

# Analisis Fleksibilitas Sistem Tenaga Listrik Jawa, Madura, dan Bali karena Integrasi yang Masif dari Pembangkit VRE

DWI CAHYA AGUNG SAPUTRA, IWA GARNIWA

Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Indonesia  
Email: [dwi.cahya23@ui.ac.id](mailto:dwi.cahya23@ui.ac.id)

*Received* 22 Maret 2024 | *Revised* 14 Mei 2024 | *Accepted* 27 Mei 2024

## ABSTRAK

*Integrasi Variable Renewable Energy (VRE), dengan karakteristik intermittent dan ketidakpastian yang tinggi, yang masif ke sistem JAMALI berpotensi mengganggu keandalan dan meningkatkan kompleksitas operasional sistem tenaga listrik. Kendala-kendala tersebut dapat dimitigasi apabila sistem memiliki fleksibilitas yang memadai. Analisis fleksibilitas, dengan bantuan IRENA FlexTool, dilakukan untuk mengkaji fleksibilitas sistem akibat meningkatnya bauran VRE di sistem JAMALI yang dilakukan secara bertahap, yaitu 5% di tahun 2030, 37% di tahun 2040, dan 52% di tahun 2050. Dari hasil analisis, semakin besar bauran VRE dalam sistem JAMALI, kemampuan fleksibilitas sistem semakin menurun. Hal ini ditandai dengan kapabilitas upward ramping yang cenderung turun dari 28,78 GW/jam di tahun 2030 menjadi 25,87 GW/jam di tahun 2050. Serta, terjadinya pembatasan VRE sebesar 706,62 MW dan kehilangan beban hingga 109,79 TWh di tahun 2050.*

**Kata kunci:** *fleksibilitas, jamali, kehilangan beban, pembatasan, sistem tenaga listrik, variable renewable energy*

## ABSTRACT

*The integration of Variable Renewable Energy (VRE) into the JAMALI power system, characterized by intermittency and high uncertainty, has the potential to disrupt reliability and increase the operational complexity of the power system. These challenges can be mitigated if the power systems possess adequate flexibility. A flexibility analysis, with the assistance of the IRENA FlexTool, was carried out to assess the system flexibility due to the increasing share of VRE in the JAMALI power system, phased as follows 5% in 2030, 37% in 2040, and 52% in 2050. Based on the analysis results, it is observed that the greater the share of VRE in the JAMALI power system the lower the power system's flexibility. This is evidenced by an upward ramping capability which tends to decrease from 28.78 GW/hour in 2030 to 25.87 GW/hour in 2050. Also, there is a VRE curtailment of 706.62 MW and a loss of load of up to 109.79 TWh in 2050.*

**Keywords:** *curtailment, flexibility, jamali, loss of load, power system, variable renewable energy*

## 1. PENDAHULUAN

Energi Baru dan Terbarukan (EBT) telah menjadi pilihan utama bagi banyak negara dalam upaya transisi energi, yaitu peralihan penggunaan energi dari fosil ke EBT, dengan harapan negara dapat menyediakan pasokan energi yang bersih, keberlanjutan, dan terjangkau. Sebagai negara dengan potensi EBT yang berlimpah, pemerintah Indonesia menargetkan dapat melakukan transisi energi untuk mencapai *Net-Zero Emission* (NZE) di sektor energi pada tahun 2060 atau lebih cepat, dengan dominasi bauran energi nasional dari *Variable Renewable Energy* (VRE) (**Hubungan Masyarakat Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan dan Konservasi Energi, 2022**). VRE merupakan salah satu jenis teknologi pembangkitan listrik yang bersumber dari energi terbarukan, seperti surya dan bayu, di mana daya yang dihasilkan dapat berubah-ubah dari waktu ke waktu (*intermittent*) dan sulit untuk dikendalikan karena dipengaruhi oleh kondisi cuaca (tingkat ketidakpastian lebih tinggi) (**ESMAP, 2019**). Kondisi tersebut menjadikan pembangkit VRE memiliki karakteristik yang berbeda dengan pembangkit konvensional, di mana pembangkit konvensional mampu membangkitkan daya secara stabil dan memiliki tingkat ketidakpastian yang rendah.

Sistem tenaga listrik beroperasi dengan menyediakan pasokan energi untuk memenuhi kebutuhan permintaan listrik dengan biaya semurah mungkin. Pada sistem tenaga listrik yang masih didominasi oleh pembangkit konvensional, variabilitas dan ketidakpastian umumnya bersumber dari permintaan pelanggan (**International Renewable Energy Agency, 2018a**). Sedangkan pada sistem tenaga listrik modern (didominasi pembangkit VRE), variabilitas dan ketidakpastian dapat berasal dari dua sisi, yaitu permintaan dan pasokan berasal dari VRE (**Huang, dkk, 2018**). Kombinasi fluktuasi dari sisi permintaan dan variabilitas produksi dari VRE akan menghasilkan profil beban bersih (*net load*) dengan volatilitas yang tinggi (**Mohandes, dkk, 2019**). Hal ini akan membuat upaya untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan listrik menjadi lebih kompleks. Menurut Mohandes (**Mohandes, dkk, 2019**) peningkatan proporsi VRE dalam sistem tenaga listrik akan menciptakan kesenjangan yang semakin lebar antara beban aktual dengan beban bersih, akibatnya (1) perubahan beban bersih akan membuat pembangkit lain harus meningkatkan kemampuan *ramp rate*-nya; (2) perbedaan nilai maksimum dan minimum (rentang *ramping*) beban bersih pada siang hari akan meningkat; dan (3) ketidakpastian yang disebabkan oleh kesalahan prakiraan (beban, bayu, dan intensitas radiasi) meningkat.

Peningkatan kebutuhan *ramp rate* dan *ramping range*, sebagai konsekuensi bertambahnya bauran VRE ke sistem tenaga listrik, harus bisa dipenuhi oleh unit pembangkit lain, terutama pembangkit termal yang memiliki kemampuan *start-up* dan *ramping* yang tinggi. Hal ini dikarenakan, ketidakcukupan kapasitas *ramp rate* (khususnya kapabilitas *upward ramping*) berpotensi menuntun terjadinya kehilangan beban pada sistem tenaga listrik (**International Renewable Energy Agency, 2018a**). Sehingga, unit pembangkit termal (*dispatchable*) harus melakukan proses *start-up*, *ramp-up*, *ramp-down*, dan *standby* atau *shutdown* (disebut dengan "siklus") yang lebih cepat dan lebih sering untuk memenuhi kebutuhan *ramping range*. Kondisi tersebut perlu diwaspadai, karena menurut Huber (**Huber, dkk, 2014**) pembangkit termal yang sering mengalami "siklus" untuk memenuhi kebutuhan beban yang berfluktuasi akibat variabilitas daya dari pembangkit surya ataupun bayu akan berpotensi mengalami tekanan yang besar, membuat umur teknologi menjadi lebih pendek.

Di samping itu, integrasi pembangkit VRE ke sistem tenaga listrik juga dapat mengganggu keandalan sistem, yang dalam hal ini berkaitan dengan inersia sistem. Inersia merupakan istilah teknis yang mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk pulih dari ketidakseimbangan pasokan dan permintaan secara instan (**International Renewable**

**Energy Agency, 2018a**). Kondisi inersia sangat dipengaruhi oleh pembangkit konvensional karena inersia bersumber dari pembangkit mesin berputar (generator sinkron). Sedangkan pembangkit VRE, secara inheren, tidak mampu menyediakan inersia bagi sistem tenaga listrik (**ESMAP, 2019**). Sehingga dominasi VRE pada sistem tenaga listrik, dan berkurangnya pembangkit konvensional, dapat mengakibatkan penurunan pada inersia sistem (**ENTSOE, 2020**). Semakin rendah inersia, maka akan semakin cepat perubahan frekuensi terjadi. Hal tersebut akan berdampak pada semakin sulitnya mempertahankan keandalan operasi sistem tenaga listrik (**International Renewable Energy Agency, 2018a**).

Pandžić (**Pandžić, 2022**) menyebutkan bahwa untuk mengatasi masalah keandalan sistem akibat integrasi yang masif dari pembangkit VRE, sistem tenaga listrik harus memiliki fleksibilitas yang memadai. Fleksibilitas merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mengakomodasi pembangkit VRE dan sekaligus menjaga keseimbangan antara pasokan dan permintaan yang andal dengan biaya semurah mungkin (**International Renewable Energy Agency, 2019**). Oleh karena itu, penting untuk mengetahui kemampuan fleksibilitas sistem dalam perencanaan sistem tenaga listrik yang akan didominasi oleh VRE. Namun, sampai saat ini metrik yang dapat dijadikan standar untuk menilai fleksibilitas masih belum ada (**Eltohamy, dkk, 2019a**). Meskipun demikian, dalam laporan IRENA (**International Renewable Energy Agency, 2018a**) disebutkan bahwa parameter kehilangan beban (*loss of load*) dan pembatasan kapasitas VRE (*curtailment*) telah sering kali digunakan dalam analisis fleksibilitas sistem. Pembatasan VRE terjadi ketika keluaran VRE harus dikurangi karena sistem tidak fleksibel, sementara kehilangan beban adalah kondisi ketika pasokan tidak dapat memenuhi permintaan dan energi tidak terlayani. Penelitian dari Yan (**Yan, dkk, 2020**) menyebutkan bahwa fleksibilitas yang tidak memadai dapat menyebabkan kehilangan beban (*loss of load*) ketika sistem tenaga listrik tidak dapat menyediakan pembangkitan listrik yang cukup ketika daya dari VRE rendah, atau pembatasan VRE terjadi ketika sistem tidak dapat mengurangi pembangkit listrik yang dapat dikontrol selama produksi VRE yang tinggi. Selain itu, menurut Lannoye (**Lannoye, dkk, 2012**) ketidakcukupan *ramping* juga dapat digunakan sebagai metrik untuk mengukur fleksibilitas sistem tenaga listrik dengan tujuan untuk perencanaan jangka panjang.

Studi untuk melakukan penilaian terhadap fleksibilitas sistem sudah banyak dilakukan. Perhitungan untuk menilai fleksibilitas sistem memiliki tingkat kesulitan yang lebih kompleks dan membutuhkan data yang sangat detail (**Eltohamy, dkk, 2019a**). Adapun metode optimalisasi fleksibilitas sistem tenaga listrik yang ada saat ini lebih ditujukan untuk aspek atau bidang tertentu, namun hasil yang disampaikan kurang komprehensif (**Xing, dkk, 2017**). Walaupun demikian, dalam laporan IRENA (**International Renewable Energy Agency, 2018a**) disebutkan bahwa penilaian fleksibilitas dapat dilakukan dengan memodelkan sistem tenaga listrik ke sebuah masalah matematika kompleks yang diselesaikan dengan bantuan perangkat lain. IRENA FlexTool merupakan salah satu perangkat untuk melakukan optimasi fleksibilitas dengan prinsip *economic dispatch* (**International Renewable Energy Agency, 2018a**). Dalam penelitiannya, Correia (**Correia, 2020**) menyebutkan bahwa FlexTool mampu memenuhi kebutuhan analisis sistem dengan cara mengintegrasikan semua data pemodelan, menyimulasikannya sesuai kondisi, dan memberikan penilaian terhadap reaksi dari sistem pada keadaan yang berbeda-beda.

Di Indonesia, terdapat lima sistem besar tenaga listrik, di mana salah satunya adalah sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali (JAMALI) yang mengakomodasi sekitar 60% total permintaan listrik nasional. Pada tahun 2020, pembangkitan di sistem JAMALI masih didominasi oleh pembangkit berbasis fosil, yaitu 70% dari batu bara, 19% dari gas alam, dan sekitar 8% berasal dari pembangkit EBT—didominasi oleh panas bumi dan hidro (**International Energy**

**Agency, 2022).** Dengan kondisi yang ada saat ini, upaya pemerintah Indonesia melakukan transisi melalui pengoptimalan VRE dalam bauran sistem JAMALI akan menghadapi tantangan yang berat. Penelitian dari Tambunan (**Tambunan, dkk, 2020**) menyebutkan bahwa penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang masif di sistem tenaga listrik Jawa-Bali berpotensi menimbulkan fenomena *duck curve*, dengan hasil identifikasi menunjukkan kebutuhan terhadap pembangkit yang fleksibel (kemampuan *ramping* yang memadai) untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan.

Studi analisis fleksibilitas pada sistem JAMALI dilakukan untuk mengkaji kemampuan fleksibilitas sistem dalam mengakomodasi integrasi pembangkit VRE secara masif. Analisis fleksibilitas dilakukan untuk perencanaan sistem JAMALI di tahun 2030, 2040, dan 2050. Pemilihan periode tahun tersebut didasarkan pada rencana pengembangan sistem JAMALI terkait penambahan kapasitas terpasang pembangkit VRE, di mana pada tahun 2030, 2040, dan 2050 persentase kapasitas VRE di sistem JAMALI berkisar 5%, 37%, dan 52% dari total kapasitas terpasang (**PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), 2021**), (**Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2023**). Sehingga di tahun 2050, diperkirakan pasokan listrik di sistem JAMALI sudah akan didominasi oleh pembangkit VRE. Kemampuan fleksibilitas sistem JAMALI dikaji berdasarkan parameter kehilangan beban (*loss of load*), pembatasan kapasitas VRE (*curtailment*), dan kapabilitas *ramping*. Dari hasil identifikasi terhadap beberapa penelitian sebelumnya, belum ditemukan studi yang sama terkait analisis fleksibilitas pada sistem JAMALI untuk tahun 2030, 2040, dan 2050. Dengan demikian, studi ini merupakan penelitian baru yang diharapkan dapat memberikan informasi yang komprehensif terhadap kemampuan fleksibilitas sistem JAMALI untuk tahun 2030, 2040, dan 2050, potensi tantangan yang akan dihadapi, dan membantu pemerintah untuk mempersiapkan perencanaan transisi energi di sektor ketenagalistrikan secara lebih matang.

## 2. METODE

### 2.1 Perangkat Optimalisasi

Dalam penelitian ini, analisis fleksibilitas dilakukan dengan bantuan perangkat lunak IRENA FlexTool, sebuah perangkat *open-source* yang dikembangkan oleh VTT *Technical Research Center of Finland Ltd.* (**International Renewable Energy Agency, 2018a**). IRENA FlexTool dikembangkan dengan prinsip *economic dispatch*, yaitu sebuah sistem tenaga listrik yang dimodelkan sebagai sebuah permasalahan optimalisasi untuk menentukan *generation dispatch* dari unit pembangkit listrik yang akan memenuhi kebutuhan permintaan dengan biaya serendah mungkin, dengan mempertimbangkan batasan-batasan unit pembangkit (**Lin & Magnago, 2017**). Di dalam FlexTool, permasalahan optimalisasi ditunjukkan oleh fungsi objektif dalam Persamaan (1), di mana fungsi objektif adalah penjumlahan biaya operasi dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari penjumlahan komponen biaya operasi dan perawatan (O&M), biaya bahan bakar, biaya *start-up*, dan biaya penalti (jika ada) dari unit pembangkit di suatu sistem tenaga listrik yang kemudian dikalikan dengan periode waktu simulasi. Sedangkan biaya investasi merupakan fitur tambahan (opsional) yang disediakan oleh FlexTool, karena dalam permasalahan fleksibilitas sering kali langkah mitigasi yang perlu dilakukan adalah investasi terhadap aset baru (**International Renewable Energy Agency, 2018b**).

$\forall \{t\} \in T:$

$$v_{\square}^{\text{objektif}} = \sum_t (v_t^{\text{Biaya Om}} + v_t^{\text{Biaya Bahan Bakar}} + v_t^{\text{Biaya Startup}} + v_t^{\text{penalti}}) \times h + v_{\square}^{\text{Biaya Investasi}} \quad (1)$$

Di mana:

$$v_t^{Biaya\ O\&M} = \sum_{\{g,n,u\} \in U_{g,n,u}} [p_u^{Biaya\ O\&M} \times v_{g,n,u,t}^{pembangkitan}]$$

$$v_t^{Biaya\ Bahan\ Bakar} = \sum_{\{n,u,F\} \in F_{n,u,F}} (v_{F,u,t}^{Penggunaan\ Bahan\ Bakar} \times p_F^{Biaya\ Bah\ Bakar})$$

$$v_t^{Biaya\ Startup} = \sum_{u \in U_u^{startup}} (v_{u,t}^{Startup} \times p_u^{Biaya\ Start})$$

$$v_t^{Biaya\ Investasi} = \sum_{\{g,n,u\} \in U_{g,n,u}} (p_u^{Biaya\ Investasi} \times v_{g,n,u}^{Kapasitas\ Diinvestasikan})$$

$$v_t^{Penalti} = \sum_n (v_{n,t}^{Loss\ of\ load} \times p_n^{Pinalti\ loss\ of\ load} + v_{n,t}^{Loss\ of\ reserve} \times p_n^{Pinalti\ loss\ of\ reserve} + v_{n,t}^{curtail} \times p_n^{Pinalti\ curtail} + v_n^{ketidakcukupan\ kap} \times p_n^{Pinalti\ ketidakcukupan\ kap})$$

$$p_{F,n,t}^{Biaya\ Bahan\ Bakar} = p_{F,n,t}^{Harga\ Bahan\ Bakar} + \sum_{e \in E_f} p_{F,e}^{Emisi\ Bahan\ Bakar} \times p_{n,e}^{pajak\ emisi}$$

Karena sistem tenaga listrik beroperasi untuk memenuhi kebutuhan permintaan dengan biaya semurah mungkin, maka penyelesaian masalah optimasi dari fungsi objektif (Persamaan 2) harus mempertimbangkan kondisi keseimbangan antara pasokan dan permintaan, didefinisikan pada Persamaan (2). Di samping itu, karena setiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda dalam pembangkitan energi, terutama pembangkit VRE, maka masalah optimasi fungsi objektif juga harus diselesaikan dengan melibatkan kendala teknis unit pembangkitan. Beberapa kendala teknis, seperti pada Persamaan (3) yang menunjukkan *limit* pembatasan VRE pada waktu tertentu dengan mempertimbangkan kapasitas yang ada dan yang akan diinvestasikan (jika ada), disesuaikan dengan faktor kapasitas masing-masing VRE. Persamaan (4) dan (5) menunjukkan perubahan daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit di antara dua periode waktu berturut-turut yang tidak boleh melebihi batas kemampuan *ramping* dari setiap unit pembangkit untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik.

Persamaan keseimbangan energi:

$$v_{g,n,t}^{pembangkitan} + v_{g,n,t}^{convert\ In} + p_{g,n,t}^{impor-expor} + v_{g,n,t}^{loss\ of\ load} = p_{g,n,t}^{permintaan} + v_{g,n,t}^{pengisian} + v_{g,n,t}^{transfer} + v_{g,n,t}^{convert\ Out} \quad (2)$$

Pertidaksamaan untuk pembatasan VRE:

$$v_{g,n,t}^{curtail} \leq \sum_{u \in U^{VRE}} p_{u,t}^{cf} \times (p_{g,n,u}^{kapasitas} + v_{g,n,u}^{investasi}) \quad (3)$$

Pertidaksamaan untuk kondisi *ramping*:

$$v_{g,n,u,t}^{pembangkitan} - v_{g,n,u,t}^{pelepasan} + v_{g,n,u,t}^{cadangan} \leq v_{g,n,u,t-h_t}^{pembangkitan} - v_{g,n,u,t-h_t}^{pelepasan} - p_u^{kapabilitas\ ramp\ Up} \quad (4)$$

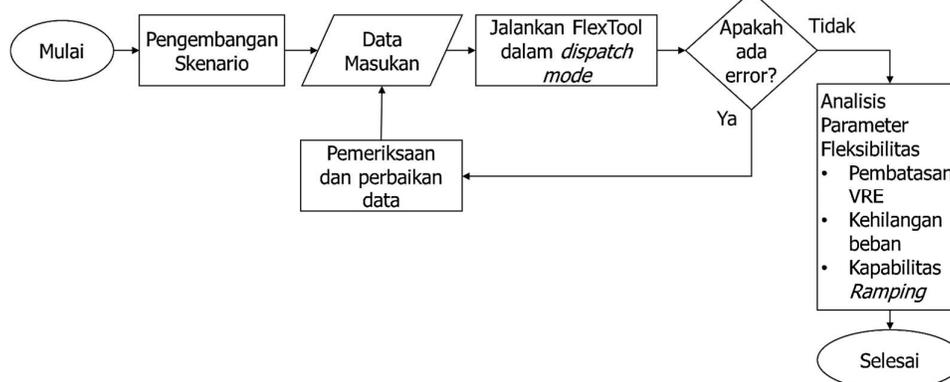
$$v_{g,n,u,t}^{pembangkitan} - v_{g,n,u,t}^{pelepasan} \geq v_{g,n,u,t-h_t}^{pembangkitan} - v_{g,n,u,t-h_t}^{pelepasan} + p_u^{kapabilitas\ ramp\ Down} \quad (5)$$

Di mana:

cf : <i>capacity factor</i>	p : parameter
e : emisi	t : <i>time step index</i>
F : bahan bakar	T : kumpulan dari <i>time steps-t</i>
g : <i>grid</i>	t-h <sub>t</sub> : periode waktu sebelumnya
h : durasi (jam) dari periode waktu	u : unit
L : jaringan di antara dua <i>node</i>	U : kumpulan unit-u
n : <i>node</i>	v : variabel

## 2.2 Pelaksanaan Penelitian

Gambaran umum pelaksanaan studi dapat dilihat pada Gambar (1). Dalam studi ini, dikembangkan empat skenario yang meliputi skenario sistem JAMALI tahun 2022, 2030, 2040, dan 2050. Pada skenario pertama, sistem JAMALI tahun 2022, dikembangkan untuk tujuan validasi model yang nantinya akan dibandingkan dengan data referensi. Skenario kedua, sistem JAMALI tahun 2030 akan dikembangkan dengan mengacu pada dokumen RUPTL 2021-2030. Sedangkan untuk skenario ketiga dan keempat, sistem JAMALI tahun 2040 dan 2050, akan dikembangkan dengan data kapasitas terpasang pembangkit mengacu pada dokumen Draf Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2023-2060.



**Gambar 1. Diagram Alir Proses Penelitian**

## 2.2 Data Masukan

IRENA FlexTool merupakan perangkat *data driven*, sehingga hasil simulasi sangat dipengaruhi oleh kualitas data. Data-data yang diperlukan untuk pengembangan model di IRENA FlexTool meliputi, 1) data sistem, terdiri dari data permintaan listrik tahunan; 2) data teknis, berupa kapasitas terpasang pembangkit, dan data tekno-ekonomi pembangkit; 3) data *time series*, terdiri dari data profil beban, dan faktor kapasitas pembangkit VRE; dan 4) data bahan bakar yang meliputi harga bahan bakar.

### 2.2.1 Data Sistem

Berdasarkan data dari Laporan Statistik 2022 yang diterbitkan oleh PT PLN (Persero), permintaan listrik di sistem JAMALI tahun 2022 nilainya sebesar 194,42 TWh. Sedangkan untuk tahun 2030, mengacu pada dokumen Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 yang diterbitkan oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), permintaan listrik di sistem JAMALI diperkirakan sekitar 255,38 TWh. Dengan menggunakan asumsi pertumbuhan 4,5% per tahun (**Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2023**), diperkirakan pada tahun 2040 dan 2050 kebutuhan permintaan listrik di JAMALI menjadi 412,92 TWh dan 643,28 TWh.

### 2.2.2 Data Teknis

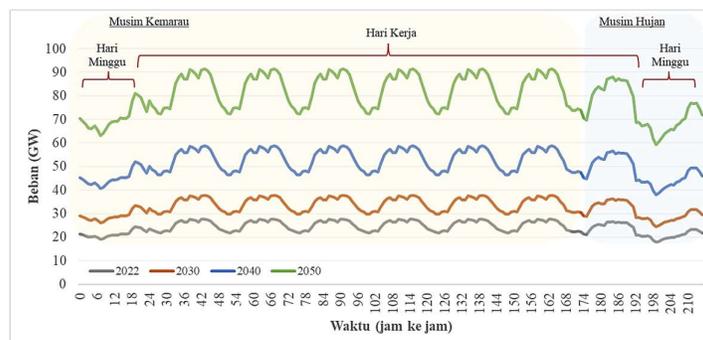
Kapasitas terpasang pembangkit di sistem JAMALI untuk periode tahun 2022, 2030, 2040, dan 2050 bisa dilihat pada Tabel 1. Sementara untuk data tekno-ekonomi pembangkit mengacu pada Katalog *Technology Data for Indonesian Power Sector* yang dipublikasikan oleh Danish Energy Agency & Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. Sebagai catatan, data tekno-ekonomi pembangkit pada katalog tersebut hanya memuat informasi dari tahun 2020, 2030, dan 2050. Sehingga untuk data tahun 2040 diasumsikan nilainya sama dengan data tahun 2030.

**Tabel 1. Kapasitas Terpasang Pembangkit di Sistem JAMALI**

Jenis Pembangkit	Satuan	2022	2030	2040	2050
Batubara	GW	29,42	32,51	28,40	9,47
Gas Alam	GW	12,02	15,47	16,48	12,56
Minyak Diesel	GW	0,37	0,38	0,20	0,003
Panas Bumi	GW	1,25	3,16	8,34	8,34
Hidro	GW	2,80	3,38	3,39	3,39
Biomassa	GW	0,017	0,25	4,32	13,96
Co-Firing Amoniak	GW	-	-	-	9,29
Surya	GW	0,002	2,84	19,53	40,85
Bayu	GW	-	0,26	23,25	35,16
Pumped Storage Hydropower (PSH)	GW	-	3,74	3,74	3,74
BESS (Li-ion)	GW	-	-	8,06	9,57

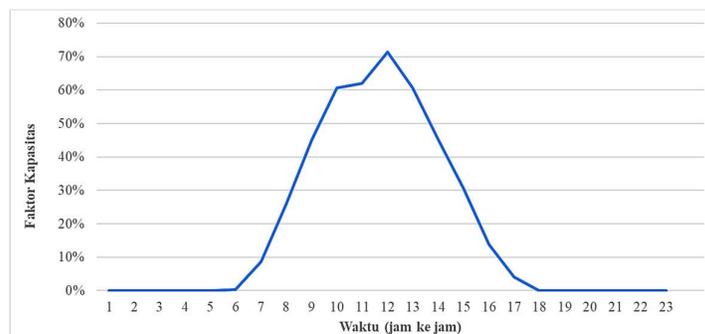
### 2.2.3 Data Time Series

Studi dari IEA (**International Energy Agency, 2022**) menampilkan profil beban harian tipikal sistem JAMALI pada hari kerja (Senin-Sabtu) dan hari Minggu pada musim kemarau dan musim hujan. Karena IRENA FlexTool melakukan simulasi optimasi dalam periode 1 tahun (8760 jam), maka diasumsikan profil beban harian tipikal bernilai sama untuk sepanjang musim kemarau dan musim hujan. Untuk menyederhanakan, ditampilkan profil beban mingguan tipikal (mencakup musim kemarau dengan warna latar kuning dan musim hujan warna latar biru) untuk tahun 2022, 2030, 2040, dan 2050 yang dapat dilihat pada Gambar (2). Di samping itu, studi dari IEA (**International Energy Agency, 2022**) juga menampilkan profil harian pembangkitan energi dari PLTS (Gambar (3)), dalam penelitian ini nilainya diasumsikan sama selama periode satu tahun dan untuk semua skenario. Sedangkan, profil harian pembangkit energi untuk pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), lihat Gambar (4), diperoleh dari hasil olahan berbagai sumber, seperti (**Premono, dkk, 2017**), (**Ismail, dkk, 2020**), dan (**Sarjiya, dkk, 2018**), dengan asumsi nilainya sama selama periode 1 tahun dan untuk semua skenario.

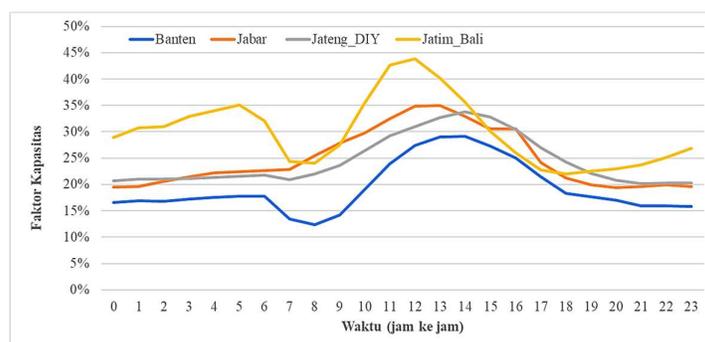


**Gambar 2. Profil Beban Tipikal Mingguan Sistem JAMALI**

## Analisis Fleksibilitas Sistem Tenaga Listrik Jawa, Madura, dan Bali karena Integrasi yang Masif dari Pembangkit VRE



**Gambar 3. Profil Faktor Kapasitas Harian Tipikal PLTS di Jawa-Bali**



**Gambar 4. Profil Faktor Kapasitas Harian Tipikal PLTB di Jawa-Bali**

### 2.2.4 Data Bahan Bakar

Harga bahan bakar untuk batubara, gas alam, dan minyak diesel untuk skenario tahun 2030 bersumber dari RUPTL 2021-2030. Sementara untuk harga bahan bakar pada skenario tahun 2040 dan 2050 diperoleh dari hasil proyeksi dengan asumsi pertumbuhan harga batu bara dan gas alam sekitar 0,4% per tahun dan minyak diesel sekitar 1,6% per tahun (**Kanugrahan, dkk, 2022**). Asumsi harga bahan bakar untuk masing-masing skenario dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2. Harga Bahan Bakar**

Jenis Bahan Bakar	Satuan	2022	2030	2040	2050
Batubara	USD/MWh	11,40	13,48	14,02	14,60
Gas Alam	USD/MWh	26,13	27,30	28,41	29,57
Minyak Diesel	USD/MWh	90,03	45,34	53,14	62,29

### 2.3 Batasan Teknis

Beberapa batasan yang digunakan pada penelitian ini, meliputi:

- Analisis fleksibilitas tidak mempertimbangkan pengaruh sumber-sumber fleksibilitas yang berasal dari sisi permintaan.
- Reservoir *pump-storage hydropower* (PSH) diasumsikan mampu menyuplai energi selama enam jam (**Silalahi, dkk, 2022**).
- Teknologi *battery energy storage system* (BESS) yang digunakan merupakan lithium-ion dengan estimasi penyimpanan/pelepasan energi selama dua jam.

- d. Rasio *co-firing* amoniak, sebagai bentuk *retrofit* PLTU, diasumsikan 20% (**Danish Energy Agency & Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021**), (**Bloomberg, 2022**).
- e. Tidak mempertimbangkan interkoneksi antar pulau besar.

## 2.4 Simulasi Optimasi

IRENA FlexTool memiliki 2 (dua) jenis mode untuk dijalankan yaitu mode *dispatch* dan mode investasi. Pada mode *dispatch*, perangkat hanya akan menyimulasikan model untuk memperoleh hasil optimasi tanpa melibatkan opsi investasi, sementara mode investasi memungkinkan bagi perangkat untuk menyimulasikan model dengan memasukkan opsi-opsi investasi untuk meningkatkan fleksibilitas sistem (**International Renewable Energy Agency, 2018b**). Pada penelitian ini, digunakan mode *dispatch*. Dalam mode *dispatch*, perangkat akan menjalankan algoritma *linear programming* untuk mencari solusi optimasi dari fungsi objektif (Persamaan 1) yang dipengaruhi oleh kendala-kendala (*constraints*), seperti keseimbangan energi (Persamaan 2), pembatasan VRE (Persamaan 3), dan kondisi *ramping* (Persamaan 4 dan 5), tanpa melibatkan komponen investasi. Apabila selama simulasi ditemukan eror, ditandai dengan munculnya jendela notifikasi, maka dilakukan pemeriksaan dan perbaikan pada data masukan.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Validasi Model

Model yang telah dikembangkan akan diperbandingkan dengan data referensi untuk menguji apakah model sudah cukup representatif untuk menggambarkan kondisi aktual dari sistem tenaga listrik JAMALI. Data yang digunakan sebagai referensi merupakan data aktual dari kondisi sistem JAMALI untuk tahun 2022 yang bersumber dari Laporan Statistik PLN 2022. Parameter yang akan diperbandingkan adalah kondisi permintaan dan pembangkitan energi dari masing-masing pembangkit listrik berdasarkan jenis bahan bakarnya. Perbandingan hasil simulasi optimasi model dengan data referensi dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3. Perbandingan Hasil Simulasi Model dengan Kondisi Referensi**

Parameter	IRENA Flextool		Referensi	
	Nilai (TWh)	Bauran (%)	Nilai (TWh)	Bauran (%)
<b>Total Permintaan Listrik</b>	<b>194,42</b>		<b>194,42</b>	
<b>Total Pembangkitan Listrik</b>	<b>194,76</b>	<b>100</b>	<b>216,60</b>	<b>100</b>
▪ <b>Batubara</b>	141,12	72,46	150,25	69,37
▪ <b>Gas</b>	34,09	17,50	37,82	17,46
▪ <b>Minyak Diesel</b>	2,39	1,23	11,48	5,30
▪ <b>Panas Bumi</b>	9,41	4,83	9,34	4,31
▪ <b>Hidro</b>	7,75	3,98	7,72	3,56
▪ <b>Surya</b>	0,003	0,00	0,001	0,00

Dari hasil perbandingan antara hasil simulasi optimasi dan referensi, nilai total permintaan energi listrik baik dari hasil pemodelan dan referensi memiliki nilai yang sama. Hal ini dikarenakan nilai permintaan dari referensi digunakan sebagai data masukan untuk pengembangan model. Sementara itu, pada total pembangkitan energi, hasil simulasi optimasi dari model menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan referensi. Perbedaan nilai ini dikarenakan belum dipertimbangkannya nilai rugi-rugi pada jaringan distribusi dan transmisi dalam penyelesaian masalah optimasi yang disimulasikan oleh IRENA FlexTool. Walaupun demikian, jika nilai pembangkitan energi ditinjau berdasarkan jenis bahan bakar pembangkit,

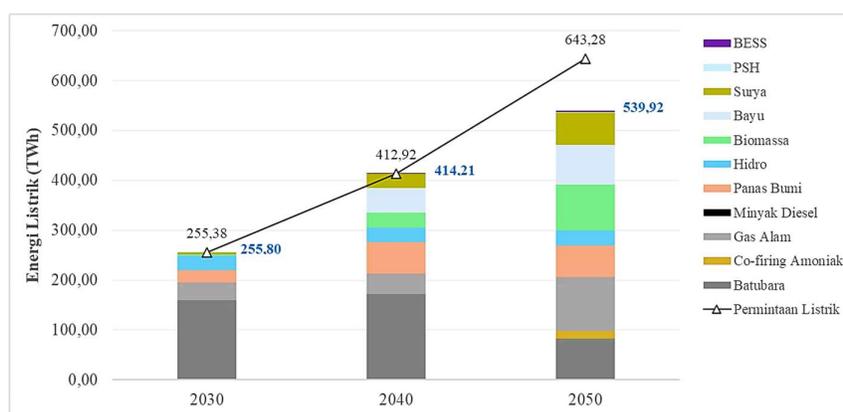
teridentifikasi bahwa persentase pembangkitan energi antara hasil pemodelan dengan referensi memiliki nilai yang relatif mendekati, dengan selisih sekitar  $\pm 4\%$ .

Perbedaan signifikan ditemukan pada hasil pembangkitan energi dari pembangkit minyak diesel, karena pada saat pengembangan model, kapasitas dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang dipasang secara *off-grid* (tidak terhubung ke jaringan listrik) diabaikan, dengan total kapasitas sekitar 42 MW (**PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), 2021**). Berdasarkan bauran pembangkitan energi, kondisi pembangkitan energi dari hasil simulasi optimasi dan referensi menunjukkan hasil yang relatif mendekati. Sehingga model yang dikembangkan cukup merepresentasikan kondisi sistem JAMALI saat ini.

### 3.2 Analisis Kondisi Sistem JAMALI Tahun 2030, 2040, dan 2050

#### 3.2.1 Kondisi Pasokan dan Permintaan

Hasil simulasi optimasi sistem JAMALI untuk skenario tahun 2030, 2040, dan 2050 dapat dilihat pada Gambar (5). Berdasarkan kondisi pasokan dan permintaan, secara umum terjadi peningkatan pada listrik yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit penyusun sistem JAMALI, di mana total pembangkitan listrik secara berurutan dari tahun 2030, 2040, dan 2050 nilainya sebesar 255,80 TWh, 414,21 TWh, dan 539,92 TWh. Peningkatan ini sesuai dengan proyeksi peningkatan permintaan listrik dan penambahan kapasitas terpasang pada beberapa jenis pembangkit. Pembangkitan listrik dari bahan bakar fosil mengalami peningkatan pada tahun 2030 dan 2040. Namun, cenderung turun di tahun 2050. Hal ini sesuai dengan upaya pemerintah untuk mengurangi aktivitas pembangkitan dari bahan bakar fosil untuk mendukung tercapainya NZE di sektor energi. Sedangkan pembangkitan dari EBT, termasuk VRE seperti surya dan bayu, mulai mengalami peningkatan produksi listrik di tahun 2040 dan 2050. Meskipun secara tren cenderung meningkat, pasokan dan permintaan hanya dapat seimbang di tahun 2030 dan 2040. Sedangkan di tahun 2050, pasokan energi yang tersedia tidak mampu memenuhi kebutuhan permintaan.



**Gambar 5. Kondisi Pasokan dan Permintaan Sistem JAMALI Tahun 2030, 2040, dan 2050**

Jika ditinjau pada indikator fleksibilitas, lihat pada Tabel (4), sistem JAMALI di tahun 2030 tidak mengalami pembatasan VRE ataupun kehilangan beban yang menandakan bahwa fleksibilitas yang dimiliki masih memadai. Sementara, pada skenario tahun 2040, sistem JAMALI mengalami pembatasan VRE, maksimum sebesar 1507,61 MW. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi sistem JAMALI mengalami masalah fleksibilitas. Meskipun pembatasan VRE tidak mempengaruhi ketersediaan pasokan, dari sisi teknis hal ini mengindikasikan bahwa kondisi inersia pada sistem JAMALI cukup rendah. Dalam laporan IRENA (**International Renewable Energy Agency, 2018a**) disebutkan bahwa ketika sistem mengalami kekurangan inersia, operator akan melakukan tindakan pembatasan

kapasitas VRE sebagai upaya mitigasi menjaga keandalan sistem. Di samping itu, jika ditinjau dari sisi keekonomian, pembatasan VRE juga dapat memberikan kerugian pada aspek biaya operasi sistem. Terjadinya pembatasan VRE akan memunculkan persepsi bahwa energi yang dibangkitkan dari pembangkit VRE tidak bisa diserap secara optimal, sehingga akan mempengaruhi kepercayaan investor untuk mengembangkan pembangkit VRE di sistem JAMALI (Cohran, dkk, 2014).

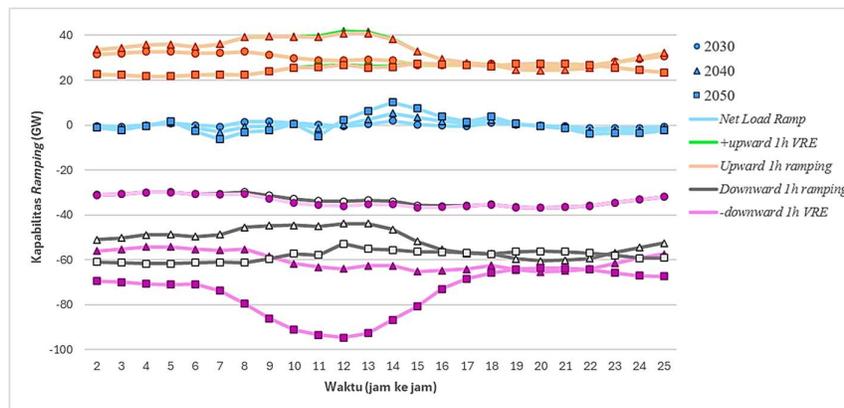
**Tabel 4. Indikator Fleksibilitas Sistem JAMALI Tahun 2030, 2040, dan 2050**

Indikator Fleksibilitas	Satuan	Sistem JAMALI		
		2030	2040	2050
Pembatasan VRE (maksimum)	MW	-	1507,61	706,62
Kehilangan Beban	TWh	-	-	109,79

Sedangkan pada skenario tahun 2050, sistem JAMALI terindikasi tidak mampu beroperasi secara andal karena mengalami pembatasan VRE sebesar 706,62 MW dan kehilangan beban sebesar 109,79 TWh. Hal ini menandakan bahwa fleksibilitas sistem JAMALI di tahun 2050 tidak memadai untuk mengakomodasi bauran pembangkit VRE hingga 52% dari total kapasitas terpasang. Terjadinya pembatasan VRE dan kehilangan beban pada sistem JAMALI juga mengindikasikan bahwa kondisi inersia sistem sangat rendah, yang disebabkan oleh pembangkit VRE yang tidak mampu menyediakan inersia bagi sistem.

### 3.2.2 Kapabilitas Ramping

Grafik kapabilitas *ramping* pembangkit dan *net load ramp*, dalam periode satu jam, hasil simulasi model sistem JAMALI untuk tahun 2030, 2040, dan 2050 dapat dilihat pada Gambar (6).



**Gambar 6. Kapabilitas Ramping Sistem JAMALI Tahun 2030, 2040, dan 2050**

Berdasarkan Gambar (6), kurva *net load ramp* merepresentasikan kondisi perubahan daya pada beban bersih (*net load*) yang ada di sistem JAMALI. Sementara kapabilitas perubahan daya meningkat (*upward ramping*) dan perubahan daya menurun (*downward ramping*) merupakan kapabilitas *ramping* yang dapat disediakan oleh semua unit pembangkit non-VRE secara kumulatif tanpa mempertimbangkan *unit commitment*. Pada Gambar (6), teridentifikasi peningkatan kapasitas VRE pada sistem JAMALI dari tahun 2030 hingga tahun 2050 mengakibatkan peningkatan pada kurva *net load ramp*. Hal ini dipengaruhi oleh bertambahnya kapabilitas *downward ramping* dari pembangkit VRE. Integrasi yang signifikan dari pembangkit VRE, terutama PLTS, di sistem JAMALI dari tahun 2030-2050 membuat kebutuhan *net load ramp* meningkat. Hal ini ditandai dengan semakin tingginya puncak kurva *net load ramp* pada

waktu siang menuju sore hari. Kebutuhan maksimum *net load ramp* di sistem JAMALI pada tahun 2030, 2040, dan 2050, secara berurutan, diperkirakan sebesar 2,4 GW/jam, 5,59 GW/jam, dan 10,68 GW/jam, yang sebagian besar terjadi di pukul 14.00.

Sementara itu, kondisi kapabilitas *upward ramping* di sistem JAMALI dari tahun 2030-2050 didominasi oleh pembangkit non-VRE dan sistem penyimpanan energi. Pada tahun 2030-2040, kapabilitas *upward ramping* relatif mengalami peningkatan. Sedangkan pada tahun 2050, kapabilitas *upward ramping* cenderung mengalami penurunan yang diperkirakan karena pembangkit berbahan bakar fosil, terutama dari batubara dan gas alam, mulai dikurangi kapasitasnya dan digantikan oleh VRE. Secara umum, kapabilitas *upward ramping* di sistem JAMALI dari tahun 2030-2040 masih mampu memenuhi kebutuhan *net load ramp*. Secara berurutan, kapasitas *upward ramping* sistem JAMALI 2030, 2040, dan 2050 pada pukul 14.00 sebesar 28,78 GW/jam, 38,17 GW/jam, dan 25,87 GW/jam.

Dari analisis yang dilakukan terhadap kapabilitas *ramping*, diperoleh informasi bahwa unit pembangkit non-VRE yang ada di sistem JAMALI dari tahun 2030-2050 diperkirakan mampu menyediakan kapabilitas *ramping*, terutama *upward ramping*, yang memadai untuk memenuhi kebutuhan *net load ramp*. Meskipun demikian, kapabilitas *ramping* tersebut masih belum mempertimbangkan *unit commitment* dari masing-masing unit pembangkit. Sehingga, apabila dengan mempertimbangkan *unit commitment*, maka nilai kapabilitas *ramping* yang ada di sistem JAMALI mungkin akan lebih rendah dibandingkan kapabilitas yang ditampilkan pada Gambar (6). Oleh karena itu, meski kapabilitas *ramping* di sistem JAMALI tahun 2050 diperkirakan memadai, namun hasil simulasi optimasi untuk kondisi pasokan dan permintaan tetap menunjukkan adanya pembatasan VRE dan kehilangan beban. Sistem tenaga listrik yang tidak memiliki fleksibilitas yang memadai, berpotensi menghadapi permasalahan pembatasan VRE, bahkan dalam situasi yang ekstrem dapat terjadi kehilangan beban (**International Renewable Energy Agency, 2018a**).

### 3.3 Upaya Peningkatan Fleksibilitas

Peningkatan fleksibilitas dapat dilakukan melalui beberapa upaya yang meliputi, *demand response*, sistem penyimpanan energi, interkoneksi sistem tenaga listrik, *dispatchable* pembangkit terdistribusi, dan operasi multi-mode dari unit siklus gabungan. *Demand response* yang dapat diimplementasikan untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah *peak shaving*. Penerapan *peak shaving* akan dapat mengurangi beban puncak yang terjadi dengan cara mengontrol penggunaan energi (**Billanes dkk., 2017**). Sistem penyimpanan energi berbasis baterai, dapat beroperasi dengan cepat menyuplai kebutuhan energi listrik untuk menjaga keandalan sistem dan menstabilkan kondisi sistem tenaga listrik akibat integrasi dari pembangkit VRE (**Indriani & Garniwa, 2022**). Perluasan sistem melalui interkoneksi antar sistem tenaga listrik akan mampu menyediakan fleksibilitas baru melalui mekanisme ekspor-impor dari suatu daerah yang kelebihan pasokan energi (berasal dari pembangkit VRE atau EBT lainnya) ke daerah yang kekurangan energi listrik (**Yan, dkk, 2020**). Namun, pada penelitian ini, optimasi fleksibilitas sistem JAMALI dengan melibatkan sumber-sumber fleksibilitas lain tidak dilakukan karena di luar batasan masalah studi ini.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi optimasi dan analisis terhadap parameter pembatasan VRE dan kehilangan beban, diketahui bahwa semakin besar bauran VRE di sistem JAMALI, semakin menurun kemampuan fleksibilitas sistem JAMALI. Hal tersebut direpresentasikan oleh kondisi sistem JAMALI di tahun 2030, di mana fleksibilitas sistem JAMALI diperkirakan masih memadai

untuk mengakomodasi bauran VRE hingga sebesar 5% dari total kapasitas terpasang, ditandai dengan tidak terjadinya pembatasan VRE ataupun kehilangan beban pada sistem. Penurunan kemampuan fleksibilitas pada sistem JAMALI mulai terjadi di tahun 2040, ketika bauran VRE meningkat hingga 37% dari total kapasitas terpasang yang ditandai dengan terjadinya pembatasan VRE hingga 1507,61 MW. Di tahun 2050, di mana bauran VRE sudah dominan (52% dari total kapasitas terpasang), sistem JAMALI mengalami pembatasan VRE hingga 706,62 MW dan kehilangan beban sebesar 109,79 MWh. Hal ini mengindikasikan bahwa fleksibilitas sistem JAMALI di tahun 2050 tidak mampu mengakomodasi integrasi VRE yang masif. Sementara itu, dari hasil analisis terhadap kapabilitas *ramping*, diperkirakan pada tahun 2030, 2040, dan 2050 kapabilitas *upward ramping* yang ada di sistem JAMALI masih mampu memenuhi kebutuhan *net load ramp*, dengan kecenderungan nilai yang turun seiring dengan digantikannya pembangkit fosil dengan VRE. Secara berurutan kapabilitas *upward ramping* di sistem JAMALI pada tahun 2030, 2040, dan 2050 sebesar 28,78 GW/jam, 38,17 GW/jam, dan 25,87 GW/jam. Dalam studi ini, sumber-sumber fleksibilitas lain seperti penerapan *demand response*, peningkatan kapasitas sistem penyimpanan energi, terutama dari baterai, interkoneksi antar sistem tenaga listrik, penerapan pembangkit terdistribusi, dan pemanfaatan mobil listrik untuk sistem tenaga listrik belum dipertimbangkan. Sehingga masih terdapat peluang agar studi analisis fleksibilitas pada sistem JAMALI dapat dilanjutkan melalui pengoptimalan sumber-sumber fleksibilitas yang lain.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial yang diberikan oleh Lembaga Dana Abadi Pendidikan (LPDP). Kami juga mengucapkan terima kasih kepada VTT *Technical Research of Finland Ltd* dan *Internasional Renewable Energy Agency (IRENA)* atas dukungannya terhadap pengembangan perangkat lunak IRENA Flextool.

### DAFTAR RUJUKAN

- Billanes, J. D., Ma, Z., & Jørgensen, B. N. (2017). Energy Flexibility in the Power System: Challenges and Opportunities in Philippines. *Journal of Energy and Power Engineering*, 11(9). <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2017.09.005>
- Bloomberg. (2022). *Japan's Costly Ammonia Coal Co-Firing Strategy*.
- Cohran, J., Miller, M., Zinaman, O., Milligan, M., Arent, D., Palmintier, B., O'Malley, M., Mueller, S., Lannoye, E., Tuohy, A., Kujala, B., Sommer, M., Holttinen, H., Kiviluoma, J., & Soonee, S. K. (2014). *Flexibility in 21st Century Power Systems*.
- Correia, D. L. (2020). *Portugal's Route to Neutrality: The Challenge of High Shares of Variable Renewable Energy*. Nova School of Business and Economics.
- Danish Energy Agency, & Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, K. E. dan S. D. M. (2021). *Technology Data for the Indonesian Power Sector Catalogue for Generation and Storage of Electricity*.
- Danish Energy Agency, & Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Renewable Energy Pipeline*.

- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, K. E. dan S. D. M. (2023). *Draft Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2023-2060*.
- Eltohamy, M. S., Moteleb, M. S. A., Talaat, H., Mekhemer, S. F., & Omran, W. (2019a). Technical Investigation for Power System Flexibility. *2019 6th International Conference on Advanced Control Circuits and Systems (ACCS) & 2019 5th International Conference on New Paradigms in Electronics & information Technology (PEIT)*, 299–309. <https://doi.org/10.1109/ACCS-PEIT48329.2019.9062862>
- ENTSOE. (2020). *Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF)*.
- ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program). (2019). *Grid-Integration Requirements for Variable Renewable Energy: Technical Guide*. World Bank.
- Huang, B., Krishnan, V., & Hodge, B.-M. (2018). Analyzing the Impacts of Variable Renewable Resources on California Net-Load Ramp Events. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585852>
- Huber, M., Dimkova, D., & Hamacher, T. (2014). Integration of Wind and Solar Power in Europe: Assessment of Flexibility Requirements. *Energy*, *69*, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.109>
- Hubungan Masyarakat Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan dan Konvservasi Energi. (2022). *Luncurkan Peta Jalan NZE Sektor Energi Indonesia, Ini Hasil Pemodelan IEA*. Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2022/09/05/3252/luncurkan.peta.jalan.nze.sektor.energi.indonesia.ini.hasil.pemodelan.iea?lang=en>
- Indriani, N., & Garniwa, I. (2022). Optimasi Battery Energy Storage System Dalam Mengatasi Renewable Energy Intermittency dan Load Leveling. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, *4*(1), 11–20. <https://doi.org/10.32528/elkom.v4i1.7216>
- International Energy Agency. (2022, Januari 21). *Scaling Up Renewables in the Java-Bali Power System: A Case Study*. <https://www.iea.org/articles/scaling-up-renewables-in-the-java-bali-power-system-a-case-study>
- International Renewable Energy Agency. (2018a). *Power System Flexibility for the Energy Transition Part 1: Overview for Policy Makers*. International Renewable Energy Agency. [www.irena.org](http://www.irena.org)
- International Renewable Energy Agency. (2018b). *Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 2: IRENA FlexTool Methodology*. International Renewable Energy Agency. [www.irena.org](http://www.irena.org)

- International Renewable Energy Agency. (2019). *Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables*. International Renewable Energy Agency. [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)
- Ismail, -, Ismail, A. H., & Nur Rahayu, G. H. N. (2020). Wind Energy Feasibility Study of Seven Potential Locations in Indonesia. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *10*(5), 1970–1978. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.5.10389>
- Kanugrahan, S. P., Hakam, D. F., & Nugraha, H. (2022). Techno-Economic Analysis of Indonesia Power Generation Expansion to Achieve Economic Sustainability and Net Zero Carbon 2050. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(15). <https://doi.org/10.3390/su14159038>
- Lannoye, E., Flynn, D., & O'malley, M. (2012). Evaluation of Power System Flexibility. *IEEE Transactions on Power Systems*, *27*(2), 922–931. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2177280>
- Lin, J., & Magnago, F. H. (2017). *Electricity Markets: Theories and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mohandes, B., Moursi, M. S. El, Hatziargyriou, N., & Khatib, S. El. (2019). A Review of Power System Flexibility with High Penetration of Renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*, *34*(4), 3140–3155. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2897727>
- Pandžić, H. (2022). Flexibility in Power Systems. *Rad Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti. Tehničke znanosti*, *21*, 61–80. <https://doi.org/10.21857/mzvkptq359>
- Premono, B. S., Tjahjana, D. D. D. P., & Hadi, S. (2017). Wind Energy Potential Assessment to Estimate Performance of Selected Wind Turbine in Northern Coastal Region of Semarang-Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, *1788*(1), 030026. <https://doi.org/10.1063/1.4968279>
- PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030*.
- Sarjiya, Putranto, L. M., Isnaini, M. B. S., Rosyied, M. A., Lukhyswara, P., Aditya, F. M. R., Pramono, E. Y., & Isnandar, S. (2018). Wind and Solar Power Plant Modelling and Its Impact to the Jawa-Bali Power Grid. *2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 274–279. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2018.8566584>
- Silalahi, D. F., Blakers, A., Lu, B., & Cheng, C. (2022). Indonesia's Vast Off-River Pumped Hydro Energy Storage Potential. *Energies*, *15*(9). <https://doi.org/10.3390/en15093457>

- Tambunan, H. B., Hakam, D. F., Prahastono, I., Pharmatrisanti, A., Purnomoadi, A. P., Aisyah, S., Wicakson, Y., & Sandy, I. G. R. (2020). The Challenges and Opportunities of Renewable Energy Source (RES) Penetration in Indonesia: Case Study of Java-Bali Power System. *Energies*, *13*(22). <https://doi.org/10.3390/en13225903>
- Xing, T., Caijuan, Q., Liang, Z., Pengjiang, G., Jianfeng, G., & Panlong, J. (2017). A Comprehensive Flexibility Optimization Strategy on Power System with High Percentage Renewable Energy. *2nd International Conference on Power and Renewable Energy*, 553–558. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2017.8390596>
- Yan, X., Jiang, H., Gao, Y., Li, J., & Abbes, D. (2020). Practical Flexibility Analysis on Europe Power System with High Penetration of Variable Renewable Energy. *iSPEC 2020 - Proceedings: IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Energy Transition and Energy Internet*, 395–402. <https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351168>