

Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban

Sri Mawar Said
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Sulawesi Selatan
srimawarsaid@yahoo.com

Muhammad Bachtiar Nappu
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Sulawesi Selatan
bachtiar@eng.unhas.ac.id

Fanandi Noor Ilmi
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Sulawesi Selatan
ilmifh17d@student.unhas.ac.id

Abstrak—Energi listrik merupakan energi yang sangat berpengaruh bagi kehidupan manusia. Seiring dengan berkembangnya zaman dan meningkatnya populasi manusia, maka kebutuhan akan listrik pula semakin meningkat. Sulawesi bagian selatan sebagai wilayah paling menonjol di Kawasan Indonesia timur mengalami peningkatan kebutuhan listrik dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan RUPTL PLN tahun 2021-2030, pertumbuhan kebutuhan listrik mengalami kenaikan rata-rata sebesar 6.8% per tahun. Dengan meningkatnya kebutuhan listrik, maka diperlukan perluasan kapasitas pembangkit guna mengimbangi peningkatan kebutuhan listrik agar tidak menyebabkan gangguan terhadap konsumen akibat pemadaman paksa. Perencanaan pembangkitan sesuai RUPTL PLN akan dianalisis sesuai dengan prakiraan beban puncak yang didapatkan dari prakiraan kebutuhan energi yang dilakukan dengan metode least square regresi linear kebutuhan energi per sektoral data historis menggunakan Microsoft Excel. Hasil prakiraan kebutuhan energi listrik digunakan untuk mendapatkan beban puncak untuk tahun 2021 sebesar 1565.27 MW dan untuk tahun 2030 sebesar 2291.63 MW. Untuk mengetahui nilai indeks keandalan LOLP digunakan software WASP-IV. Indeks keandalan LOLP sistem sulbagsel selama 2021-2030 mengalami kondisi yang naik turun dan berada pada range 0.0794 % – 0.0814 % dimana masih dalam kategori andal sesuai dengan standar PLN 0.274 % atau 1 hari/tahun.

Kata kunci: Keandalan, Sistem sulbagsel, Prakiraan Kebutuhan Listrik, LOLP

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan energi yang sangat berpengaruh bagi kehidupan manusia. Hampir semua sektor aktivitas manusia membutuhkan listrik. Seiring dengan berkembangnya zaman dan meningkatnya populasi manusia, maka kebutuhan akan listrik pula semakin meningkat. Hal ini akan berdampak dari segi keandalan listrik itu sendiri. Apabila energi listrik yang dihasilkan oleh unit pembangkit listrik lebih kecil dari permintaan beban listrik yang ada, maka akan menyebabkan terlepasnya beban dari sistem kelistrikan. Kondisi ini akan juga menyebabkan kesulitan dari konsumen listrik, karena segala aktivitas yang berkaitan dengan listrik akan terhambat dikarenakan tidak adanya listrik.

Sistem kelistrikan Sulawesi bagian selatan terdiri dari sebagian sistem Sulawesi Tengah, Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, dan Sulawesi Tenggara. Kebutuhan listrik di Sulawesi bagian selatan selalu mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN tahun 2021-2030,

pertumbuhan beban puncak listrik mengalami kenaikan rata-rata sebesar 6.8% per tahun dimana faktor bebannya juga meningkat dari 51.52 % pada tahun 2018 menjadi 53.85% pada tahun 2019 [1].

Melihat kondisi yang terjadi, dengan semakin meningkatnya kebutuhan listrik maka dibutuhkan keseimbangan antara kapasitas listrik yang tersedia untuk tetap menjaga keandalan listrik itu sendiri. Hal yang dapat dilakukan agar kondisi tersebut tidak terjadi dan listrik akan selalu andal, maka penelitian ini dilakukan untuk menganalisis keandalan dari sistem Sulawesi bagian selatan sesuai dengan standar LOLP (*Loss of Load Probability*) <0.273% atau LOLE (*Loss of Load Expected*) dengan 1 hari/tahun berdasarkan RUPTL PLN 2021-2030. Dalam menganalisis keandalan untuk beberapa tahun kedepan, terlebih dahulu dicari beban puncak di setiap tahunnya dengan melakukan prakiraan terhadap konsumsi energi di setiap sector menggunakan data historis setelah itu dengan menggunakan kombinasi penambahan unit pembangkit guna menyesuaikan kapasitas yang tersedia dengan prakiraan beban kedepannya. Adapun dalam penelitian ini rencana skema pengembangan pembangkitan sesuai RUPTL PLN 2021-2030. Untuk menunjang jalannya penelitian ini maka akan digunakan WASP-IV (*Wien Automatic Sistem Planning IV*), yang merupakan sebuah perangkat lunak dalam perencanaan ekspansi energi.

II. STUDI LITERATUR

A. Konsep Umum Keandalan

Keandalan adalah istilah abstrak yang berarti daya tahan, dapat diandalkan, dan kinerja yang baik. Namun, untuk ilmu keteknikan, lebih dari sekedar istilah abstrak, yaitu sesuatu yang dapat dihitung, diukur, dievaluasi, direncanakan, dan dirancang menjadi peralatan atau sistem. Keandalan berarti kemampuan sistem untuk melakukan fungsinya sesuai yang telah dirancang pada keadaan di bawah kondisi operasi yang ditemui selama masa pakai yang diproyeksikan [2]. Keandalan dapat diartikan sebagai peluang suatu peralatan untuk beroperasi sesuai dengan yang direncanakan pada selang waktu dan kondisi tertentu. Keandalan sistem tenaga listrik merupakan tolak ukur tingkat pelayanan suatu sistem terhadap suatu permintaan energi listrik konsumen [3]. Secara umum, keandalan sistem kelistrikan mengatasi masalah gangguan layanan dan kehilangan beban listrik. Berbagai indeks telah dikembangkan untuk mengukur keandalan dan biayanya di area sistem tenaga seperti kemungkinan kehilangan beban (LOLP), ekspektasi kehilangan beban (LOLE), frekuensi pengurangan beban

yang diharapkan (EFLC), durasi pengurangan beban yang diharapkan (EDLC), durasi pembatasan yang diharapkan (EDC), dan energi yang diharapkan tidak disuplai (EENS) [4]. Dalam suatu keandalan sistem tenaga listrik terdapat empat faktor yang berkaitan dengan keandalan, yaitu probabilitas, bekerja sesuai dengan fungsinya, periode waktu dan kondisi operasi.

- Probabilitas
Probabilitas adalah suatu ukuran yang dapat dinyatakan secara angka dengan nilai 0 dan 1 atau antara 0 hingga 100%.
- Bekerja sesuai dengan fungsinya
Faktor yang menandakan perlunya diadakan kriteria-kriteria tertentu untuk menyatakan peralatan atau sistem beroperasi secara memuaskan.
- Periode waktu
Faktor yang menyatakan ukuran dari periode waktu yang digunakan dalam pengukuran probabilitas.
- Kondisi operasi
Faktor yang menyatakan pada kondisi operasi yang dilakukan untuk mendapatkan angka keandalan.

B. Sistem Pembangkitan Listrik

Pada sistem tenaga listrik terdiri dari sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Sistem pembangkitan berfungsi untuk menyediakan daya agar beban sistem dapat terpenuhi. Dalam pembangkitan dan produksi energi listrik dapat diperoleh dari berbagai sumber energi primer, seperti batu bara, minyak dan gas bumi, panas bumi, angin, air, dan energi matahari.

Bagian yang paling umum dalam membangkitkan energi listrik menggunakan mesin listrik yang biasa disebut generator saat menghasilkan listrik DC dan alternator saat menghasilkan listrik AC. Mesin ini yang akan mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik dan juga harus terkopel secara mekanik dengan prime movers. Dimana dengan sumber energi primer yang ada akan menjadi prime movers dalam mengkopel sehingga energi listrik dapat dibangkitkan [5].

Sumber energi pembangkit listrik dibedakan menjadi 3, yaitu [6]: Sumber energi pembangkit listrik dibedakan menjadi 3, yaitu [6]:

- a. Pembangkit tenaga listrik konvensional atau jenis energi tidak terbarukan yang menggunakan bahan bakar batubara, minyak dan gas bumi.
- b. Pembangkit tenaga listrik renewable atau jenis energi terbarukan yang menggunakan sumber energi alam seperti matahari, angin, panas bumi, dan hydrogen.
- c. Pembangkit tenaga listrik energi baru yang menggunakan bahan bakar nuklir.

Berdasarkan factor kapasitasnya unit pembangkit dapat digolongkan menjadi tiga unit golongan yaitu [7]:

- a. Unit pemikul beban dasar (*Base Load*).
Unit pemikul beban dasar dioperasikan dengan factor kapasitas tinggi (75% s/d 100%). Untuk unit pembangkit beban dasar yaitu PLTU, PLTGU, PLTN dan PLTA.
- b. Unit pemikul beban menengah (*Medium Load*).
Unit pemikul beban menengah dioperasikan dengan factor kapasitas antara (20% s/d 75 %). Unit pemikul beban medium yaitu PLTA dan PLTU.

- c. Unit pemikul beban puncak (*Peak Load*).

Unit pemikul beban puncak hanya dioperasikan selama permintaan beban puncak, dioperasikan dengan factor kapasitas antara (0% s/d 20%). Yang termasuk dalam unit pemikul beban puncak adalah PLTG, PLTD, dan PLTA.

C. Keandalan Pembangkit

Suatu unit pembangkit dapat keluar dari sistem operasi tenaga listrik, sehingga tidak dapat membangkitkan energi listrik untuk mensuplai daya listrik. Dalam keadaan ini unit pembangkit mengalami gangguan. Gangguan merupakan keadaan komponen jika tidak dapat melaksanakan fungsi sebenarnya akibat dari suatu atau beberapa kejadian yang berhubungan langsung dengan komponen tersebut. Gangguan yang terjadi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu [8]:

1. Gangguan Paksa

Gangguan paksa adalah gangguan yang disebabkan oleh kondisi darurat yang berhubungan langsung dengan komponen atau sistem atau peralatan yang mengakibatkan komponen atau sistem atau peralatan harus dipisahkan dari sistem oleh suatu sistem proteksi secara otomatis atau manual.

2. Gangguan Terjadwal

Gangguan terjadwal adalah gangguan yang menyebabkan komponen atau sistem atau peralatan dikeluarkan dari sistem. Hal ini biasanya dilakukan guna pemeliharaan komponen atau sistem atau peralatan yang telah di jadwalkan.

Keandalan unit-unit pembangkit dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain gangguan kerusakan dan pemeliharaan rutin. Faktor-faktor tersebut memungkinkan unit-unit pembangkit mengalami keluar paksa FOR. Maka ukuran sering tidaknya unit pembangkit mengalami gangguan dinyatakan dengan FOR.

Perubahan permintaan daya listrik dari waktu ke waktu, penambahan beban puncak serta adanya kemungkinan unit pembangkit listrik gagal beroperasi akan mengakibatkan pemasokan tidak dapat memenuhi permintaan. Oleh karena itu, untuk mencegah keadaan seperti itu maka diperlukan kapasitas cadangan dalam sistem pembangkit listrik (*reserved capacity*) [7].

Beberapa parameter yang menentukan keandalan pembangkit antara lain [16].

• Faktor Beban

Faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata untuk suatu selang waktu tertentu terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama. Faktor beban terdiri dari faktor beban harian, mingguan, bulanan, atau tahunan. Beban rata-rata adalah produksi energi dalam selang waktu tertentu dibagi selang waktu tertentu tersebut. Sedangkan beban puncak harian adalah beban tertinggi yang terjadi dalam 24 jam. Faktor beban menggambarkan karakteristik beban, semakin besar faktor beban maka semakin baik keandalan pembangkit.

• Faktor Ketersediaan

Faktor ketersediaan adalah perbandingan antara besarnya daya yang tersedia terhadap daya yang terpasang dalam sistem. Faktor ketersediaan ini menggambarkan kesiapan operasi unit-unit pembangkit dalam sistem. Semakin tinggi

faktor ketersediaan maka semakin baik keandalan unit pembangkit.

- Faktor Penggunaan

Faktor penggunaan adalah perbandingan antara besarnya beban puncak terhadap daya yang terpasang dalam sistem. Faktor penggunaan menggambarkan besar kemampuan yang terpasang. Maka bila faktor penggunaan telah mencapai nilai yang tinggi maka perlu pengembangan pembangkit agar tidak mengalami beban lebih (*over loaded*).

- Faktor Kapasitas

Faktor kapasitas menunjukkan besar sebuah unit pembangkit tersebut dimanfaatkan. Faktor kapasitas adalah faktor kapasitas tahunan, menggambarkan pemanfaatan energi unit pembangkit dalam satu tahun dari kemampuan produksi. Maka semakin tinggi faktor kapasitas maka semakin baik keandalan unit pembangkit.

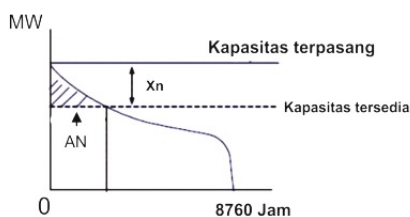
- Faktor Gangguan Keluar Perawatan

Faktor gangguan keluar perawatan adalah perbandingan antara lamanya waktu perawatan selama satu tahun. Maka semakin rendah faktor gangguan keluar perawatan maka semakin baik keandalan unit pembangkit.

Pembangkit yang direncanakan tersedia untuk operasi dalam sistem ada kemungkinan mengalami pemadaman (*Forced Outage*) maka besarnya cadangan daya tersedia sesungguhnya merupakan ukuran keandalan operasi sistem. Peralatan dalam sistem tenaga listrik perlu dipelihara secara periodik. Penundaan pemeliharaan akan memperbesar kemungkinan rusaknya peralatan. Oleh karena itu, jadwal pemeliharaan peralatan harus ditaati. Pemeliharaan yang teratur selain memperpanjang umur ekonomis peralatan juga mempertinggi keandalan peralatan [11].

Forced outage rate dan ketersediaan digunakan sebagai perhitungan kemungkinan sistem kehilangan beban atau *Loss of Load Probability* (LOLP), dengan menggunakan kurva lama beban atau *Load Duration Curve* (LDC) yang menggambarkan durasi beban dalam periode waktu tertentu[17].

1) Kurva Beban



Gambar 1. Kurva Beban

Beban listrik adalah jumlah daya listrik yang dipakai oleh konsumen listrik secara terus menerus atau sesuai keperluan dan berada dibawah pengawasan Perusahaan Listrik Negara (PLN). Riwayat dari penggunaan beban biasa digambarkan pada sebuah kurva yang disebut kurva beban dimana kurva beban adalah sebuah kurva yang menunjukan besar daya listrik yang digunakan pada satuan waktu tertentu. Kurva beban merupakan bagian dari perencanaan beban yang berfungsi untuk kegiatan perencanaan dan pengoperasian suatu pembangkit. Dengan kurva beban diketahui durasi kebutuhan daya serta energi yang digunakan dengan mencari luas wilayah yang berada

dibawah kurva tersebut. Dalam satuan waktu yang digunakan kurva beban dapat dibagi menjadi kurva beban harian, bulanan, dan tahunan [7].

2) LOLP (*Loss of Load Probability*)

LOLP adalah nilai yang diharapkan, kadang-kadang dihitung berdasarkan beban puncak per jam masing-masing hari dan kadang-kadang pada setiap jam beban (24 dalam sehari). Selain itu, pada awalnya, LOLP digunakan untuk mencirikan kecukupan generator untuk melayani beban pada sistem daya massal, tidak secara langsung memodelkan keandalan sistem transmisi dan distribusi di mana sebagian besar pemadaman sebenarnya terjadi baru-baru ini dibuat bahwa LOLP biasanya digunakan untuk memperkirakan indeks keandalan [3,9].

Indeks keandalan LOLP adalah suatu kondisi dimana beban puncak melebihi kapasitas dari daya yang tersedia[10]. Metode perhitungan indeks keandalan LOLP dapat digunakan untuk mengevaluasi keperluan dari cadangan daya yang diperlukan pada industri listrik. Untuk sistem *single area case*, *two area case*, *three area case* dapat dihitung nilai dari keandalannya dengan menggunakan metode ini[12]. Tidak hanya itu, perhitungan dengan metode LOLP memiliki keunggulan lain, diantaranya sistem kelistrikan dari semua interkoneksi dapat dihitung nilai dari indeks keandalan pembangkitnya.

Kemungkinan bahwa sistem tidak dapat melayani beban, tidak dapat melayani kebutuhan pelanggan akan tenaga listrik dinyatakan dengan indeks LOLP. Untuk menghitung LOLP maka aspek bagaimana pengaruh penambahan atau pengurangan unit pembangkit dalam sistem terhadap kemungkinan terjadinya kumulatif KW *on outage* harus dibandingkan dengan kurva lama beban dari sistem. Walaupun nilai kemungkinan terjadinya KW *on outage* adalah sama, tetapi kalau karakteristiknya berlainan, maka nilai LOLP juga berlainan. Kurva lama beban disusun berdasarkan kurva beban harian. Nilai LOLP dapat ditentukan dengan persamaan (1)[8]:

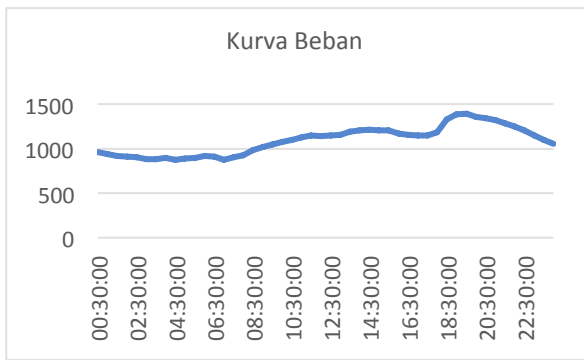
$$LOLP = \sum_{t=1}^{365} p \times t \quad (1)$$

dengan:

- *t* adalah waktu mulai 1 hari sampai dengan 365hari (1 tahun)
- *p* adalah probabilitas atau kemungkinan terjadinya kumulatif kapasitas sistem lebih kecil dari beban (*Capacity < Load*)

3) ENS (*Energy Not Served*)

Indeks keandalan energi tak terpenuhi atau *energy not served* menunjukkan besarnya energi yang hilang karena kapasitas tersedia lebih kecil dari permintaan beban maksimal. Indeks keandalan energi tak terpenuhi dinyatakan dalam satuan MWh/tahun. Area dibawah kurva *load duration curve* mewakili energi yang digunakan selama periode tertentu dan dapat digunakan untuk menghitung *expected energy not served* (EENS) karena ketidaktersediaan *installed capacity* [11].



Gambar 2. Kurva Energi yang terganggu karena *capacity outage*

Dari Gambar 2 Luas daerah yang diarsir (AN) merupakan besarnya energi yang tak dapat terpenuhi oleh sistem pembangkitan yang disebabkan terjadinya gangguan sebesar Xn. Jika probabilitas kapasitas gangguan sebesar Xn dinyatakan dengan Pn, maka hasil kali AN dan Pn adalah probabilitas kehilangan energi yang disebabkan oleh kapasitas gangguan sebesar Xn.

4) Sistem Kelistrikan Sulawesi bagian Selatan

Sistem kelistrikan di pulau Sulawesi terbagi menjadi 2 area besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 antara lain area Sulawesi bagian utara (Sulbagut) dan Sulawesi bagian selatan (Sulbagsel). Sistem Sulbagsel merupakan penggabungan Sistem Sulsel-Sulbar, Sistem Sulteng dan Sistem Sultra. Sistem ini telah terbentuk pada tahun 2019 setelah proyek transmisi 150 kV interkoneksi Sistem Sulsel dengan Sistem Sultra selesai dibangun termasuk IBT 275/150 kV Wotu. Rencana penempatan pembangkit di sistem Sulsel-Sulbar, Sultra, Sulteng diupayakan seimbang dengan sesuai kriteria *regional balance*.



Gambar 3. Peta Sistem Tenaga Listrik Sulawesi

Pada RUPTL 2021-2030 diketahui bahwa penjualan terus mengalami kenaikan. Hal serupa terjadi dengan produksi listrik itu sendiri juga ikut bertambah. Dalam rangka mengoptimalkan potensi tenaga hidro yang sangat besar dan tersebar di provinsi Sulsel, Sulbar, Sulteng, dan Sultra, akan dibangun beberapa proyek PLTA oleh PLN dan

IPP. Selain potensi tenaga hidro, di Sulsel juga terdapat potensi tenaga angin/bayu yang cukup besar yaitu di sidrap, Jeneponto dan Majene. Potensi tersebut juga akan dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga listrik (biasa disebut PLTB) yang tersambung ke grid Sulbagsel. Daya mampu PLTA dan PLTB sangat dipengaruhi oleh musim sehingga di sistem Sulbagsel direncanakan juga pembangunan pembangkit thermal (PLTG/GU/MG) yang setiap saat dapat dioperasikan jika diperlukan untuk mengisi kekurangan daya pada saat musim kemarau dan saat tidak ada angin untuk PLTB. Selain itu, pembangkit thermal yang direncanakan juga dirancang untuk dapat mengikuti fluktuasi daya pembangkit *intermittent*.

5) WASP-IV (Wien Automatic Sistem Planning)

Modul WASP-IV adalah sebuah alat perencanaan perluasan kapasitas pembangkit listrik yang dikembangkan untuk Badan Energi Atom Internasional atau *International Atomic Energy Association* (IAEA). Modul ini telah berhasil digunakan selama beberapa oleh perencana sistem tenaga listrik di seluruh dunia. Karena pengembangan dan peningkatan berkelanjutan untuk mengakomodasi kebutuhan pengguna, WASP telah menjadi salah satu model yang paling banyak diterapkan dan berumur panjang untuk studi perencanaan perluasan sistem tenaga [13]. Keandalan dari konfigurasi sistem dievaluasi oleh WASP dalam kaitannya dengan indeks LOLP. Indeks ini dihitung dalam WASP untuk setiap periode dalam setahun dan setiap kondisi yang ditentukan. LOLP setiap periode ditentukan sebagai jumlah LOLP untuk setiap kondisi hidro (dalam periode yang sama) yang dibobot oleh probabilitas kondisi hidro, dan rata-rata LOLP tahunan sebagai jumlah LOLP periode dibagi dengan jumlah periode [14].

WASP-IV merupakan sebuah software yang digunakan untuk menyusun rencana pengembangan sistem pembangkit untuk mencari nilai yang paling optimum dengan batasan-batasan tertentu. Seluruh total biaya pengembangan sistem selama masa studi akan ditampilkan dalam bentuk net present value atau biaya-biaya ditinjau dalam periode awal studi. Total biaya perencanaan didapatkan dari *objectif function* yang memiliki nilai minimum dalam proses optimisasi.

Pada modul WASP-IV disediakan jenis pembangkit thermal dan pembangkit hidro. Seperti disebutkan dalam pendahuluan bahwa model beban di perangkat lunak WASP-IV didasarkan pada teknik kurva lama atau durasi beban (LDC). Model LDC memberikan informasi tentang persentase waktu beban sama atau melebihi sebesar nilai dalam MW tertentu dan memberikan informasi energi yang sama seperti yang sesuai pada kurva durasi beban. Namun, dalam memodelkan pembangkit yang nondispatchable seperti angin yang sumbernya hanya berdasarkan ketersediaan angin saja akan memiliki sedikit keterbatasan. Ada beberapa cara untuk memodelkan turbin angin/PLTB di WASP-IV dan semuanya memiliki semacam prakiraan. Berikut beberapa cara untuk menanganinya[15].

- PLTB dapat dimodelkan sebagai pembangkit thermal dengan nol harga bahan bakar dan FOR yang meningkat untuk menggambarkan angin yang bervariasi dan mengurangi kapasitas kredit dari PLTB. Dengan nol biaya bahan bakar, maka loading order ekonomi dari

PLTB merupakan yang pertama diperhitungkan dan dapat dijadikan sebagai pemikul beban dasar.

- PLTB dimodelkan sebagai beban negatif. Prakiraan energi yang dihasilkan dari PLTB pertama dapat dikurangi dari kurva beban yang awal dan kemudian LDC dapat dibuat. Pengoptimalan akan selesai tanpa menimbang PLTB dan harga PLTB dapat ditambahkan saat *optimal case*.
- PLTB dapat diturunkan sesuai dengan kapasitas kredit dan dimodelkan sebagai pembangkit thermal dengan nol biaya bahan bakar dan tingkat FOR sekitar 4% dapat ditugaskan.
- PLTB dimodelkan sebagai pembangkit hidro dengan kapasitas beban dasar dan *inflow* energi yang terbatas. *Inflow* energi menggambarkan energi dari PLTB dapat menghasilkan dalam rentang waktu kurva lama atau durasi beban tertentu.

Dalam penelitian ini, PLTB dimodelkan sebagai pembangkit thermal dengan tingkat pemadaman paksa tinggi untuk menyelidiki kelayakan ekonomi PLTB. Teknik ini lebih mendekati kenyataan karena tingkat pemadaman paksa yang lebih tinggi memaksa model WASP untuk memilih lebih banyak pembangkit untuk memenuhi persyaratan keandalan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Analisis Data

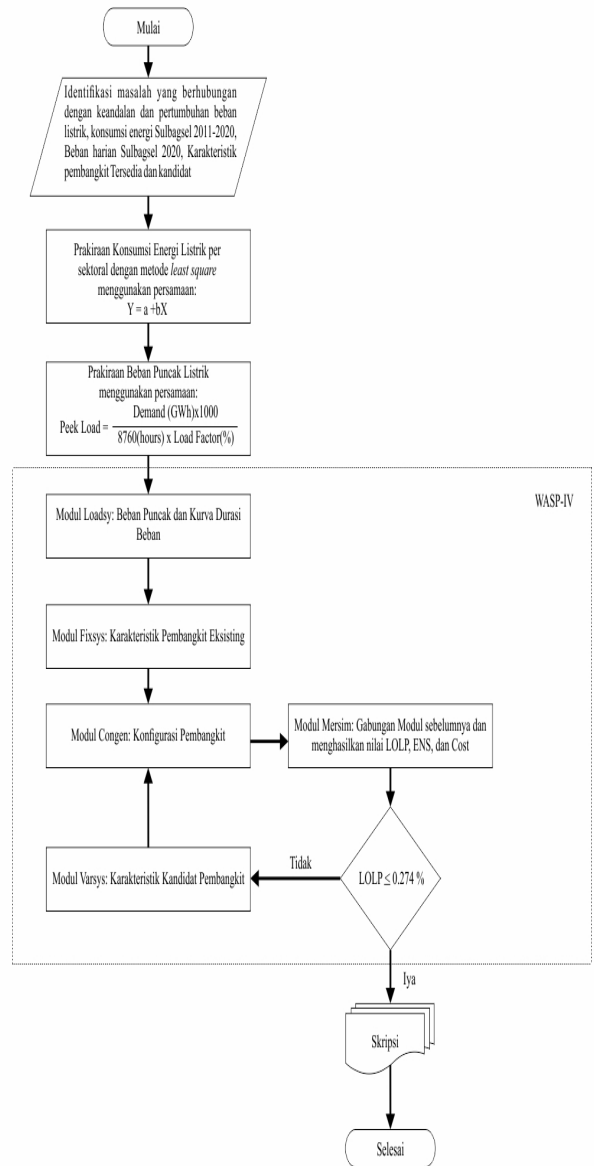
Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software WASP-IV untuk mendapatkan nilai LOLP, sebelum itu dilakukan prakiraan beban, dengan melakukan prakiraan konsumsi energi listrik per sektoral untuk tahun 2021-2030 berdasarkan data historis konsumsi energi listrik per sektoral tahun 2010-2020 pada statistik PLN 2010-2020.

B. Rancangan Simulasi

Rancangan simulasi pada penelitian ini terdiri dari simulasi keandalan sistem dengan perencanaan pembangkitan sesuai RUPTL dan simulasi keandalan sistem dengan perencanaan memperhatikan kebijakan tentang PLTU dengan parameter input yaitu Beban Puncak yang diketahui berdasarkan konsumsi energi listrik yang telah diprakirakan dan FOR pembangkit yang tersedia data dari PLN.

C. Alur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian ini digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Prakiraan Beban Puncak

Untuk melakukan simulasi guna mengetahui keandalan dari sistem sulbagesel dalam beberapa tahun kedepan tentunya diperlukan sebuah proyeksi mengenai konsumsi energi listrik dari masyarakat itu sendiri. Adapun yang menjadi salah satu masukan dalam salah satu modul di WASP-IV yaitu beban puncak. Proyeksi konsumsi energi listrik hingga tahun 2030, dapat diperkirakan dengan analisis model prakiraan konsumsi energi. Konsumsi energi listrik atau energy demand dihitung berdasarkan besarnya konsumsi energi persektor. Selain konsumsi energi, terdapat variable lainnya yang dapat mempengaruhi proyeksi akan kebutuhan energi listrik di masa mendatang. Dalam melakukan prakiraan terdapat banyak metode. Salah satunya yaitu metode *least square*. Metode jumlah kuadrat terkecil atau metode *least square* adalah jumlah kuadrat penyimpangan (deviasi) nilai data terhadap garis tren

minimum atau terkecil [18]. Ciri dari metode ini, yaitu dalam menentukan parameter X. Setelah parameter X terbentuk dan dijumlah, jumlahnya harus 0, walaupun dalam data historis berjumlah ganjil maupun data historis berjumlah genap.

Cara Menghitung dengan metode ini terhadap data dilakukan pembagian menjadi dua kelompok untuk data yang jumlahnya:

- Genap, maka skor nilai X adalah.....-5, -3, -1, 1, 3, 5
- Ganjil, maka skor nilai X adalah.....-2, -1, 0, 1, 2

Tren penjualan adalah suatu garis naik atau turun yang menunjukkan tingkat penjualan. Persamaan tren dapat mempunyai berbagai bentuk, salah satunya yaitu bentuk persamaan linier atau garis lurus diberikan pada persamaan (2)

$$Y' = a + bX \quad (2)$$

dimana:

Y' = Nilai variabel dependen

X = Nilai variabel independen dalam analisis tren (waktu)

a = Intercept Y, yakni nilai Y apabila $X = 0$

b = Lereng garis tren persamaan ini menunjukkan garis lurus atau linier.

Data konsumsi energi listrik setiap sektor mulai tahun 2010 sampai tahun 2020 dianalisis regresi linear berdasarkan metode diatas menggunakan software *Microsoft Excel*. Dimana dari 2010 hingga 2020 didapatkan data ganjil, sehingga hasil Analisa regresi linier data konsumsi energi listrik persektor diperlihatkan masing-masing dalam bentuk matematis dengan Y' adalah kebutuhan energi listrik (GWh) yang uraian sebagai berikut.

a. Sektor Rumah Tangga

$$Y' = 2973.12 + 233.48X \quad (3)$$

b. Sektor Industri

$$Y' = 932.93 + 64.12X \quad (4)$$

c. Sektor Bisnis

$$Y' = 1140.05 + 65.99X \quad (5)$$

d. Sektor Sosial

$$Y' = 214.99 + 23.08X \quad (6)$$

e. Sektor Kantor Pemerintah

$$Y' = 162.67 + 12.67X \quad (7)$$

f. Sektor Penerangan Jalan Umum

$$Y' = 143.55 + 3.65X \quad (8)$$

Setelah mendapatkan prakiraan kebutuhan energi listrik mulai dari tahun 2021 hingga 2030, maka dapat pula

ditentukan beban puncak tanpa rugi-rugi (*peak load NL*) setiap tahun yaitu:

$$PeakLoadNL = \frac{Demand (GWh) \times 1000}{8760 (hours) \times LoadFactor (\%)} \quad (9)$$

Pada penelitian ini kita akan asumsikan nilai *load factor* adalah sama, yaitu rata-rata dari *load factor* dari tahun 2010 hingga tahun 2020 yaitu 0.57 atau 57% sehingga dengan telah didapatkannya prakiraan konsumsi energi listrik 2021-2030, beban puncaknya dapat diketahui dengan persamaan matematis diatas. Kebutuhan energi listrik pada tabel dibawah ini hanya digunakan untuk mendapatkan nilai beban puncak dengan asumsi faktor beban diatas sedangkan pada saat software disimulasikan beban puncak hasil perhitungan ini akan menjadi input dan dengan factor beban yang didapatkan dari kurva durasi beban subbagsel tahun 2020 untuk mendapatkan karakteristik beban yang sedikit actual.

TABEL I. DATA BEBAN LISTRIK

Tahun	Kebutuhan Energi (GWh)	Load Factor (%)	Beban Puncak (MW)
2010	3505.51	0.62	649.02
2011	3839.03	0.67	657.80
2012	4345.66	0.57	866.96
2013	4985.72	0.70	810.71
2014	5247.94	0.67	890.53
2015	5441.75	0.48	1286.58
2016	6031.53	0.50	1374.66
2017	6336.09	0.28	2562.20
2018	6729.51	0.61	1255.20
2019	7312.75	0.59	1411.20
2020	7464.97	0.61	1391.18
2021	7815.71	0.57	1565.27
2022	8218.69	0.57	1645.98
2023	8621.68	0.57	1726.68
2024	9024.66	0.57	1807.39
2025	9427.64	0.57	1888.10
2026	9830.62	0.57	1968.80
2027	10233.61	0.57	2049.51
2028	10636.59	0.57	2130.21
2029	11039.57	0.57	2210.92
2030	11442.55	0.57	2291.63

B. Simulasi Keandalan dengan Perencanaan RUPTL PLN

Pada simulasi diasumsikan *reserve margin minimum* berada pada 30 % dan maksimum 80% sesuai dengan RUPTL PLN dimana untuk wilayah Indonesia timur itu diteratpkan *reserve margin* diatas 30%. Dari simulasi kita akan melihat keandalan dari sistem itu sendiri berdasarkan indeks keandalan LOLP yang akan dihitung oleh WASP-IV. Karakteristik beban sesuai kurva lama beban tahun 2020 untuk sistem Sulawesi bagian selatan diasumsikan sama selama periode tahun studi.

Kajian kecukupan daya bertujuan untuk melihat kemampuan pembangkit untuk melayani permintaan beban. Kajian ini akan ditentukan oleh indeks kegagalan pembangkit dalam melayani beban pada suatu sistem atau ketika kemungkinan terjadi kegagalan pada suatu pembangkit dan bagaimana besar cadangan yang ditetapkan dapat meminimalisir durasi gangguan yang tergambar dalam indeks LOLP. Dengan demikian bila cadangan tidak cukup menggantikan kapasitas unit pembangkit yang keluar maka

akan terjadi kekurangan pasokan daya. Keadaan ini dalam prakteknya ditanggulangi dengan melakukan pemadaman bergilir agar supaya terjadi keadilan bagi semua konsumen. Sistem dikatakan gagal apabila indeks LOLP yang terjadi sudah melampaui standar yang ditetapkan dimana pada sistem Sulawesi bagian selatan sudah ditetapkan standar sebesar 1 hari/ tahun. Untuk sistem yang kecil seperti perhitungan probabilitas kumulatif sangat mudah dilakukan dengan manual, karena sebagai contoh jika suatu sistem lima unit pembangkit maka mempunyai kombinasi sebesar $2^3=8$ kemungkinan. Untuk sistem yang besar seperti dalam kasus Sistem Sulawesi bagian selatan maka perhitungan dibutuhkan bantuan perangkat lunak dimana dalam menyelesaikan perhitungan LOLP ini dibantu dengan perangkat lunak WASP-IV.

Dengan memasukan data pembangkit dan pertumbuhan beban dan dilakukan kalkulasi dengan menggunakan software WASP-IV dihasilkan indeks keandalan sistem Sulawesi bagian selatan beserta besar *energy not served* (ENS).

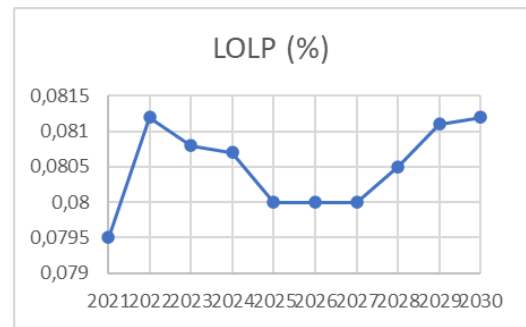
Setelah melewati modul *Loadsys*, *Fixsys*, *Varsys*, dan *Congen*, selanjutnya yaitu modul *Mersim*. Modul *Mersim* merupakan singkatan *Merge and Simulate*, dimana pada modul ini membutuhkan masukan yaitu output-output dari modul-modul sebelumnya setelah itu modul bisa dijalankan. Pada modul ini akan diatur mengenai loading order yang akan digunakan untuk menghitung LOLP, ENS, dan cost yang akan dihasilkan. Oleh karena itu dalam penelitian ini *loading order* yang digunakan yaitu *loading order by economic*, ini menandakan bahwa dalam melayani beban akan diutamakan pembangkit yang rendah harganya sebagai beban dasar untuk didapatkan hasil dengan cost minimal. Output dari modul *Mersim* ini yaitu LOLP, ENS, *Cost*, dan *energy* yang dihasilkan pembangkit.

TABEL II. HASIL PERKIRAAN

Tahun	Total Generation (GWh)	Energy Demand (GWh)	Unerved Energy (GWh)	Energy Balance (GWh)	LOLP (%)	LOLE (hari/tahun)	Cost (k\$)
2021	11825.1	11833.2	6.6	-1.6	0.0795	0.29	500102
2022	11680.2	11687.3	6.8	-0.5	0.0812	0.296	480388
2023	13044.1	13053.4	7.9	-1.3	0.0808	0.295	629427
2024	13654.6	13663.5	8.3	-0.7	0.0807	0.295	667509
2025	14263.7	14273.7	8.2	-1.4	0.08	0.292	699647
2026	14873.9	14883.8	8	-2.1	0.08	0.292	727096
2027	15483.8	15493.9	7.5	-2.6	0.08	0.292	753242
2028	16093.7	16104	6.9	-3.4	0.0805	0.294	779400
2029	16703.5	16714.1	6.5	-4	0.0811	0.296	805547
2030	17313.5	17324.3	6,1	-4.7	0.0812	0.296	831689

Dari Tabel 2 dapat dilihat perbandingan antara total energy yang dibangkitkan dengan energy yang dibutuhkan untuk dilayani. Keandalan sebuah sistem dapat dilihat dari keseimbangan yang dihasilkan antara energi yang dibutuhkan dengan energi yang dihasilkan. Selain seimbang, kondisi yang dapat terjadi yaitu energi yang dibutuhkan lebih besar daripada energi yang dihasilkan, kondisi itu akan menyebabkan sebesar selisih dari energi tersebut tidak dapat dilayani oleh energi yang dihasilkan sehingga akan terjadi pemutusan dari beban dari sistem akibat tidak dapat dilayani energi. Selanjutnya untuk kondisi energi yang dihasilkan lebih besar daripada energi yang dibutuhkan, maka tidak

akan terjadi pelepasan beban dari sistem akibat tidak dapat terlayani dalam hal ini sistem dinyatakan andal, tetapi bila jarak yang dihasilkan antara energy yang dihasilkan dan dibutuhkan itu sangat besar akan dibutuhkan cost yang sangat besar dan energy yang tidak digunakan akan terbuang sia-sia. Oleh karena itu selain memperhatikan LOLP, dalam perencanaan perluasan sistem tenaga listrik mesti dipertimbangkan *reserve margin*, sebagai alternatif apabila dalam suatu sistem terdapat pengeluaran paksa ataupun terjadwal dari pembangkit, sehingga sistem selalu dapat andal dengan kondisi apapun dan dengan cost seminimal mungkin.



Gambar 5. Grafik LOLP simulasi 1

Pada Gambar 5, memperlihatkan indeks keandalan LOLP pada sistem sulbagsel dari tahun 2021 hingga tahun 2030, dimana nilainya berada pada range 0.0794 % – 0.0814 %. Dengan hasil nilai indeks keandalan LOLP ini dapat dipastikan sistem sulbagsel untuk 10 tahun kedepan akan dalam kondisi yang andal.

C. Simulasi Keandalan dengan Perencanaan memperhatikan kebijakan tentang PLTU

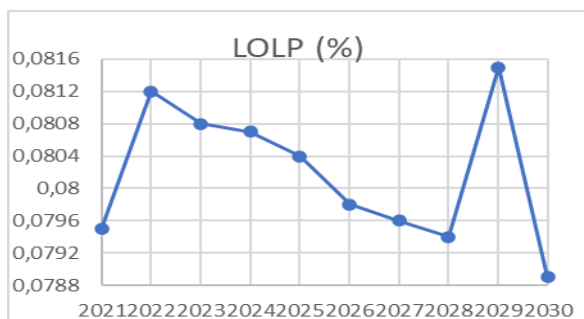
Selain opsi perencanaan pada RUPTL, saat ini sedang di wacanakan mengenai PLTU yang dipensiunkan. Hal ini dapat dilihat dari kabar berita dari pihak Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral terkait selagi PLTU memiliki emisi karbon yang tinggi dan bahan bakar primer berupa batubara semakin menipis. Kebijakan ini pada nantinya tinggal menunggu peraturan sebagai legalitasnya. Selain itu dalam Konferensi Tingkat Tinggi COP26 yang membahas mengenai iklim dunia pada tanggal 31 Oktober hingga 12 November 2021. Hampir 200 negara setuju untuk mengadopsi Pakta Iklim Glasgow. Terdapat beberapa point yang menjadi hasil KTT COP26 itu yaitu target bahan bakar fosil, pembayarab kepada negara rentan, aturan untuk pasar karbon global, dan kesepatan sela. Salah satu point yaitu pada target bahan bakar fosil batubara yang awalnya untuk dihapuskan, tetapi hasil akhir dan menjadi kesepakatan yaitu untuk menghentikan secara bertahap. Hal ini dikarenakan hampir semua negara penggunaan bahan bakar batubara pada pembangkit diseluruh dunia masih menjadi pembangkit mayoritas yang menghasilkan listrik untuk negaranya masing-masing. Selain itu juga melalui kementerian ESDM, pemerintah berencana menghentikan operasi PLTU mulai tahun 2025. Total besar daya pembangkit tersedia sulbagsel dengan bahan bakar batubara mencapai 984 MW. Potensi energi air untuk daerah sulbagsel yang mencakupi Sulawesi selatam, barat,

tenggara, dan Sebagian tengah yaitu 6,1 GW. Potensi energi bayu yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga listrik diperkirakan sekitar 400 MW tersebar. Potensi energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan sebesar 85 MW. Dari potensi yang ada, dapat dilihat energi air sangat besar peluangnya untuk menggantikan keberadaan energi batubara. Oleh karena itu untuk opsi berikut akan dilakukan scenario dengan menerapkan segala kebijakan berikut dengan menyiapkan kandidat pembangkit berbahan bakar air, angin dan panas bumi. Untuk selanjutnya dengan scenario berikut pada sistem sulbagsel akan didapatkan nilai indeks keandalan LOLP.

Untuk opsi skenario menindaklanjuti hasil perjanjian negara-negara mengenai pemberhentian batubara secara perlahan dan pernyataan dari pemerintah melalui kementerian ESDM yang akan mulai memberhentikan operasi pembangkitan PLTU mulai dari tahun 2025. Untuk skenarionya, akan dilakukan pemberhentian PLTU dan digantikan dengan kandidat pembangkit *renewable* sesuai dengan potensi yang ada. Pada scenario ini, PLTU yang total daya mencangkup lebih dari 984 MW akan diberhentikan beberapa unit pada setiap tahunnya sehingga untuk tahun 2026-2029 akan membuat PLTA tersebar sebesar 780 MW. Diasumsikan pula untuk PLTU yang masuk perencanaan pada RUPTL akan tetap dilanjutkan, tetapi untuk proyek PLTU setelah tahun 2025 ditiadakan. Adapun untuk PLTU yang baru dibangun akan digunakan hingga memasuki waktu untuk diberhentikan secara natural dengan cara tidak melakukan *maintenance* berkepanjangan dan kedepannya juga akan digantikan dengan pembangkit-pembangkit berbahan bakar energi terbarukan.

TABEL III. HASIL PERKIRAAN

Tahun	Total Generation (GWh)	Energy Demand (GWh)	Unserviced Energy (GWh)	Energy Balance (GWh)	LOLP (%)	LOLE (hari/tahun)	Cost (k\$)
2021	11825.1	11833.2	6.6	-1.6	0.0795	0.29	500102
2022	11680.2	11687.3	6.8	-0.5	0.0812	0.296	480388
2023	13044.1	13053.4	7.9	-1.3	0.0808	0.295	629427
2024	13654.6	13663.5	8.3	-0.7	0.0807	0.295	667509
2025	14263.6	14273.7	8.1	-2	0.0804	0.293	696207
2026	14873.9	14883.8	6.6	-4	0.0798	0.291	632738
2027	15482.7	15493.9	5.1	-6.1	0.0796	0.291	565056
2028	16092.6	16104	3.2	-8.1	0.0794	0.29	511035
2029	16703.8	16714.1	1.3	-9	0.0815	0.297	456799
2030	17313	17324.3	0.9	-10.4	0.0789	0.288	479416



Gambar 6. Grafik LOLP simulasi 2

Pada Gambar 6 diperlihatkan indeks keandalan LOLP pada sistem sulbagsel dari tahun 2021 hingga tahun 2030, dimana nilainya berada pada range 0.0788 % – 0.0816 %.

Dengan hasil nilai indeks keandalan LOLP ini dapat dipastikan sistem sulbagsel untuk 10 tahun kedepan akan dalam kondisi yang andal.

Dari Gambar 5 dan Gambar 6, nilai LOLP pada opsi 2 setelah PLTA masuk menggantikan PLTU pada tahun 2025 hingga tahun 2030 nilai LOLP semakin turun. Sedangkan semakin kecil nilai indeks LOLP maka semakin andal pula sistem itu sendiri, sehingga untuk melihat potensi yang ada pada wilayah sulbagsel yang besar dengan energi tenaga air, maka peralihan bahan bakar batubara ke energi terbarukan akan berjalan lancar dan tetap menjamin keandalan dari sistem itu sendiri.

V. KESIMPULAN

Sistem sulbagsel memiliki kondisi yang andal pada tahun 2021 dengan nilai indeks LOLP 0.0795 %.Keandalan sistem Sulbagsel selama 2021-2030 dalam kondisi andal untuk opsi perencanaan pembangkit sesuai RUPTL dan opsi perencanaan pemberhentian bertahap PLTU.Rata-rata nilai indeks keandalan LOLP sistem sulbagsel selama 2021-2030 untuk opsi perencanaan pembangkit sesuai RUPTL dan opsi perencanaan pembangkit dengan pemberhentian bertahap PLTU adalah 0.0805 % dan 0.08018 %.

REFERENSI

- [1] Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. Indonesia, Jakarta, 2021.
- [2] Chowdhury, A.A. and Koval, D.O, "Power Distribution Sistem Reliability Practical Methods and Applications", IEEE, Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2009.
- [3] E. Yawantoro, B. Supradono, and A. Solichan. "Analisa Keandalan Sistem Tenaga Listrik Jawa Tengah dan DIY Periode Tahun 2009-2011". Media Elektro., vol. 5, 2012.
- [4] Medjoudj, R., Bediaf, H., & Aissani, D, "Power Sistem Reliability: Mathematical Models and Applications". Sistem Reliability., 2017.
- [5] Uppal, S.L, Electrical Power. New Delhi, India: Khanna Publisher, 1980.
- [6] Yudo Satrio, B, "Study of Interconnected Power Generating Planning in Kalimantan Electricity Sistem for Master Plan Up to 2050", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [7] Auliya, N. "Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Jawa Bali Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban (LOLP) dan Besar Energi Tidak Terlayani (ENS)", Universitas Indonesia, Jakarta, 2017.
- [8] Marsudi, D, Operasi Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2006.
- [9] A. N. Widiastuti, S. Sarjiya, K. A. Pinanditho, and E. T. Prastyo. "Evaluasi Keandalan Perencanaan Pembangkit Wilayah Jawa-Bali dengan Mempertimbangkan Ketidakpastian Peramalan Beban," J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf., vol. 6, no. 2, pp. 230-234, 2017.
- [10] H. T. Spears, Kenneth L. Hicks, Senior Member, IEEE And Stephen T. Y. LEE. "Probability of Loss of Load for Three Areas", IEEE Transactions on Power Apparatus and Sitem, VOL. PAS-89, NO. 4, April 1970.
- [11] E. G. Prasetyo, Sulasno, and S. Handoko, "Studi Tentang Indeks Keandalan Pembangkit Tenaga Listrik WILAYAH JAWA TENGAH DAN DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA," Univ. Diponegoro, no. august, 2011.
- [12] Prada, José Fernando, "The Value of Reliability in Power Sitem ". Massachusetts Institute of Technology: July, 1999.
- [13] Fauziah, L., Devianto, D., & Maiyastri, M, "Peramalan Beban Listrik Jangka Menengah Di Wilayah Teluk Kuantan Dengan Metode Fuzzy Time Series Cheng". Jurnal Matematika UNAND, 2019.
- [14] Wien Automatic Sistem Planning Package (WASP): A computer code for power generating sitem expansion planning: Version WASP-IV,

user's manual. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, Division of Nuclear Power and Reactors, 2001.

- [15] Arif S. Malik, and Cornelius Kuba. "Power generation expansion planning including large scale wind integration: a case study of Oman". Journal of wind energy: Hindawi Publishing Corporation, 2013.
- [16] Fauziah, "Analisis Keandalan Sistem Tenaga Listrik Sulselrabar Dengan Integrasi PLTB". Universitas Hasanuddin, Makassar, 2020.
- [17] Bayu Aji, Rinthon, "Perencanaan Sistem Kelistrikan Kalimantan Dengan Prinsip Regional Balance Tahun 2018-2027". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [18] Boedijoewono Noegroho, Pengantar Statistika Ekonomi dan Bisnis. Yogyakarta: STIM YKPN, 2007.