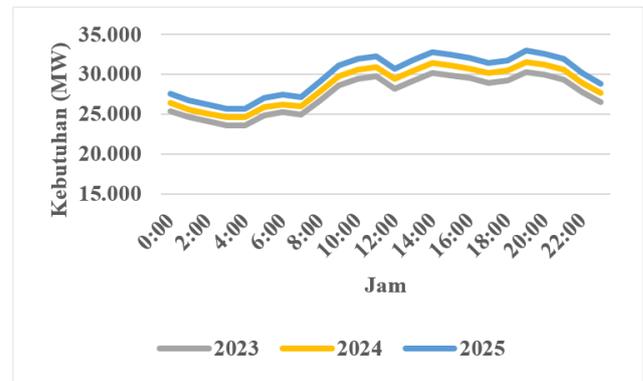
II. MATERIAL

A. KONDISI PEMBANGKIT LISTRIK DI JAWA-BALI

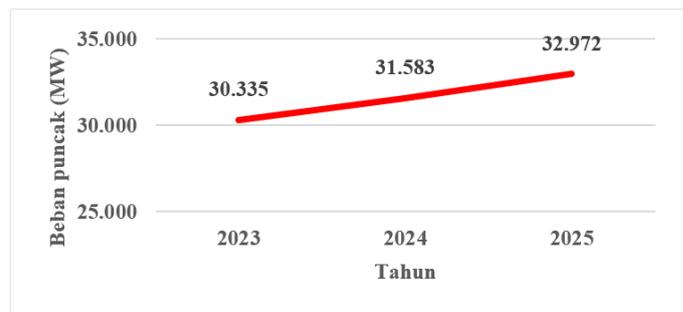
Sistem Jawa-Bali terdiri atas 244 pembangkit listrik, termasuk pembangkit bertenaga batu bara, pembangkit listrik tenaga panas bumi, pembangkit listrik tenaga gas, pembangkit listrik tenaga uap, pembangkit listrik tenaga air, dan sebagian kecil pembangkit listrik tenaga diesel. Sistem Jawa-Bali masih didominasi oleh pembangkit listrik bertenaga batu bara sebagai pembangkit dengan kapasitas terbesar. Spesifikasi fotovoltaik (*photovoltaic*, PV) yang umum digunakan di PLTS di Indonesia adalah 230WP-500WP. Data karakteristik dari pembangkit Jawa-Bali yang digunakan dalam makalah ini adalah daya minimum atau TML (*P_{min}*), daya maksimum (*P_{max}*), *ramp-up* (RU), *ramp-down* (RD), *minimum uptime* (MUT), dan *minimum downtime* (MDT), yang akan menjadi batasan dalam menghitung dan mengoptimasi *unit commitment* dan *economic dispatch*.

B. BEBAN JAWA-BALI 2023-2025

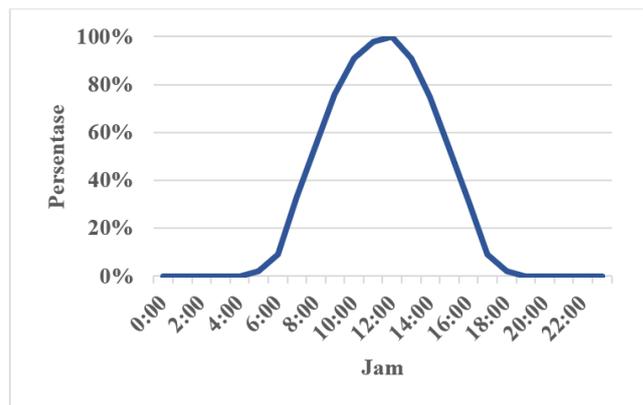
Sistem pembangkit Jawa-Bali menghasilkan energi sebesar 187.726 GWh pada Desember 2020. Sementara itu, sistem Jawa-Bali mengalami beban puncak tertinggi sebesar 27.927



Gambar 1. Profil beban Jawa-Bali tahun 2023-2025.



Gambar 2. Peningkatan beban puncak pada 2023 hingga 2025.



Gambar 3. Profil iradiasi matahari.

MW pada 2020. Sistem Jawa-Bali diperkirakan akan mengalami pertumbuhan listrik sebesar 4,02% pada 2021-2025 dan sebesar 3,98% pada 2030 [1].

Karakteristik beban sistem Jawa-Bali adalah beban puncak terjadi pada pukul 19.00 dan beban terendah terjadi pada pukul 04.00. Data profil beban sistem Jawa-Bali ini merupakan data beban puncak tertinggi dalam tiga tahun, dari 2023 hingga 2025, dengan durasi beban selama satu jam. Profil beban sistem Jawa-Bali ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan peningkatan beban sistem Jawa-Bali ditunjukkan pada Gambar 2.

Penelitian ini menggunakan profil beban puncak tertinggi tiap tahun. Beban puncak tertinggi diturunkan menjadi beban per jam berdasarkan kurva profil beban harian. Profil beban per jam akan menjadi referensi penelitian ini ketika PLTS masuk pada beban.

C. PENETRASI PLTS

Penetrasi PLTS yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem tipikal PV profil. PV profil membangkitkan daya dari pukul 06.00 sampai 18.00 dan mencapai puncak pada pukul 12.00 [29]. Penetrasi PLTS pada sistem ditunjukkan pada Gambar 3.

III. METODOLOGI

A. DESAIN SISTEM

Penelitian dimulai dengan tinjauan pustaka untuk menemukan penelitian-penelitian sebelumnya tentang penetrasi PLTS pada pembangkit Jawa-Bali yang sudah ada. Hasilnya dapat digunakan sebagai referensi untuk memvalidasi penelitian ini. Tinjauan pustaka juga digunakan untuk menentukan dasar teori yang mendukung penelitian ini.

Selanjutnya, dilakukan formulasi masalah yang telah ada kemudian menjadikannya model matematika. Lalu, dibuat *source code* dari *unit commitment* dan *economic dispatch* dengan perangkat lunak Python, dimulai dari membuat MILP untuk menentukan biaya bahan bakar optimal yang nantinya dapat diproses dengan program Python. Dalam penelitian ini, metode MILP menggunakan CPLEX dan Python untuk memperoleh solusi optimal bagi *unit commitment* dan *economic dispatch*.

Unit commitment dan *economic dispatch* terlebih dahulu dilakukan tanpa penetrasi PLTS. Hasilnya akan digunakan sebagai referensi pada perbandingan data sebelum dan sesudah penetrasi PLTS.

Hal yang pertama dilakukan pada penetrasi PLTS adalah menentukan jumlah TML keseluruhan pembangkit listrik beban dasar sistem Jawa-Bali. Jumlah TML akan digunakan sebagai referensi untuk menentukan besarnya penetrasi PLTS terhadap beban puncak pada penelitian ini.

Setelah jumlah TML dari pembangkit listrik beban dasar dan jumlah kapasitas PLTS diketahui, *unit commitment* dan *economic dispatch* dilakukan pada pembangkit *existing* untuk mendapatkan besarnya perbedaan daya yang dibangkitkan, perubahan daya akibat penetrasi PLTS, dan biaya pembangkitan sebelum dan sesudah penetrasi PLTS.

Selanjutnya, *unit commitment* and *economic dispatch* yang dilakukan pada pembangkit setelah penetrasi PLTS diperiksa terhadap batasan yang ada, baik pada sisi kekangan sistem maupun kendali daya pembangkit, khususnya pada pembangkit bertenaga batu bara. Hal ini disebabkan pembangkit bertenaga batu bara memiliki banyak kekangan, seperti *ramping* yang relatif lambat dan MUT/MDT yang lebih lama daripada pembangkit jenis lain.

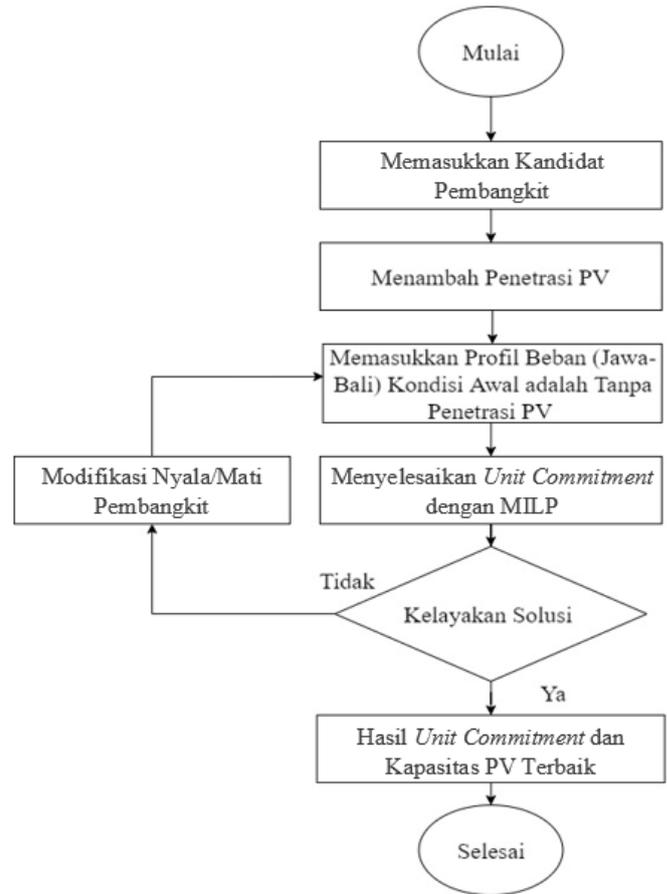
Diasumsikan terdapat sebuah pelanggaran batasan pembangkit listrik dan tidak ada solusi yang dapat dilakukan. Maka, simulasi harus dihentikan dan pembangkit akan melakukan modifikasi *online/offline* sampai tidak ada lagi pelanggaran batasan pembangkit (MUT/MDT, *ramp-up ramp-down*, *power balance*, dan *generation limit*) dan solusi ditemukan. Terakhir, dilakukan dokumentasi penetrasi PV maksimal setelah solusi ditemukan. Diagram alir penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 4.

B. FUNGSI OBJEKTIF

Fungsi objektif optimasi *economic dispatch* dapat dilihat sebagai fungsi biaya bahan bakar dari unit pembangkit.

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \left((f(P_{i,t})U_{i,t}) + SU_{i,t} + SD_{i,t} \right) \quad (1)$$

dengan $P_{i,t}$ merepresentasikan pembangkitan unit i pada waktu t dalam MW dan $U_{i,t}$ adalah status unit i pada waktu t . U bernilai 1 jika pembangkit *on* dan bernilai 0 jika pembangkit *off*. Parameter t adalah indeks yang menunjukkan waktu dalam jam, dari 1 hingga interval waktu yang ditentukan; dan i adalah indeks yang menunjukkan jumlah unit pembangkit listrik termal. Fungsi $f(P_{i,t})$ adalah biaya bahan bakar unit i (Rp/j)



Gambar 4. Diagram alir penetrasi PLTS.

yang merupakan sebuah fungsi daya keluaran pembangkit, yang ditunjukkan pada (2).

$$f(P_{i,t}) = a_i(P_{i,t})^2 + b_i(P_{i,t}) + c_i \quad (2)$$

dengan a_i , b_i , dan c_i merepresentasikan koefisien biaya bahan bakar unit i .

$SU_{i,t}$ dan $SD_{i,t}$ adalah biaya menyalakan dan mematikan pembangkit i pada waktu t . Ketika $U_{i,t}$ bernilai 1 dan $U_{i,t-1}$ bernilai 0, nilai $SU_{i,t}$ dihitung menggunakan (3). Jika $U_{i,t}$ bernilai 0 dan $U_{i,t-1}$ bernilai 1, nilai $SD_{i,t}$ dihitung menggunakan (4).

$$SU_{i,t} = C_{start}(U_{i,t} - U_{i,t-1}) \quad (3)$$

$$SD_{i,t} = C_{down}(U_{i,t-1} - U_{i,t}). \quad (4)$$

Persamaan biaya bahan bakar merupakan sebuah persamaan gabungan bilangan bulat dan nonlinear yang sulit diselesaikan dengan metode pemrograman nonlinear standar. Maka, persamaan biaya bahan bakar harus diubah ke MILP-*unit commitment*. Karena digunakan metode MILP-*unit commitment*, semua persamaan fungsi objektif dan fungsi kekangan harus berupa fungsi linear. Oleh karena itu, persamaan biaya bahan bakar harus terlebih dahulu diproyeksikan ke dalam fungsi linear menggunakan metode *piecewise*.

C. CADANGAN PUTAR (SPINNING RESERVE)

Cadangan putar (*spinning reserve*) adalah jumlah daya yang tersedia dari semua unit yang tersinkronisasi dengan sistem dikurangi beban yang disuplai pada waktu tersebut, untuk berjaga-jaga jika ada masalah dengan pembangkit yang lain.

$$\sum_{i=1}^I P_{maks_i} U_{i,t} > D_t + SR_t \quad (5)$$

dengan P_{maks_i} adalah batas maksimum daya pembangkit; D_t adalah kebutuhan beban pada waktu t ; dan SR_t adalah daya cadangan pada waktu t .

D. BATASAN POWER BALANCE

Daya aktif total yang dihasilkan tiap jam harus memenuhi kebutuhan beban pada jam tersebut.

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} U_{i,t} = D_t \quad (6)$$

dengan $P_{i,t}$ adalah daya pembangkit dan D_t adalah kebutuhan beban pada waktu t .

E. BATAS PEMBANGKITAN

Daya aktif yang dibangkitkan oleh sebuah unit pembangkit harus berada dalam batas daya aktif minimum dan maksimum unit pembangkit.

$$P_{min_i} \leq P_{i,t} \leq P_{maks_i} \quad (7)$$

dengan P_{min_i} adalah batas daya minimum unit i ; $P_{i,t}$ adalah daya keluaran unit i pada waktu t ; dan P_{maks_i} adalah keluaran maksimum unit i .

F. MINIMUM UP-TIME DAN MINIMUM DOWN-TIME

Minimum up-time adalah waktu minimum sebuah unit pembangkit harus *online* atau *on* setelah unit dinyalakan (sebelum dapat dimatikan), sedangkan *minimum down-time* adalah waktu minimum pembangkit harus *offline* sebelum pembangkit dapat dinyalakan.

$$T_{on_i} \geq MUT_i \quad (8)$$

$$T_{off_i} \geq MDT_i \quad (9)$$

dengan T_{on} adalah durasi unit i dalam keadaan *on*; T_{off} adalah durasi unit i dalam keadaan *off*; MUT_i adalah *minimum up-time* unit i ; dan MDT_i *minimum down-time* unit i .

G. RAMP-UP DAN RAMP-DOWN

Ramp-up dan *ramp-down* adalah kondisi sebuah pembangkit dapat menambah dan mengurangi daya keluaran (dalam MW) selama interval waktu tertentu.

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RU_i \quad (10)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RD_i \quad (11)$$

dengan $P_{i,t}$ adalah daya pembangkit i pada waktu t ; $P_{i,t-1}$ adalah daya pembangkit i pada waktu $t-1$; RU_i adalah batas *ramp-up* pembangkit i ; dan RD_i adalah *ramp-down* pembangkit i .

H. DAYA PV

Daya maksimum yang dihasilkan PV bergantung pada cahaya matahari. Kondisi ini mengakibatkan daya PV terbatas dari kapasitas PV yang dipasang.

$$P_s \leq P_{s,max} \quad (12)$$

dengan P_s adalah daya keluaran PV dan $P_{s,max}$ adalah kapasitas maksimum PV.

IV. ANALISIS

A. UNIT COMMITMENT SISTEM JAWA-BALI SEBELUM PENETRASI PLTS

Tahap pertama dari penelitian ini adalah melakukan *unit commitment* dan *economic dispatch* pada sistem Jawa-Bali

TABEL I
PENETRASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Tahun	2023	2024	2025
Kebutuhan (MW)	30.335	31.583	32.972
Total TML (MW)	12.483	12.873	14.063
Maksimal PV (MW)	15.772	16.544	16.648
Persentase	52%	52%	50%

tanpa penetrasi PLTS. Tahap ini menggunakan tiga profil beban yang merupakan puncak tertinggi profil beban dari tahun 2023 sampai 2025. Profil beban sistem Jawa-Bali menunjukkan bahwa beban puncak terjadi pada pukul 19.00, sedangkan beban terendah terjadi pada pukul 04.00. Peningkatan profil beban terjadi pada pukul 05.00 sampai 12.00 dan terjadi penurunan beban sementara selama satu jam, yaitu dari pukul 12.00 hingga 13.00. Profil beban kembali meningkat setelah pukul 13.00 sampai 15.00, lalu secara bertahap turun hingga pukul 17.00. Kenaikan profil beban mulai terjadi setelah pukul 17.00 dan terjadi beban puncak pada 19.00, lalu beban turun secara bertahap sampai kembali ke titik terendah pada pukul 04.00.

B. PERUBAHAN PROFIL BEBAN SISTEM JAWA-BALI AKIBAT PENETRASI PLTS TERHADAP BATAS TML

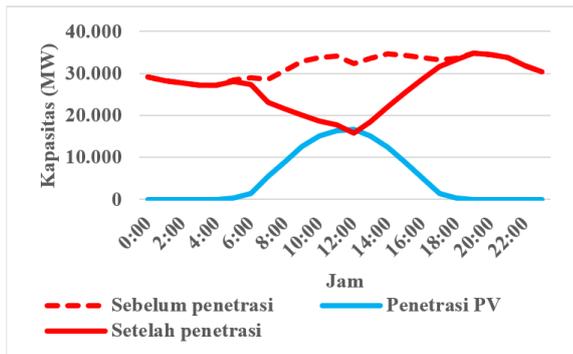
Penetrasi PLTS hingga batas TML pembangkit Jawa-Bali dilakukan untuk memaksimalkan kapasitas PLTS yang dapat dipasang dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik termal (*existing*). Makin besar kapasitas PLTS yang terpasang, makin besar pula kapasitas pembangkit listrik termal yang dapat dimatikan. Dengan makin kecilnya kapasitas pembangkit listrik termal (beroperasi pada batas TML), biaya bahan bakar dan biaya pembangkitan per kWh pembangkit Jawa-Bali diharapkan dapat berkurang.

TML total pembangkit Jawa-Bali diambil dari data spesifikasi pembangkit listrik beban dasar. Sementara itu, penetrasi PLTS tertinggi terjadi pada pukul 12.00, yang menembus kebutuhan sistem Jawa-Bali. TML total pembangkit beban dasar digunakan sebagai data referensi untuk menentukan jumlah penetrasi PLTS, yang dinyatakan dalam persen.

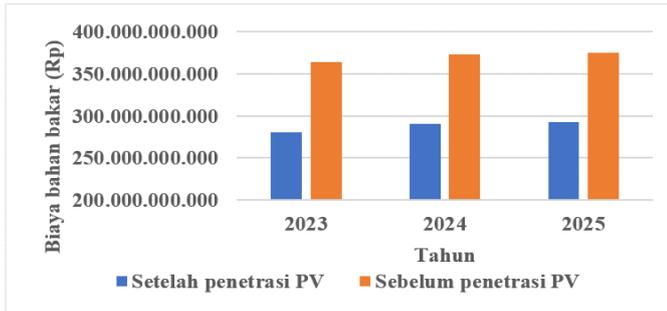
Masuknya penetrasi PLTS akan mengubah profil beban sistem Jawa-Bali. PLTS yang masuk akan dikategorikan sebagai beban negatif. Beban negatif akan menyebabkan kebutuhan sistem berkurang. Perubahan kebutuhan mulai terjadi pada pukul 05.00, ketika PLTS masuk ke dalam sistem. Kebutuhan terhadap pembangkit *existing* akan menurun secara bertahap karena penetrasi PLTS akan mulai meningkat pada siang hari.

Siang hari, pada pukul 12.00, merupakan puncak tertinggi penetrasi PLTS pada sistem. Penetrasi PLTS tertinggi akan menyebabkan kebutuhan terhadap pembangkit *existing* mencapai titik terendah (mencapai TML pembangkit listrik beban dasar *existing*) dalam satu hari.

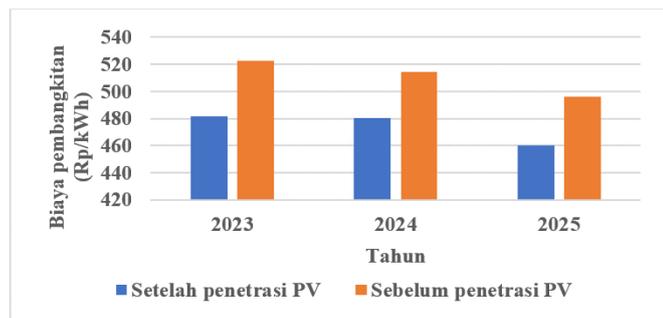
Setelah pukul 12.00, intensitas sinar matahari mulai menurun, yang menyebabkan penetrasi PLTS juga menurun. Penurunan penetrasi PLTS menyebabkan kebutuhan terhadap pembangkit *existing* mulai meningkat kembali. Peningkatan ini akan terus berlangsung sampai PLTS dilepaskan dari sistem saat matahari terbenam. Kebutuhan beban yang semula dipenuhi oleh PLTS akan disuplai oleh pembangkit *existing*. Peningkatan beban akan terus berlangsung sejak matahari terbenam (sejak keluarnya penetrasi PLTS dari sistem) sampai pukul 19.00, ketika terjadi beban puncak pada sistem. Jumlah penetrasi PLTS ditunjukkan pada Tabel I dan Gambar 5.



Gambar 5. Penetrasi PV pada sistem Jawa-Bali.



Gambar 6. Biaya bahan bakar pembangkit Jawa-Bali.

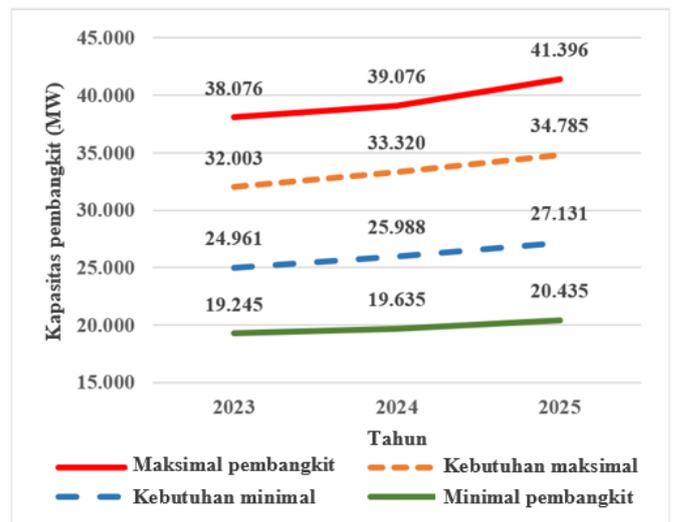


Gambar 7. Biaya pembangkitan per kWh.

C. UNIT COMMITMENT SISTEM JAWA-BALI SETELAH PENETRASI PLTS

PLTS dalam kapasitas besar yang memasuki sistem Jawa-Bali akan menyebabkan *unit commitment* dan *economic dispatch* berubah. Pembangkit listrik *follower* yang beroperasi pada pagi hari akan mulai dimatikan karena adanya penetrasi PLTS. Pada siang hari, akan makin banyak pembangkit listrik *follower* yang dimatikan dan pembangkit listrik beban dasar juga akan mengurangi produksinya hingga mencapai TML. Pada pukul 12:00, PLTS akan mencapai puncak operasinya. Ketika PLTS berada pada kondisi puncak, semua kebutuhan terhadap pembangkit *follower* akan digantikan oleh PLTS, yang menyebabkan semua pembangkit *follower* *offline*. Penetrasi PLTS sampai batas TML pembangkit beban dasar juga akan menyebabkan pembangkit beban dasar memproduksi listrik hanya sampai batas TML.

Di sore hari, produksi listrik PLTS akan menurun. Pembangkit listrik beban dasar akan mulai meningkatkan produksinya melampaui batas TML dan pembangkit *follower* akan mulai dinyalakan untuk membantu pembangkit listrik beban dasar. PLTS akan *offline* saat matahari terbenam. Dengan keluarnya PLTS dari sistem, seluruh pembangkit *existing* akan beroperasi seperti biasa untuk memenuhi kebutuhan sistem dan terus meningkatkan produksinya untuk menyuplai kebutuhan beban puncak pada pukul 19.00.



Gambar 8. Batas pembangkit Jawa-Bali.

TABEL II
CADANGAN PUTAR

Tahun	2023	2024	2025
Kebutuhan (MW)	30.335	31.583	32.972
Kebutuhan + Cadangan (MW)	32.003	33.320	34.785
Kapasitas Maksimal Gen (MW)	38.076	39.076	41.396

Hasil simulasi menunjukkan bahwa di tahun 2023, biaya bahan bakar pembangkit *existing* adalah Rp364,2 miliar dan biaya pembangkitan adalah Rp523. Setelah penetrasi PLTS, biaya bahan bakar berkurang sebanyak 23% menjadi Rp280,4 miliar dan biaya pembangkitan berkurang 8% menjadi Rp481/kWh. Di tahun 2024, biaya bahan bakar pembangkit *existing* adalah Rp373,5 miliar, sedangkan biaya pembangkitan adalah Rp515. Setelah penetrasi PLTS, biaya bahan bakar turun 22% menjadi Rp290,8 miliar dan biaya pembangkitan turun 8% menjadi Rp480/kWh. Terakhir, pada tahun 2025, biaya bahan bakar pembangkit *existing* adalah Rp375,7 miliar, sedangkan biaya pembangkitan sebesar Rp496. Setelah penetrasi PLTS, biaya bahan bakar menurun 22% menjadi Rp293,1 miliar, sedangkan biaya pembangkitan menurun 7% menjadi Rp460/kWh. Penurunan biaya bahan bakar dan biaya pembangkitan per kWh sistem Jawa-Bali ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

D. BATASAN CADANGAN PUTAR

Penelitian ini menggunakan 5% cadangan beban. Cadangan sistem dan pembangkitan maksimal (*max gen*) disajikan dalam Tabel II. Rangkuman beban puncak dan cadangan tersebut masih di bawah kapasitas maksimum semua pembangkit dalam tiga tahun.

E. BATASAN POWER BALANCE

Daya aktif total yang dihasilkan tiap jam harus memenuhi kebutuhan beban pada jam tersebut. Beban puncak terjadi pada pukul 19.00. Semua kapasitas pembangkitan beban puncak harus tetap di bawah kapasitas maksimum pembangkit. Dari Gambar 5 dan Gambar 8, PLTS tidak memengaruhi *power balance* sistem Jawa-Bali.

F. BATAS PEMBANGKITAN

Pembangkit memiliki batas atas dan batas bawah operasi. Jika semua pembangkit dinyalakan, kebutuhan beban total harus berada di bawah kapasitas total pembangkit. Beban maksimum terjadi pada pukul 19.00 dan beban tersebut masih berada di bawah kapasitas keluaran maksimum semua

pembangkit. Sementara itu, beban minimum terjadi pada pukul 04.00 dan masih berada di atas kapasitas keluaran minimum semua pembangkit.

Pada 2023, beban maksimum adalah 32,003 MW, masih di bawah kapasitas keluaran total semua generator, yaitu 38,076 MW, sedangkan beban minimum adalah 24,961 MW, masih di atas kapasitas keluaran minimum semua generator, yaitu 19,245 MW. Di tahun 2024, beban maksimum adalah 33,320 MW, masih di bawah kapasitas keluaran total semua generator, yaitu 39,076 MW, dan beban minimum adalah 25,988 MW, masih di atas kapasitas keluaran minimum semua generator, yaitu 19,635 MW. Pada tahun 2025, beban maksimum adalah 34,785 MW, di bawah kapasitas keluaran total semua generator, yaitu 41,396 MW, sedangkan beban minimum adalah 27,131 MW, di atas kapasitas keluaran minimum semua generator, yaitu 20,435 MW. Batas pembangkitan sistem Jawa-Bali ditunjukkan pada Gambar 8.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, *unit commitment* dan *economic dispatches* diselesaikan menggunakan metode MILP. Solusi *unit commitment* harus memenuhi persyaratan beban dan sekaligus mempertimbangkan batasan-batasan fisik dan operasional pembangkit. Di sistem Jawa-Bali, dengan pendekatan TML, rata-rata kapasitas PLTS yang masuk di sistem Jawa-Bali terhadap beban puncak dalam tiga tahun adalah 50%. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kemungkinan kapasitas PLTS maksimum yang dapat masuk ke sistem Jawa-Bali jauh di atas 6% yang direncanakan PLN.

Efek penetrasi PLTS pada profil beban sistem Jawa-Bali adalah PLTS menekan kerja pembangkit beban dasar sampai batas TML. PLTS akan mematikan pembangkit listrik *follower* karena kebutuhan daya telah terpenuhi oleh PLTS. Pembangkit listrik beban dasar akan membangkitkan listrik hanya sebesar batas TML. Makin besar kapasitas pembangkitan PLTS yang dipasang, makin besar beban negatif yang dialami sistem Jawa-Bali. Makin besarnya beban negatif akan makin mengurangi kebutuhan terhadap pembangkit Jawa-Bali yang sudah ada.

Penetrasi PLTS dapat mengurangi biaya bahan bakar pembangkit *existing* sebesar 23% pada 2023 dan 22% pada 2024 dan 2025. Sementara itu, biaya pembangkitan per kWh pembangkit *existing* juga berkurang karena penetrasi PLTS, dengan penurunan sebesar 8% pada 2023 dan 7% pada 2024 dan 2025.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis makalah The writer of this paper, "Penetrasi Fotovoltaik dengan Metode MILP dan Pertimbangan Pembebanan Minimal Teknis" menyatakan bahwa makalah ini bebas dari konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Alfi Bahar, Muhammad Yasirroni, M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, dan Sarjiya; metodologi, Alfi Bahar, Muhammad Yasirroni, M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, dan Sarjiya; perangkat lunak, Muhammad Yasirroni; penulisan—penyusunan draf asli, Alfi Bahar; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Muhammad Yasirroni, M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, dan Sarjiya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, Bapak Sarjiya, serta Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Universitas Gadjah

Mada atas dukungannya dalam penelitian dan penyusunan makalah ini.

REFERENSI

- [1] "RUPTL - Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2019-2028," PT. PLN (Persero), 2019.
- [2] "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030," PT. PLN (Persero), 2021.
- [3] "Statistik Ketenagalistrikan 2019," Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2020.
- [4] "Diseminasi RUPTL 2021-2030," PT PLN (Persero), 2021.
- [5] M. Sun, C. Feng, dan J. Zhang, "Factoring Behind-the-Meter Solar into Load Forecasting: Case Studies Under Extreme Weather," *2020 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. (ISGT)*, 2020, hal. 1-5, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087791.
- [6] R. Zhang dkk., "Forecast of Solar Energy Production - A Deep Learning Approach," *2018 IEEE Int. Conf. Big Knowl. (ICBK)*, 2018, hal. 73-82, doi: 10.1109/ICBK.2018.00018.
- [7] M. Upasani dan S. Patil, "Grid Connected Solar Photovoltaic System with Battery Storage for Energy Management," *2018 2nd Int. Conf. Inventive Syst., Control (ICISC)*, 2018, hal. 438-443, doi: 10.1109/ICISC.2018.8399111.
- [8] International Renewable Energy Agency, "Renewable Power Generation Costs in 2020," 2020. [Online]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf.
- [9] "Pengesahan Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change," Undang-Undang RI, No. 16, 2016.
- [10] "Intended Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia," Pemerintah RI, 2015.
- [11] "Diseminasi RUPTL 2021-2030," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, 2021.
- [12] Y. Wang dkk., "Data-Driven Probabilistic Net Load Forecasting with High Penetration of Behind-the-Meter PV," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 33, No. 3, hal. 3255-3264, Mei 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2762599.
- [13] Z. Xuan dkk., "PV-Load Decoupling Based Demand Response Baseline Load Estimation Approach for Residential Customer with Distributed PV System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 6, hal. 6128-6137, Nov./Des. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3014575.
- [14] S.E. Razavi dkk., "From Load to Net Energy Forecasting: Short-Term Residential Forecasting for the Blend of Load and PV Behind the Meter," *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 224343-224353, Des. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044307.
- [15] N. Nigmatulina, A. Mashlakov, N. Belonogova, dan S. Honkapuro, "Techno-Economic Impact of Solar Power System Integration on a DSO," *2020 17th Int. Conf. Eur. Energy Mark. (EEM)*, 2020, hal. 1-6, doi: 10.1109/EEM49802.2020.9221951.
- [16] K. Alboaouh dan S. Mohagheghi, "Voltage and Power Optimization in a Distribution Network with High PV Penetration," *2018 IEEE/PES Transmiss., Distrib. Conf., Expo. (T&D)*, 2018, hal. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2018.8440384.
- [17] J.F.C. Acero, H.P. Viveros, N.J.B. Castanon, dan R.C. Yucra, "Improvement of Power Quality for Operation of the Grid-Connected Photovoltaic Energy System Considering the Irradiance Uncertainty," *2020 IEEE XXVII Int. Conf. Electron. Elect. Eng., Comput. (INTERCON)*, 2020, hal. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON50315.2020.9220222.
- [18] A. Haque, V.S.B. Kurukuru, dan M.A. Khan, "Energy Management Strategy for Grid Connected Solar Powered Electric Vehicle Charging Station," *2019 IEEE Transp. Electrific. Conf. (ITEC-India)*, 2019, hal. 1-6, doi: 10.1109/ITEC-India48457.2019.ITECIndia2019-44.
- [19] O.M. Abdelwahab dan M.F. Shaaban, "PV and EV Charger Allocation with V2G Capabilities," *2019 IEEE 13th Int. Conf. Compat. Power Electron., Power Eng. (CPE-POWERENG)*, 2019, hal. 1-5, doi: 10.1109/CPE.2019.8862370.
- [20] J. Till, S. You, Y. Liu, dan P. Du, "Impact of High PV Penetration on Voltage Stability," *2020 IEEE/PES Transmiss., Distrib. Conf., Expo. (T&D)*, 2020, hal. 1-5, doi: 10.1109/TD39804.2020.9299973.
- [21] Y. Gabdullin dan B. Azzopardi, "Impacts of High Penetration of Photovoltaic Integration in Malta," *2018 IEEE 7th World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC) (A Joint Conf. 45th IEEE PVSEC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, 2018, hal. 1398-1401, doi: 10.1109/PVSEC.2018.8548256.

- [22] S. Qutaishat, A. Al-Salaymeh, dan H. Obeid, "Maximum PV Penetration Level Integrated to the National Transmission Grid of Jordan, Particularly 132 KvBusbar," *2021 12th Int. Renew. Eng. Conf. (IREC)*, 2021, hal. 1–3, doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427859.
- [23] M.Q. Duong, N.T.N. Tran, dan C.A. Hossain, "The Impact of Photovoltaic Penetration with Real Case: ThuaThienHue-Vietnamese grid," *2019 Int. Conf. Robot. Elect., Signal Process. Techn. (ICREST)*, 2019, hal. 682–686, doi: 10.1109/ICREST.2019.8644338.
- [24] G. Pattichis dkk., "Mediterranean Region," dalam *Management of Recreation and Nature Based Tourism in European Forests*, U. Pröbstl, V. Wirth, B.H.M. Elands, dan S. Bell, Eds., London, Inggris: Springer, 2010, hal. 97–114, doi: 10.1007/978-3-642-03145-8_5.
- [25] P.R. Mara, Sarjiya, L.M. Putranto, dan M. Yasirroni, "Determination of Maximum Grid-Connected Photovoltaic Penetration Level Based on Unit Commitment Solution," *Int. J. Electr. Eng. Inform.*, Vol. 11, No. 3, hal. 610–621, Sep. 2019, doi: 10.15676/ijeei.2019.11.3.11.
- [26] M. Carrión dan J.M. Arroyo, "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 21, No. 3, hal. 1371–1378, Agu. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876672.
- [27] N. Dhlamini dan S.P.D. Chowdhury, "Solar Photovoltaic Generation and Its Integration Impact on the Existing Power Grid," *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 710–715, doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521003.
- [28] G. Yudhaprawira, Sarjiya, dan S.P. Hadi, "Unit Commitment for Power Generation System Including PV and Batteries by Mixed Integer Quadratic Programming," *2012 Int. Conf. Power Eng., Renew. Energy (ICPERE)*, 2012, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICPERE.2012.6287247.
- [29] A. Jahid, M.K.H. Monju, M.S. Hossain, dan M.F. Hossain, "Hybrid Power Supply Solutions for Off-Grid Green Wireless Networks," *Int. J. Green Energy*, Vol. 16, No. 1, hal. 12–33, Okt. 2019, doi: 10.1080/15435075.2018.1529593.