

Analisis Indeks Keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Angin-Surya Menggunakan Metode EENS

(Reliability Index Analysis of Hybrid Power Plant Using EENS Method)

RAMADONI SYAHPUTRA, FAHRIAN NOOR, FAARIS MUJAAHID

ABSTRAK

Pengembangan sumber energi terbarukan, terutama pembangkit listrik tenaga angin dan surya sangat penting di Indonesia. Hal ini disebabkan kedua jenis pembangkit tersebut dinilai paling potensial dan realistis untuk mendukung program pengembangan energi terbarukan di Indonesia. Dalam penelitian ini disajikan studi tentang indeks keandalan pembangkit listrik hibrid tenaga angin dan surya. Metode untuk menganalisis indeks keandalan adalah metode EENS (*expected energy not supplied*). Dalam penelitian ini dilakukan analisis lapangan pada pembangkit listrik yang telah beroperasi di Kabupaten Bantul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai EENS masih belum memenuhi standar yaitu $<0,002\%$ per tahun. Studi yang dilakukan pada tahun 2019 ini menyimpulkan bahwa pembangkit listrik hibrid berbasis tenaga angin dan surya ini belum dapat diandalkan untuk mendukung ketersediaan energi listrik di wilayah Bantul.

Kata Kunci: Keandalan, energi terbarukan, sistem hibrid, energi angin, energi surya *photovoltaic*, EENS

ABSTRACT

The development of renewable energy sources, especially wind and solar power plants, is very important in Indonesia. This fact is because these two types of power plants are considered the most potential and realistic to support renewable energy development programs in Indonesia. In this research, a study on the reliability index of wind and solar-based power plants is presented. The method for analyzing the reliability index is the EENS (expected energy not supplied) method. This study conducted a field analysis on a power plant that has been operated in Bantul district, Yogyakarta Special Region province. The results of the study show that the EENS value still does not meet the standard, namely $<0.002\%$ per year. The study conducted in 2019 concluded that wind and solar-based hybrid power plants could not be relied on to support the availability of electrical energy in the Bantul area.

Keywords: Reliability, renewable energy, hybrid system, wind energy, solar *photovoltaic* energy, EENS

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga hibrid berbasis angin dan matahari merupakan sistem pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan (Brusco dkk, 2014). Pembangkit listrik pada penelitian ini merupakan pembangkit listrik yang dibangun di Dusun Ngentak, Poncosari,

Srandakan, Kabupaten Bantul, Yogyakarta, Indonesia pada tahun 2019. Pembangkit listrik ini telah memberikan solusi untuk memenuhi penyediaan energi listrik. Sistem pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo terintegrasi dengan dua pembangkit listrik, yaitu pembangkit listrik tenaga surya (*photovoltaic arrays*) dan pembangkit listrik tenaga angin. Sistem pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo memiliki 238 unit panel surya dan

34 unit turbin angin yang mampu menghasilkan daya listrik 90 kW. Namun, sistem pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo sudah tidak berfungsi optimal lagi untuk menyuplai listrik bagi masyarakat. Hal tersebut diakibatkan oleh masalah angin yang mengakibatkan pembangkit listrik tenaga angin yang kurang efektif dan permasalahan pada peralatan yang rusak seperti inverter yang berfungsi untuk memindahkan energi listrik dari panel surya ke baterai. Selain itu, baterai pada sistem pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo juga harus diganti karena sudah tidak berfungsi secara maksimal (Syahputra dan Soesanti, 2017).

Akibat dari permasalahan tersebut dapat menimbulkan kerugian bagi masyarakat yang menggunakan sistem pembangkit hibrid, dimana sistem pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo secara aktif dikelola oleh masyarakat dan menjadi acuan dalam pengelolaan energi terbarukan di Indonesia dalam hal kemandirian energinya. Oleh karena itu penting untuk menjaga keandalan sistem pembangkit untuk kelangsungan distribusi listrik (Syahputra dkk, 2016).

Untuk memenuhi dan melayani kebutuhan kelistrikan konsumen, keandalan sistem pembangkit sangat penting. Tingkat keandalan yang tepat akan menentukan kontinuitas penyaluran listrik ke sistem tenaga, dan ini dapat dihitung menggunakan indeks *Expected Energy Not Supplied* (EENS). EENS merupakan perhitungan atau kemungkinan energi yang tidak dapat disuplai oleh generator. Nilai EENS sangat bergantung pada variasi generator yang beroperasi pada sistem dalam waktu tertentu (Hui dkk, 2016).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai EENS dalam menentukan keandalan pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo, menganalisis hubungan kurva waktu beban dalam perhitungan EENS, dan mengetahui nilai EENS pada pembangkit hibrid Pantai Baru Pandansimo. Pembangkit mengikuti standar PLN. Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Pantai Baru Pandansimo dalam mengembangkan dan meningkatkan kualitas perusahaan serta untuk mengetahui seberapa besar tingkat keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Pantai Baru Pandansimo.

Pembangkit Listrik Hibrid

Pembangkit listrik hibrid adalah pembangkit listrik yang memiliki sistem pembangkit untuk melayani area yang berdiri sendiri maupun area yang tidak terjangkau jaringan. Untuk sumber energi primer, pembangkit listrik *hybrid* menggunakan energi terbarukan, dan sumber energi cadangan menggunakan *Diesel-Generator Set* (Syahputra, 2017; Mujaahid dkk, 2017). Pada pembangkit listrik hibrid, solar, angin, dan lainnya sebagai energi terbarukan dapat digabungkan dengan *Diesel-Generator Set* sehingga dapat menjadi generator yang efisien, efektif, dan andal untuk menyuplai kebutuhan energi listrik masyarakat atau pelanggan. Beban yang dapat memenuhi kebutuhan listrik dengan memanfaatkan pembangkit listrik hibrid hanya berupa penerangan rumah atau kebutuhan peralatan listrik serta kebutuhan industri kecil di daerah tersebut (Hariadi dkk, 2018). Dalam kasus lain, energi *solar cell* hanya dapat diperoleh pada siang hari saat cuaca cerah, sedangkan energi angin dapat diperoleh pada siang atau malam hari. Untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan baterai untuk menyimpan energi yang telah dikumpulkan dari energi sel surya dan energi angin (Hui dkk, 2015).

Pada pembangkit listrik hibrid dibutuhkan energi cadangan atau darurat karena kekurangan energi yang mungkin terjadi jika hanya mengandalkan energi solar cell dan energi angin (Jiang dkk, 2017). Kondisi cuaca mendung atau hujan hanya akan menghasilkan energi yang lebih sedikit dari energi matahari, dan ketiadaan angin dapat membuat pembangkit listrik tenaga angin tidak menghasilkan energi. Oleh karena itu diperlukan sumber energi cadangan untuk mengatasi masalah kekurangan energi pada pembangkit listrik hibrid (Peng dkk, 2018).

Sistem tenaga hibrid terdiri dari dua sumber energi yaitu matahari dengan bantuan modul PV dan angin dengan bantuan turbin angin dan generator sebagai energi cadangan. Prinsip kerja pembangkit listrik hibrid untuk pemanfaatan energi matahari, panel surya menangkap sinar matahari, yang kemudian berubah menjadi energi listrik (Sher dkk, 2018). Ada sel fotovoltaik di panel surya yang terbuat dari dua lapisan silikon (Ardiyanto dkk, 2019). Ketika panel surya terkena sinar matahari, ion positif dan negatif akan dihasilkan di lapisan

silikon, dan kemudian akan menghasilkan energi listrik (Hossain dkk, 2013).

Untuk memanfaatkan energi angin secara bersamaan, yaitu saat angin bertiup, roda turbin bergerak dan memutar rotor pada genset diesel, yang kemudian menghasilkan energi listrik. Energi listrik tersebut kemudian didistribusikan ke baterai untuk disimpan (Tang dkk, 2017).

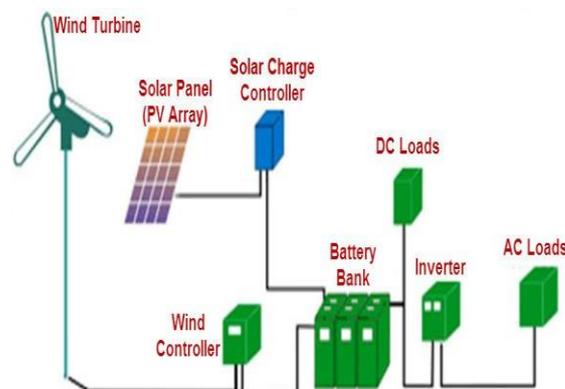
Energi listrik dari kincir angin dan sel surya berupa arus searah, sedangkan peralatan elektronik seperti TV, pompa air, setrika listrik, dan keperluan lainnya menggunakan arus bolak-balik. Untuk itu diperlukan konverter arus dari DC ke AC, yaitu inverter. Gambar 1 menunjukkan pembangkit listrik hibrid yang khas (Ghasemi dkk, 2018).

Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Pantai Baru merupakan gabungan dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Pembangkit Listrik Tenaga Angin. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya digunakan panel surya yang disusun secara seri untuk menghasilkan tegangan dan disusun secara paralel untuk mendapatkan arus yang besar. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan kincir angin atau turbin angin kecepatan rendah, dengan spesifikasi turbin

angin rata-rata dengan kapasitas 1 kW (Farhat dkk, 2015).

Di Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Pantai Baru terdapat tiga kelompok pembangkit listrik yaitu kelompok barat, kelompok timur, dan kelompok KKP. Di kelompok barat, terdapat sistem turbin angin 240 V dan sistem panel surya 120 V dengan total kapasitas 36 kW. Pada kelompok timur terdapat sistem pembangkit 48 V, 120 V, dan 240 V yang terdiri dari panel surya dan turbin angin dengan total kapasitas 44 kW. Pada kelompok KKP hanya terdapat panel surya dengan sistem 48 V dengan total kapasitas 10 kW. Dalam sistem turbin angin sering digunakan perangkat *dummy load*. *Dummy load* adalah tempat pembuangan untuk tegangan lebih yang dihasilkan oleh generator. Jika tegangan yang dibangkitkan mencapai 260 V maka tegangan tersebut akan dialihkan ke *dummy load* (Zhang dkk, 2019).

Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang memberikan kontribusi yang signifikan dalam memenuhi kebutuhan listrik khususnya di daerah terpencil (Kebede dkk, 2018). Gambar 2 menunjukkan salah satu pembangkit listrik tenaga angin di Pantai Baru, Bantul.



GAMBAR 1. Skema pembangkit listrik tenaga hibrid angin dan surya



GAMBAR 2. Salah satu pembangkit listrik tenaga angin di Pantai Baru, Bantul

Spesifikasi turbin angin yang terdapat pada PLTH Pantai Baru untuk jenis kisi dan segitiga dapat dilihat pada Tabel 1. Pembangkit Listrik Tenaga Angin dapat menjadi salah satu solusi permasalahan lingkungan dan ketersediaan sumber energi karena energi angin adalah energi tersedia setiap saat dan, yang terpenting, bebas dari polusi. Turbin angin yang digunakan pada pembangkit listrik hibrid Pantai Baru adalah jenis turbin angin kisi.

Panel surya dan kincir angin saling membantu dalam menyuplai energi listrik. Saat panas terik sementara kecepatan angin rendah, panel surya bertugas memasok energi listrik dan kemudian menyimpannya ke dalam baterai. Begitu pula sebaliknya, saat cuaca hujan sedangkan kecepatan angin stabil, maka kincir angin akan mengambil alih sebagai penyuplai energi. Gambar 3 menunjukkan panel surya di pembangkit listrik hibrid Pantai Baru sedangkan spesifikasinya ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 1. Spesifikasi turbin angin pada pembangkit listrik tenaga angin di Pantai Baru, Bantul

Spesifikasi turbin angin	
Jenis	1000 W/240 V
Daya maksimum	1000 W
Tegangan maksimum	240 V
Laju angin menyela	$3,5 \text{ m/s} < v < 25 \text{ m/s}$
Laju angin memotong	$v < 3,5 \text{ m/s}, v < 25 \text{ m/s}$
Laju rotasi	375 rpm
Daya generator	1,5 kW
Jenis magnet generator	Magnet permanen
Tinggi tower	15 m
Jumlah bilah	3 buah
Panjang bilah	1,450 m
Bobot bilah	2,45 kg
Material bilah	Serat diperkuat
Pengatur bilah	Pelat ekor



GAMBAR 3. Panel surya di pembangkit listrik hibrid Pantai Baru, Bantul

TABEL 2. Spesifikasi panel surya pada pembangkit listrik tenaga angin di Pantai Baru, Bantul

Spesifikasi panel surya	
Manufaktur	Skytec
Model	SIP-220
Standar uji	1,5 E: 1000 W/m ²
Suhu	25°C
Daya maksimum	220 W
Tegangan hubung terbuka	36,24 V
Arus hubung singkat	7,93 A
Tegangan maksimum	29,82 V
Arus maksimum	7,39 A
Tegangan sistem	12 V
Tegangan sistem maksimum	1000 V
Bobot	19 kg
Dimensi	987 x 1637 x 45 mm

Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan panel surya sebagai alat utamanya (Metry, 2017). Pada pembangkit hibrid Pantai Baru, panel surya (PV) disusun secara seri untuk menghasilkan tegangan dan disusun secara paralel sehingga menghasilkan arus yang besar. Material yang terdapat pada panel surya adalah silikon polikristalin dengan pengaturan sudut kemiringan 15 derajat ke tanah. Energi listrik yang diperoleh panel surya bergantung pada besarnya daya dari sistem pada saat baterai mencapai tegangan maksimumnya. Panel surya merupakan komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga surya. Panel surya adalah perangkat elektronik yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik (Ahmed dan Salam, 2018).

Metode EENS

Expected Energy Not Supplied Method (EENS) adalah perhitungan atau kemungkinan energi yang tidak dapat disuplai oleh generator. Nilai EENS sangat bergantung pada variasi generator yang beroperasi pada sistem dalam waktu tertentu. Standar keandalan EENS didasarkan pada Pasar Listrik Nasional (*National Electrical Market, NEM*) bahwa energi yang tidak tersedia setiap tahun tidak lebih dari 0,002% dari total konsumsi energi di daerah tersebut. Nilai EENS diperoleh dengan mengalikan nilai energi yang dibatasi dengan probabilitas generator beroperasi. Energi yang dibatasi diperoleh dari

area di bawah kurva beban lama yang terbentuk, bagian-bagian dari area tersebut ditentukan oleh nilai generator yang beroperasi atau dalam pelayanan.

Kurva beban dengan persamaan kurvanya misalnya didefinisikan sebagai:

$$f(x) = -0.1033x^2 + 0.6082x + 76.057 \quad (1)$$

Persamaan garis digunakan untuk mencari nilai energi yang dibatasi yang tidak membentuk angka datar. Berikut ini adalah rumus yang digunakan untuk mencari nilai energi yang dibatasi.

$$EC = \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x) dx \quad (2)$$

dimana EC adalah Energy Curtailed, $f(x)$ adalah persamaan kurva beban, dan x_n, x_{n+1} adalah batas atas dan bawah dari integral, yang merupakan nilai titik perpotongan antara kurva beban lama dan besarnya generator dalam operasi atau layanan.

Perhitungan yang digunakan untuk menghitung nilai energi yang dibatasi yang tidak membentuk angka datar adalah dengan memasukkan persamaan kurva lama beban dengan batas integral yang sesuai dengan cutoff yang terbentuk. Nilai energi yang dibatasi dapat ditemukan dengan menggunakan rumus bangun datar jika area yang dibentuk oleh perpotongan antara nilai generator dalam-layanan dan kurva beban lama menghasilkan gambar dua dimensi. Sehingga dapat dikatakan energi yang dibatasi sama dengan luas atau luas yang terbentuk di bawah kurva lama beban yang terbentuk.

Nilai EENS dapat diketahui dengan mengalikan nilai energi yang dibatasi dengan probabilitas generator dalam pelayanan, cara menghitung nilai EENS dapat dilihat pada rumus berikut:

$$EENS = EC \times P \quad (3)$$

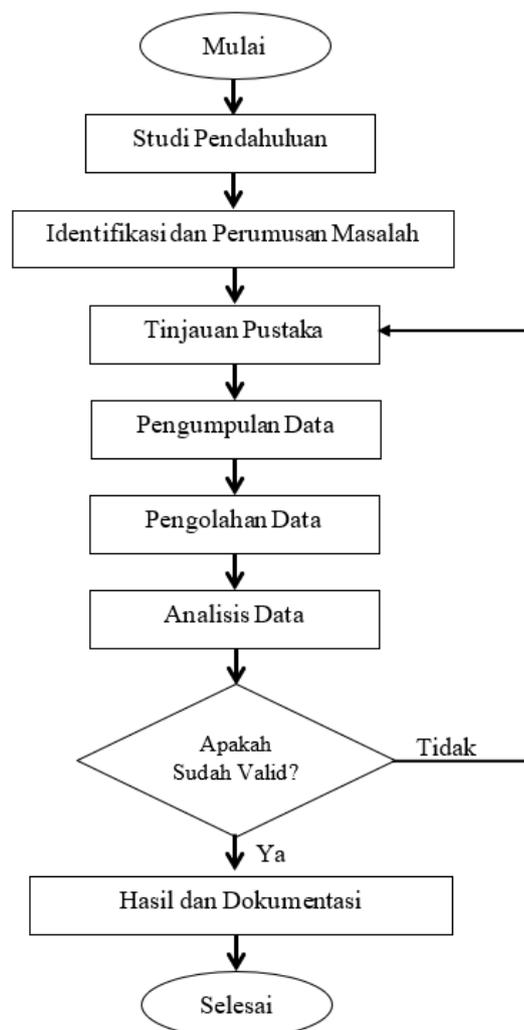
Dimana, EENS adalah *expected energy not supplied*, EC adalah energi yang dilingkupi, dan P adalah probabilitas daya dalam-layanan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid yang merupakan sistem pembangkit energi listrik dengan menggunakan energi terbarukan. Lokasi penelitian pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid terletak di

Dusun Ngentak, Pongosari, Srandakan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah unit laptop dengan sistem operasi Windows 10.1 64 bit sebagai media perancangan dan pengujian simulasi yang akan dilakukan. Software Microsoft Word dan Microsoft Excel sebagai software yang digunakan untuk melakukan perancangan dan perhitungan pada penelitian ini. Data beban harian, mingguan, bulanan, dan tahunan yang digunakan dan dipasok oleh sistem pembangkit hibrid Pantai Baru digunakan dalam analisis kinerja pembangkit hibrida. Langkah-langkah penelitian ini dituangkan dalam bentuk diagram alir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



GAMBAR 4. Diagram alir langkah-langkah penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Forced Outage Rate (FOR) Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Pembangkit listrik hibrid di sistem Pantai Baru, unit pembangkit tenaga listrik dibagi menjadi tiga unit. Pembangkit listrik pada sistem pembangkitan ini ada dua jenis, yaitu panel surya dan turbin angin (segitiga dan kisi) yang masing-masing memiliki kapasitas daya terpasang. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Pantai Baru, total kapasitas terpasang 90 kW yang terdiri dari kelompok timur 44 kW, kelompok barat 36 kW, dan kelompok KKP 10 kW, dengan 238 unit panel surya dan 34 unit turbin angin.

Setelah mengetahui jumlah unit pada PLTH Pantai Baru yang memiliki tiga kelompok unit pembangkit, maka kombinasi yang mungkin terjadi dalam pengoperasian sistem tersebut dapat diketahui dari segi pasokan listrik. Pada perhitungan ini nilai n merupakan banyaknya unit pembangkit yang terdapat pada sistem. Dengan jumlah unit pembangkit 3, kombinasi pembangkit listrik tenaga angin adalah 8.

Probabilitas individu atau kemungkinan dari setiap kombinasi dapat dihitung menggunakan *Forced Outage Rate (FOR)*. Perhitungan FOR dilakukan dengan mengetahui lamanya gangguan dari masing-masing unit pembangkit listrik hibrid Pantai Baru. Perhitungan FOR juga dilakukan sebelum menghitung probabilitas individu atau probabilitas kejadian.

Gangguan yang terjadi pada PLTH Pantai Baru, diantaranya pada tanggal 21 Januari 2019 dilakukan pemeliharaan untuk mengganti komponen inverter 48 V dan transformator yang terbakar di western group, sehingga dibutuhkan waktu perawatan selama 120 menit. Pada tanggal 9 Maret 2019 telah dilakukan perbaikan pada unit gugus timur yaitu dilakukan perbaikan pada interval turbin angin 5 kW dan 10 kW dengan waktu pengerjaan 120 menit. Kemudian pada 10 Maret 2019, untuk kelompok KKP melakukan perbaikan instalasi listrik perkantoran dan penerangan jalan umum yaitu pemutusan saluran listrik dengan durasi 180 menit.

Dalam perhitungan ini diperoleh nilai FOR dari masing-masing kelompok. Untuk kelompok timur yang mengalami gangguan selama 120 menit memiliki nilai FOR 0.0769, dan nilainya sama dengan kelompok barat yang memiliki

gangguan selama 120 menit, maka nilai FOR dari kelompok barat sama. sebagai kelompok timur. Untuk nilai FOR kelompok KKP yang mengalami gangguan selama 180 menit, nilai FOR sebesar 0.1111.

Setelah didapatkan nilai FOR pada setiap unit, maka akan diketahui besarnya gangguan yang terjadi dan kemungkinan unit tersebut beroperasi dalam waktu unit tersebut dioperasikan (1-FOR). Kemudian nilai FOR akan digunakan untuk mencari probabilitas individu.

Nilai Individual Probability (IP) Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Setelah mencari nilai FOR masing-masing unit, langkah selanjutnya adalah menghitung probabilitas individu (IP). Jumlah daya yang memaksa pemadaman dari sistem satu unit, dua unit, dan tiga unit akan dihitung. Setiap perhitungan akan mengetahui nilai kW pada saat pemadaman, dimulai dari nilai 0 (nol) sama dengan yang terbesar.

Pada sistem kelompok timur, nilai kW pada pemadaman menggambarkan jumlah daya yang terputus. Nilai 0 (nol) menunjukkan bahwa jika terjadi gangguan sebesar 0 kW, maka probabilitas individualnya adalah (1-FOR1) yaitu $1 - 0,0769 = 0,9231$ artinya 0,9231 kemungkinan unit beroperasi, sedangkan bila daya memiliki a gangguan sebesar 44 kW atau sebesar kelompok unit daya, maka probabilitas individual adalah FOR1 atau kemungkinan sistem mengalami kerusakan sebesar 0,0769.

Dalam sistem kelompok barat, sama dengan kelompok timur, yang berbeda hanya kekuatan. Nilai awal pada kW pada pemadaman sama dengan nilai awal, karena setiap perhitungan dimulai ketika sistem mengalami gangguan sebesar 0 kW yang menjelaskan jika terjadi gangguan pada 0 kW, maka probabilitas individualnya adalah (1-FOR2) yaitu $1 - 0,0769 = 0,9231$ artinya 0,9231 kemungkinan unit beroperasi, sedangkan bila daya terganggu sebesar 36 kW atau sama dengan daya satuan grup pembangkit, maka probabilitas individualnya adalah FOR2 atau kemungkinan sistem diganggu oleh 0,0769.

Pada sistem kelompok KKP sama dengan sistem kelompok timur dan barat, perbedaannya hanya pada besarnya kekuatan dan nilai FOR. Pada tabel diatas nilai kW pada outage menggambarkan besarnya daya yang

mengalami gangguan. Nilai 0 (nol) menjelaskan jika terjadi gangguan sebesar 0 kW, maka probabilitas individualnya adalah $(1-\text{FOR}_3)$ yaitu $1 - 0.1111 = 0.8889$ artinya 0.8889 merupakan likelihood suatu unit operasi, sedangkan bila daya mengalami gangguan sebesar 10 kW atau sama dengan daya satuan dari grup pembangkit, maka probabilitas individual adalah FOR_3 atau kemungkinan sistem mengalami error sebesar 0,1111.

Selanjutnya menghitung probabilitas sistem individu dengan menggabungkannya menjadi dua unit yaitu kelompok KKP dengan kelompok barat terlebih dahulu. Perhitungan probabilitas individu yang terdiri dari dua unit yaitu western group unit dan CTF group dimana nilai 0 (nol) pada kolom satuan menggambarkan unit pembangkit yang mengalami pemadaman paksa dan nilai 1 (satu) menggambarkan unit pembangkit sedang beroperasi.

Probabilitas individu kedua unit, kelompok barat, dan kelompok KKP beroperasi normal, atau tidak terjadi gangguan maka besarnya daya interferensi adalah 0 kW dengan perhitungan probabilitas individu, $\text{IP} (0 \text{ kW}) = (1-\text{FOR}_3) (1-\text{FOR}_2) = 0.8889 \times 0.9231 = 0.8205$.

Kondisi selanjutnya adalah pada saat kelompok KKP mengalami gangguan (0 kW) sedangkan kelompok barat dalam kondisi normal (36 kW), maka total kapasitas yang mengalami gangguan adalah $10 \text{ kW} + 0 \text{ kW} = 10 \text{ kW}$, sehingga nilai probabilitas individu adalah $\text{ip} (10 \text{ kW}) = \text{FOR}_3 (1-\text{FOR}_2) = 0,1111 \times 0,9231 = 0,1026$.

Bila kondisi selanjutnya berlawanan dengan kondisi kedua yaitu saat kelompok KKP dalam kondisi normal (10 kW) sedangkan kelompok barat mengalami gangguan (0 kW) maka total kapasitas yang terputus adalah $0 \text{ kW} + 36 \text{ kW} = 36 \text{ kW}$, sehingga nilai probabilitas individu adalah $\text{IP} (36 \text{ kW}) = (1-\text{FOR}_3) \text{FOR}_2 = 0.8889 \times 0.0769 = 0.0684$.

Probabilitas individual apabila kedua satuan mengalami interferensi maka besarnya daya interferensi adalah $10 \text{ kW} + 36 \text{ kW} = 46 \text{ kW}$, sehingga nilai probabilitas individu adalah $\text{ip} (46 \text{ kW}) = \text{FOR}_3 \times \text{FOR}_2 = 0,1111 \times 0,0769 = 0,0085$.

Langkah selanjutnya adalah menghitung probabilitas individu dari 3 (tiga) unit pembangkit. Perhitungan untuk tiga kelompok pembangkit dengan perhitungan probabilitas individu ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL 3. Perhitungan untuk tiga kelompok pembangkit dengan perhitungan probabilitas individu

Nama Grup KKP	Nama Grup		Daya masuk (kW)	Daya Keluar (kW)	Probabilitas	
	Barat	Timur				
1	1	0	44	46	$(1-\text{FOR}_3) (1-\text{FOR}_2) \text{FOR}_1$	0.063
0	1	0	54	36	$\text{FOR}_3 (1-\text{FOR}_2) \text{FOR}_1$	0.008
1	0	0	80	10	$(1-\text{FOR}_3) \text{FOR}_2 \times \text{FOR}_1$	0.005
0	0	0	90	0	$\text{FOR}_3 \times \text{FOR}_2 \times \text{FOR}_1$	0.001
1	1	1	0	90	$(1-\text{FOR}_3) (1-\text{FOR}_2) (1-\text{FOR}_1)$	0.757
0	1	1	10	80	$\text{FOR}_3 (1-\text{FOR}_2) (1-\text{FOR}_1)$	0.095
1	0	1	36	54	$(1-\text{FOR}_3) \text{FOR}_2 (1-\text{FOR}_1)$	0.063
0	0	1	46	44	$\text{FOR}_3 \times \text{FOR}_2 (1-\text{FOR}_1)$	0.008
Total						1

Tabel 3 dibuat menjadi dua bagian yaitu kW pada tabel outage, tabel pertama adalah (n-1) unit + 0 dan pada tabel kedua adalah (n-1) unit + Pn. Dalam hal ini, (n -1) satuan adalah nilai kW pemadaman yang telah digunakan dari perhitungan sebelumnya yaitu 0 kW dan 10 kW, sedangkan Pn adalah nilai kW pemadaman yang akan dimasukkan ke dalam perhitungan probabilitas individu yaitu 36 kW.

Dari Tabel 3 dapat ditambahkan perhitungan probabilitas individu untuk kelompok yang akan dijumlahkan yaitu:

- Untuk (n-1) unit + 0 = probabilitas individu dalam tabel (n-1) unit kali (1-FORn)
- Untuk (n-1) unit + Pn = probabilitas individu dalam tabel (n-1) unit kali (1-FORn)

Dimana dalam perhitungan $FORn = FOR1$ dan $(1-FORn) = (1-FOR1)$.

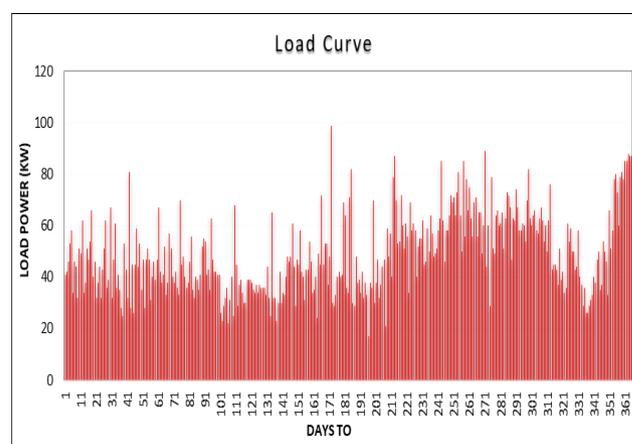
Kurva Beban Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Langkah selanjutnya adalah menganalisis keandalan sistem pembangkit listrik hibrid berdasarkan kurva beban. Kurva beban menggambarkan variasi beban pada generator, yang diukur dalam satuan KW sebagai fungsi waktu. Fungsi waktu yang dimaksud bisa harian, mingguan, bulanan, dan tahunan. Namun pembahasan ini akan dibatasi satu hari dalam setahun. Data yang diperoleh merupakan data perhari. Kurva beban menunjukkan hubungan antara kemampuan suplai daya (watt)

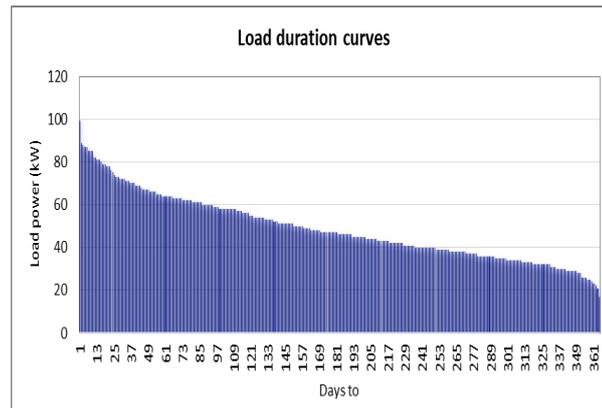
dengan lamanya waktu pelayanan (tahun). Kurva beban lama diperoleh dari kurva beban yang kemudian diurutkan dari daya beban terbesar ke terkecil dengan fungsi waktu yang sama dari hari ke-1 sampai dengan hari ke 364. Kurva beban listrik yang dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019 adalah ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan kurva beban listrik, seperti terlihat pada Gambar 5, terdapat beban yang melebihi kW sistem operasi sebesar 99 kW pada tanggal 21 Juni yang menyebabkan beban rugi atau padam. Setelah didapat kurva beban, maka selanjutnya adalah membuat kurva durasi beban dengan mengurutkan nilai daya beban dari yang terbesar di kiri dan nilai terkecil di kanan dari grafik. Gambar 5 menunjukkan kurva durasi beban listrik yang dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019.

Setelah membuat kurva durasi pembebanan, maka akan diperoleh nilai waktu t. Syarat untuk menentukan nilai t adalah daya beban \geq kW operasi atau daya tersedia. Ketika kW operasi adalah 90 kW, beban pemadaman adalah 0 kW, atau sistem tidak memiliki gangguan adalah 0 kW. Dengan demikian, sistem beroperasi secara optimal tanpa adanya gangguan, yaitu 90 kW. Nilai t saat kondisi satu karena saat kondisi beban lebih baik dari 90 kW yaitu 99 kW, dan kurva beban yang telah disusun pada hari ke-1 maka nilai t = 1. Jika ada beban pada kurva lama, beban operasi lebih dari 5 kW; akan ada pelepasan beban.



GAMBAR 5. Kurva beban listrik yang dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019



GAMBAR 6. Kurva durasi beban listrik yang dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019

Pada saat daya operasi adalah 80 kW, beban pemadaman adalah 10 kW, atau sistem mengalami gangguan sebesar 10 kW, dari daya terpasang sebesar 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 16 karena pada saat nilai kW beban 81 dan pada kurva lama beban yang telah diatur berada pada hari ke 16, sehingga nilai $t = 16$. Saat kW operasi adalah 54 kW, beban mati 36 kW, atau sistem mengalami gangguan 36 kW, dari daya terpasang 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 129 karena pada saat nilai beban kW adalah 54 dan pada kurva lama beban yang telah disusun berada pada hari ke-129 sehingga nilai $t = 129$.

Saat kW operasi 46 kW, beban on-outage 44 kW, atau sistem yang mengalami interferensi 44 kW, dari besaran daya terpasang 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 190 karena pada saat kW nilai beban 46 dan pada kurva beban lama yang telah diatur adalah pada hari ke 190 maka nilai $t = 190$. Saat kW beroperasi adalah 44 kW, maka beban mati 46 kW, atau sistem mengalami gangguan 46 kW, dari daya terpasang yaitu 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 226 karena pada saat beban kW bernilai

44 dan pada kurva lama beban yang telah diatur berada pada hari ke-226, sehingga nilai $t = 226$.

Pada saat daya operasi 36 kW maka beban on-outage 54 kW, atau sistem yang terputus adalah 54 kW, dari besaran daya terpasang 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 290 karena pada saat nilai kW beban adalah 36 dan pada kurva lama beban yang telah diatur berada pada hari ke 290 sehingga nilai $t = 290$. Pada saat kW beroperasi Pada saat daya sebesar 10 kW, maka beban mati adalah 80 kW atau sistem mengalami gangguan sebesar 80 kW, dari daya terpasang yaitu 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 364 karena pada saat nilai beban kW adalah 17 dan pada kurva yang lama beban yang telah disusun berada pada hari ke 364 sehingga nilai $t = 364$. Pada saat operasi kW sebesar 0 kW, maka beban yang padam 90 kW, atau sistem mengalami gangguan sebesar 90 kW, dari daya terpasang sebesar 90 kW. Nilai t pada saat kondisi adalah 364 karena pada saat nilai beban kW adalah 0 dan pada kurva lama beban yang telah diatur berada pada hari ke 364, sehingga nilai $t = 364$. Ringkasan Hasil perhitungan waktu t ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL 3. Ringkasan hasil perhitungan waktu t pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019

Daya Out Service (kW)	Daya In Service (kW)	Waktu t
0	90	1
10	80	16
36	54	129
44	46	190
46	44	226
54	36	290
80	10	364
90	0	364

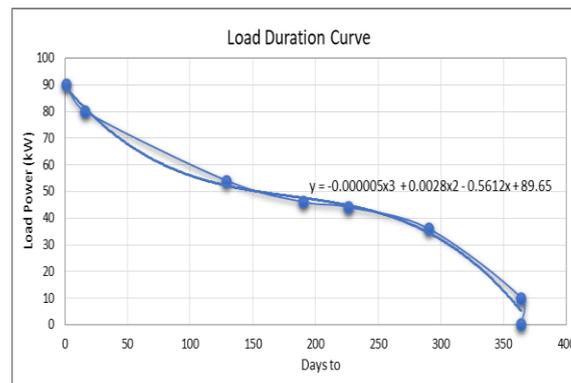
Perhitungan Expected Energy Not Supplied (EENS)

Expected Energy Not Supplied (EENS) adalah perhitungan atau kemungkinan energi yang tidak dapat disuplai oleh generator. Nilai EENS sangat bergantung pada variasi generator yang beroperasi pada sistem dalam waktu tertentu. Nilai EENS diperoleh dengan mengalikan nilai energi yang dibatasi dengan probabilitas generator beroperasi. Nilai tersebut dapat ditunjukkan pada persamaan $EENS = EC \times P$. Energi yang dibatasi diperoleh dari area di bawah kurva beban lama yang terbentuk, bagian-bagian dari area tersebut ditentukan oleh nilai generator yang beroperasi atau dalam pelayanan. Gambar 7 menunjukkan kurva durasi beban listrik dengan persamaannya yang

dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019.

Dari kurva durasi beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, persamaan garis kurvanya adalah $y = -0,000005x^3 + 0,0028x^2 - 0,5612x + 89,65$. Persamaan ini digunakan untuk mencari energi yang dibatasi yang bentuknya gambar dua dimensi. Rumusan yang digunakan untuk membatasi nilai energi adalah sesuai dengan persamaan (2).

Berdasarkan rumus tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan kondisi *out of service* berdasarkan data seperti pada Tabel 3. Nilai daya pada kondisi *out of service* digunakan sebagai dasar untuk variabel x . Nilai energi yang dibatasi dirangkum dalam tabel, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.



GAMBAR 7. Kurva durasi beban listrik dengan persamaannya yang dilayani oleh pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019

TABEL 4. Perhitungan nilai energi yang dibatasi pembangkit listrik hibrid Pantai Baru selama tahun 2019

Daya In Service (kW)	Time t	Energi Terhimpun (kWh)
0	364	18524
10	364	14884
36	190	4837
44	226	3498
46	190	2937
54	129	1587
80	16	86
90	1	-1

TABEL 5. EENS untuk pembangkit listrik hibrid Pantai Baru

EENS untuk UNIT 1, 2 and 3				
Daya Out Service (kW)	Daya In Service (kW)	Probabilitas	Energi Terhimpun (kWh)	Ekspektasi Energi (kWh)
0	90	0.757	0	0
10	80	0.095	86	8
36	54	0.063	1587	100
44	46	0.063	2937	185
46	44	0.008	3498	27
54	36	0.008	4837	38
80	10	0.005	14884	78
90	0	0.001	17876	12
EENS _{1,2,3}				449

Setelah itu, langkah selanjutnya adalah mencari nilai EENS dengan mengalikan nilai energi yang dibatasi dengan probabilitas generator sedang dalam pelayanan. Hasil perhitungan EENS secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 5.

Berdasarkan hasil perhitungan, seperti terlihat pada Tabel 5, Expect Energy Not Supplied (EENS) di PLTH Pantai Baru dengan total 3 unit pembangkit akan menghasilkan total nilai 449 kWh per tahun atau 2.512% pada tahun 2019. Jika dinyatakan dalam persentase, maka diperoleh nilai EENS sebagai berikut:

$$\text{EENS (\%)} = (\text{EENS Value}) / (\text{Nilai total data beban generator selama 1 tahun}) \times 100\%$$

$$\text{EENS (\%)} = (449 \text{ kWh}) / (17876 \text{ kWh}) \times 100\%$$

$$\text{EENS (\%)} = 2.512\%$$

Nilai tersebut masih belum memenuhi standar Pasar Listrik Nasional (NEM) yang ditetapkan yaitu <0,002% / tahun. Dari hal tersebut dapat dikatakan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid di Pantai Baru memiliki tingkat kehandalan yang rendah atau dengan kata lain belum dapat diandalkan.

KESIMPULAN

Hasil analisis yang telah dilakukan pada pembangkit listrik hibrid Pantai Baru tentang keandalan sistem tenaga listrik dengan EENS. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan kurva

durasi pembebanan, beban memiliki beban lebih dari kW operasi sistem yaitu 99 kW. Sebaliknya, total daya yang dimiliki pembangkit listrik hibrid Pantai Baru adalah 90 kW. Fakta ini membuat sistem terpaksa kehilangan beban atau melepaskan beban. Pada perhitungan indeks keandalan sistem tenaga listrik pada kondisi awal menghasilkan nilai EENS tahun 2019 yang menghasilkan nilai total sebesar 2.512% atau 449 kWh. Nilai EENS masih belum memenuhi standar yang ditetapkan oleh Pasar Listrik Nasional (NEM) yaitu <0,002% / tahun. Berdasarkan data tersebut dapat dikatakan bahwa keandalan sistem pembangkit listrik hibrid Pantai Baru tahun 2019 berada pada kategori tidak dapat diandalkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas kontribusinya dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, J., Salam, Z. (2018). An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(3), pp. 1487 – 1496.

- Ardiyanto, Y., Sujoko, I.T., Wibowo, W.A., Nugraha, V.D.H., Saputra, F.E. (2019). Prototype Design of Unmanned Surface Ship to Detect Illegal Fishing Using Solar Power Generation Technology, *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 3(1), pp. 14-18.
- Brusco, G., A. Burgio, D. Menniti, A. Pinnarelli, N. Sorrentino. (2014). Optimal Sizing of DGs for a CHP-Based Agro-Industrial Microgrid with a Priority Criteria Operational Strategy, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 9(2), pp. 351-362.
- Farhat, S., Alaoui, R., Kahaji, A., Bouhouch, L., Ihlal, A. (2015). P&O and Incremental Conductance MPPT Implementation. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 10(1), pp. 116-122.
- Ghasemi, M.A., Ramyar, A., Eini, H.I. (2018). MPPT Method for PV Systems Under Partially Shaded Conditions by Approximating I-V Curve, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(5), pp. 3966 - 3975.
- Hariadi, T.K., Derks, M., Jamal, A., Riyadi, S. (2018). Renewable Energy Investment for Middle and Upper Class Housing Sector in Indonesia: Investigating the Scope for a Change in Policy, *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 2(1), pp. 12-18.
- Hossain, M.K., Ali, M.H. (2013). Overview on Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques for Photovoltaic Power Systems. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 8(4), pp. 1363-1378.
- Hui, J.C.y., Bakhshai, A., Jain, P.K. (2015). A Sensorless Adaptive Maximum Power Point Extraction Method With Voltage Feedback Control for Small Wind Turbines in Off-Grid Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(3), pp. 817 - 828.
- Hui, J.C.y., Bakhshai, A., Jain, P.K. (2016). An Energy Management Scheme With Power Limit Capability and an Adaptive Maximum Power Point Tracking for Small Standalone PMSG Wind Energy Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), pp. 4861 - 4875.
- Jiang, R., Han, Y., Zhang, S. (2017). Wide-range, high-precision and low-complexity MPPT circuit based on perturb and observe algorithm, *Electronics Letters*, 53(16), pp. 1141 - 1142.
- Kebede, M.H., Beyene, G.B. (2018). Feasibility Study of PV-Wind-Fuel Cell Hybrid Power System for Electrification of a Rural Village in Ethiopia. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018.
- Metry, M., Shadmand, M.B., Balog, R.S., Abu-Rub, H. (2017). MPPT of Photovoltaic Systems Using Sensorless Current-Based Model Predictive Control, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), pp. 1157 - 1167.
- Mujaahid, F., Fauzi, A.M., Syahputra, R., Putra, K.T., Purwanto, K. (2017). Potentials of Organic Waste Conversion in a Green Campus Concept. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 1(4), pp. 183-188.
- Peng, B.R., Che, K., Liu, Y.H. (2018). A Novel and Fast MPPT Method Suitable for Both Fast Changing and Partially Shaded Conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), pp. 3240 - 3251.
- Sher, H.A., Addoweesh, K.E., Al-Haddad, K. (2018). An Efficient and Cost-Effective Hybrid MPPT Method for a Photovoltaic Flyback Microinverter, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3), pp. 1137 - 1144.
- Syahputra, R., Soesanti, I. (2017). Modeling of Wind Power Plant with Doubly-Fed Induction Generator. *Jurnal Teknologi, Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 1(3), pp. 126-134.
- Syahputra, R., Soesanti, I., Ashari, M. (2016). Performance Enhancement of Distribution Network with DG Integration Using Modified PSO Algorithm. *Journal of Electrical Systems (JES)*, 12(1), pp. 1-19.
- Syahputra, R. (2017). Distribution Network Optimization Based on Genetic Algorithm. *Jurnal Teknologi, Journal of*

Electrical Technology UMY (JET-UMY), 1(1), pp. 1-9.

Tang, L., Xu, W., Mu, C. (2017). Analysis for step-size optimisation on MPPT algorithm for photovoltaic systems, IET Power Electronics, 10(13), pp. 1647 - 1654.

Zhang, Y., Zhang, L., and Liu, Y. (2019). Implementation of Maximum Power Point Tracking Based on Variable Speed Forecasting for Wind Energy Systems. Processes. 7. 158. 10.3390/pr7030158.

PENULIS:

Ramadoni Syahputra

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Email: ramadoni@umy.ac.id

Fahrian Noor

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Faaris Mujaahid

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Email: f.mujaahid@umy.ac.id