

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Istilah keandalan (*reliability*) berhubungan dengan kemampuan sistem untuk menyalurkan listrik ke semua titik beban dalam standar dan jumlah yang sesuai atau diharapkan. Keandalan suatu sistem tenaga listrik harus mengimbangi peningkatan permintaan akan kebutuhan tenaga listrik.

Keandalan sistem pembangkit listrik merupakan suatu ukuran tingkat pelayanan sistem pembangkit terhadap pemenuhan kebutuhan energi listrik beban (konsumen). Pengaruh beban terhadap keandalan pembangkit listrik adalah signifikan. Peningkatan permintaan energi listrik oleh beban disebabkan oleh pesatnya peningkatan jumlah penduduk mengakibatkan peningkatan standar kenyamanan hidup masyarakat seperti pertumbuhan ekonomi dan semakin majunya perkembangan teknologi. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, maka dibangun sistem tenaga listrik.

Secara umum pemilihan lokasi pembangkit diupayakan untuk memenuhi prinsip *regional balance*, yaitu situasi dimana kebutuhan listrik suatu wilayah dipenuhi sebagian besar oleh pembangkit yang berada di wilayah tersebut dan tidak banyak tergantung pada transfer daya dari wilayah lain melalui saluran transmisi interkoneksi. Dengan prinsip ini, kebutuhan transmisi interkoneksi antarwilayah akan minimal. Adapun Lokasi pembangkit masih dapat berubah sesuai dengan perkembangan dalam penyiapan proyek di lapangan dan disesuaikan dengan kebutuhan sistem.

Analisis keandalan sistem pembangkit listrik penting dilakukan untuk memastikan bahwa pasokan listrik mencukupi untuk memenuhi permintaan listrik setiap saat, dalam hal ini adalah ketersediaan daya. Ketersediaan daya listrik kepada daya mampu unit-unit pembangkit dan berbagai faktor seperti ran rutin maupun kemampuan operasi unit-unit pembangkit.



Ketika menyuplai daya ke beban, unit-unit pembangkit yang direncanakan tidak selalu beroperasi sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Gangguan yang terjadi dapat menyebabkan sistem pembangkit tidak dapat beroperasi dengan baik atau sistem mengalami kegagalan. Kegagalan adalah suatu kondisi dimana suatu komponen tidak dapat berfungsi sesuai dengan fungsinya. Akibat gangguan yang terjadi, maka dilakukan pelepasan beban atau pemadaman listrik. Pelepasan beban mengakibatkan kapasitas daya yang tersedia lebih kecil dari beban yang dipikul sistem atau kondisi ini disebut dengan kehilangan beban (*Loss of Load*). Jika pemadaman sering terjadi maka dapat dikatakan sistem pembangkitan tidak andal dalam melayani beban.

Metode perhitungan probabilitas atau kemungkinan saat mengevaluasi keandalan sistem pembangkit listrik adalah konsep Probabilitas kehilangan beban (*Loss of Load Probability*) atau disingkat LOLP. LOLP menyatakan besarnya nilai probabilitas terjadinya kehilangan beban karena kapasitas daya tersedia sama atau lebih kecil dari beban sistem, yang dinyatakan dalam hari per tahun.

Kebutuhan energi listrik di Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur dipasok oleh tiga penyedia listrik yang saling terinterkoneksi, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) mulut tambang Lati yang berkapasitas 3 x 7 MW, PLTU Berau yang berkapasitas 2 x 7 MW, dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Sambaliung dengan total kapasitas mampu sebesar 17,5 MW. PLTD Sambaliung menggunakan mesin diesel berbahan bakar solar serta terdiri atas 11 unit generator set diesel sendiri.

Semakin meningkatnya kebutuhan listrik maka harus diimbangi dengan kapasitas listrik yang tersedia untuk tetap menjaga keandalan listrik itu sendiri. Berbagai hal dapat dilakukan untuk menjaga pasokan listrik akan selalu andal. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis keandalan dari sistem pembangkit listrik Kabupaten Berau sesuai dengan standar yang diatur dalam Rencana Usaha Penediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2021-2030 dimana

keandalan yang digunakan adalah *Loss of Load Probability* (LOLP) lebih dari 0,274% atau setara dengan probabilitas padam 1 hari dalam setahun. Dengan kapasitas pembangkit dengan kriteria LOLP menghasilkan nilai



reserve margin yang bergantung pada ukuran unit pembangkit, tingkat ketersediaan tiap unit pembangkit, jumlah unit, dan jenis unit.

Berdasarkan uraian tersebut, maka akan dilakukan penelitian yang berjudul “Analisis Keandalan Sistem Pembangkit Kabupaten Berau berdasarkan Probabilitas Kehilangan Beban”. Untuk menunjang jalannya penelitian ini, digunakan indeks keandalan probabilitas kehilangan beban atau LOLP guna mengetahui kemampuan operasi sistem pembangkit dalam memenuhi pasokan listrik Kabupaten Berau.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana tingkat keandalan sistem pembangkit di Kabupaten Berau?
2. Apa faktor yang mempengaruhi tingkat keandalan sistem pembangkit di Kabupaten Berau?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, penelitian ini bertujuan sebagai berikut.

1. Mengetahui tingkat keandalan sistem pembangkit di Kabupaten Berau berdasarkan probabilitas kehilangan beban.
2. Mengetahui faktor yang mempengaruhi tingkat keandalan sistem pembangkit di Kabupaten Berau.



1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat memberikan wawasan tentang cara menganalisis keandalan sistem pembangkit berdasarkan probabilitas kehilangan beban.
2. Dapat menjadi dasar pertimbangan bagi penyedia listrik di Kabupaten Berau dalam mengoptimalkan pasokan listrik ke beban.
3. Dapat menjadi dasar untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini melingkupi beberapa hal sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengumpulan dan analisis data secara langsung dari lokasi penelitian.
2. Keandalan yang dianalisis adalah kriteria keandalan berdasarkan probabilitas kehilangan beban.
3. Membahas mengenai analisis keandalan pembangkit yang mencakup analisis kemampuan sistem pembangkit listrik di Kabupaten Berau dalam memenuhi kebutuhan beban tahun 2023.
4. Membahas analisis untuk mengetahui nilai LOLP pada sistem pembangkit listrik di Kabupaten Berau.



1.6 Sistematika Penulisan

Berikut merupakan sistematika penulisan tugas akhir pada penelitian ini.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas terkait materi-materi yang berhubungan dengan penelitian, materi tersebut diambil dari berbagai referensi.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta tahapan dalam melakukan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang data penelitian, proses analisis, dan hasil analisis penelitian.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas tentang simpulan dari penelitian dan saran-saran berdasarkan simpulan dari penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Keandalan

Tujuan utama sistem tenaga listrik adalah melayani kebutuhan energi listrik konsumen yang sesuai dengan keinginan dan kebutuhan konsumen. Untuk mencapai hal tersebut, diperlukan adanya standar pelayanan, sehingga pengelola dan konsumen dapat mengetahui bahwa energi listrik yang tersalurkan kepada konsumen sudah memenuhi standar atau belum. Jika ternyata belum memenuhi standar, maka konsumen dapat melakukan klaim atau menuntut agar dilakukan perbaikan kualitas pelayanan.

Standar yang digunakan untuk mengukur kualitas pelayanan tenaga listrik kepada konsumen meliputi dua hal yaitu keandalan dan kualitas. Keandalan adalah standar pelayanan yang berkaitan dengan kontinuitas pelayanan energi listrik kepada konsumen. Sedangkan kualitas berkaitan dengan stabilitas nilai tegangan dan frekuensi yang sampai kepada konsumen. Dengan keandalan dan kualitas tenaga listrik yang tinggi, konsumen akan dapat memanfaatkan energi listrik secara terus menerus sesuai kebutuhan dengan nyaman dan aman. (Suripto, 2016)

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), keandalan berasal dari kata andal yang memiliki arti dapat dipercaya; memberikan hasil yang sama pada ujian atau percobaan yang berulang. Keandalan dapat didefinisikan sebagai nilai probabilitas bahwa suatu komponen atau sistem akan beroperasi secara memuaskan dalam menjalani fungsinya pada periode waktu dan kondisi tertentu.

Secara umum, keandalan sistem kelistrikan mengacu pada kemampuan sistem untuk menyediakan pasokan listrik yang andal kepada pelanggan. Ini melibatkan beberapa aspek, termasuk mengatasi masalah gangguan layanan dan mengurangi kehilangan beban listrik. Ada empat faktor yang berhubungan dengan

1, yaitu probabilitas, bekerja sesuai dengan fungsinya, periode waktu dan operasi.



1. Probabilitas (*probability*) atau peluang adalah suatu ukuran yang dapat dinyatakan secara angka dengan nilai antara 0 dan 1 atau antara 0% dan 100%. Probabilitas digunakan untuk menentukan keandalan secara kuantitatif.
2. Unjuk kerja atau bekerja sesuai dengan fungsinya menandakan perlunya diadakan kriteria-kriteria tertentu untuk menyatakan peralatan atau sistem beroperasi secara memuaskan.
3. Periode waktu menyatakan ukuran dari periode waktu yang digunakan dalam pengukuran probabilitas.
4. Kondisi Operasi menyatakan pada kondisi operasi yang dilakukan untuk mendapatkan angka keandalan.

Suatu unit mesin pembangkit dapat keluar dari sistem operasi tenaga listrik, sehingga tidak dapat membangkitkan energi listrik untuk mensuplai daya listrik. Dalam keadaan ini, unit mesin pembangkit mengalami *outage*. *Outage* (pelepasan) adalah keadaan dimana suatu komponen tidak dapat bekerja sesuai fungsinya. Sistem mempunyai dua tipe *outage* yaitu Pelepasan paksaan (*Forced Outage*) dan Pelepasan Berjadwal (*Schedule Outage*).

2.2 Pembangkit Listrik

Pada sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu sistem pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban (konsumen) yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi konsumen sesuai kebutuhan. Pembangkit listrik berfungsi menyediakan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan beban. Pembangkit listrik merupakan kumpulan dari beberapa komponen baik mekanis maupun elektris yang dipadukan menjadi satu sehingga membentuk sebuah sistem yang mampu membangkitkan energi listrik melalui proses transformasi energi dari berbagai sumber energi primer seperti air, angin, panas bumi, gas bumi, batu bara, dan minyak bumi. Pada pembangkit listrik, digunakan mesin listrik berupa generator terkopel secara langsung dengan penggerak mula sehingga dapat mengkonversi energi mekanik dari energi primer menjadi energi listrik.



Selanjutnya, listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik akan disalurkan kepada pelanggan dengan menggunakan jaringan transmisi dan distribusi listrik. Proses penyaluran energi listrik di Indonesia dikelola sepenuhnya oleh PT. Perusahaan Listrik Negara Persero (PLN). (Yuniarti dan Aji, 2019)

Secara umum, sistem penyediaan tenaga listrik skala besar terbagi menjadi tiga jenis tenaga listrik, yaitu pusat listrik tenaga air (hidro), pusat listrik tenaga termal, dan pusat listrik tenaga nuklir. Pembangkitan tenaga listrik skala besar menggunakan generator sinkron sebagai komponen yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tegangan bolak-balik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik memiliki frekuensi dan tegangan yang nilainya disesuaikan pada setiap negara.

Ditinjau dari bahan bakarnya, proses pembangkitan tenaga listrik dapat dibagi menjadi dua, yaitu pembangkit tenaga listrik terbarukan dan pembangkit tenaga listrik tidak terbarukan. Jenis pembangkit listrik terbarukan di antaranya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Sedangkan pembangkit listrik tidak terbarukan diantaranya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).

2.3 Sistem Kelistrikan Kabupaten Berau

Total kapasitas daya terpasang pada sistem kelistrikan di wilayah Kabupaten Berau tahun 2023 sebesar 52,359 MW. Sedangkan total kapasitas daya mampu sistem kelistrikan Kabupaten Berau tahun 2023 adalah sebesar 42,5 MW. Sistem kelistrikan Kabupaten Berau dipasok oleh tiga penyedia listrik yang saling terinterkoneksi, yaitu PLTU Lati, PLTU Berau, dan PLTD Sambaliung.





Gambar 1 PLTU mulut tambang Lati
Sumber: Sulaiman (2023)

PT Indo Pusaka Berau (IPB) mengelola pengoperasian dan pemeliharaan PLTU mulut tambang Lati (PLTU Lati) berkapasitas 3 x 7 MW. PLTU Lati berlokasi di Sambakungan, Kecamatan Gunung Tabur, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. PLTU Lati merupakan *pilot project* PLTU China skala kecil pertama di Indonesia dengan bahan bakar batubara kalori rendah (*low calory*) beroperasi sejak tahun 2004. Penyaluran distribusi tenaga listrik dari PLTU Lati kepada pelanggan melalui jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV milik sendiri sepanjang ± 132 km.



Gambar 2 PLTU Berau
Sumber: Purnama, Sugiharto (2022)

PT PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Berau atau PLTU Berau yang berkapasitas 2 x 7 MW berlokasi di Teluk Bayur, Kelurahan Teluk Kecamatan Teluk Bayur, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. PLTU ah memanfaatkan limbah cangkang sawit untuk menekan emisi karbon es pembakaran batu bara dengan komposisi perbandingan 5:95 melalui



program *co-firing* biomassa. PLTU Berau mensuplai energi listrik ke sistem jaringan *isolated* 20 KV Tanjung Redeb.



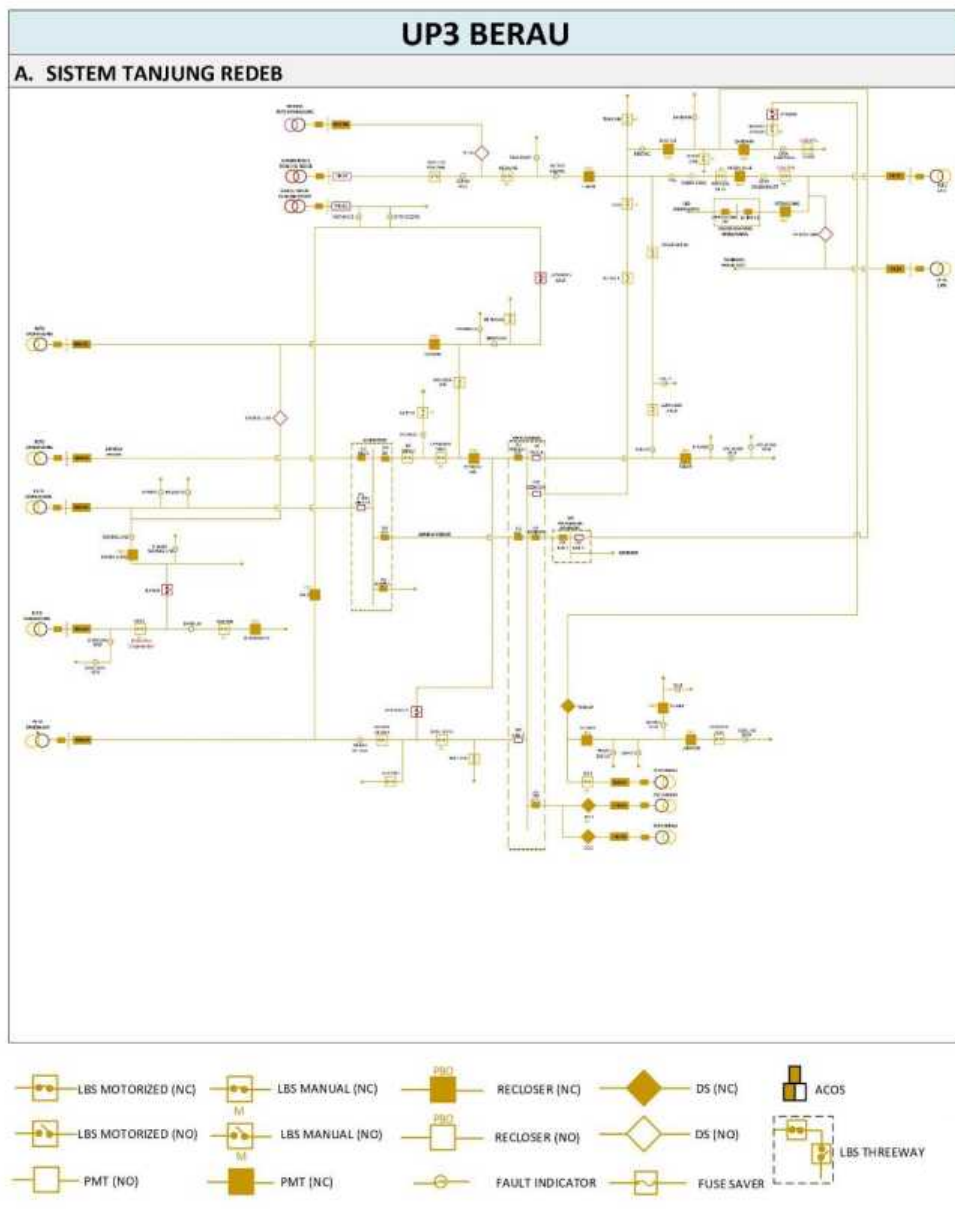
Gambar 3 PLTD Sambaliung
Sumber: Google Maps (2020)

PT PLN Nusantara Power, Unit Pelaksana Pengendalian Pembangkitan (UPDK) Tarakan, Unit Layanan (UL) PLTD Sambaliung berlokasi di Jalan SM. Bayamuddin, Sambaliung, Kecamatan Sambaliung, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. PLTD Sambaliung menggunakan mesin diesel berbahan bakar solar serta terdiri atas 11 unit generator set diesel sendiri yang terdiri atas 11 unit mesin pembangkit listrik tenaga diesel sendiri, di antaranya yaitu 1 unit generator set diesel merek Mirrlees Black Stone dengan daya terpasang 1,059 MW dan 10 unit generator set diesel merek Mitsubitshi yang mempunyai daya terpasang yang identik dengan masing-masing berdaya 1,33 MW. Maka, total kapasitas terpasang milik PLTD sendiri sebesar 14,359 MW.

Gambar *Single Line Diagram* (SLD) sistem kelistrikan Kabupaten Berau atau yang disebut sebagai sistem kelistrikan Tanjung Redeb dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



	PT PLN (PERSERO) UP2D KALTIMRA	06 SEPTEMBER 2024	Revisi ke: 12
	UPDATE SINGLE LINE DIAGRAM 20 KV KALTIMRA	DOP-OPS-02-09-24	Halaman 99 s.d 123



Gambar 4 *Single Line Diagram* sistem kelistrikan Kabupaten Berau
Sumber: PT PLN (Persero) UP3 Berau



2.4 Regresi Linier Sederhana

Analisis regresi adalah analisis statistik yang mempelajari hubungan antara dua atau lebih variabel kuantitatif sehingga satu variabel dapat diramalkan (*predicted*) dari variabel lainnya. Hubungan antara dua variabel dapat dibedakan menjadi dua, yaitu hubungan fungsional dan hubungan statistik. Hubungan fungsional antara dua variabel dapat dinyatakan secara matematis. (Pangesti, 2016)

Jika X variabel bebas (*independent variable*) dan Y variabel tak bebas (*dependent variable*), bentuk hubungan dinyatakan dalam model persamaan regresi yang signifikan dimana Y merupakan fungsi dari X dituliskan:

$$Y = f(X) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

Terdapat dua jenis analisis regresi linear, yaitu regresi linear sederhana dan regresi linear berganda. Secara sederhana, analisis regresi sederhana adalah sebuah metode pendekatan untuk pemodelan hubungan antara satu variabel bebas X dan satu variabel tak bebas Y . Sedangkan regresi linear berganda memiliki dua atau lebih variabel bebas.

Dalam model regresi analisis regresi linear sederhana, variabel bebas menerangkan variabel tak bebasnya. Dalam analisis regresi sederhana, hubungan antara variabel bersifat linier, di mana perubahan pada variabel X akan diikuti oleh perubahan pada variabel Y secara tetap. Maka, regresi linear sederhana dinyatakan dengan persamaan garis lurus fungsi taksiran:

$$Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X \quad (2)$$

dimana,

$\hat{Y}$ adalah nilai prediksi *dependen variable* (Y) untuk setiap nilai *independen variable* (X) yang diberikan.

$\hat{b}_0$ adalah intersep, nilai prediksi Y saat X adalah 0.

$\hat{b}_1$ adalah koefisien regresi, seberapa besar kita mengharapkan Y berubah seiring peningkatan X .



regresi linier sederhana bertujuan untuk membantu dalam penentuan fungsi yang akan digunakan untuk melakukan pendekatan paling sesuai dengan

kumpulan dari titik data (x_n, y_n) yang telah diketahui. Regresi linier menemukan garis yang paling sesuai dengan data.

Memperkirakan nilai data yang tidak diketahui dapat dilakukan dengan menggunakan nilai data yang sudah diketahui, Misalkan nilai X yang dicari terletak di antara dua titik yang sudah ada. Berdasarkan Persamaan 2, prakiraan (estimasi) nilai X dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3 berikut.

$$\hat{X} = \frac{\hat{b}_0 - Y}{\hat{b}_1} \quad (3)$$

dengan

$$\hat{b}_0 = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (4)$$

dan

$$\hat{b}_1 = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (5)$$

dimana,

$\hat{X}$ adalah nilai prediksi *independen variable* (X) untuk setiap nilai *dependen variable* (Y) yang diberikan.

X adalah *independen variable* (variabel yang kita harapkan mempengaruhi Y).

n adalah jumlah data.

Prakiraan nilai yang diperoleh perlu dilakukan pengujian menggunakan persamaan koefisien determinasi (R^2). Koefisien determinasi adalah angka antara 0 dan 1 yang mengukur seberapa baik model statistik memprediksi suatu hasil. Sederhananya, semakin baik suatu model dalam membuat prediksi, semakin dekat R^2 -nya ke 1.

Koefisien determinasi adalah kuadrat dari koefisien korelasi Pearson. Koefisien korelasi Pearson (r) menggambarkan kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel kuantitatif. Koefisien korelasi Pearson dapat bernilai antara -1 dan 1. Hubungan linier sempurna ($r = -1$ atau $r = 1$) berarti bahwa salah satu variabel dapat dijelaskan dengan sempurna oleh fungsi linier variabel lainnya.



r korelasi Pearson juga memberi informasi tentang kemiringan garis n terbaik negatif atau positif. Jika kemiringannya negatif, r negatif. Jika annya positif, r positif.

Persamaan koefisien korelasi Pearson sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (6)$$

Sehingga koefisien determinasi

$$R^2 = r^2 \quad (7)$$

$$R^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \right)^2 \quad (8)$$

Secara singkat, langkah-langkah penentuan fungsi $Y = \widehat{b}_0 + \widehat{b}_1 X$ menggunakan regresi linier sederhana adalah sebagai berikut.

1. Tentukan n titik data yang telah diketahui dalam (x_i, y_i) untuk nilai i dari 1 sampai n.
2. Hitunglah nilai dari $\widehat{b}_0$ dan $\widehat{b}_1$ dengan menggunakan persamaan dari regresi linier (Persamaan 4 dan Persamaan 5).
3. Dapatkan nilai dari setiap titik *sampling* data.
4. Dapatkan nilai dari hubungan antara variable X dan Y dengan menggunakan persamaan 8.

2.5 Keandalan Sistem Pembangkit Listrik

Secara umum, keandalan pembangkit tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan pembangkit dalam menyediakan pasokan tenaga listrik yang cukup dengan kualitas yang memuaskan. Keandalan pembangkit tenaga listrik menjadi tingkat jaminan dari pasokan daya listrik konsumen.

Keandalan sistem pembangkit listrik dapat dianalisis menggunakan parameter *Loss of Load Probability* (LOLP) dan *Expected Energy Not Served* (EENS). Namun, pertama-tama perlu menyusun kurva lama beban.

2.5.1 Kurva Lama Beban



epadatan beban selalu dipakai sebagai ukuran dalam menentukan n listrik. Untuk mengetahui hubungan antara kebutuhan listrik terhadap aka dibuat kurva beban. Kurva beban adalah kurva yang menunjukkan

permintaan (*demand*) atau kebutuhan beban pada interval waktu berupa harian, mingguan, dan tahunan. Kurva beban dapat digunakan dalam menyajikan data beban puncak (kebutuhan maksimum) listrik dalam interval waktu tertentu. Adapun beban puncak didefinisikan sebagai beban (kebutuhan) terbesar yang terjadi dalam interval waktu tertentu.

Pada kurva beban, sumbu tegak (vertikal) menyatakan besar daya pada sistem dan sumbu datar (horizontal) menyatakan durasi beban berlangsung dalam satu periode waktu tertentu. Jika koordinat kurva beban disusun dari urutan nilai yang menurun dengan koordinat tertinggi di sebelah kiri dan koordinat terendah di sebelah kanan, maka diperoleh kurva beban jenis baru yang disebut sebagai kurva lama beban dengan sumbu tegak dan sumbu datar sama dengan kurva beban. Luas permukaan di bawah kurva lama beban menggambarkan kebutuhan energi sistem yang bersangkutan. Kurva ini nantinya akan digunakan dalam menentukan waktu (t) di setiap probabilitas kapasitas daya yang beroperasi di suatu daerah.

Dalam menghitung LOLP, hasilnya harus dibandingkan dengan kurva beban dari sistem, sehingga perlu terlebih dahulu menyusun kurva beban.

2.5.2 *Loss of Load Probability (LOLP)*

Suatu unit pembangkit pada sistem operasi tenaga listrik bisa berada pada kondisi tidak dapat melaksanakan fungsi sebagaimana mestinya. Kondisi ini disebut sebagai gangguan. Gangguan pada unit pembangkit dapat berupa gangguan paksa dan gangguan terjadwal.

Gangguan paksa adalah gangguan atau kegagalan yang disebabkan oleh keadaan darurat yang berhubungan langsung dengan suatu komponen, sistem, atau peralatan yang mengakibatkan sistem proteksi harus secara otomatis atau manusia secara manual memutuskan komponen, sistem, atau peralatan tersebut dari sistem tenaga listrik. Gangguan terjadwal adalah gangguan yang menyebabkan komponen, sistem, atau peralatan sengaja dikeluarkan dari sistem guna pemeliharaan, sistem, atau peralatan yang telah di jadwalkan.



LOLP atau kemungkinan kehilangan beban adalah kemungkinan bahwa kapasitas daya yang tersedia lebih kecil dari pada beban puncak sistem sehingga sistem tidak dapat melayani beban atau kebutuhan pelanggan tenaga listrik.

Metode perhitungan indeks keandalan LOLP dapat digunakan untuk mengevaluasi keperluan dari cadangan daya yang diperlukan pada sistem tenaga listrik. Tingkat keandalan dari suatu sistem tenaga listrik diukur dengan kriteria LOLP dan cadangan daya terhadap beban puncak (*reserve margin*). Kedua faktor tersebut digunakan dalam memperhitungkan parameter-parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai LOLP berupa model beban dan model pembangkit. Nilai LOLP dapat diperkecil dengan menurunkan nilai FOR atau menambah daya terpasang.

FOR atau dapat dikatakan sebagai kondisi *unavailability*, adalah tingkat kegagalan unit-unit pembangkit yang disebabkan oleh gangguan paksa yang tidak terjadwal. FOR merupakan jumlah jam unit mesin pembangkit terganggu atau disebut *Forced Outage Hours* (FOH) dibagi jumlah jam unit mesin pembangkit terganggu ditambah jumlah jam unit mesin pembangkit beroperasi atau disebut *Available Hour* (AH), yang dinyatakan dalam persen. Secara matematis, dapat dituliskan dengan Persamaan 9 sebagai berikut.

$$Unavailability (FOR) = \frac{\sum U_t}{\sum U_t + \sum U_b} \quad (9)$$

sedangkan

$$Availability (1-FOR) = \frac{\sum U_b}{\sum U_b + \sum U_t} \quad (10)$$

dimana,

FOR = tingkat kegagalan unit pembangkit

1-FOR = tingkat keandalan unit pembangkit

U_t = jumlah jam unit terganggu (jam)

U_b = jumlah jam unit beroperasi (jam)



Dalam menentukan nilai LOLP perlu diketahui terlebih dahulu nilai kapasitas individu dan probabilitas kumulatif. Perhitungan probabilitas individu dan probabilitas kumulatif didasarkan pada variabel diskrit. Pada variabel diskrit, jika variabel terdapat nilai peluangnya. Nilai variabel diskrit dapat

diperoleh dengan cara menghitung. Selain itu, peluang diskrit terbentuk jika jumlah semua peluang sama dengan 1. Variabel dari sampel yang diambil dari populasi ini bertujuan untuk mempermudah pemahaman teori sampel dan pembahasan hipotesis pada pengujian selanjutnya.

Peluang untuk nilai x tertentu atau probabilitas individu untuk unit-unit pembangkit dinyatakan dengan Persamaan 11 sebagai berikut.

$$P(X = x) = \text{FOR}_x \times (1 - \text{FOR})_x \quad (11)$$

dimana,

$$P(X = x) = \text{probabilitas individu data } x$$

Distribusi kumulatif atau *Cumulative Distribution Funtion* (CFD) adalah fungsi yang menggambarkan probabilitas kumulatif dari variabel acak, sedangkan probabilitas kumulatif adalah kemungkinan variabel acak berada dalam rentang tertentu. Probabilitas kumulatif didapatkan dari penjumlahan probabilitas individu dirinya dan probabilitas individu setelahnya. Adapun probabilitas kumulatif dinyatakan dengan Persamaan 12 sebagai berikut.

$$P_k = P(X \geq x) = \sum_{i=x}^n P(X = i) \quad (12)$$

dimana,

X = variabel acak,

x = titik awal atau referensi untuk menghitung probabilitas,

n = nilai terakhir atau nilai maksimum dari variabel acak X ,

$P(X \geq x)$ = probabilitas kumulatif mulai data x ,

$P(X = i)$ = probabilitas bahwa variabel acak X mengambil data i ,

Persamaan 12 berarti menjumlahkan semua probabilitas individu dari x hingga n .

LOLP atau probabilitas kehilangan beban dapat dihitung dengan perkalian probabilitas (kemungkinan) terjadinya beban dengan lama terjadinya kehilangan beban (beban < kapasitas tersedia) dinyatakan dalam hari per tahun. Secara

s dapat dinyatakan dengan Persamaan 13 sebagai berikut.

$$\text{OLP} = P_k \times t \quad (13)$$

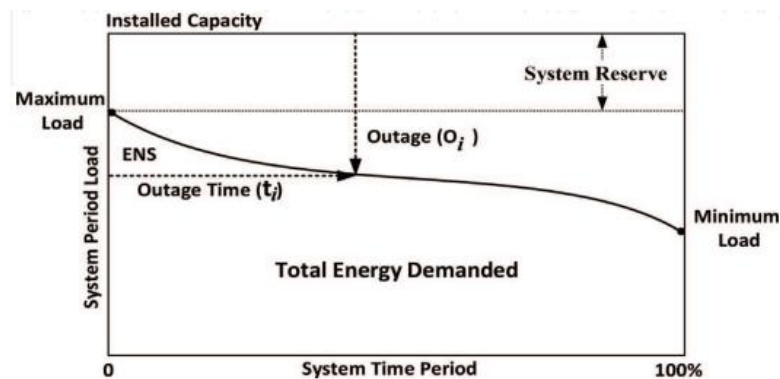


dimana,

P_k = probabilitas kumulatif,

t = durasi kehilangan beban,

LOLP dapat dijelaskan berdasarkan Gambar 5 berikut.



Gambar 5 Kurva durasi beban sistem
Sumber : Al-Shaalan, A. M. (2019)

2.5.3 Expected Energy not served (EENS)

Expected Energy not served (EENS) atau kemungkinan energi tak terpenuhi dalam sistem terjadi karena gangguan unit mesin pembangkit yang menyangkut besar daya dan lama kekurangan energi. *Energy not served (ENS)* menunjukkan besarnya energi yang hilang karena kapasitas tersedia lebih kecil dari permintaan beban maksimal. Indeks keandalan energi tak terpenuhi dinyatakan dalam satuan MWh/tahun.

2.6 Beban Listrik

Pemakaian energi listrik oleh para konsumen senantiasa berubah, dan dapat setiap saat naik atau turun. Dengan demikian, maka setiap saat daya beban, dapat lebih besar atau lebih kecil dari daya mekanikal.

Sistem-sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi memiliki daya cadangan ar daripada suatu sistem bekerja tersendiri. Secara efektif, suatu sistem n lebih mampu untuk meresap suatu gangguan besar, dengan demikian, ia oil. Misalnya, beban dari distribusi wilayah 1 mendadak menaik, pusat-



pusat pembangkit listrik 2 dan Umum 3 dapat turut membantu melalui saluran interkoneksi bilamana diperlukan. Dengan demikian beban dipikul bersama oleh ketiga pusat pembangkit listrik.

Pada beberapa wilayah yang terinterkoneksi beban keseluruhan dapat dipikul bersamaan antara berbagai pusat pembangkit listrik dan apabila salah satu pusat pembangkit listrik mengalami kerusakan atau dihentikan guna inspeksi atau pemeliharaan, bebannya dapat dipikul oleh pusat-pusat pembangkit listrik lainnya. Misalnya, daripada mengoperasikan ketiga pusat pembangkit listrik tinggi di malam hari pada beban yang rendah, salah satu pusat pembangkit listrik dihentikan dan beban dipikul oleh kedua pusat pembangkit listrik yang lain. Dengan demikian, biaya operasi salah satu pusat pembangkit listrik menjadi "nol", sedangkan efisiensi dari yang kedua lainnya menjadi lebih baik, karena dijalankan lebih dekat pada kapasitas nominal. Energi yang melewati saluran-saluran interkoneksi dengan sendirinya diukur guna melakukan perhitungan yang diperlukan.

Beban listrik adalah semua peralatan yang menggunakan listrik sebagai sumber energi. Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda disebabkan pola konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut.

Kemampuan sistem pembangkit listrik dalam memenuhi permintaan beban yang fluktuatif menjadi indikator utama keandalan suatu sistem pembangkit. Fluktuasi beban ini dapat dikategorikan berdasarkan waktu atau durasi, sehingga karakteristik beban dapat dianalisis dalam periode harian, mingguan, bulanan, atau tahunan.

Pengklasifikasian ini sangat penting artinya bila kita melakukan analisa karakteristik beban untuk suatu sistem yang sangat besar. Perbedaan yang paling prinsip dari empat jenis beban diatas, selain dari daya yang digunakan dan juga pembebanannya. Pemakaian daya pada beban rumah tangga akan lebih rendah pada pagi dan malam hari, sedangkan pada beban komersil lebih dominan pada siang dan sore hari.



2.7 Karakteristik Beban

Cerdin, C. (2021) menyatakan bahwa karakteristik beban diperlukan agar sistem tegangan dan pengaruh thermis dari pembebanan dapat dianalisis dengan baik. Analisis tersebut termasuk dalam menentukan keadaan awal yang akan di proyeksikan dalam perencanaan selanjutnya. Berikut ini beberapa faktor yang menentukan karaktristik beban.

1. Faktor Beban

Faktor beban adalah perbandingan antara beban rata – rata terhadap beban puncak pada interval waktu tertentu.

2. Beban Harian

Beban harian bervariasi menurut keadaan cuaca, hari, maupun karakteristik dari sektor beban tersebut, apakah sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha, atau gabungan beberapa sektor.

3. Faktor Penilaian Beban

Faktor-faktor penilaian beban dapat memberikan gambaran tentang karakteristik beban yang membantu meramalkan karakteristik beban dimasa depan dan dampak pembebanan terhadap kapasitas sistem secara menyeluruh.

a. Beban (*Demand*)

Demand (D) dan suatu beban dapat diartikan sebagai besar pembebanan sesaat dan gardu pada waktu tertentu atau besar beban rata-rata untuk suatu interval waktu tertentu. Demand dapat dinyatakan dalam KW, KVA atau KVAR.

b. Kebutuhan maksimum (*Maximum Demand*)

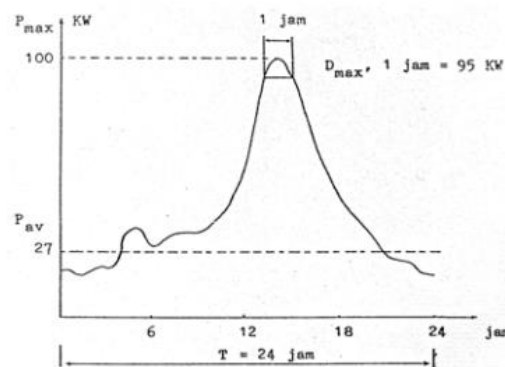
Kebutuhan maksimum atau maximum demand (D_{max}) adalah beban rata-rata terbesar yang terjadi pada suatu interval demand tertentu.

c. Beban Puncak (*Peak Load*)

Beban Puncak adalah nilai terbesar dari pembebanan sesaat pada suatu interval demand tertentu.

emand (D), Maximum Demand (D_{max}), dan Beban Puncak (P_{max}) dapat jelaskan melalui Gambar 6.





Gambar 6 Perubahan kebutuhan maksimum terhadap waktu
Sumber: Suswanto, D. (2009)

d. Beban terpasang

Beban terpasang dari suatu sistem adalah jumlah total daya dari seluruh peralatan berdasarkan kW atau kVA yang tertera pada papan nama (*name plat*) peralatan yang akan dilayani oleh sistem tersebut.

e. Faktor Kebutuhan (*Demand Factor*)

Faktor kebutuhan (*demand factor*) merupakan perbandingan antara kebutuhan maksimum dan total beban terpasang.

f. Faktor Keserampakan (*Coincidence Factor*)

Faktor keserampakan (*coincidence factor*) merupakan kebalikan dari faktor keberagaman yaitu perbandingan antara beban maksimum dari kumpulan beban sistem terhadap jumlah beban maksimum setiap unit beban.

g. Faktor keragaman (*Diversity Factor*)

Faktor keragaman (*diversity factor*) merupakan perbandingan antara jumlah beban maksimum tiap unit beban yang ada pada suatu sistem terhadap beban maksimum sistem secara keseluruhan.

h. Faktor Rugi-Rugi (*Loss Factor*)

Faktor rugi-rugi (*loss factor*) merupakan perbandingan antara daya rata-rata dengan daya beban puncak dalam selang waktu tertentu. Faktor rugi-rugi dapat ditentukan dengan menghitung daya rata-rata dan daya beban puncak.



2.8 Penelitian Terkait yang Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terkait yang terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Meskipun terdapat keterkaitan dalam pembahasan, penelitian yang diajukan ini memiliki perbedaan dengan penelitian terdahulu.

1. Study Kelayakan LOLP (*Loss OF Load Probability*) pada PLTGU Unit Pembangkit Muara Karang. Oleh Richard Angkasa Pratama (2023)

Mengevaluasi risiko kegagalan beban dengan metode pengumpulan data dan analisis data menggunakan persamaan yang berlaku untuk menghitung nilai LOLP. Proses dimulai dengan studi literatur, observasi lapangan, penghitungan probabilitas individu dan kumulatif, serta perhitungan LOLP berdasarkan data kapasitas pembangkit dan FOR. Selain itu, perbandingan hasil perhitungan dilakukan menggunakan program Matlab dan Microsoft Excel. Penelitian ini melakukan analisis pada setiap unit pembangkit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai LOLP di PLTGU Muara Karang adalah 9.744 hari/tahun, yang jauh melebihi standar yang ditetapkan oleh PT. PLN yaitu 1 hari/tahun. Ini mengindikasikan bahwa sistem penyaluran tenaga listrik di lokasi tersebut tergolong kurang andal. Solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini mencakup dua skenario perbaikan untuk meningkatkan nilai keandalan LOLP. Skenario 1 melibatkan penggantian grup KKP dengan unit pembangkit baru, yang menghasilkan nilai LOLP sebesar 9.6908 hari/tahun. Skenario 2 menambahkan unit pembangkit baru di PLTH Pantai Baru Pandansimo, yang menghasilkan nilai LOLP yang lebih baik sebesar 6.8186 hari/tahun, menunjukkan peningkatan keandalan sistem.

2. Studi Analisa Keandalan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Embalut Kalimantan Timur Menggunakan Perhitungan LOLP (*Loss of Load Probabilty*) dan LOLE (*Loss of Load Expectation*). Oleh Idham Priliyanto¹, Elkim Dwijayanto Malia, Alfian Rachmadana Uspa, Andhika wi Bhaswara, dan Fatur Rahman (2022).

menakup beberapa aspek penting terkait analisis keandalan sistem pembangkit listrik meliputi metode analisis menggunakan distribusi diskrit



untuk menghitung probabilitas individu dari unit pembangkit, dengan langkah-langkah analisis yang ditunjukkan dalam diagram alir, data sistem pembangkit, dan indeks keandalan menggunakan LOLP dan LOLE sebagai ukuran keandalan, serta bagaimana probabilitas kumulatif dihitung untuk berbagai kombinasi kapasitas unit pembangkit. Penelitian memberikan gambaran menyeluruh tentang metode dan perhitungan yang digunakan untuk menilai keandalan sistem kelistrikan. Pada penelitian ini, tidak disebutkan aplikasi tertentu yang digunakan. Kesimpulan dari penelitian ini, PLTU Embalut memenuhi standar keandalan PLN, tetapi LOLE menunjukkan perlu perbaikan dengan nilai LOLP 0,0211 hari/tahun (andal) dan nilai LOLE: 7,7014 hari/tahun (kurang andal).

3. Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban. Oleh Sri Mawar Said, Muhammad Bachtiar Nappu, dan Fanandi Noor Ilmi (2022)

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis keandalan operasi sistem pembangkitan di Sulawesi Bagian Selatan berdasarkan indeks probabilitas kehilangan beban menggunakan perangkat lunak WASP-IV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pembangkitan di wilayah tersebut memiliki tingkat keandalan yang masih dalam kategori andal sesuai dengan standar PLN. Indeks keandalan LOLP sistem sulbagsel selama periode 2021-2030 berkisar antara 0.0794% hingga 0.0814%, yang masih di bawah standar PLN sebesar 0.274% atau setara dengan 1 hari/tahun. Selain itu, penelitian juga menyoroti pentingnya memperhatikan *reserve margin* dalam perencanaan perluasan sistem tenaga listrik untuk menjaga keandalan sistem dengan *cost* seminimal mungkin

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan disajikan dalam Tabel 1 sebagai berikut.



Tabel 1 Perbandingan penelitian terkait yang terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
1	Study Kelayakan LOLP (<i>Loss OF Load Probability</i>) pada PLTGU Unit Pembangkit Muara Karang.	Pada penelitian ini untuk mengetahui nilai keandalan LOLP dilakukan perbandingan hasil perhitungan dan waktu operasi sistem dengan menggunakan Microsoft Excel dan program Matlab sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan Microsoft Excel.	Melakukan penelitian dengan mengusulkan skenario perbaikan 1 dan 2 nilai keandalan LOLP.	Pada penelitian ini tidak menjelaskan secara detail proses matematis perhitungan nilai keandalan LOLP.	Metode penentuan indeks keandalan berdasarkan probabilitas kehilangan beban menggunakan Microsoft Excel sama dengan penelitian yang diajukan sehingga kemiripan sekitar 30%.



Lanjutan Tabel 1

No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
2	Studi Analisa Keandalan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Embalut Kalimantan Timur Menggunakan Perhitungan LOLP (<i>Loss of Load Probabilty</i>) dan LOLE (<i>Loss of Load Expectation</i>)	Pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan nilai LOLE sedangkan pada penelitian yang dilakukan hanya berfokus pada analisis LOLP.	Menyajikan analisis perhitungan nilai LOLE.	Pada penelitian ini tidak dijelaskan metode perhitungan atau perangkat lunak yang digunakan dalam penentuan nilai keandalan LOLP.	Penentuan nilai keandalan LOLP di suatu wilayah dan penggunaan data beban puncak selama satu tahun sama dengan penelitian yang diajukan sehingga kemiripan sekitar 40%.
	Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan	Pada penelitian ini untuk mengetahui nilai indeks keandalan LOLP	Menyajikan analisis keandalan operasi sistem pembangkitan di	Tidak disertakan analisis perbandingan dengan	Metode penentuan indeks keandalan berdasarkan



Lanjutan Tabel 1

No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
	Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban.	Digunakan perangkat lunak WASP-IV sedangkan pada penelitian yang diajukan digunakan perangkat lunak Microsoft Excel.	Sulawesi Bagian Selatan berdasarkan indeks probabilitas kehilangan beban dan menyajikan informasi mengenai proyeksi kebutuhan energi listrik di wilayah tersebut hingga tahun 2030, yang dapat menjadi acuan penting dalam perencanaan pembangkitan listrik.	penelitian sebelumnya atau studi sejenis.	probabilitas kehilangan beban sama dengan penelitian yang diajukan sehingga kemiripan sekitar 25%.

