

# Perbaikan Keandalan PLTU Tembilahan dengan Penambahan Kapasitas Pembangkit

Fadhil M Hanafi<sup>1</sup>, Dian Yayan Sukma<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Riau, Pekanbaru 55281 INDONESIA (tel.: 076166595; email: <sup>1</sup>fadhil.m5065@student.unri.ac.id, <sup>2</sup>dianyayan.sukma@eng.unri.ac.id)

[Diterima: 2 Mei 2023, Direvisi: 12 September 2023]

Corresponding Author: Fadhil M Hanafi

**INTISARI** — Untuk memastikan keandalan sistem pembangkit yang baik, adanya unit pembangkit yang beroperasi atau cadangan daya yang memadai di sistem pembangkit sangatlah penting. Ketersediaan cadangan daya pada sistem ini bergantung pada berbagai faktor, termasuk frekuensi gangguan pada unit-unit pembangkit dan kapasitas puncak yang dibutuhkan oleh sistem. Salah satu contoh sistem pembangkit adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Tembilahan, yang memiliki kapasitas  $2 \times 7$  MW dan melayani beban puncak sebesar 14,31 MW pada periode tahun 2019-2022. Namun, pada periode tahun itu, tingkat keandalan sistem pembangkit, yang diukur dengan indeks *loss of load expectation* (LOLE), hanya mencapai 33 hari/tahun, jauh di bawah standar Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN 2021-2030 yang mencapai 1 hari/tahun. Untuk memperbaiki tingkat keandalan sistem pembangkit PLTU Tembilahan pada tahun 2027, diperlukan analisis untuk mempertimbangkan masa pengadaan pembangkit dan ketersediaan lahan pada sistem tersebut. Analisis ini melibatkan penggunaan metode *recursive convolution* untuk menghitung indeks *lost of load probability* (LOLP)/*loss of load expectation* (LOLE) dan metode regresi linear sederhana untuk memperkirakan beban puncak pada tahun tersebut. Berdasarkan hasil analisis, ditemukan bahwa penambahan tiga unit pembangkit sebesar 7 MW dapat meningkatkan keandalan sistem pembangkit. Luas area yang dibutuhkan untuk unit-unit tambahan ini adalah 2.030,91 m<sup>2</sup> dan lahan yang tersedia masih mencukupi. Setelah perbaikan dilakukan, indeks keandalan LOLE sistem pembangkit meningkat menjadi 0,078 hari/tahun untuk tahun 2027, yang memenuhi standar tingkat keandalan pembangkit berdasarkan RUPTL PT PLN 2021-2030.

**KATA KUNCI** — Keandalan, LOLP, LOLE, Sistem Pembangkit.

## I. PENDAHULUAN

Unit pembangkit listrik memiliki peran sebagai pembangkit tenaga listrik, baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri. Rusaknya suatu unit pembangkit, atau dalam kondisi terparah terjadi pemadaman listrik, dapat mengakibatkan unit tersebut tidak dapat beroperasi. Jika beberapa unit pembangkit besar mengalami hal ini secara bersamaan, pelepasan beban atau kerugian sistem dapat terjadi. Jika suatu unit pembangkitan sering mengalami pelepasan beban, unit pembangkitan tersebut tidak andal dalam melayani beban. Mengingat pentingnya peran unit pembangkit dalam menyediakan daya listrik, keandalan unit pembangkit tersebut perlu dijaga [1]. Penyebab unit pembangkit tidak dapat beroperasi dapat berupa gangguan internal (dari unit pembangkit) maupun gangguan eksternal (faktor luar). Terjadinya gangguan pada unit pembangkit akan memengaruhi tingkat keandalan pembangkit. Selain itu, beban puncak yang mengalami peningkatan setiap tahunnya juga memengaruhi tingkat keandalan pembangkit. Keadaan pembangkit listrik yang mengalami gangguan selama beroperasi akan mengakibatkan *forced outage rate* (FOR) [2]. Nilai FOR tersebut digunakan untuk menentukan *lost of load probability* (LOLP) atau probabilitas kehilangan beban, yaitu ketika beban melebihi kemampuan pembangkit [3]. Selanjutnya, dilakukan perhitungan *loss of load expectation* (LOLE) untuk menentukan durasi padam unit pembangkit dalam setahun. PT PLN pada Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2021-2030 menetapkan LOLP sebesar 0,274% atau setara dengan LOLE 1 hari/tahun [4].

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Tembilahan  $2 \times 7$  MW adalah salah satu unit penyedia layanan kelistrikan yang status kepemilikannya dipegang oleh PT PJB Services, anak perusahaan dari PT PLN Nusantara Power. PLTU Tembilahan

memiliki dua unit pembangkit dengan kapasitas masing-masing sebesar 7 MW. Berdasarkan hasil analisis LOLE terhadap data beban dan nilai FOR pada PLTU Tembilahan di periode tahun 2019-2022, dengan nilai LOLE sebesar 33 hari/tahun, diketahui bahwa hasil tersebut belum sesuai dengan RUPTL PT PLN 2021-2030.

Oleh karena itu, perbaikan tingkat keandalan perlu dilakukan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memperbaiki tingkat keandalan adalah menambah kapasitas pembangkit yang tersedia dengan menambah jumlah unit pembangkit. Penambahan jumlah unit pembangkit harus dilakukan dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia pada PLTU Tembilahan agar skenario yang dibuat mampu direalisasikan berdasarkan keadaan yang sebenarnya. Metode penambahan unit pembangkit dipilih dikarenakan merupakan metode yang umum digunakan untuk meningkatkan keandalan suatu pembangkit listrik dan telah berhasil diterapkan pada beberapa penelitian sebelumnya.

Berbagai penelitian yang membahas tentang analisis tingkat keandalan pembangkit telah banyak dilakukan, di antaranya penelitian tentang evaluasi keandalan PLTU Suralaya berdasarkan nilai FOR [1]. Berdasarkan data kegagalan dan pengeluaran harian pada tahun 2019, indeks keandalan PLTU Suralaya untuk Unit 1 sampai Unit 4 adalah 4,23 hari/tahun atau 1,23% [1].

Sementara itu, penelitian sebelumnya telah melakukan perbaikan tingkat keandalan pembangkit melalui penambahan kapasitas atau jumlah unit pembangkit, di antaranya perbaikan nilai keandalan LOLP PLTH Pantai Baru Pandansimo, yang awalnya memiliki nilai LOLP sebesar 0,1407 atau LOLE senilai 51,3627 hari/tahun [2]. Skenario perbaikan dilakukan, yaitu skenario 1 berupa pergantian unit pembangkit baru dan skenario 2 berupa penambahan unit pembangkit baru. Skenario

1 meningkatkan keandalan dengan LOLP menjadi 9,6908 hari/tahun, sedangkan skenario 2 meningkatkan keandalan dengan LOLP menjadi 6,8186 hari/tahun [2].

Penelitian berikutnya, yang menambahkan unit pembangkit untuk meningkatkan keandalan pembangkit, adalah penelitian tentang upaya peningkatan indeks keandalan sistem pembangkit di salah satu pembangkit di provinsi Riau [5]. Sistem ini awalnya memiliki indeks keandalan LOLE sebesar 0,5627 hari/tahun, kemudian dengan skenario penambahan unit pembangkit, indeks keandalan LOLE pembangkit tersebut berhasil diubah menjadi 0,000784 hari/tahun [5].

Penelitian lainnya yang menggunakan skenario penambahan unit pembangkit untuk memperbaiki tingkat keandalan adalah penelitian skenario peningkatan keandalan sistem pembangkit tenaga listrik di wilayah Bali [6]. Awalnya, sistem tersebut memiliki nilai keandalan dengan perhitungan LOLP dari sistem 150 kV di wilayah Bali, yaitu sebesar 6.184 hari/tahun. Skenario yang telah dilakukan adalah menambahkan satu pembangkit sebesar 380 MW, yaitu PLTU Celukan Bawang sebesar 380MW, yang dapat memperkecil nilai LOLP hingga menjadi 1.78 hari/tahun. Nilai LOLP tersebut telah hampir memenuhi standar nasional PT PLN, yaitu 1 hari/tahun [6].

Penelitian ini melakukan analisis perhitungan dan perbaikan tingkat keandalan pembangkit PLTU Tembilihan agar sesuai dengan RUPTL PT PLN 2021-2030 dengan memprediksi kenaikan beban puncak hingga tahun 2027 menggunakan data dari pembangkit tahun 2019-2022. Prediksi kenaikan beban puncak dilakukan hingga tahun 2027 dengan mempertimbangkan realisasi pengadaan unit pembangkit baru yang dapat membutuhkan waktu selama empat hingga lima tahun.

## II. KENAIKAN BEBAN PUNCAK DAN TINGKAT KEANDALAN PEMBANGKIT

Analisis tingkat keandalan dilakukan dengan mempertimbangkan kenaikan beban puncak pada pembangkit setiap tahunnya. Kenaikan beban puncak diprediksi menggunakan regresi linear sederhana dan tingkat keandalan dihitung menggunakan indeks LOLP/LOLE.

### A. REGRESI LINEAR SEDERHANA

Regresi adalah metode statistika yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memahami hubungan antara dua atau lebih variabel. Berbeda dengan klasifikasi, regresi digunakan untuk memprediksi target yang memiliki tipe data numerik, sementara klasifikasi digunakan untuk memprediksi atau mengelompokkan data dengan target tipe data kategorik. Dalam analisis regresi, terdapat dua jenis variabel, yaitu variabel independen dan dependen. Variabel independen adalah faktor-faktor yang memengaruhi target atau variabel dependen. Sebagai contoh, dalam *dataset* calon penerima beasiswa, yang termasuk sebagai variabel independen adalah gaji orang tua, nilai IPK, dan jarak rumah. Sementara itu, variabel dependen adalah variabel target yang hendak diprediksi. Sebagai contoh, dalam *dataset* calon penerima beasiswa, keterangan “diterima” atau “ditolak” termasuk dalam variabel dependen. Biasanya, analisis regresi melibatkan satu variabel dependen dan lebih dari satu variabel independen [7].

Metode tren atau metode regresi linear sederhana adalah suatu metode dalam analisis runtun waktu (*time series*) yang didasarkan pada kecenderungan data masa lalu tanpa memperhatikan faktor lainnya (ekonomi, iklim, dan teknologi).

Metode ini menghasilkan persamaan matematika antara data dan waktu serta sering digunakan untuk memperkirakan masa depan dalam jangka pendek [8]. Persamaan regresi linear sederhana merupakan suatu model persamaan yang menggambarkan hubungan satu variabel bebas atau *predictor* ( $x$ ) dengan satu variabel tak bebas atau *response* ( $y$ ), yang biasanya digambarkan dengan garis lurus [9].

Perkembangan beban listrik dijelaskan dalam bentuk persamaan yang mengikuti pola kecenderungan linear, yang didefinisikan dengan persamaan berikut.

$$y = a + bx \quad (1)$$

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3)$$

dengan  $y$  merupakan beban listrik pada periode  $x$  yang dijadikan acuan,  $a$  merupakan perkembangan beban listrik,  $b$  adalah laju pertumbuhan rata-rata beban listrik, serta  $n$  adalah jumlah data yang digunakan.

Metode regresi linear sederhana dapat dilakukan jika kecenderungan data masa lampau bersifat linear. Jika kecenderungan data tidak bersifat linear, digunakan metode regresi nonlinear dengan model geometrik dan hasil dari persamaan nonlinear diproyeksikan ke dalam persamaan linear seperti berikut [10].

$$y = ax^b \quad (4)$$

$$\log y = \log(ax^b) \quad (5)$$

$$\log y = \log a + \log x^b \quad (6)$$

$$\log y = \log a + b \cdot \log x \quad (7)$$

Persamaan (7) selanjutnya diproyeksikan ke (1), sehingga membentuk (8) sebagai berikut.

$$P = A + BQ \quad (8)$$

dengan

$$P = \log y \quad (9)$$

$$A = \log a \quad (10)$$

$$Q = \log x \quad (11)$$

$$B = b \quad (12)$$

$$a = 10^A \quad (13)$$

Untuk memperoleh nilai  $A$  dan  $B$ , (2) dan (3) diubah berdasarkan (8), sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$A = \frac{\sum P \sum Q^2 - \sum Q \sum QP}{n \sum Q^2 - (\sum Q)^2} \quad (14)$$

$$B = \frac{n \sum QP - \sum Q \sum P}{n \sum Q^2 - (\sum Q)^2} \quad (15)$$

### B. DAYA TERSEDIA DALAM SISTEM

Ketersediaan daya pada sistem harus cukup untuk memenuhi kebutuhan pelayanan tenaga listrik ke pelanggan. Ketersediaan daya dalam sistem juga bergantung pada daya terpasang, demikian juga kesiapan unit-unit pembangkit dalam sistem untuk beroperasi. Unit pembangkit tidak siap beroperasi jika terjadi berbagai faktor, seperti kelalaian pemeliharaan, yang menyebabkan terjadinya gangguan atau kerusakan.

Agar dapat memenuhi beban yang diestimasi dari peramalan beban dan mengatasi masalah pemeliharaan unit pembangkit, diperlukan usaha untuk memastikan ketersediaan daya dalam sistem agar selalu mencukupi dalam melayani beban yang ada [11]. Ketersediaan daya cadangan dan nilai FOR dari unit-unit pembangkit yang beroperasi selama periode tertentu memainkan peran penting dalam menentukan keandalan sistem pembangkit. Nilai FOR dan keandalan sistem berbanding terbalik, sehingga makin kecil nilai FOR, makin bagus ketersediaan cadangan daya dalam sistem.

$$FOR = \frac{\text{Force Outage Hours}}{\text{Service Hours} + \text{Force Outage Hours}} \quad (16)$$

*Force outage hours* merupakan jumlah waktu sebuah unit mengalami gangguan akibat kegagalan peralatan yang memerlukan diputusnya unit tersebut dari sistem, sedangkan *service hours* adalah periode operasi sebuah unit pembangkit yang terhubung ke jaringan transmisi, baik dalam keadaan normal maupun saat pengurangan kapasitas unit (*derating*). Makin kecil FOR, makin tinggi jaminan keandalan yang didapat. Sebaliknya, makin besar FOR, makin kecil jaminan keandalan yang diperoleh. Perubahan nilai FOR dapat secara langsung memengaruhi keandalan total sistem [12].

### C. ALGORITMA RECURSIVE CONVOLUTION

Evaluasi keandalan suatu sistem pembangkit dapat dilakukan dengan metode *recursive* berdasarkan distribusi variasi keadaan generator. Unit pembangkit memiliki dua kondisi yang memungkinkan (*dual state*), yaitu kondisi (*state available* dan *outage*). Sistem yang disuplai dari  $n$  unit generator memiliki  $2n$  variasi kondisi. Perhitungan manual untuk sistem dengan banyak unit pembangkit akan sangat sulit dilakukan. Banyak algoritma *recursive* yang telah diterapkan untuk mengevaluasi keandalan sistem tenaga [13].

Metode *recursive* yang digunakan dalam mencari indeks keandalan pada penelitian ini merupakan jenis persamaan *recursive convolution*. Fungsi yang merujuk pada dirinya sendiri disebut juga fungsi *recursive* dan terdiri atas basis dan rekurens. Nilai awal yang tidak merujuk pada fungsi itu sendiri disebut basis dan berfungsi untuk memberikan nilai yang didefinisikan pada fungsi *recursive* serta menghentikan proses *recursion*. Sementara itu, bagian dari fungsi yang mendefinisikan argumen fungsi dalam terminologi dirinya sendiri disebut rekurens dan argumen dari fungsi tersebut harus lebih dekat pada basisnya setiap kali fungsi melakukan rekurens [14].

Pada persamaan konvolusi, untuk mencari keandalan sistem pembangkit, digunakan juga fungsi dari *recursive convolution* dengan persamaan sebagai berikut.

$$F^i(L_e) = \int_{L_{oi}} F^{i-1}(L_e - L_{oi}) f_o(L_{oi}) dL_{oi} \quad (17)$$

Persamaan (17) memiliki aturan bahwa  $F^i(L_e)$  akan sama dengan  $F(L)$  jika  $i$  bernilai 0 dan  $F^i(L_e)$  akan sama dengan  $F(L_e)$  jika  $i$  tidak bernilai 0 [15]. Ketika diasumsikan  $L_{oi}$  bernilai diskret,  $f_{oi}$  akan bernilai  $p_i$  jika  $L_{oi}$  sama dengan 0 dan  $f_{oi}$  akan bernilai  $q_i$  jika  $L_{oi}$  sama dengan  $C_i$ , sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$F^i(L_e) = F^{i-1}(L_e) \cdot p_i + F^{i-1}(L_e - C_i) q_i \quad (18)$$

dengan  $L_e$  merupakan beban efektif,  $L_{oi}$  adalah pemadaman beban acak,  $IC$  adalah kapasitas unit pembangkit yang terpasang,  $F^i(L_e)$  adalah fungsi peluang beban efektif,  $p_i$  adalah

probabilitas kapasitas tersedia,  $q_i$  adalah probabilitas kapasitas *outage*, dan  $C_i$  adalah kapasitas generator pada urutan ke- $i$  [15].

### D. INDEKS KEANDALAN

Perhitungan keandalan sistem tenaga listrik dapat dianalisis dari seringnya suatu sistem mengalami gangguan atau frekuensi padamnya listrik. Data hasil gangguan suatu sistem dapat dihitung menggunakan rumus LOLP. Makin kecil nilai LOLP, makin sedikit peluang suatu sistem mengalami gangguan dan investasi yang diperlukan untuk mendukung juga makin besar [16]. LOLP didefinisikan sebagai probabilitas terjadinya sebuah beban sistem melebihi kapasitas pembangkit yang tersedia dengan asumsi beban puncak setiap hari berlangsung sepanjang hari. Nilai LOLP = 0 berarti beban akan selalu terpenuhi dan LOLP = 1 berarti beban tidak akan pernah terpenuhi [17]. Untuk mengukur keandalan, digunakan satuan hari/tahun, yang mengindikasikan bahwa beban sistem lebih kecil, sama, atau lebih besar dari kapasitas yang tersedia. Untuk melakukan perhitungan, data unit pembangkit dan nilai FOR digunakan untuk menghitung probabilitas *outage* individu. Kemudian, LOLP dapat dihitung berdasarkan hasil tersebut [15].

LOLE dapat diartikan sebagai jumlah unit dalam satu waktu (jam atau hari) per interval waktu (tahun) yang permintaan bebannya melebihi kapasitas. LOLE mengungkapkan nilai yang mewakili jumlah jam atau hari dalam periode waktu tertentu, ketika beban (yaitu konsumsi daya) tidak dapat disuplai [18]. Untuk mengidentifikasi persentase waktu ketika beban lebih besar dari jumlah yang dibangkitkan, kurva durasi beban sangat sesuai digunakan. Jadi, indeks keandalan ini menghasilkan kemungkinan besarnya beban yang mengalami pemadaman saat terjadi beban puncak pada satu waktu. LOLE sendiri merupakan perkalian antara probabilitas kegagalan sistem pembangkit, yaitu LOLP, dengan satuan waktu, seperti dalam satuan hari/tahun [19]. Secara singkat, nilai LOLE adalah LOLP dikali dengan jumlah hari dalam satu tahun. Nilai LOLP sendiri merujuk pada (18), yaitu LOLP didefinisikan sebagai penjumlahan probabilitas pemadaman dikalikan dengan kumulatif probabilitas jumlah beban yang tidak disediakan, atau dengan kata lain, kemungkinan beban melebihi kapasitas yang tersedia setelah pemadaman [20]. Berdasarkan penjelasan tersebut, dapat dibentuk (19).

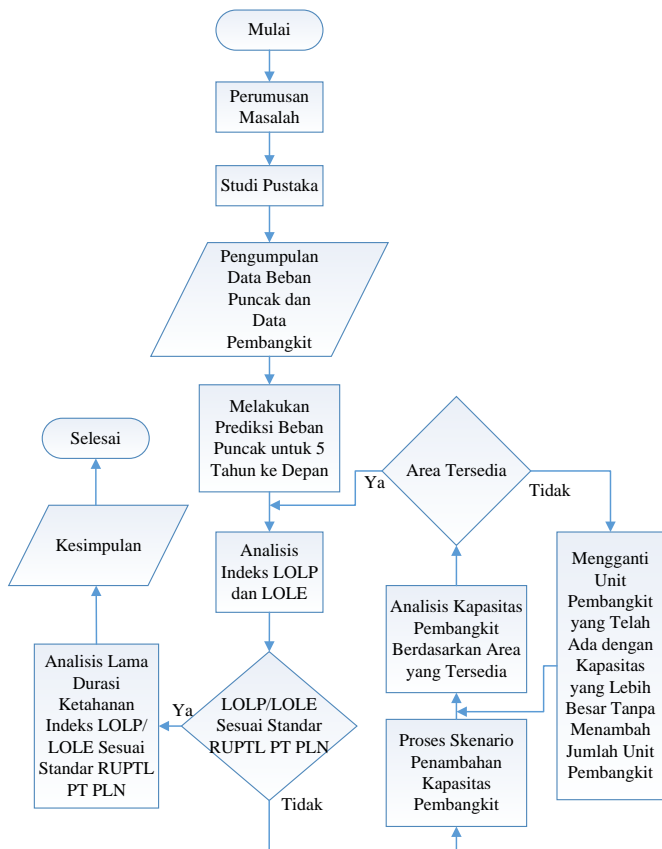
$$LOLE = (F^{i-1}(L_e) \cdot p_i + F^{i-1}(L_e - C_i) q_i) \cdot 365 \quad (19)$$

dengan 365 merupakan asumsi jumlah hari dalam satu tahun.

Standar yang digunakan adalah standar dari RUPTL PT PLN 2021-2030, yaitu LOLE sebesar 1 hari/tahun. Perhitungan LOLP dan LOLE sangat membantu dalam tinjauan desain dan ukuran utilitas sistem tenaga. Dengan cara yang sama, keduanya memperkirakan dan menunjukkan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk kehilangan unit pembangkit (yaitu unit pembangkit atau komponen apa pun memerlukan penggantian atau perawatan) [21].

### III. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan secara sistematis agar hasil penelitian dapat dicapai. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Metodologi penelitian adalah cara atau langkah-langkah yang digunakan untuk merancang, mengumpulkan, menganalisis, dan menafsirkan data dalam sebuah penelitian. Metodologi penelitian membantu peneliti untuk mengumpulkan informasi secara sistematis dan terorganisasi, sehingga data yang diperoleh dapat diandalkan



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

dan valid. Metodologi pada penelitian ini diawali dengan perumusan masalah, yaitu tentang upaya untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit dengan cara menambah kapasitas pembangkit di PLTU Tembilaan dengan kapasitas awal sebesar  $2 \times 7$  MW. Langkah selanjutnya adalah studi pustaka, yaitu mempelajari teori-teori terkait perancangan sistem tenaga yang akan dibahas. Teori-teori tersebut mencakup berbagai aspek, seperti pembangkit tenaga listrik, PLTU, daya tersedia dalam sistem, keandalan pembangkit, kurva beban harian, kurva distribusi peluang beban, algoritma konvolusi, LOLP, LOLE, dan metode regresi linear. Sumber acuan untuk teori-teori tersebut dapat berasal dari buku, jurnal, makalah, dan internet. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data, melakukan prediksi kenaikan beban puncak, melakukan analisis LOLP/LOLE, perbaikan tingkat keandalan pembangkit dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia, melakukan analisis durasi ketahanan tingkat keandalan, dan penarikan kesimpulan.

#### A. PENGUMPULAN DATA

Dalam rangka membahas permasalahan pada penelitian ini, dilakukan pengumpulan data untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan. Data yang perlu dikumpulkan meliputi data beban puncak dan nilai FOR setiap unit pembangkit di PLTU Tembilaan dari tahun 2019 hingga 2022.

#### B. PERHITUNGAN PREDIKSI KENAikan BEBAN PUNCAK

Indeks keandalan, seperti LOLP, umumnya dievaluasi untuk menentukan kecukupan sistem tenaga massal di masa depan [22]. Maka, perlu dilakukan analisis prediksi peningkatan beban puncak untuk lima tahun ke depan. Hal ini dilakukan sebagai acuan untuk menentukan nilai LOLP/LOLE pada unit pembangkit yang akan ditambahkan. Perencanaan

TABEL I  
LUAS AREA BANGUNAN PEMBANGKIT PLTU TEMBILAHAN

Kapasitas Pembangkit	Luas Area Turbin	Luas Area Boiler	Jumlah Luas Area Unit Pembangkit	Luas Area per-Unit Pembangkit
$2 \times 7$ MW	1.012,5 m <sup>2</sup>	341,44 m <sup>2</sup>	1.353,94 m <sup>2</sup>	676,97 m <sup>2</sup>

tenaga listrik berkonsentrasi pada prakiraan beban untuk masa depan. Ekspektasi beban listrik di masa depan membutuhkan riwayat data beban [23]. Dengan menggunakan riwayat data beban, dilakukan prediksi kenaikan beban untuk masa yang akan datang.

#### C. PERHITUNGAN INDEKS KEANDALAN

Analisis indeks LOLP dan LOLE dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari PLTU Tembilaan  $2 \times 7$  MW. Jika LOLE yang didapat lebih dari 1 hari/tahun, dilakukan skenario perbaikan tingkat keandalan pembangkit dengan penambahan kapasitas pembangkit.

Dua keadaan dipertimbangkan dalam perhitungan ini, yaitu kondisi yang sudah ada (*existing*) dan kondisi lima tahun ke depan. Perhitungan pada kondisi yang sudah ada melibatkan analisis tingkat keandalan pembangkit dengan beban puncak saat ini, sedangkan perhitungan pada kondisi lima tahun ke depan melibatkan evaluasi tingkat keandalan dengan beban puncak pada tahun kelima dari kondisi yang sudah ada. Hal ini perlu dilakukan karena beban puncak cenderung meningkat setiap tahunnya, seiring dengan pertambahan jumlah penduduk. Kondisi lima tahun dipilih karena jika evaluasi keandalan pada kondisi lima tahun ke depan tidak memenuhi standar, perlu dilakukan perbaikan dengan menambah kapasitas pembangkit.

#### D. PERBAIKAN INDEKS KEANDALAN

Untuk meningkatkan indeks LOLP/LOLE, kapasitas pembangkit perlu ditambah dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia di PLTU Tembilaan. PLTU Tembilaan berdiri di atas lahan seluas 10 hektar atau 100.000 m<sup>2</sup>. Terdapat area seluas 22.173 m<sup>2</sup> yang belum dimanfaatkan, dengan luas area efektif sebesar 5.166 m<sup>2</sup>, yang dapat digunakan sebagai area penambahan kapasitas pembangkit. Tujuan perbaikan ini adalah untuk memperoleh indeks LOLE kurang dari 1 hari/tahun. Berdasarkan penjelasan tersebut, dibuat persyaratan penambahan kapasitas pembangkit menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Luas Area Unit Pembangkit} < 5.166 \text{ m}^2. \quad (20)$$

Luas area yang diperlukan berdasarkan besarnya kapasitas pembangkit merujuk pada Tabel I.

Secara umum, metode penambahan kapasitas pembangkit melalui penambahan unit pembangkit dapat digunakan jika masih terdapat ketersediaan lahan pada area pembangkit tersebut, sehingga area yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal. Penambahan unit pembangkit diawali dengan penambahan unit kecil dengan jumlah lebih banyak. Ketika penambahan unit kecil dengan jumlah yang banyak tidak mampu memperbaiki tingkat keandalan serta luas area yang tersedia tidak mencukupi (unit kecil dengan jumlah banyak memerlukan lebih banyak area), dilakukan penggantian unit pembangkit yang telah ada menjadi kapasitas unit yang lebih besar (kapasitas lebih dari 7 MW untuk satu unit pembangkit). Namun, perbaikan tingkat keandalan memprioritaskan penambahan unit berdasarkan kapasitas yang telah ada (7 MW)

TABEL II  
 DATA BEBAN PUNCAK PLTU TEMBILAHAN 2019-2022

Tahun	Beban Puncak (MW)
2019	9,64
2020	14,31
2021	13,09
2022	14,21

TABEL III  
 VARIABEL PERHITUNGAN PREDIKSI KENAIKAN BEBAN PUNCAK

Tahun	x	y	Q	P	Q <sup>2</sup>	Q.P
2019	1	9,64	0,000000	0,98415	0,000000	0,000000
2020	2	14,31	0,301030	1,15559	0,09062	0,34787
2021	3	13,09	0,477121	1,11692	0,22764	0,53290
2022	4	14,21	0,602060	1,15260	0,36248	0,69394
Jumlah	1	51,25	1,380210	4,40926	0,68074	1,57471

karena data yang tersedia (nilai FOR) merujuk pada kapasitas tersebut.

**E. ANALISIS DURASI TINGKAT KEANDALAN**

Dilakukan analisis perhitungan lamanya indeks LOLE kurang dari 1 hari/tahun yang diperoleh dari hasil perbaikan tingkat keandalan pembangkit dengan penambahan kapasitas pembangkit dapat dipertahankan berdasarkan prediksi beban puncak di masa depan.

**F. PENARIKAN KESIMPULAN**

Setelah melakukan analisis, langkah berikutnya adalah mengambil kesimpulan dari hasil tersebut berdasarkan analisis yang telah dilakukan.

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. ANALISIS KENAIKAN BEBAN PUNCAK LIMA TAHUN KE DEPAN**

Dengan mempertimbangkan data beban puncak dari tahun 2019 hingga 2022, seperti yang tertera pada Tabel II, dilakukan estimasi untuk memprediksi beban puncak dalam lima tahun ke depan. Hal ini bertujuan untuk memperhitungkan kemungkinan tidak andalnya pembangkit dan mempersiapkan perancangan skenario penambahan kapasitas pembangkit yang membutuhkan waktu sekitar empat hingga lima tahun. Untuk melakukan prediksi tersebut, digunakan persamaan regresi linear sederhana. Variabel yang digunakan dalam perhitungan ini adalah beban puncak, yang juga digunakan untuk menentukan indeks LOLP/LOLE pada sebuah sistem pembangkit.

Dengan menggunakan rekapitulasi data beban puncak PLTU Tembilahan dari tahun 2019 hingga 2022, dilakukan analisis prakiraan dengan menggunakan metode regresi linear sederhana untuk mendapatkan nilai A dan B pada persamaan regresi berpangkat. Untuk memperoleh nilai P dan Q, data pada Tabel III digunakan untuk melakukan perhitungan menggunakan (9) dan (11).

Selanjutnya, dilakukan perhitungan menggunakan (14) dan (15) untuk mendapatkan nilai A dan B. Kemudian, dicari nilai a dan b menggunakan (13) dan (12), sehingga diperoleh nilai y sebagai berikut.

$$A = 1,012415$$

$$B = 0,260543$$

$$a = 10^{1,012415} = 10,29$$



Gambar 2. Prediksi kenaikan beban puncak.

TABEL IV  
 PREDIKSI PENINGKATAN BEBAN PUNCAK LIMA TAHUN KE DEPAN

Tahun	Variabel x: Periode Tahun	Variabel y: Beban Puncak (MW)
2023	5	15,65046
2024	6	16,41183
2025	7	17,08440
2026	8	17,68923
2027	9	18,24049

$$b = 0,260543$$

$$y = 10,29x^{0,260543} \tag{21}$$

Berdasarkan (21), dapat ditentukan prediksi nilai beban puncak untuk lima tahun ke depan, terhitung dari tahun 2023 hingga tahun 2027, seperti ditunjukkan pada Tabel IV dan Gambar 2.

**B. ANALISIS KEANDALAN KONDISI YANG SUDAH ADA**

Untuk menentukan tingkat keandalan, pertama ditentukan nilai FOR masing-masing unit pembangkit menggunakan (16). Nilai FOR ditentukan berdasarkan data pada Tabel V. Berdasarkan data pada Tabel V dan menggunakan (16), diperoleh nilai FOR untuk masing-masing unit pembangkit seperti yang ditunjukkan pada Tabel VI.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai LOLP/LOLE berdasarkan data yang ditunjukkan pada Tabel VII. Berdasarkan data yang ditunjukkan pada Tabel VII, dilakukan analisis perhitungan nilai LOLP/LOLE menggunakan (19). Perhitungan dilakukan menggunakan aplikasi Microsoft Office Excel 2013. Diperoleh LOLP PLTU Tembilahan dalam kondisi yang sudah ada adalah 0,0901805, dengan LOLE sebesar 32,9158821 atau 33 hari/tahun.

**C. ANALISIS KEANDALAN KONDISI 5 TAHUN KE DEPAN**

Untuk menganalisis nilai LOLP/LOLE dalam jangka waktu lima tahun ke depan (2027), dilakukan analisis berdasarkan kondisi sistem yang sudah ada dengan dua unit pembangkit yang ada dan beban puncak yang diperkirakan makin meningkat tiap tahunnya hingga tahun 2027. Untuk melakukan analisis tersebut, digunakan nilai beban puncak hasil prediksi untuk tahun 2027, yaitu sebesar 18,24049 MW dan nilai beban dasar sebesar 40% dari beban puncak, yaitu 7,296195 MW.

TABEL V  
DATA DURASI KERJA PLTU TEMBILAHAN 2019-2022

Tahun	Service Hours Unit 1 (Jam)	Service Hours Unit 2 (Jam)	Force Outage Hours Unit 1 (Jam)	Force Outage Hours Unit 2 (Jam)
2019	3.377,00	5.140,00	107,00	51,00
2020	7.186,00	8.122,00	374,00	213,00
2021	6.965,97	7.569,75	520,15	139,93
2022	7.382,00	6.881,00	95,00	314,00
Jumlah	24.910,97	27.712,75	1.096,15	717,93

TABEL VI  
NILAI FOR PADA UNIT PLTU TEMBILAHAN

FOR Unit 1	FOR Unit 2
0,042148	0,0252519

TABEL VII  
VARIABEL ANALISIS LOLP/LOLE KONDISI YANG SUDAH ADA

Variabel	Nilai
Kapasitas Unit 1 ( $C_1$ )	7 MW
Kapasitas Unit 2 ( $C_2$ )	7 MW
Nilai FOR Unit 1 ( $q_1$ )	0,0421480
Nilai FOR Unit 2 ( $q_2$ )	0,0252519
Nilai $p_1$	0,9578520
Nilai $p_2$	0,9742148
Kapasitas terpasang ( $IC$ )	14 MW
Beban puncak ( <i>peak load</i> )	14,31 MW
Beban dasar ( <i>base load</i> )	5,724 MW

Analisis ini dilakukan untuk melihat keandalan pembangkit jika kapasitas pembangkit tetap dipertahankan (dua unit pembangkit) seperti kondisi yang ada sekarang. Variabel kondisi lima tahun ke depan ini juga akan digunakan sebagai variabel ketika diperlukan penambahan kapasitas pembangkit. Variabel yang berubah dibandingkan dengan kondisi yang sudah ada adalah beban puncak dan beban dasar, sedangkan nilai kapasitas Unit 1, kapasitas Unit 2, nilai FOR, nilai  $p_1$ , nilai  $p_2$ , dan kapasitas terpasang mengikuti kondisi yang sudah ada sekarang pada Tabel VII.

Untuk prediksi kenaikan beban puncak di tahun 2027, diperoleh nilai LOLP PLTU Tembilahan adalah 0,42809426 dengan LOLE sebesar 156,254406 atau 156 hari/tahun. Berdasarkan hasil perhitungan pada kondisi yang ada sekarang dan prediksi lima tahun ke depan (2027), dapat disimpulkan bahwa makin meningkat nilai beban puncak, makin tinggi nilai indeks LOLE, sehingga belum memenuhi target keandalan yang telah ditetapkan PT PLN dalam RUPTL PT PLN berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 188.K/HK.02/MEM.L/2021 tentang RUPTL 2021-2030, yaitu dengan probabilitas padam 1 hari/tahun. Oleh karena itu, diperlukan skenario penambahan kapasitas pembangkit untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit yang sedang diteliti ini. Penambahan kapasitas pembangkit ini akan mempertimbangkan luas area yang tersedia di PLTU Tembilahan  $2 \times 7$  MW.

#### D. PERBAIKAN TINGKAT KEANDALAN

Berdasarkan hasil perhitungan indeks keandalan, didapati bahwa nilai indeks keandalan tidak mencapai standar yang telah ditetapkan, yaitu 1 hari/tahun. Oleh karena itu, dilakukan sebuah skenario dengan menambahkan unit pembangkit pada sistem pembangkit yang diteliti, yang didasarkan pada luas area

yang tersedia. Luas area yang tersedia dijelaskan pada (20), sedangkan luas area untuk kapasitas pembangkit yang ditambahkan merujuk pada Tabel I. Prediksi nilai beban puncak yang digunakan dalam skenario penambahan kapasitas pembangkit adalah 18,24049 MW pada tahun 2027, dengan asumsi bahwa penambahan kapasitas pembangkit memerlukan waktu sekitar 4-5 tahun.

#### 1) SKENARIO 1 PENAMBAHAN UNIT 1 $\times$ 7 MW

Pada skenario 1, dilakukan penambahan kapasitas unit kecil sebesar 7 MW terlebih dahulu karena pertimbangan bahwa menyediakan kapasitas terbesar akan membutuhkan area yang lebih luas. Berdasarkan Tabel I, untuk penambahan satu unit dengan kapasitas 7 MW dibutuhkan area seluas 676,97 m<sup>2</sup>, yang memenuhi persyaratan untuk penambahan kapasitas pembangkit sesuai dengan (20). Nilai FOR sebesar 0,042148 mengikuti nilai FOR dari Unit 1 pada sistem pembangkit yang diteliti. Dari hasil perhitungan menggunakan (19), diperoleh LOLP sebesar 0,04329 dan indeks LOLE sebesar 15,79975 hari/tahun. Meskipun demikian, indeks keandalan yang dihasilkan masih belum memenuhi standar yang ingin dicapai.

#### 2) SKENARIO 2 PENAMBAHAN UNIT 2 $\times$ 7 MW

Berdasarkan hasil indeks keandalan LOLE yang belum terpenuhi pada skenario 1, skenario 2 dilakukan dengan menambahkan dua unit dengan kapasitas unit sebesar 7 MW. Dari Tabel I, dapat diketahui bahwa penambahan satu unit dengan kapasitas 7 MW memerlukan area seluas 676,97 m<sup>2</sup>, sehingga penambahan dua unit akan memerlukan area seluas 1.353,94 m<sup>2</sup>.

Berdasarkan (20), dapat disimpulkan bahwa luas area yang dibutuhkan untuk penambahan kapasitas pembangkit pada skenario 2 memenuhi persyaratan yang dibutuhkan. Skenario 2 ini menggunakan nilai FOR yang sama dengan Unit 1 pada sistem pembangkit yang diteliti, yaitu sebesar 0,042148. Hasil perhitungan menggunakan (19) menunjukkan bahwa indeks keandalan LOLP pada skenario 2 sebesar 0,00327 dan indeks keandalan LOLE sebesar 1,19238 hari/tahun. Meskipun hasil tersebut lebih baik dari skenario 1, indeks keandalan yang dihasilkan masih belum memenuhi standar yang ingin dicapai.

#### 3) SKENARIO 3 PENAMBAHAN UNIT 3 $\times$ 7 MW

Dengan mempertimbangkan hasil indeks keandalan LOLE yang belum terpenuhi pada skenario 1 dan skenario 2, pada skenario 3 dilakukan penambahan tiga unit dengan kapasitas 7 MW pada sistem pembangkit yang diteliti. Berdasarkan Tabel I, dibutuhkan area seluas 676,97 m<sup>2</sup> untuk penambahan satu unit dengan kapasitas 7 MW, sehingga total area yang dibutuhkan untuk penambahan tiga unit adalah 2.030,91 m<sup>2</sup>.

Berdasarkan (20), area yang tersedia cukup untuk penambahan kapasitas pembangkit. Setiap unit pembangkit memiliki nilai FOR sebesar 0,042148 dan nilai FOR yang dipilih pada skenario ketiga mengikuti nilai FOR dari Unit 1 pada sistem pembangkit yang diteliti. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan (19), diperoleh nilai indeks keandalan LOLP sebesar 0,00021 dan indeks keandalan LOLE sebesar 0,078266 hari/tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa standar indeks keandalan sistem pembangkit telah terpenuhi pada skenario ketiga.

#### 4) HASIL PENAMBAHAN KAPASITAS PEMBANGKIT

Data yang diperoleh dari hasil analisis skenario penambahan kapasitas pembangkit ditunjukkan pada Tabel VIII. Dari hasil penambahan kapasitas pembangkit yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa pada skenario 1, dengan

TABEL VIII  
 HASIL PERBAIKAN TINGKAT KEANDALAN PEMBANGKIT

Penambahan Kapasitas (MW)	Total Kapasitas (MW)	Luas Area yang Diperlukan (m <sup>2</sup> )	LOLE (hari/tahun)	Sesuai Standar RUPTL PT PLN
1 × 7	3 × 7	676,97	15,79980	Tidak
2 × 7	4 × 7	1.353,90	1,19238	Tidak
3 × 7	5 × 7	2.030,90	0,07827	Ya

TABEL IX  
 DURASI KETAHANAN TINGKAT KEANDALAN

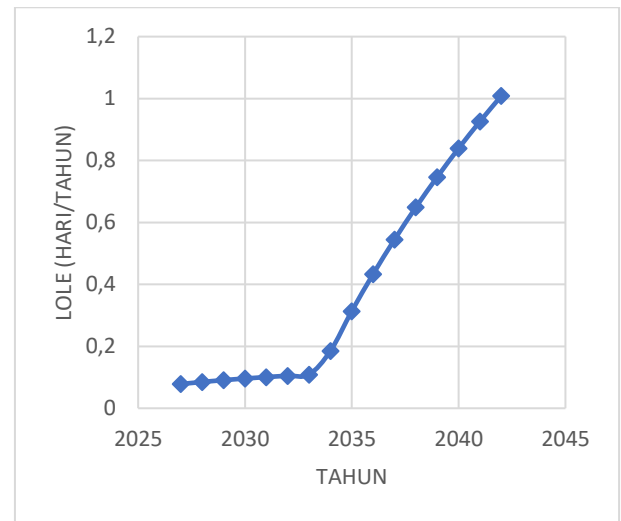
Tahun	Beban Puncak (MW)	LOLP	LOLE (hari/tahun)
2027	18,24049	0,000214	0,0782660
2028	18,74814	0,000233	0,0849232
2029	19,21953	0,000249	0,0907901
2030	19,66022	0,000263	0,0960204
2031	20,07453	0,000276	0,1007280
2032	20,46590	0,000288	0,1050000
2033	20,83711	0,000298	0,1089040
2034	21,19045	0,000507	0,1850663
2035	21,52782	0,000860	0,3137872
2036	21,85082	0,001187	0,4333004
2037	22,16080	0,001492	0,5447239
2038	22,45895	0,001778	0,6489897
2039	22,74627	0,002046	0,7468826
2040	23,02364	0,002299	0,8390688
2041	23,29184	0,002537	0,9261187
2042	23,55155	0,002763	1,0085238

menambahkan satu unit pembangkit berkapasitas 7 MW, nilai indeks keandalan LOLE masih belum memenuhi standar yang diinginkan. Begitu juga pada skenario 2, dengan penambahan dua unit pembangkit dengan kapasitas masing-masing 7 MW. Namun, pada skenario 3, dengan penambahan tiga unit berkapasitas masing-masing 7 MW, didapatkan nilai indeks keandalan LOLE yang telah memenuhi standar yang ditetapkan PT PLN dalam RUPTL PT PLN berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 188.K/HK.02/MEM.L/2021 tentang RUPTL 2021-2030, yaitu LOLP sebesar kurang dari 0,274% atau setara dengan LOLE kurang dari 1 hari/tahun.

**E. ANALISIS DURASI KETAHANAN TINGKAT KEANDALAN**

Analisis dilakukan untuk menentukan durasi keandalan pembangkit dapat dipertahankan. Durasi keandalan ini sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh RUPTL PT PLN berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 188.K/HK.02/MEM.L/2021 tentang RUPTL 2021-2030. Analisis tersebut melibatkan prediksi kenaikan beban puncak setiap tahun dan evaluasi hasil indeks LOLE hingga melebihi 1 hari/tahun. Informasi mengenai durasi ketahanan dapat ditemukan pada Tabel IX dan Gambar 3.

Dari hasil prediksi kenaikan beban puncak setiap tahun yang tertera pada Tabel IX dan Gambar 3, dapat disimpulkan bahwa tingkat keandalan pembangkit dari skenario 3 akan tetap terjaga hingga tahun 2042 dengan mempertahankan nilai beban puncak sebesar 23,55155 MW, LOLP sebesar 0,00276, dan indeks keandalan LOLE sebesar 1,008524 hari/tahun. Terlihat pada Gambar 3 bahwa nilai LOLE mengalami kenaikan signifikan antara tahun 2033 menuju 2035, dari 0,108904 hari/tahun menjadi 0,3137872 hari/tahun.



Gambar 3. Durasi ketahanan tingkat keandalan setelah perbaikan.

**V. KESIMPULAN**

Dari penelitian yang telah dilakukan pada sistem pembangkit PLTU Tembilahan dengan memanfaatkan data empat tahun terakhir, dari 2019 sampai 2022, telah diperoleh nilai indeks keandalan LOLE sebesar 33 hari/tahun pada kondisi yang sudah ada dan 156 hari/tahun pada kondisi lima tahun ke depan, dengan prediksi kenaikan beban puncak sebesar 18,24049 MW. Dengan mempertimbangkan standar PT PLN dalam RUPTL PT PLN berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 188.K/HK.02/MEM.L/2021 tentang RUPTL 2021-2030, maka nilai tersebut belum memenuhi standar yang diinginkan.

Untuk memperbaiki tingkat keandalan tersebut, dilakukan penambahan kapasitas pembangkit melalui skenario penambahan jumlah unit pembangkit dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia. Dari skenario yang dilakukan, hasil pada skenario 3 telah memenuhi standar indeks keandalan, yaitu sebesar 0,078266 hari/tahun. Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa makin banyak unit pembangkit, makin tinggi tingkat keandalan, tetapi juga diikuti dengan makin luasnya area pembangkit.

Indeks keandalan pada skenario 3 dapat dipertahankan hingga tahun 2042 dengan beban puncak sebesar 23,55155 MW, nilai LOLP sebesar 0,002763, dan indeks keandalan LOLE sebesar 1,0085238 hari/tahun.

**KONFLIK KEPENTINGAN**

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini. Semua analisis dilakukan secara empiris berdasarkan data yang telah diperoleh.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Riau dan PT. PJB Services Unit PLTU Tembilahan 2 × 7 MW yang telah berpartisipasi dalam pelaksanaan penelitian ini.

**REFERENSI**

- [1] P.F. Ferdinant, L. Nurdiana, dan A. Irman, "Evaluation of Power Plant Reliability Using Index Loss of Load in the Suralaya Power Plant," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci., Eng.*, Vol. 909, No. 1, hal. 1-9, Des. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/909/1/012070.
- [2] R.A. Putra, I.T. Yuniahastuti, dan R.D. Laksono, "Skenario Perbaikan Nilai Keandalan Loss of Load Probability pada PLTH Pantai Baru Pandansimo," *ELECTRA Elect. Eng. Art.*, Vol. 2, No. 1, hal. 16-22, Sep. 2021, doi: 10.25273/electra.v2i1.10500.
- [3] C.B. Jones dkk., "Switch Location Identification for Integrating a Distant

- Photovoltaic Array Into a Microgrid,” *IEEE Access*, Vol. 10, hal. 57902–57913, Mei 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3177143.
- [4] “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021 sampai dengan Tahun 2030,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021.
- [5] U. Albab dan D.Y. Sukma, “Upaya Peningkatan Indeks Keandalan Sistem Pembangkit dengan Peningkatan Kapasitas Sistem Pembangkit,” *J. Online Mhs. Fak. Tek.*, Vol. 6, No. 2, hal. 1–6, Jul.–Des. 2019.
- [6] R.D. Laksono, I.T. Yuniahastuti, dan A.P.P. Prakoso, “Skenario Peningkatan Keandalan Sistem Pembangkit Tenaga Listrik di Wilayah Bali Berdasarkan LOLP,” *ELECTRA Elect. Eng. Art.*, Vol. 2, No. 1, hal. 39–45, Sep. 2021, doi: 10.25273/electra.v2i1.10525.
- [7] I. Saputra dan D.A. Kristiyanti, *Machine Learning untuk Pemula*. Bandung, Indonesia: Informatika, 2022.
- [8] D. Suswanto, *Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik untuk Mahasiswa Teknik Elektro*, ed. 1. Padang, Indonesia: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, 2009.
- [9] C.E. Simbolon, “Penerapan Algoritma Regresi Linier Sederhana dalam Memprediksi Keuntungan dan Kerugian Kelapa Sawit PT. Sri Ulina,” *J. Inf. Syst. Res. (JOSH)*, Vol. 2, No. 2, hal. 169–172, Jan. 2021.
- [10] N.H. Sugiarto (2021) “Mengenal Analisis Regresi Non-linear dalam Statistik,” [Online], [https://lab\\_adrk.ub.ac.id/id/mengenal-analisis-regresi-non-linear-dalam-statistik/](https://lab_adrk.ub.ac.id/id/mengenal-analisis-regresi-non-linear-dalam-statistik/), tanggal akses: 25-Jul-2023.
- [11] A.N. Widiastuti, S. Sarjiya, K.A. Pinanditho, dan E.T. Prastyo, “Evaluasi Keandalan Perencanaan Pembangkit Wilayah Jawa-Bali dengan Mempertimbangkan Ketidakpastian Peramalan Beban,” *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 6, No. 2, hal. 230–234, Mei 2017, doi: 10.22146/jnteti.v6i2.320.
- [12] M.J.A.H. Saleh, S.A.A.H. Abdulla, A.M.A.A. Altaweel, dan I.S. Qamber, “LOLP and LOLE Calculation for Smart Cities Power Plants,” *2019 Int. Conf. Innov., Intell. Inform., Comput., Technol. (3ICT)*, 2019, hal. 1–6, doi: 10.1109/3ICT.2019.8910296.
- [13] Sunarwoko, E. Elsafan, L. Suhaimi, dan C. Hudaya, “Improving Loss of Load Probability Through Biomass Power Plant Integration: A Case Study in Tanjung Balai Karimun,” *2019 IEEE Int. Conf. Innov. Res., Dev. (ICIRD)*, 2019, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074713.
- [14] S. Herlambang, “Implementasi Fungsi Rekursif Dalam Algoritma dan Perbandingannya dengan Fungsi Iteratif.” Tanggal akses: 21-Mar-2023, [Online], <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2008-2009/Makalah2008/Makalah0809-079.pdf>
- [15] R.L. Sullivan, *Power System Planning*, ed 1. New York, AS: McGraw Hill, 1977.
- [16] R.A. Putra dan I.T. Yuniahastuti, “Perhitungan Keandalan Pembangkit Loss of Load Probability (LOLP) untuk N unit Pembangkit,” *ELECTRA Elect. Eng. Article*, Vol. 1, No. 2, hal. 13–19, Mar. 2021, doi: 10.25273/electra.v1i2.8960.
- [17] S. Sanajaoba, “Optimal Sizing of Off-Grid Hybrid Energy System Based on Minimum Cost of Energy and Reliability Criteria Using Firefly Algorithm,” *Sol. Energy*, Vol. 188, hal. 655–666, Agu. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.049.
- [18] M. Čepin, “Evaluation of the Power System Reliability If a Nuclear Power Plant Is Replaced with Wind Power Plants,” *Reliab. Eng., Syst. Saf.*, Vol. 185, hal. 455–464, Mei 2019, doi: 10.1016/j.res.2019.01.010.
- [19] R. Billinton dan R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, ed 2. New York, AS: Plenum Press, 1996.
- [20] S.A. Rashidaee, T. Amraee, dan M. Fotuhi-Firuzabad, “A Linear Model for Dynamic Generation Expansion Planning Considering Loss of Load Probability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 33, No. 6, hal. 6924–6934, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2850822.
- [21] I.S. Qamber, “Novel Modeling of Forced Outage Rate Effect on the LOLP and LOLE,” *Int. J. Comput., Digit. Syst.*, Vol. 9, No. 2, hal. 229–237, Mar. 2020, doi: 10.12785/IJCDS/090208.
- [22] Y.Y. Hong, C.I. Wu, T.H. Hsiao, dan C.S. Lin, “Reliability of a Power System with High Penetration of Renewables: A Scenario-Based Study,” *IEEE Access*, Vol. 9, hal. 78050–78059, Mei 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083793.
- [23] I.S. Qamber, “Loss of Load Probability effect on Four Power Stations,” *2019 Int. Conf. 4th Ind. Revolut. (ICFIR)*, 2019, hal. 1–4, doi: 10.1109/ICFIR.2019.8894781.