

SKRIPSI
ANALISIS KEANDALAN OPERASI SISTEM PEMBANGKITAN
SULAWESI BAGIAN SELATAN BERDASARKAN
INDEKS PROBABILITAS KEHILANGAN BEBAN

Disusun dan diajukan oleh:

FANANDI NOOR ILMI
D041 17 1306



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**ANALISIS KEANDALAN OPERASI SISTEM PEMBANGKITAN
SULAWESI BAGIAN SELATAN BERDASARKAN
INDEKS PROBABILITAS KEHILANGAN BEBAN**

Disusun dan diajukan oleh:

FANANDI NOOR ILMI

D041 17 1306

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 24 Januari 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T.
NIP. 19601106 198601 2 001



Ir. Muh. Bachtiar Nappu, ST., MT., M.Phil., Ph.D
NIP. 19760406 200312 1 002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fanandi Noor Ilmi

NIM : D041171306

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

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

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 02 February 2022

Yang Menyatakan

Tanda tangan



(Fanandi Noor Ilmi)

ABSTRAK

Fanandi Noor Ilmi, Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban (dibimbing oleh Sri Mawar Said dan M. Bachtiar Nappu).

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

ABSTRACT

Fanandi Noor Ilmi, Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban (dibimbing oleh Sri Mawar Said dan M. Bachtiar Nappu).

Electrical energy is a very influential energy for human life. Along with the development of the times and the human population, the need for electricity will increase. Southern Sulawesi as the most prominent area in eastern Indonesia has experienced an increase in electricity demand in recent years. Based on PLN's RUPTL for 2021-2030, electricity demand growth has increased by an average of 6.8% per year. With the increasing demand for electricity, it is necessary to expand power generation in order to increase electricity capacity so as not to cause disruption to consumers due to forced blackouts. Generation planning according to PLN's RUPTL will be analyzed according to the peak load obtained from energy demand forecasts carried out by the least squares linear regression method of historical energy demand data per sector using Microsoft Excel. The results of the electricity demand forecast get a peak load value for 2021 of 1565.27 MW and for 2030 of 2291.63 MW. To determine the value of the LOLP reliability index, WASP-IV software was used. The reliability index of the South Sulawesi LOLP system during 2021-2030 experiences ups and downs and is in the range of 0.0794% - 0.0814% which is still in the reliable category according to PLN standards of 0.274% or 1 day/year.

Keywords : Reliability, southern Sulawesi's system, demand forecast, WASP-IV

KATA PENGANTAR

Puji syukur tak henti-hentinya penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT sebab atas berkat, rahmat, serta atas seijin-Nyalah sehingga penulis dapat diberi kesempatan untuk menyelesaikan penyusunan tugas akhir dengan judul **“Analisis Keandalan Operasi Sistem Pembangkitan Sulawesi Bagian Selatan Berdasarkan Indeks Probabilitas Kehilangan Beban”**. Shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW pemimpin dan sebaik-baik teladan di muka bumi ini yang membawa manusia dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh hidayah seperti saat ini.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, baik dari awal hingga akhir penyusunan tugas akhir ini penulis menghadapi berbagai macam suka duka, hambatan dan tantangan. Namun penulis dapat melalui semuanya hingga bisa sampai ke titik ini dengan bantuan tulus dan ikhlas dari pihak-pihak yang sangat berharga dalam hidup penulis.

Ucapan terima kasih paling tulus penulis ucapkan kepada kedua orangtua yang sangat penulis sayangi, Bapak Hasrin, S.Pd. M.Pd., dan Mama Salwiah S.Pd., yang tidak henti-hentinya mendukung penulis, mendoakan kelancaran penyusunan tugas akhir ini dan mendoakan keselamatan penulis, memberikan kasih sayang yang tak pernah terputus kepada penulis, yang tidak pernah menuntut penulis untuk cepat selesai, yang selalu memahami penulis dan selalu siap mendengar keluh kesah penulis kapanpun dan dimanapun. Ucapan terima kasih juga penulis ucapkan kepada ketiga saudara dan saudari penulis, Faradila Ilmi Aulia, S.Ked., Muhammad Farhan Ilmi, dan Aluna Almaira Ilmi yang walaupun selalu cerewet menanyakan kapan tugas akhir penulis selesai namun tetap mendukung penulis, menghibur penulis ketika sedang kehilangan semangat dengan cara mereka masing-masing, dan tak henti memotivasi penulis. Terima kasih atas segala bantuan yang telah kalian berikan kepada penulis.

Selesainya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T, selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak M. Bachtiar Nappu, M.T. M.Phil. Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bimbingan, meluangkan waktu di tengah kesibukannya selama penulis melaksanakan penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T., dan Bapak Ir. H. Gassing, M.T., selaku dosen penguji yang senantiasa memberikan segala pendapat baik berupa kritik maupun saran yang bersifat membangun kepada penulis terhadap penelitian yang dilakukan.
4. Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas ilmu, arahan, dan motivasi yang diberikan kepada penulis selama menempuh bangku kuliah.
5. Seluruh staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuannya terutama kepada staf S1 Teknik Elektro, Ibu Salmiah, Ibu Risma, dan pak Aris selalu penulis repotkan dalam hal pengurusan surat-surat.
6. Pak Budi selaku Laboran Laboratorium Mesin – Mesin Listrik yang selalu menyemangati selama melakukan aktivitas dan pengolahan data berlangsung di laoratorium.
7. Aulia Rizqi, S.T yang selalu mengingatkan bagaimana perkembangan tugas akhir kapanpun dan dimanapun, selalu menjadi *moodbooster* disaat menghadapi naik turunnya *mood* penulis selama penyusunan tugas akhir ini, yang tidak pernah mengeluh menemani penulis kemanapun dan jam berapapun, yang selalu mendengar apapun yang penulis katakan, dan memberikan bantuan yang tak terhitung selama hidup penulis. Terima kasih karena selalu ada dan sangat berpengaruh untuk penulis.
8. Keluarga Cemara yang memberikan dukungan dan semangat kepada penulis walaupun kita sudah memiliki kesibukan masing-masing. Terima kasih karena masih peduli kepada penulis.

9. Keluarga Konan yang selalu mengisi hari-hari penulis selama melalui seluruh dinamika kehidupan yang terjadi selama mengarungi dunia perkuliahan.
10. Teman-teman Lab Riset Mesin - Mesin Listrik 2017 yang telah berjuang bersama-sama di semester ini.
11. Saudara dan saudari EQUAL17ER Teknik Elektro 2017 yang membantu dan mengikutsertakan penulis menjadi bagian dari kisah-kisah hebat kalian. Yang memberikan arti pantang menyerah dan selalu berusaha untuk capai semua mimpi dengan terus melangkah.
12. Keluarga besar HME FT-UH dan OKFT-UH, yang telah menjadikan tempat ternyaman untuk mengembangkan diri selama menempuh pendidikan di kampus merah hitam.
13. Kanda, saudara, dan adinda di keluarga besar Laboratorium Teknik Energi Departemen Elektro yang senantiasa membimbing dan membantu untuk berkembang dan menjadikan laboratorium sebagai tempat penulis dalam belajar lebih dalam mengenai dunia keelektroan dan tidak lupa pula arti persaudaraan.
14. Keluarga, rekan, sahabat, dan berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
15. Ucapan terima kasih terakhir ingin penulis sampaikan kepada diri penulis sendiri. Terima kasih karena sudah kuat berjuang sampai di titik ini, terima kasih karena tidak menyerah, terima kasih karena sudah bertahan walaupun tidak mudah, terima kasih sudah mau untuk terus melangkah walaupun segala rintangan menghadang.

Thanks to me and I'm very proud of what I have done but the journey is not over, so I will fight for my path and keep moving forward.

Penulis menyadari dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan, baik dalam metode penulisan maupun dalam pembahasan materi. Sehingga penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun, mudah-mudahan di kemudian hari dapat diperbaiki segala kekurangannya.

Semoga tugas akhir ini dapat berguna bagi kalangan yang membutuhkan dan memberikan manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan dan lingkungan.

Gowa, 13 Januari 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GRAFIK	xiii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metodologi Penelitian	3
1.6. Manfaat Penelitian.....	3
1.7. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Konsep Umum Keandalan.....	5
2.2. Sistem Pembangkitan Listrik.....	6
2.3. Keandalan Pembangkit.....	7
2.4. Kurva Beban	13
2.5. LOLP (<i>Loss of Load Probability</i>).....	16
2.6. ENS (<i>Energy not Served</i>)	17
2.7. Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan	18
2.7.1. Kondisi Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan	18
2.7.2. Skema Perencanaan Pembangkit Sulawesi Bagian Selatan	21
2.8. WASP-IV (<i>Wien Automatic Sistem Planning IV</i>).....	24

2.9. Penelitian Terkait	32
BAB III	34
METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian.....	34
3.2. Instrumen Penelitian.....	34
3.3. Teknik Pengumpulan Data	34
3.4. Prosedur Penelitian.....	35
3.5. Diagram Alir Penelitian.....	41
3.6. Algoritma Penelitian	42
BAB IV.....	44
HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1. Data dan Parameter	44
4.2. Hasil Simulasi dan Analisa.....	47
BAB V.....	57
KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Hirarki Keandalan Sistem Kelistrikan	8
Gambar 2. Kurva Beban Harian	13
Gambar 3. Beban dasar, beban menengah, dan beban puncak dalam kurva beban	14
Gambar 4. Kurva beban dalam bentuk histogram	14
Gambar 5. Kurva durasi beban dalam histogram	15
Gambar 6. Kurva durasi beban terinvers	15
Gambar 7. Kurva energi yang terganggu karena capacity outage.....	18
Gambar 8. Peta Sistem Tenaga Listrik Sulawesi	19
Gambar 9. Load Duration Curve sistem Sulbagsel 2020.....	22
Gambar 10. Tampilan Modul WASP-IV.....	25
Gambar 11. Common Case Data.....	26
Gambar 13. Modul Fixsys WASP-IV	27
Gambar 12. Modul Loadsys WASP-IV.....	27
Gambar 14. Modul Varsys WASP-IV	28
Gambar 15. Modul Congen WASP-IV	28
Gambar 16. Modul Mersim WASP-IV	29
Gambar 17. Modul Dynpro WASP-IV.....	29
Gambar 18. Diagram Alir Penelitian.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Pembangkit Eksisting Sulawesi Bagian Selatan	20
Tabel 2. Rencana Pembangkit RUPTL 2021-2030	23
Tabel 3. Data Historis Konsumsi Energi	36
Tabel 4. Prakiraan Kebutuhan Energi Listrik	38
Tabel 5. Prakiraan Beban Puncak.....	39
Tabel 6. FOR Pembangkit Eksisting	44
Tabel 7. Nilai kalor bahan bakar pembangkit.....	45
Tabel 8. Average Incremental Heat rate	46
Tabel 9. Hasil Modul Loadsy	47
Tabel 10. Kapasitas Sistem	51
Tabel 11. Hasil Simulasi WASP-IV Opsi 1	52
Tabel 12. Hasil Simulasi WASP-IV Opsi 2	55

DAFTAR GRAFIK

Grafik 1. Beban Puncak dan Beban Minimum	48
Grafik 2. Energy Demand	49
Grafik 3. Generation vs Demand.....	53
Grafik 4. Loss of Load Probability opsi 1	53
Grafik 5. Energy Not Served.....	54
Grafik 6. Loss of Load Probability opsi 2	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

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. Dalam menganalisis keandalan untuk beberapa tahun kedepan, terlebih dahulu dicari beban puncak disetiap 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.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana keandalan sistem subbagseI yang tersedia (*existing*) berdasarkan nilai LOLP?
2. Bagaimana keandalan sistem subbagseI seiring dengan kondisi konsumsi energi listrik selama periode studi?
3. Bagaimana perubahan nilai LOLP pada sistem subbagseI selama periode studi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui keandalan sistem pembangkitan subbagseI saat ini berdasarkan nilai LOLP.
2. Mengetahui keandalan sistem subbagseI seiring dengan kondisi konsumsi energi listrik selama periode studi.
3. Mengetahui perubahan nilai LOLP pada sistem subbagseI selama periode studi.

1.4. Batasan Masalah

Masalah yang akan menjadi pembahasan difokuskan dan dibatasi sebagai berikut:

1. Sistem yang digunakan yaitu sistem SulbagseI (Sulawesi bagian selatan).
2. Perhitungan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak WASP-IV untuk mendapatkan nilai LOLP dan ENS.
3. Periode studi dari penelitian ini yaitu dibatasi selama 10 tahun kedepan, 2021 hingga 2030.
4. Berfokus pada sistem pembangkitan, diasumsikan transmisi andal.

1.5. Metodologi Penelitian

Dalam melakukan penulisan untuk mendapatkan hasil yang tepat maka metode yang dilakukan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Kajian yang dilakukan oleh penulis atas referensi-referensi yang ada, baik berupa buku, artikel, maupun sumber lain yang berhubungan dengan penelitian.

2. Pengumpulan data

Melakukan pengumpulan data yang berhubungan mengenai keandalan sistem kelistrikan khususnya sistem pembangkitan untuk sistem sulbagsel.

3. Komputasi

Mendapatkan nilai indeks keandalan LOLP dan ENS dengan menggunakan Software WASP-IV.

4. Analisa hasil komputasi

Dari data yang didapat dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan sebelumnya jika didapatkan nilai tidak sesuai dengan standar yang ditentukan maka dilakukan analisa serta perubahan pola agar hasil yang didapatkan sesuai dengan standar.

5. Penarikan kesimpulan

Membuat kesimpulan dari hasil analisa data yang telah dilakukan dengan melihat korelasi antara hasil analisa dan permasalahan yang diteliti.

1.6. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini adalah:

1. Sebagai referensi bagi pihak PLN dalam hal evaluasi perencanaan sistem pembangkit di Sulawesi bagian selatan yang dapat digunakan dalam menyusun RUPTL PLN selanjutnya.

2. Sebagai referensi ilmiah bagi mahasiswa lainnya mengenai topik keandalan sistem pembangkit.

3. Bagi penulis sendiri merupakan pengalaman dan pembelajaran khususnya mengenai keandalan pembangkit dan perencanaan energi.

1.7. Sistematika Penulisan

Tugas akhir disusun dengan mengikuti sistematika penulisan yang diuraikan sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang uraian secara singkat tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang, konsep umum keandalan, sistem pembangkitan, beban listrik, indeks keandalan sistem pembangkitan dan penjelasan tentang kondisi sistem kelistrikan sistem sulbagsel *eksisting* saat ini yang meliputi data beban, pembangkit dan perencanaan sistem untuk tahun 2021-2030 sesuai RUPTL, serta WASP-IV yang digunakan sebagai program untuk perencanaan sistem kelistrikan sulbagsel dengan keluaran data yang akan dilihat nilai indeks keandalan LOLP yang sesuai dengan standar PLN.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, instrument yang digunakan, metode yang digunakan, prosedur penelitian, diagram alir penelitian, dan algoritma penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan dibahas mengenai hasil dan analisa mengenai keandalan sistem sulbagsel berdasarkan nilai indeks LOLP yang dihasilkan.

BAB 5 PENUTUP

Pada bab penutup berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran membangun mengenai topik penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. 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.

1. Probabilitas

Probabilitas adalah suatu ukuran yang dapat dinyatakan secara angka dengan nilai 0 dan 1 atau antara 0 hingga 100%.

2. Bekerja sesuai dengan fungsinya

Faktor yang menandakan perlunya diadakan kriteria-kriteria tertentu untuk menyatakan peralatan atau sistem beroperasi secara memuaskan.

3. Periode waktu

Faktor yang menyatakan ukuran dari periode waktu yang digunakan dalam pengukuran probabilitas.

4. Kondisi operasi

Faktor yang menyatakan pada kondisi operasi yang dilakukan untuk mendapatkan angka keandalan.

2.2. 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]:

- 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 faktor kapasitas antara (0% s/d 20%). Yang termasuk dalam unit pemikul beban puncak adalah PLTG, PLTD, dan PLTA.

2.3. 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

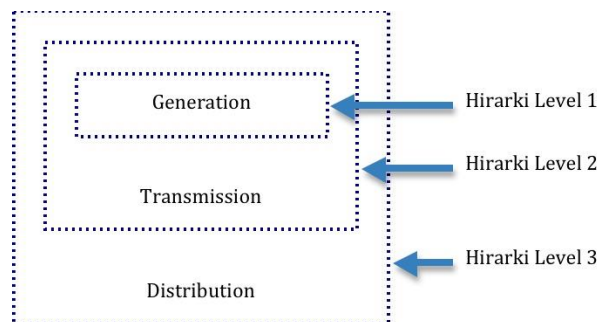
Gangguan paksa adalah gangguan yang disebabkan oleh kondisi darurat yang berhubungan langsung dengan komponen atau sistem atau peralatan yang mengakibatkan komponen atau sistem atau peralatan harus dipisahkan dari sistem oleh suatu sistem proteksi secara otomatis atau manual.

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.

Untuk memudahkan didalam analisa, keandalan sistem tenaga listrik dibagi kedalam tiga level hirarki seperti pada Gambar 1. Untuk hirarki level I yaitu bagian dari keandalan pembangkit. Pada hirarki ini akan didapatkan indeks keandalan pembangkit, yang nantinya akan dianalisa dengan suatu metode tertentu sehingga akan didapatkan nilai dari indeks keandalan pembangkitan yang terkoneksi pada sistem tersebut. Setelah mengetahui indeks keandalan pembangkit, pada hirarki level II akan mengetahui nilai dari indeks keandalan transmisi dengan memperhitungkan pengaruh dari hirarki level I. Indeks keandalan pembangkit, transmisi belum cukup mewakili untuk sistem kelistrikan yang dinamakan handal. Hal ini disebabkan pada sistem kelistrikan ada bagian yang berfungsi untuk mendistribusikan daya listrik kepada konsumen. Akibat adanya sistem distribusi listrik, pada hirarki level III akan dibahas indeks keandalan dari ketiga komponen tersebut. Sehingga kepuasan dan permintaan daya listrik dari konsumen merupakan tujuan dari hirarki ini. Pada penelitian ini akan dijelaskan hanya hirarki level I yaitu keandalan pada pembangkitan.



Gambar 1. Hirarki Keandalan Sistem Kelistrikan

Permintaan daya dan energi listrik adalah dasar dari perhitungan yang dipakai untuk pengembangan sistem tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga listrik terdiri dari beberapa jenis pembangkit dengan beberapa parameter, sebagai berikut:

1. Jumlah unit;
2. Jenis dan kapasitas pembangkit tenaga listrik;
3. Keandalan dari unit pembangkit tenaga listrik;
4. Pemakaian bahan bakar dari pembangkit tenaga listrik, dimana untuk pembangkit thermal dilihat dari besar heat rate pembangkit;
5. Biaya investasi dari unit pembangkit tenaga listrik.

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].

1. 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.

2. 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.

3. 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*).

4. 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.

5. 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].

Adapun yang dimaksud dengan status unit pembangkit adalah status operasi suatu unit pembangkit dalam pengoperasian suatu sistem pembangkit. Berikut merupakan macam-macam status pembangkit[11]:

1. Durasi Siap (*Available Hours, AH*) Merupakan jumlah durasi suatu unit dalam keadaan siap dioperasikan dalam periode operasinya.
2. Durasi Operasi (*Service Hours, SH*) Jumlah durasi unit pembangkit beroperasi yang tersambung ke jaringan transmisi, baik pada kondisi normal maupun kondisi pengurangan kapasitas unit (derating)
3. Durasi Periode Operasi (*Periode Hours, PH*) Jumlah durasi total dari semua status operasi unit.
4. Total Durasi Operasi (*Total Operating Hours, TOH*) Jumlah durasi dimana setiap unit siap beroperasi dengan kapasitas pembangkitan secara penuh.

5. Durasi Keluar Paksa Sebagian (*Forced Partial Outage Hours*, FPOH) Jumlah durasi pelepasan yang disebabkan oleh kegagalan (gangguan) peralatan atau kondisi keluar paksa yang mengharuskan pembebanan pada unit pembangkit diturunkan.
6. Durasi Keluar Terencana Sebagian (*Schedule Partial Outage Hours*, SPOH) Jumlah durasi pelepasan yang disebabkan oleh kegagalan peralatan atau kondisi yang terencana dan mengharuskan pembebanan unit pembangkitan diturunkan.
7. Jumlah Durasi Keluar Ekonomis (*Total Economy Outage Hours*, TEOH) Jumlah durasi suatu unit dikeluarkan dari operasi karena alasan ekonomis penggunaan pembangkit.
8. Durasi Keluar Paksa (*Forced Outage Hours*, FOH) Jumlah durasi suatu unit yang mengalami gangguan paksa. Gangguan paksa disebabkan oleh gangguan peralatan yang diharuskan lepas dari sistem.
9. Durasi Keluar Pemeliharaan (*Maintenance Outage Hours*, MOH) Jumlah durasi pelepasan unit dari sistem untuk melakukan pekerjaan pemeliharaan.
10. Durasi Keluar Terencana (*Planned Outage Hours*, POH) Jumlah durasi pelepasan unit dari sistem untuk melakukan pemeriksaan atau turun mesin sebagian besar peralatan utama.
11. Daya Mampu Netto (DMN) Kapasitas maksimum unit pembangkit yang beroperasi terus menerus dalam keadaan stabil dan aman setelah dikurangi kapasitas pemakaian sendiri.

Daya tersedia dalam sistem tenaga listrik haruslah cukup untuk melayani kebutuhan tenaga listrik dari para pelanggan. Daya tersedia tergantung kepada daya terpasang unit-unit pembangkit dalam sistem dan juga tergantung kepada kesiapan operasi unit-unit tersebut. Keandalan operasi sistem sesungguhnya tidak semata-mata tergantung kepada cadangan daya tersedia dalam sistem tetapi juga kepada besar kecilnya Forced Outage Hours per tahun dari unit-unit pembangkit yang beroperasi. Keandalan operasi sistem akan semakin tinggi apabila daya tersedia dalam sistem makin terjamin.

Keandalan sistem akan makin tinggi apabila daya tersedia dalam sistem makin terjamin. Tingkat jaminan tersedianya dalam sistem tergantung kepada [8]:

1. Besarnya cadangan daya tersedia
2. Besarnya *Forced Outage Rate* (FOR) unit pembangkit dalam satu tahun.

Dalam sistem tenaga listrik yang memiliki berbagai jenis unit pembangkit, nilai FOR dari masing-masing unit pembangkit sangat mempengaruhi tingkat keandalan daya yang tersedia. Ketersediaan daya dirumuskan sebagai berikut :

$$Ketersediaan = 1 - FOR \quad (1)$$

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].

Secara kualitatif hal ini perlu ditelaah lebih mendalam karena kualitas unit pembangkit yang menyediakan cadangan daya yang tersedia ini, yaitu apakah unit pembangkitnya sering mengalami gangguan atau tidak, merupakan faktor utama dalam menentukan kualitas cadangan daya tersedia. *Force outage rate* (FOR) adalah ukuran sering tidaknya unit pembangkit mengalami gangguan. FOR secara matematis dapat ditentukan dengan persamaan 2 berikut :

$$FOR = \frac{\text{jumlah h jam unit terganggu}}{\text{jumlah h jam unit beroperasi} + \text{jumlah h jam unit terganggu}} \times 100\% \quad (2)$$

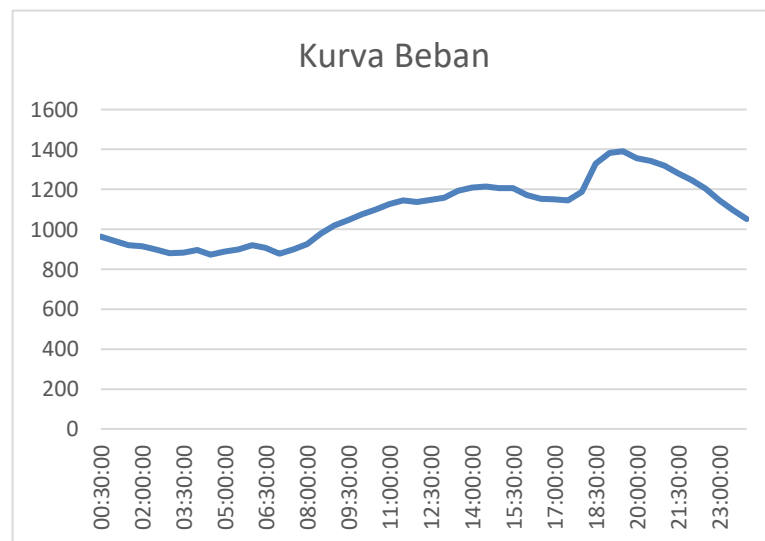
dengan demikian maka besarnya cadangan daya yang tersedia yang bisa diandalkan tergantung juga kepada FOR dari unit-unit pembangkit jadi juga tingkat jaminan operasi sistem tergantung kepada FOR unit-unit pembangkit.

Apabila sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa pusat pembangkit listrik yang terdiri dari beberapa unit pembangkit maka tingkat jaminan tersedianya daya dalam sistem tergantung kepada komposisi unit-unit pembangkit yang ada dalam

sistem, tergantung pada FOR dari unit-unit pembangkit yang ada dalam sistem. Cadangan daya yang tersedia dan besar kecilnya nilai *Forced Outage Rate* (FOR) unit-unit pembangkit yang beroperasi dalam selang waktu satu tahun sangat mempengaruhi keandalan sistem pembangkit. Semakin kecil nilai FOR semakin menjamin ketersediaan cadangan daya sistem, hal ini berarti keandalan sistem akan semakin tinggi.

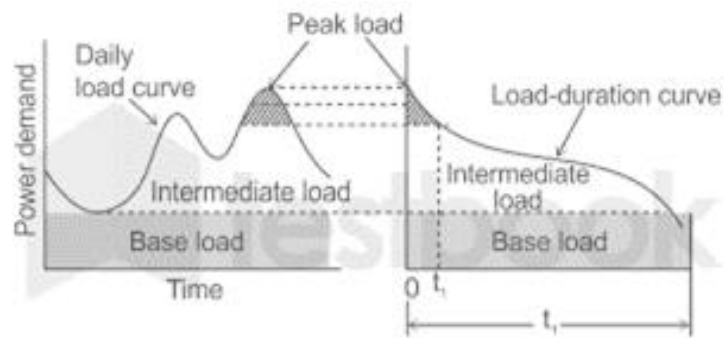
2.4. Kurva Beban

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 menunjukkan 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]. Gambar 2 berikut merupakan salah contoh dari kurva beban.



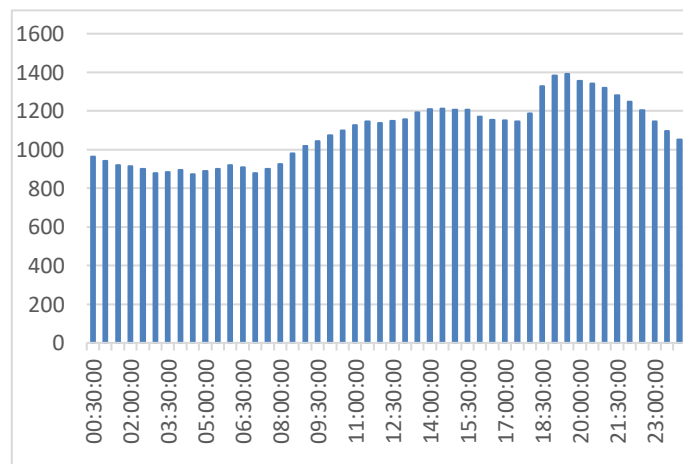
Gambar 2. Kurva Beban Harian

Pada gambar 2 terlihat dari kurva beban harian dari sebuah sistem secara menyeluruh. Pada kurva beban terdapat istilah yang digunakan yaitu beban dasar, beban menengah, dan beban puncak yang dapat dilihat pada gambar 3, ini menggambarkan besaran daya pada waktu tertentu dimana beban puncak didefinisikan sebagai beban terbesar yang terjadi selama durasi kurva beban. Beban puncak biasanya dijadikan acuan untuk menentukan besar dari kapasitas pembangkit.



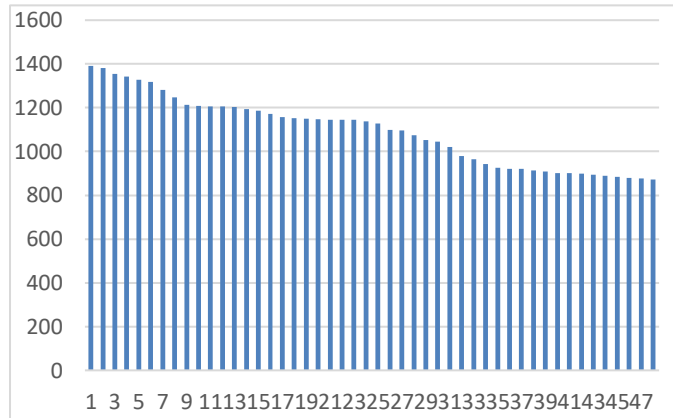
Gambar 3. Beban dasar, beban menengah, dan beban puncak dalam kurva beban

Kurva beban yang tergambar pada gambar 2 dirubah dalam bentuk histogram seperti gambar 4 seperti gambar berikut.



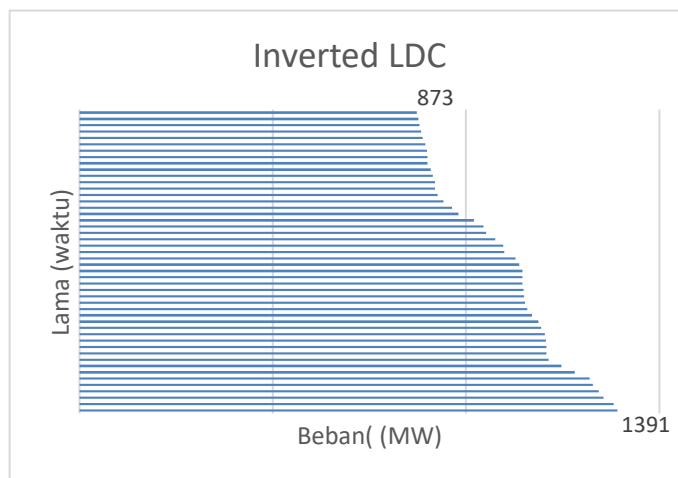
Gambar 4. Kurva beban dalam bentuk histogram

Selanjutnya untuk membentuk *Load Duration Curve* maka kurva beban dalam bentuk histogram diurutkan menurut besarnya beban, dari yang terbesar hingga yang terkecil sehingga berbentuk seperti pada gambar 5 berikut.



Gambar 5. Kurva durasi beban dalam histogram

Setelah gambar 5 terbentuk, dilakukan invers diagram pada gambar sehingga diperoleh suatu bentuk invers dari *load duration curve* atau kurva durasi beban. Invers kurva durasi beban adalah memodifikasi dengan membalik koordinat dari fungsi tersebut dengan merubah posisi sumbu x sebagai fungsi waktu dan sumbu y fungsi beban menjadi sumbu x sebagai fungsi beban dan sumbu y adalah fungsi waktu seperti gambar 6 [7].



Gambar 6. Kurva durasi beban terinvers

Dari gambar 6 diatas dapat diamati bahwa beban dasar yang dibutuhkan dalam pengoperasian tanpa berhenti sebesar 873 MW dan beban sisanya yaitu kebutuhan beban puncak yang mencapai 1391 MW. Dengan terbentuknya *Inverted Load Duration Curve* ini dapat memudahkan dalam hal memetakan urutan pembangkit yang akan menyuplai dari beban dasar hingga beban puncak.

2.5. 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.

LOLP biasa dinyatakan dalam angka persen, dan LOLE merupakan konversi angka nilai LOLP dalam hari pertahun. Makin kecil nilai LOLP berarti garis daya tersedia harus makin kecil kemungkinannya memotong garis kurva lama beban, ini berarti bahwa daya terpasang harus makin tinggi serta juga FOR juga harus makin kecil dengan perkataan lain diperlukan investasi yang lebih besar dan juga kualitas unit pembangkit yang lebih baik.

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 berikut[8]:

$$LOLP = \sum_{t=1}^{t=365} p \times t \quad (3)$$

dengan:

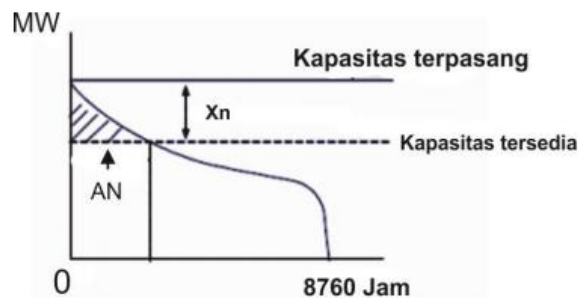
- t adalah waktu mulai 1 hari sampai dengan 365 hari (1 tahun)
- p adalah probabilitas atau kemungkinan terjadinya kumulatif kapasitas sistem lebih kecil dari beban (*Capacity < Load*)

Usaha untuk memperkecil nilai LOLP yang berarti mempertinggi keandalan, dapat dilakukan dengan melakukan investasi pada pembangkit. Tindakan lain yang selalu harus dilakukan adalah memelihara unit-unit pembangkit yang ada agar dapat angka FORnya tidak melampaui angka-angka standar.

2.6. 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 energi not served* (EENS) karena ketidaktersediaan *installed capacity* [11]. Berikut

merupakan gambar 7 yang menunjukkan besar energi yang terganggu dilihat dari kurva durasi beban.



Gambar 7. Kurva energi yang terganggu karena *capacity outage*

Dari Gambar 7 Luas daerah yang diarsir (AN) merupakan besarnya energi yang tak dapat terpenuhi oleh sistem pembangkitan yang disebabkan terjadinya gangguan sebesar X_n . Jika probabilitas kapasitas gangguan sebesar X_n dinyatakan dengan P_n , maka hasil kali AN dan P_n adalah probabilitas kehilangan energi yang disebabkan oleh kapasitas gangguan sebesar X_n . Hal tersebut dapat dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$ENS(X_n) = A_n \times p_n \quad (4)$$

keterangan:

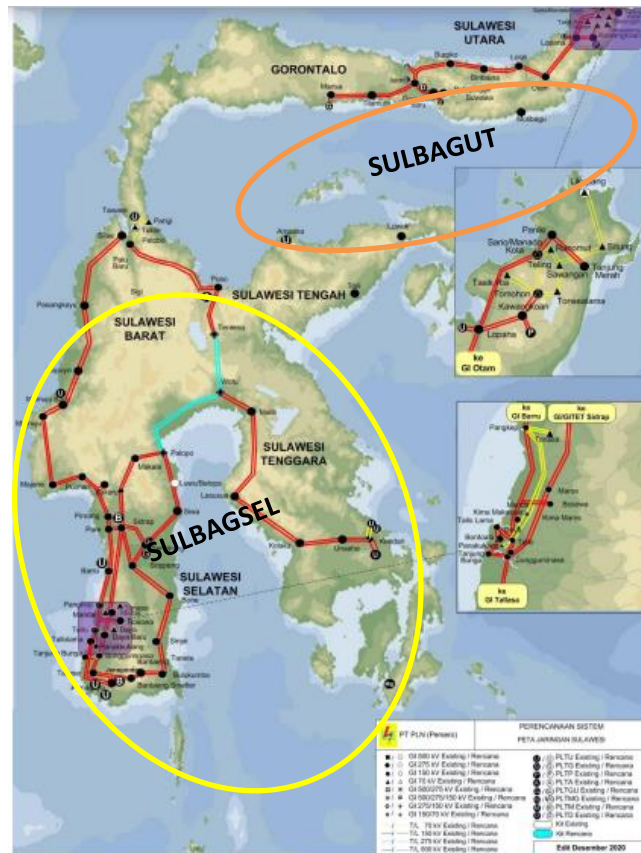
- ENS adalah *Energy Not Served*
- AN adalah luas daerah yang diarsir
- P_n adalah probabilitas kehilangan energi akibat gangguan sebesar X_n .

2.7. Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan

2.7.1. Kondisi Sistem Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan

Sistem kelistrikan di pulau Sulawesi terbagi menjadi 2 area besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 8 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 8. 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 Sulbagesel. Daya mampu PLTA dan PLTB sangat dipengaruhi oleh musim sehingga di sistem Sulbagesel 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*.

Komposisi jenis pembangkit tersedia dan beban sistem Sulawesi bagian selatan dapat dilihat dalam tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Pembangkit Eksisting Sulawesi Bagian Selatan

No	PEMBANGKIT	Bahan Bakar	Unit	DMN/unit (MW)	Total DMN	TML/Unit (MW)	TML
1	PLTU Barru	COAL	2	50	100	20	40
2	PLTG Tello	HSD	2	33.4	66.8	8	16
3	PLTD Tello	MFO	4	12.4	49.6	6	24
4	PLTU Punagaya	COAL	2	100	200	60	120
5	PLTU Nii Tanasa	COAL	3	10	30	6	18
6	PLTMG Nii Tanasa	HSD	6	9.78	58.68	6	36
7	PLTD Silae	HSD	1	24.2	24.2	0.45	0.45
8	PLTD Wuawua	HSD	1	14.1	14.1	1	1
9	PLTD Poasia	HSD	1	9.6	9.6	1	1
10	PLTD Lambuya	HSD	1	3.15	3.15	1	1
11	PLTD Lanipani	HSD	1	4.99	4.99	1	1
12	PLTG Skang 1	GAS	2	42.5	85	7.5	15
13	PLTGU Skang 1	GAS	1	50	50	18	18
14	PLTG Skang 2	GAS	2	60	120	15	30
15	PLTGU Skang 2	GAS	1	60	60	15	15
15	PLTU Jeneponto	COAL	2	100	200	56	112
16	PLTU Jeneponto Expnsi	COAL	2	125	250	56.5	113
17	PLTU Mamuju	COAL	2	25	50	12.5	25
18	PLTD Suppa	MFO	1	62.5	62.5	8	8
19	PLTU Moramo	COAL	2	50	100	30	60
20	PLTB Sidrap	WIND	30	2.5	75	0	0
21	PLTU Tawaeli	COAL	2	27	54	0	0
22	PLTB Tolo	WIND	20	3.6	72	0	0

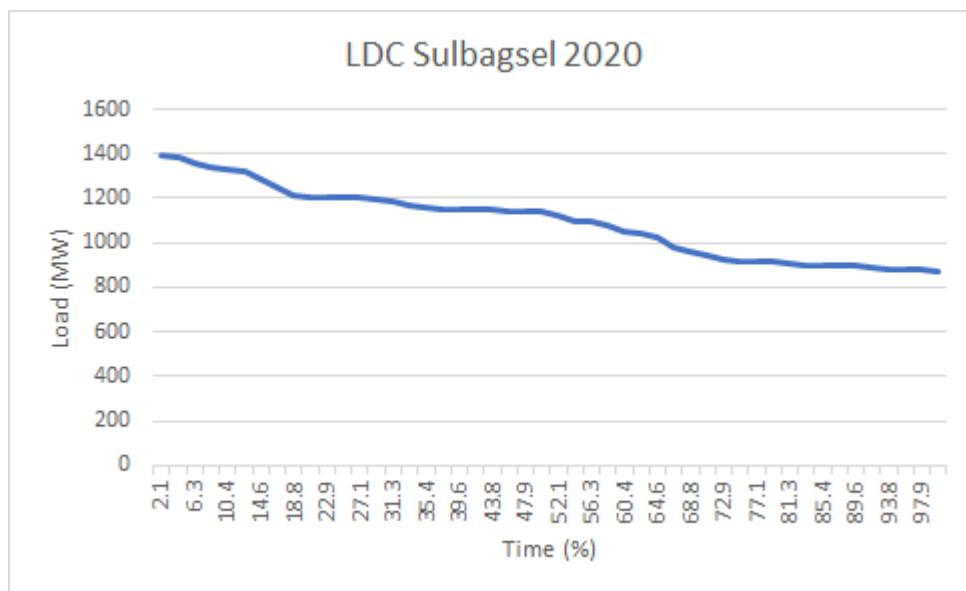
23	PLTA Bakaru	HIDRO	1	126	126	54	54
24	PLTA Poso1	HIDRO	1	120	120	60	60
25	PLTA Poso2	HIDRO	1	195	195	78	78
26	PLTA Small	HIDRO	1	36.165	36.165	21.465	21.465
27	PLTM Tersebar	HIDRO	1	46.24	46.24	15.58	15.58
Total					2263.03		883.5

2.7.2. Skema Perencanaan Pembangkit Sulawesi Bagian Selatan

Rencana perencanaan disusun berdasarkan ketentuan :

1. Periode perencanaan pengembangan pembangkit adalah 10 tahun dimulai dari tahun 2021 hingga 2030. Unit *eksisting* yang sudah direncanakan untuk dihapuskan karena sudah tidak ekonomis atau sudah terdapat pembangkit baru dimasukkan dalam skema perencanaan.
2. Rencana penambahan tetap atau penambahan-penambahan unit pembangkit yang saat ini sedang dalam tahap konstruksi dan PPA diyakini akan selesai tepat waktu sesuai dengan RUPTL 2021-2030.
3. Data pembangkit *eksisting*, rencana penambahan tetap, beban puncak sistem serta prakiraan pertumbuhan listrik di sistem Sulbagsel diambil dari RUPTL 2021-2030.
4. Batasan indeks keandalan LOLP direncanakan mengacu pada standar PLN yaitu dibawah 0,273% atau LOLE sebesar 1 hari/tahun.
5. Data-data pendukung lainnya yang tidak didapatkan pada PT.PLN yang berhubungan dengan karakteristik pembangkit diambil dari data *typical* pada *Technology Data for the Indonesian Power Sector Catalogue for Generation and Storage of Electricity February 2021*.

Karakteristik penggunaan beban di sistem Sulbagsel dimodelkan menjadi sebuah kurva LDC yang digunakan untuk mengetahui keandalan dan energi yang harus disediakan sistem seperti pada gambar 9 dibawah ini.



Gambar 9. Load Duration Curve sistem Sulbagsel 2020

Karakteristik beban untuk 10 tahun kedepan diasumsikan tidak berbeda jauh dari tahun awal studi sehingga LDC yang digunakan setiap tahun adalah sama hanya nilai beban puncak dan beban dasarnya saja yang berbeda. LDC menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan rencana penambahan pembangkit karena akan sangat berpengaruh pada operasi dan karakteristik pembangkit yang berbeda-beda. Rencana penambahan pembangkit dijelaskan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Rencana Pembangkit RUPTL 2021-2030

No	Pembangkit	Jenis	Unit	Kapasitas (MW)	Total Kapasitas (MW)	Target
1	Luwuk	PLTMG	1	40	40	2021
2	Barru 2	PLTU	1	100	100	2021
3	MPP Sulselbar	PLTMG	2	60	120	2022
4	Sulbagsel	PLTU	2	200	400	2023-2024
5	Makassar (Relokasi)	PLTG/GU	1	200	200	2023
6	Palu 3	PLTU	2	50	100	2023
7	Tersebar	PLTB	1	60	60	2024
9	Poso Peaker	PLTA	1	200	200	2021
10	Malea	PLTA	1	90	90	2021
11	Small 2	PLTA/M	1	99.4	99.4	2021
12	Bakaru 2	PLTA	1	140	140	2025
13	Small 3	PLTM	1	44.2	44.2	2026
14	Poko	PLTA	1	124.5	124.5	2026
15	Butu batu	PLTA	1	200	200	2027
16	Tersebar	PLTA	1	600	600	2028-2030

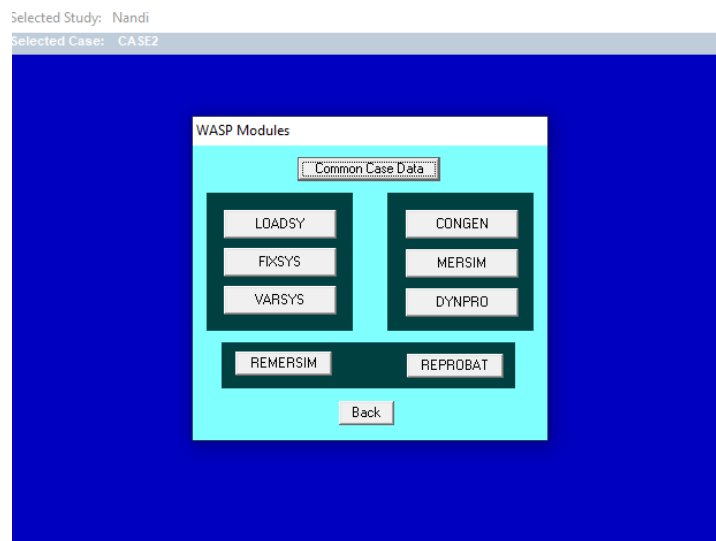
Selain rencana penambahan kapasitas dalam tabel 2 juga akan ada pemberhentian pembangkitan yaitu PLTGU Sengkang tahun 2023 dan PLTG Tello 2025. Potensi cadangan tenaga hidro yang cukup berlimpah di wilayah sulbagsel menyebabkan opsi penambahan pembangkit masih di dominasi pembangkit tenaga hidro. Tetapi tidak langsung saja tidak terdapat pembangkit thermal yang cukup memiliki kapasitas yang besar per unitnya di sistem sulbagsel. Sehingga pada perencanaan RUPTL ini selagi senantiasa untuk menambah kapasitas pembangkit *thermal* juga mulai meningkatkan bahan bakar yang *renewable* untuk sektor pembangkitan energi listrik. Selain opsi perencanaan pada RUPTL, saat ini sedang di wacanakan mengenai PLTU yang dipensiunkan. Hal ini dapat dilihat dari kabar berita dari pihak Kementrian 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 system sulbagsel akan didapatkan nilai indeks keandalan LOLP.

2.8. WASP-IV (*Wien Automatic Sistem Planning IV*)

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. Gambar 10 dibawah memperlihatkan tampilan awal dari modul WASP-IV.



Gambar 10. Tampilan Modul WASP-IV

WASP-IV membutuhkan data dasar sebelum memodelkan studi perencanaan. Data-data dasar yang harus dimasukkan antara lain, tahun awal dan akhir studi, jumlah periode beban dalam 1 tahun, serta kondisi dan probabilitas air dalam satu tahun. Data dasar ini akan diinput dalam *common case data* WASP-IV sesuai dengan gambar 11 berikut.

Selected Study: Nandi
Selected Case: CASE2

Common Case Data

First Year of the Study

Last Year of the Study
(Max. number of years, including first and last years, is 30)

Number of Periods in each Year
(Max. number of periods is 12)

Number of Hydro Conditions
(Max. number of hydro conditions is 5)

Probabilities of Hydro Conditions

<input type="text" value="1.0000"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
-------------------------------------	----------------------	----------------------	----------------------

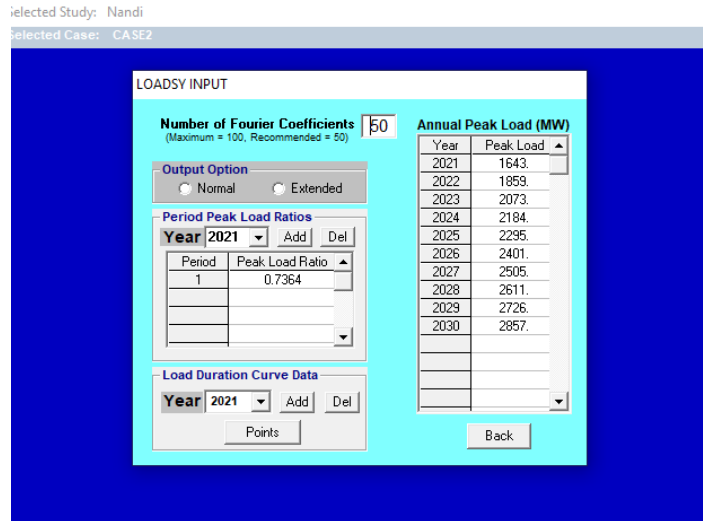
(Sum of probabilities must be 1.0)

Back

Gambar 11. Common Case Data

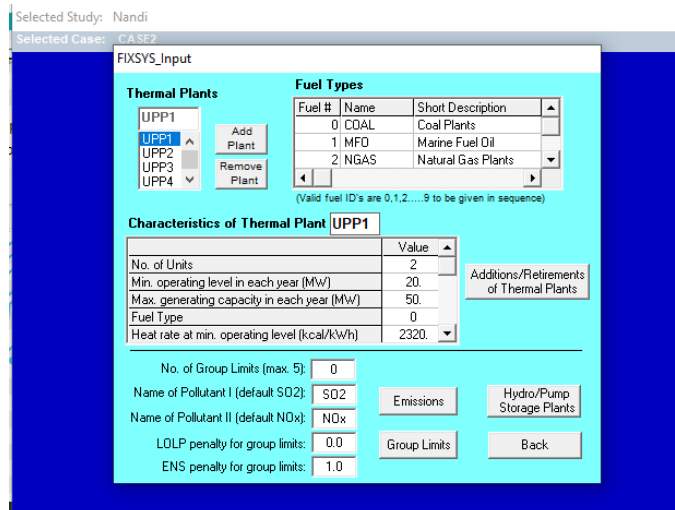
WASP-IV terdiri dari 6 modul utama yang memiliki fungsi yang berbeda-beda dalam memodelkan perencanaan.

- a. *Loadsys (Load Sistem)* adalah modul yang digunakan untuk memodelkan beban, seperti prakiraan beban puncak selama masa studi, rasio beban tiap periode dan karakteristik beban yang dimodelkan dalam LDC. Gambar 12 merupakan gambar tampilan dari Loadsys.



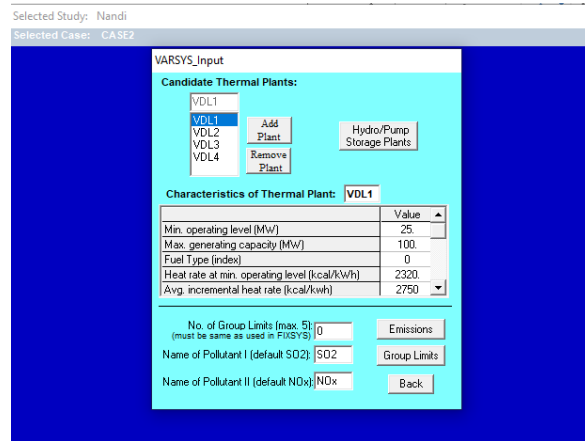
Gambar 13. Modul Loadsys WASP-IV

- b. *Fixsys (Fixed Sistem)* adalah modul kedua dalam software WASP-IV. Modul ini berfungsi untuk memberikan informasi tentang kondisi pembangkitan listrik di wilayah perencanaan selama tahun studi. Kondisi yang diinfokan yaitu total daya mampu per-tahun yang disesuaikan dengan kondisi hydro yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain itu, juga memberikan informasi berupa biaya pembangkitan untuk setiap jenis pembangkit. Untuk mendapatkan informasi tersebut, maka dibutuhkan data masukan berupa jenis dan jumlah unit pembangkit yang ada pada wilayah tersebut, serta beberapa parameter teknis yang dimiliki oleh setiap pembangkit. Tampilan dari modul ini akan diperlihatkan pada gambar 13.



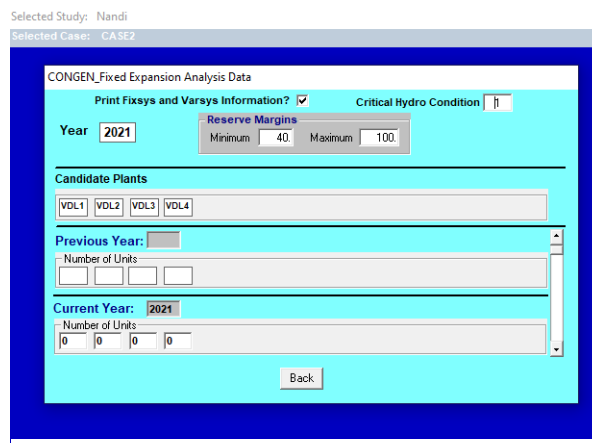
Gambar 12. Modul Fixsys WASP-IV

- c. *Varsys (Variable Sistem)* adalah modul yang digunakan untuk memasukkan kandidat pembangkit-pembangkit rencana yang akan dioptimisasi. Gambar 14 berikut adalah tampilan dari modul Varsys.



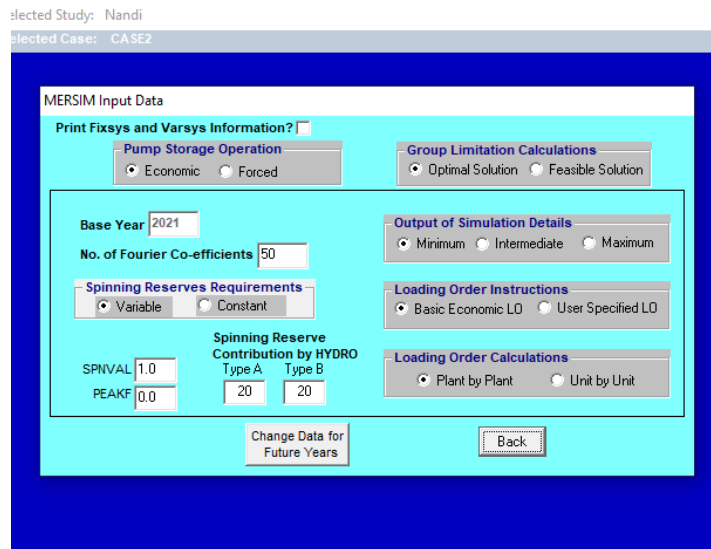
Gambar 14. Modul Varsys WASP-IV

- d. *Congen (Configurasi Generator)* modul yang digunakan untuk menghitung semua kemungkinan kombinasi pembangkit-pembangkit yang direncanakan pertahun dengan reserve margin yang telah ditentukan. Tampilan dari modul diperlihatkan pada gambar 15.



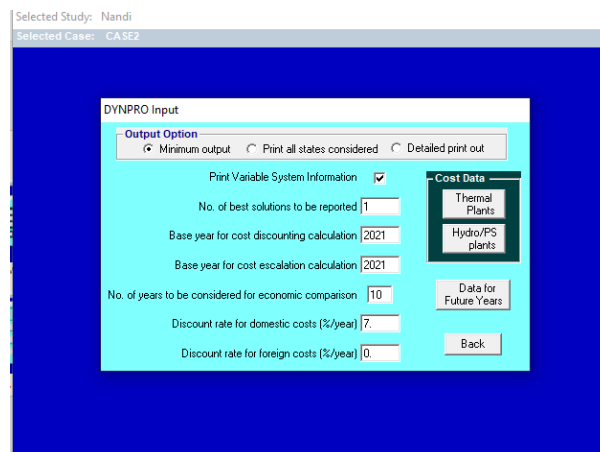
Gambar 15. Modul Congen WASP-IV

- e. *Mersim (Merge and Simulate)* adalah modul yang digunakan menghitung nilai-nilai biaya produksi, ENS dan keandalan sistem dalam LOLP dalam setiap kombinasi pembangkit yang telah ditetapkan oleh modul CONGEN. Gambar 16 berikut adalah tampilan dari modul Congen.



Gambar 16. Modul Mersim WASP-IV

- f. *Dynpro (Dynamic Programming Optimization)*, modul yang digunakan untuk menentukan pengembangan perencanaan yang paling optimum sesuai dengan perhitungan yang telah diturunkan sebelumnya dengan informasi masukan seperti biaya modal, biaya ENS, parameter ekonomi dan kriteria keandalan system. Gambar 17 adalah tampilan modul ini.



Gambar 17. Modul Dynpro WASP-IV

Setelah seluruh modul di jalankan dan semua skema perencanaan di pilih maka dapat ditentukan skenario perencanaan yang paling optimum. Hasil perencanaan yang paling optimum dapat dilihat pada modul Reprbat (*Report Writer of WASP in Batched Environment*). Pada penelitian ini hanya akan menggunakan sampai pada modul MERSIM, dimana akan melihat keandalan sistem berdasarkan kombinasi pembangkit yang telah ditetapkan oleh modul CONGEN.

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].

1. 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.
2. PLTB dimodelkan sebagai beban *negatife*. 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*.
3. PLTB dapat diturunkan sesuai dengan kapasitas kredit dan dimodelkan sebagai pembangkit thermal dengan nol biaya bahan bakar dan tingkat FOR sekitar 4% dapat ditugaskan.

4. 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. Di dalam sistem nyata juga karena kredit kapasitas yang buruk dikaitkan untuk energi angin banyak pasokan cadangan harus disediakan.

Alur kerja dari WASP-IV dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memasukkan data permintaan beban, pembangkit eksisting, dan kandidat pembangkit pada modul *loadsys*, *fixsys*, dan *varsys*. *Output* dari modul tersebut akan menjadi input untuk proses yang akan dilakukan oleh modul *congen* dan *merism*.
2. Setelah menyelesaikan tiga modul awal. Selanjutnya dilakukan konfigurasi kombinasi pembangkit dengan ketentuan : $\text{minimum reserve margin} < \text{daya mampu} < \text{maximum reserve margin}$. Pembatasan dilakukan untuk menentukan kapasitas pembangkit yang masuk. Sehingga kandidat pembangkit hanya dikonfigurasi pada batas ketentuan tersebut.
3. Selanjutnya menjalankan modul *mersim* untuk melihat nilai LOLP dan biaya operasional pertahun. Nilai LOLP dapat dibatasi sesuai dengan standar PLN ($\text{LOLP} < 0.274\%$). Apabila nilai LOLP masih lebih besar dari standar yang telah ditetapkan, maka Kembali ke modul *congen* untuk mengatur Kembali konfigurasi kandidat pembangkit pada sistem.
4. Selanjutnya hasil simulasi akan diperlihatkan berupa konfigurasi pembangkit selama masa studi dari sistem dengan keandalan sistem berdasarkan LOLP yang sesuai standar.

2.9. Penelitian Terkait

Penelitian yang berkaitan dengan keandalan LOLP biasanya berkaitan dengan rencana perluasan kapasitas pembangkit. Berikut beberapa penelitian dengan topik perluasan pembangkit dengan keandalan LOLP:

1. Analisis keandalan operasi sistem pembangkitan Jawa Bali berdasarkan indeks probabilitas kehilangan beban (LOLP) dan besar energi tidak terlayani (ENS), merupakan tesis dari Naufal Auliya pada tahun 2017, dimana fokus dari tesis ini adalah menganalisis keandalan dari sistem dengan dua skenario yang berbeda besar penambahan kapasitas pembangkitnya untuk mendapatkan opsi yang optimal. Tesis ini juga dilakukan menggunakan software WASP-IV untuk mengetahui nilai LOLP.
2. Studi perencanaan pembangkit terinterkoneksi di sistem kelistrikan Kalimantan untuk Master Plan sampai dengan tahun 2050, merupakan tugas akhir dari Bories Yudo Satrio pada tahun 2018. Tugas akhir ini yaitu tentang perencanaan pembangkit di wilayah Kalimantan. Prinsip dalam merencanakan pembangkit listrik adalah mendapatkan nilai total biaya penyediaan listrik termurah (least cost) dan memenuhi kriteria keandalan tertentu yang dapat dicapai apabila menggunakan sistem kelistrikan yang saling berinterkoneksi. Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Kalimantan dengan memanfaatkan potensi energi yang ada, maka akan dilakukan studi tentang perencanaan pembangkit terinterkoneksi di sistem kelistrikan Kalimantan untuk master plan sampai dengan tahun 2050. Perencanaan ini akan didukung dengan simulasi menggunakan software WASP-IV untuk mendapatkan nilai keekonomian yang optimum dan keandalan sesuai dengan yang direncanakan. Dari hasil perencanaan, didapatkan total biaya penyediaan listrik termurah dan nilai indeks keandalan telah sesuai dengan standar PLN yaitu LOLP.
3. Perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan dengan prinsip regional balance tahun 2018-2027, merupakan tugas akhir dari Rinthon Bayu

Aji pada tahun 2018. Tesis ini hampir sama dengan penelitian nomor 2, tetapi dalam perencanaannya sistem yang digunakan tidak terinterkoneksi secara keseluruhan, tetapi memakai konsep terinterkoneksi per regional, sehingga pembangkit akan merata disemua wilayah sesuai dengan potensi yang ada. Tetapi tetap saja dengan mempertimbangkan harga yang optimal dan keandalan sesuai standar PLN. Dalam mendapatkan semua parameternya dibantu dengan software WASP-IV untuk mendapatkan hasil yang paling optimal.