

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut beberapa penelitian mengenai keandalan sistem tenaga listrik yang pernah dilakukan sebagai rujukan penulis guna mendukung penyusunan skripsi ini.

1. Gunawan Eko Prasetyo (2007) melakukan penelitian mengenai Studi Tentang Indeks Keandalan Pembangkit Tenaga Listrik Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa dengan pembangkit skenario P3B pusat Gandul, kemudian pembangkit Jawa Tengah dan DIY diputus dari interkoneksi Jawa Madura Bali dapat diketahui bahwa tingkat keandalan pembangkit LOLP pada tahun 2006 adalah 61,496 hari per tahun. Hal ini tidak sesuai dengan ketentuan standart PLN yang maksimal 3 hari per tahun.
2. Rina Apriani dan Rudyanto Thayib (2015) melakukan penelitian mengenai Perhitungan *Loss Of Load Probability* (Probabilitas Kehilangan Beban) Sistem Tenaga Listrik di PT. Pupuk Sriwidjaja berdasarkan penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa LOLP sistem tenaga listrik di PT. Pupuk Sriwidjaja (Pusri) pada saat itu 9 hari/tahun. Setelah Pusri-II LOLP sistem tenaga listrik menjadi 7.03 hari/tahun. Bila saat *gas turbine generator* dengan kapasitas 21.5 MW sedang dalam perawatan atau pemeliharaan, LOLP pada sistem tenaga listrik menjadi 63.8 hari/tahun. Bila saat *steam turbine generator* dengan kapasitas 20 MW sedang dalam perawatan atau pemeliharaan, LOLP pada sistem tenaga listrik menjadi 73 hari/tahun. Bila saat *gas turbine generator* dengan kapasitas 15 MW sedang dalam perawatan atau pemeliharaan, LOLP pada sistem tenaga listrik menjadi 41.85 hari/tahun.

Untuk mendapatkan indeks *Loss of Load Probability* maksimal 1 (satu) hari/tahun maka dua buah *steam turbine generator* Pusri-IIB harus diperbesar menjadi 30 MW.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH)

Pembangkit listrik tenaga hibrid (PLTH) merupakan salah satu sistem pembangkitan yang tepat untuk melayani daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh PLN/grid dan berdiri sendiri (*stand alone*). PLTH ini memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber energi utama dan Diesel-Generator Set sebagai sumber energi cadangan.

Pada PLTH, energi terbarukan yang dimanfaatkan berasal dari energi matahari, angin, dan lain lain yang diintegrasikan Diesel-Generator Set sehingga diharapkan dapat menjadi suatu pembangkit lebih efektif, efisien, dan handal untuk menyuplai dan memenuhi kebutuhan pelanggan akan energi listrik.

Dalam sistem seperti ini beban hanya berupa lampu untuk penerangan di malam hari. Di sisi lain energi sel surya hanya didapatkan pada siang hari sedangkan energi dari PLT Bayu bisa didapatkan di siang dan malam hari dengan waktu yang tidak menentu. Untuk mengatasi hal ini maka penggunaan batere sebagai penyimpanan energi merupakan solusinya. Energi dari sel surya dan dari PLT Bayu disimpan terlebih dahulu di dalam batere sebelum dikirim ke konsumen.

Pada sistem hibrid diperlukan sumber energi cadangan atau darurat karena kemungkinan terjadinya kekurangan energi jika hanya mengandalkan energi dari sel surya dan dari PLT Bayu. Kondisi pada saat mendung (cuaca berawan) atau hujan, energi dari sel surya hanya akan menghasilkan energi yang kecil, serta kemungkinan tidak adanya angin maka energi PLT Bayu tidak akan

menghasilkan energi. Dalam keadaan semacam ini bisa mengalami kekurangan energi sehingga diperlukan adanya sumber energi cadangan.



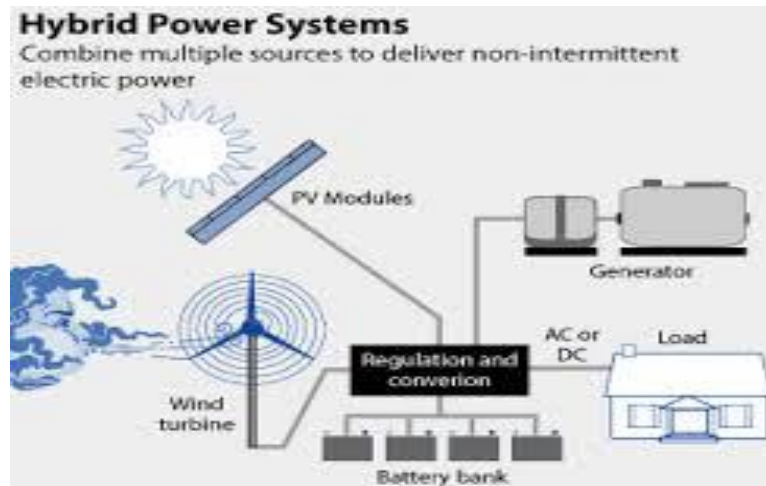
Gambar 2.1 Pendistribusian PLTH

(Sumber: Kantor Workshop PLTH Pantai Baru)

Pada gambar 2.1 diatas menggambarkan alur pendistribusian energi listrik oleh Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) dimana terdapat kincir angin dan *pv array* sebagai energi primer dari sistem pembangkitan guna memenuhi kebutuhan listrik seperti warung-warung kuliner, lampu PJU, tandon air pertanian, masjid, dan lain-lain.

2.2.2 Cara Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH)

Pada gambar 2.2 dibawah menunjukkan sistem tenaga hibrid yang terdiri dari kombinasi 2 (dua) sumber energi yaitu angin dengan bantuan turbin angin dan matahari dengan bantuan *pv modules* serta cadangan energi berupa generator. Cara kerja dari pembangkit listrik tenaga hibrid ini yaitu ketika angin bertiup, kincir-kincir turbin bergerak dan memutar rotor pada diesel-set generator yang kemudian menghasilkan energi/ arus listrik. Energi listrik ini selanjutnya disalurkan ke baterai untuk disimpan.



Gambar 2.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH)

(Sumber: www.wirabima.com/mengenal-lebih-dekat-pembangkit-tenaga-hybrid/)

Pemanfaatan energi matahari juga bekerja pada saat yang sama, panel surya akan menangkap sinar matahari dan diubah menjadi energi listrik. Di dalam panel surya terdapat sel photovoltaic yang terbuat dari dua buah lapis silikon. Pada saat terkena sinar matahari, maka lapisan silikon tersebut akan menghasilkan ion positif dan ion negatif, dan kemudian menghasilkan energi listrik.

Energi listrik yang dihasilkan oleh kincir angin dan sel surya berupa arus searah (DC), sedangkan peralatan-peralatan elektronik seperti televisi, kulkas, dan lain lain merupakan pengaplikasian dari penggunaan arus bolak-balik (AC). Maka, perlu penggunaan inverter untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC).

Untuk beban diatas 75% dari beban inverter tergantung pada *setting* parameter atau kondisi baterai kosong sampai level yang ditetapkan, diesel akan mulai beroperasi untuk menyuplai beban dan sebagian akan mengisi baterai sampai beban diesel mencapai 70% sampai 80% dari kapasitasnya tergantung *setting* parameter.

2.2.3 Proses Pembangkitan PLTH Pantai Baru Pandansimo

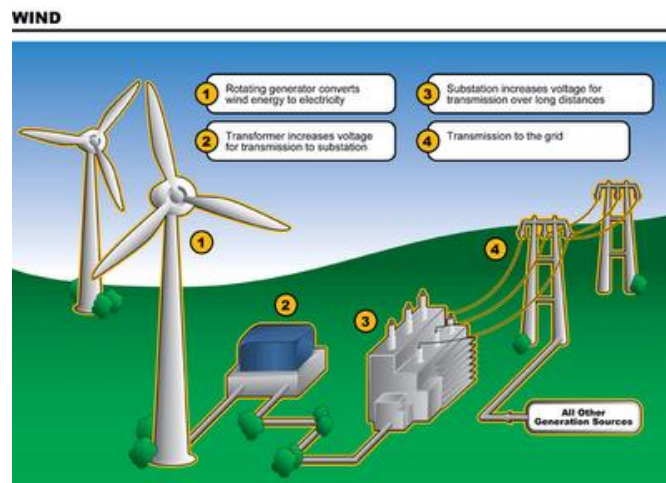
Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) Pantai Baru Pandansimo merupakan integrasi dari Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pada PLTB menggunakan kincir angin atau turbin angin putaran rendah, terlihat pada spesifikasi turbin angin yang memiliki rata-rata kapasitas daya sebesar 1 kW.

PLTH Pantai Baru Pandansimo terbagi menjadi 3 (tiga) grup pembangkit energi listrik yaitu grup barat, grup timur, dan grup KKP. Grup timur terdiri dari jenis pembangkitan sistem 48 V, 120 V, 240 V yang terdiri dari turbin angin dan panel surya dengan total kapasitas 44 kW. Pada grup barat terdiri dari sistem turbin angin 240 V dan panel surya sistem 120 V dengan total kapasitas 36 kW, dan pada grup KKP hanya terdiri dari panel surya sistem 48 V dengan total kapasitas 10 kW.

Kincir angin dan panel surya saling mendukung dalam memasok energi listrik. Jika panas terik dan kecepatan angin rendah, maka panel surya yang bertugas menyuplai energi listrik dan kemudian menyimpannya dalam baterai/accu. Begitu halnya jika cuaca hujan dan kecepatan anginnya kencang, maka kincir angin yang akan mengambil alih sebagai penyuplai energi.

2.2.3.1 Pembangkitan PLTB

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat memberikan kontribusi dalam memenuhi kebutuhan energi listrik khususnya daerah terpencil. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau Pembangkit Listrik Tenaga Angin dapat menjadi solusi untuk permasalahan lingkungan hidup dan ketersediaan sumber energi, dimana energi angin tersedia dimanapun dan bebas polusi.



Gambar 2.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

(Sumber: <https://edisuryanakun.files.wordpress.com/2014/06/proses-kerja-pltb.png>)

Pada gambar 2.3 di atas terlihat sistem pembangkit listrik tenaga bayu atau angin dimulai dari generator yang mengubah energi angin menjadi energi listrik sampai mentransmisikan energi listrik ke grid. PLT Bayu adalah pembangkit listrik yang mengkonversikan angin sebagai sumber energi menjadi energi listrik menggunakan turbin angin atau kincir angin.

Beberapa komponen yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga bayu atau angin, yaitu:

a. Turbin Angin

Berikut spesifikasi turbin angin yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Pantai Baru Pandansimo.



Gambar 2.4 Turbin Angin

(Sumber: Kantor Workshop PLTH Pantai Baru Pandansimo)

Salah satu contoh turbin angin yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) Pantai Baru Pandansimo terlihat pada gambar 2.4 yang termasuk jenis turbin angin *lattice*. Spesifikasi untuk turbin angin yang ada di PLTH Pantai Baru Pandansimo untuk semua jenis yaitu *lattice* dan *tri angle* dapat dilihat pada tabel 2.1 dibawah.

Tabel 2.1 Spesifikasi Turbin Angin

SPESIFIKASI ELEKTRIK	
Tipe Sistem	1 kW/240 V
Pmax	1 kW
Vmax	240 V
Kecepatan Angin <i>Cut In</i>	3,5 m/s < V angin < 25 m/s
Kecepatan Angin <i>Cut Off</i>	V angin < 3,5 m/s dan V angin < 25 m/s
Kecepatan Rotasi	375 rpm
Generator 3 Phasa	1500 Watt
Sifat Magnet Generator	Magnet Permanen
SPESIFIKASI FISIK	
Tinggi Menara	15 mm
Jumlah Sudu	3 buah
Panjang Sudu	1450 mm

Lanjutan Tabel 2.1 Spesifikasi Turbin Angin

SPESIFIKASI FISIK	
Berat Sudu	2,45 kg
Bahan Sudu	<i>Fiber Reinforced</i>
Pengarah Turbin	Plat Ekor

(Sumber: <https://id.scribd.com/doc/241215866/plth>)

b. Box Kontrol Turbin Angin

Fungsi box kontrol turbin angin adalah untuk mengatur kecepatan angin putaran pada kincir dan suplai tegangan dari turbin angin ke panel beban. Contoh box kontrol turbin angin yang digunakan di PLTH Pantai Baru Pandansimo terlihat pada gambar 2.5 dibawah.



Gambar 2.5 Box Kontrol Turbin Angin

(Sumber: Kantor Workshop PLTH Pantai Baru Pandansimo)

c. Dummy Load

Pada gambar 2.5 dibawah terlihat salah satu komponen yang ada di PLTH Pantai Baru Pandansimo yaitu *dummy load*. *Dummy Load* merupakan tempat untuk pembuangan tegangan berlebih yang dihasilkan oleh pembangkit. Apabila tegangan yang dihasilkan mencapai 260 V, maka tegangan akan dialihkan ke *dummy load*.



Gambar 2.6 Dummy Load

(Sumber: <https://id.scribd.com/doc/241215866/plth>)

d. *Data Logger*

Pada PLTH Pandansimo juga terdapat data *logger* terlihat pada gambar 2.7. Data Logger merupakan suatu piranti yang dapat membaca berbagai macam jenis sinyal input yang selanjut akan direkam untuk kemudian disimpan dalam memori internal atau dihubungkan langsung ke computer. Kelebihan data logger dibandingkan dengan piranti akuisisi data lainnya adalah karena dapat dioperasikan terpisah dengan komputer.



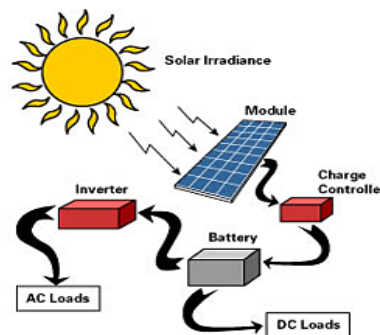
Gambar 2.7 Data Logger

(Sumber: <https://id.scribd.com/doc/241215866/plth>)

2.2.3.2 Pembangkitan PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit energi listrik yang mengkonversikan energi matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan panel surya.

Panel surya (PV) pada PLTH Pantai Baru Pandansimo disusun secara seri guna menghasilkan tegangan, dan disusun secara paralel untuk mendapatkan arus yang besar. Material pada panel surya adalah silikon polikristal dengan sudut kemiringan 15 derajat terhadap tanah. Jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh PV tergantung pada jumlah daya dari sistem ketika baterai mencapai tegangan maksimum.



Gambar 2.8 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

(Sumber: <https://tenagamatahari.wordpress.com/beranda/konsep-kerja-sistem-plts/>)

Berdasarkan gambar 2.8, pada sistem pembangkit listrik tenaga surya terdapat beberapa komponen yang digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pantai Baru Pandansimo yaitu:

a. Panel Surya

Panel surya merupakan komponen yang sangat penting pada PLTS. Panel surya adalah alah elektronik yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik.



Gambar 2.9 Panel Surya

(Sumber: <https://id.scribd.com/doc/241215866/plth>)

Berikut spesifikasi panel surya pada PLTS Pantai Baru Pandansimo:

Spesifikasi:

<i>Company</i>	: <i>Skytec Solar</i>
<i>Model No.</i>	: <i>SIP-220</i>
<i>Standart Test Conditional AM</i>	: <i>1,5 E : 1000 W/m²</i>
<i>Temp.</i>	: <i>25°C</i>
<i>Rated Power (Pmax)</i>	: <i>220 V</i>
<i>Open Circuit Voltage (Voc)</i>	: <i>36,24 V</i>
<i>Short Circuit Current (Isc)</i>	: <i>7,93 A</i>
<i>Max. Power Voltage (Vpm)</i>	: <i>29,82 V</i>
<i>Max. Power Current (Ipm)</i>	: <i>7,39 A</i>
<i>System Voltage</i>	: <i>12 V</i>
<i>Max. System Voltage</i>	: <i>1000 V</i>
<i>Weight</i>	: <i>19 kg</i>
<i>Dimension</i>	: <i>987 x 1637 x 45 mm</i>

b. Inverter

Inverter adalah alat untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Sedangkan rata-rata peralatan elektronik menggunakan arus bolak-balik (AC). Contoh inverter pada PLTH Pantai Baru Pandansimo dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2.10 Inverter

(Sumber: Kantor Workshop PLTH Pantai Baru Pandansimo)

c. Baterai

Baterai berguna untuk menyimpan arus atau energi yang dihasilkan panel surya. Arus listrik yang dihasilkan adalah arus searah (DC). Baterai adalah suatu alat penyimpanan energi listrik yang dapat di-charge setelah energi digunakan. Baterai biasanya terdiri dari baterai kering dan baterai basah. Namun, dapat dilihat pada gambar 2.11 jenis baterai yang digunakan adalah baterai kering guna menjaga kualitas dan keawetan komponen-komponen di PLTS.



Gambar 2.11 Baterai

(Sumber: Kantor Workshop PLTH Pantai Baru Pandansimo)

2.2.4 Konsep Keandalan

Keandalan adalah peluang atau kemungkinan suatu sistem atau peralatan bekerja sesuai dengan fungsinya dalam periode waktu tertentu dan dalam kondisi operasi tertentu.

Keandalan sistem adalah probabilitas atau peluang sistem dapat berfungsi seperti yang diharapkan untuk rentang waktu tertentu di bawah kondisi yang ditetapkan (Gunawan, Arief Hamdani dan Franky Ferdinand, 2002)

Keandalan sistem tenaga listrik merupakan suatu tolak ukur atau indikator unjuk kerja dari suatu pembangkit sekaligus sebagai jaminan dalam tingkat pelayanan sistem terhadap pemenuhan kebutuhan energi listrik bagi konsumen.

Terdapat empat faktor yang mendukung keandalan sistem, yaitu :

1. Probabilitas (*Probability*)

Probabilitas atau peluang digunakan untuk menentukan keandalan secara kuantitatif. Probabilitas sendiri merupakan suatu ukuran yang dapat dinyatakan secara angka atau indeks numerik dengan nilai antara 0 dan 1 atau 0 dan 100%.

Indeks numerik 0 akan mengidentifikasi suatu kejadian yang tidak akan terjadi, sedangkan indeks numerik 1 akan mengidentifikasi suatu kejadian yang pasti terjadi.

Guna keperluan teori keandalan, nilai probabilitas secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua keluaran yaitu keluaran yang mewakili kejadian yang didefinisikan sebagai kejadian sukses, sedang keluaran yang lainnya mewakili kejadian yang didefinisikan sebagai kejadian yang gagal (Ebeling, 1997).

2. Unjuk kerja (*Performance*)

Unjuk kerja adalah faktor yang menandakan perlunya diadakan kriteria – kriteria tertentu untuk menunjukkan bahwa peralatan atau sistem beroperasi secara memuaskan atau dapat diartikan bekerja sesuai fungsinya, biasanya unjuk kerja dari suatu sistem atau peralatan merupakan kriteria kegagalan dari peralatan tersebut dalam melakukan tugasnya.

3. Periode waktu / Selang waktu pengamatan

Periode waktu merupakan total waktu yang diamati pada suatu komponen atau peralatan sistem tenaga. Selang waktu pengamatan atau peninjauan dari sistem tenaga biasanya menggunakan periode satu tahun, meskipun pengambilan data dilakukan dalam periode lebih dari satu tahun.

4. Kondisi operasi

Kondisi operasi menunjukkan bahwa peralatan atau sistem beroperasi. Kondisi operasi merupakan kondisi dimana suatu peralatan atau sistem beroperasi. Kondisi operasi suatu peralatan dapat berbeda – beda.

Suatu unit pembangkit dapat berada dalam keadaan dimana tidak dapat membangkitkan energi untuk mensuplai daya listrik yang kemudian mengakibatkan unit pembangkit tersebut dapat keluar dari sistem operasi tenaga listrik ataupun harus dikeluarkan dari operasi (tidak dioperasikan) dikarenakan pemeliharaan peralatan dan sebagainya. Keadaan tersebut dapat dikatakan bahwa unit pembangkit mengalami *outage*.

Outage (pelepasan) adalah keadaan dimana suatu peralatan/sistem tidak dapat bekerja sesuai fungsinya/tidak beroperasi

Pelepasan (*outage*) pada sistem dapat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu:

a. Pelepasan paksaan (*Forced Outage*)

Adalah pelepasan yang terjadi akibat adanya gangguan, kerusakan peralatan atau gangguan dari luar sehingga perlu dikeluarkan atau dilepas dengan segera, baik secara manual oleh operator maupun secara otomatis.

b. Pelepasan terencana (*Planned Outage*)

Adalah pelepasan yang terjadi untuk keperluan *annual*, *overhaul*, inspeksi, pemeliharaan rutin atau periodik dan *testing* pada waktu yang telah direncanakan sehingga harus dikeluarkan dari sistem.

2.2.5 Faktor – faktor dalam Keandalan Pembangkit

Berikut keandalan pembangkit yang ditinjau dari faktor-faktor pengoperasian unit pembangkit.

1. Faktor Beban

Faktor beban adalah perbandingan antara besar beban rata – rata untuk suatu selang waktu (misalnya satu hari atau satu bulan) terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama. Faktor beban terdiri dari faktor beban harian, mingguan, bulanan atau tahunan. Beban rata – rata untuk suatu selang waktu adalah jumlah produksi kWh dalam selang waktu tersebut dibagi dengan jumlah jam dari selang waktu tersebut, misalnya beban rata-rata adalah produksi kWh dalam satu hari (24 jam) maka dibagi 24 jam. Sedangkan beban puncak harian adalah beban tertinggi yang terjadi dalam 24 jam.

$$\text{Faktor beban} = \frac{\text{Beban Rata-Rata}}{\text{Beban Puncak}} \dots\dots\dots(1)$$

Faktor beban menggambarkan karakteristik beban sistem, semakin besar faktor beban (100%), semakin baik keandalan pembangkit. Dengan demikian pemanfaatan alat-alat /instalasi sistem semakin baik dan efisien. Dalam praktik, faktor beban tahunan sistem berkisar 60-80 %.

2. Faktor Ketersediaan/Kesediaan

Faktor ketersediaan adalah perbandingan antara besar daya yang tersedia terhadap daya yang terpasang dalam sistem. Praktisnya, dalam pengamatan faktor ketersediaan harian menggunakan nilai daya tersedia pada waktu beban puncak, yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan.

$$\text{Faktor ketersediaan} = \frac{\text{Daya Tersedia}}{\text{Daya Terpasang}} \dots\dots\dots(2)$$

Faktor ketersediaan menggambarkan kesiapan operasi unit – unit pembangkit dalam sistem. Hal ini bergantung pada manajemen pemeliharaan unit-unit pembangkit dalam sistem. Namun ketidaksiapan operasi tidak semata-mata hanya disebabkan oleh manajemen operasi yang kurang baik,

tetapi bisa juga karena desain yang salah dari pabrik, kualitas material yang kurang baik, atau perencanaan teknis yang kurang tepat.

Semakin tinggi faktor ketersediaan (100%) maka semakin baik keandalan unit pembangkit.

3. Faktor Penggunaan

Faktor penggunaan sebenarnya serupa dengan faktor kapasitas, tetapi disini menyangkut daya. Faktor penggunaan adalah perbandingan antara besarnya beban puncak terhadap daya yang terpasang dalam sistem.

$$\text{Faktor penggunaan} = \frac{\text{Beban Puncak}}{\text{Daya Terpasang}} \dots\dots\dots(3)$$

Faktor penggunaan menggambarkan seberapa besar kemampuan yang terpasang (daya terpasang) dalam instalasi yang dimanfaatkan dari segi penggunaan. Bila faktor penggunaan telah mencapai nilai tinggi (100%) maka perlu pengembangan pembangkit agar tidak mengalami beban lebih (*over loaded*). Sebaliknya faktor penggunaan yang rendah juga perlu dihindari, hal itu dikarenakan termasuk pemborosan modal.

4. Faktor Kapasitas (*Capacity Factor, CF*)

Faktor kapasitas sebuah unit pembangkit menggambarkan seberapa besar pemanfaatan unit pembangkit dalam satu tahun dari segi kemampuan produksi. Faktor kapasitas tahunan (8760 jam) didefinisikan sebagai:

$$CF = \frac{\text{Produksi Energi dalam satu tahun}}{\text{Daya Terpasang} \times 8760 \text{ jam}} \dots\dots\dots(4)$$

Semakin tinggi faktor kapasitas (100%) maka semakin baik keandalan unit pembangkit. Faktor kapasitas yang rendah disebabkan karena unit pembangkit sering tidak siap operasi, tetapi bisa juga karena tidak begitu diperlukan dalam sistem, sehingga hanya sering menjadi unit cadangan walaupun dalam keadaan siap operasi.

5. Faktor Pelayanan (*Service Factor, SF*)

Faktor pelayanan adalah perbandingan antara lamanya waktu pengoperasian (t_{op}) selama satu tahun (8760 jam).

$$SF = \frac{t_{op}}{8760} \dots\dots\dots(5)$$

Semakin tinggi faktor pelayanan (100%) maka semakin baik keandalan unit pembangkit. Dalam praktik, faktor pelayannya tidak dapat mencapai 100% karena selama satu tahun (8760 jam) terdapat waktu keluar untuk perawatan (*Maintenance Outage Hours*) unit pembangkit. Ini menunjukkan bahwa waktu pengoperasian unit pembangkit tidak mencapai 8760 jam atau kurang dari 8760 jam atau lebih kecil dari 100%.

6. Faktor Gangguan Keluar Perawatan (*Maintenance Outage Hours, MOF*)

Faktor gangguan keluar perawatan dalah perbandingan antara lamanya waktu perawatan (t_{mn}) selama satu tahun (8760 jam).

$$MOF = \frac{t_{mn}}{8760} \dots\dots\dots(6)$$

Semakin rendah faktor gangguan keluar perawatan (0%), maka semakin baik keandalan unit pembangkit.

2.2.6 Daya Tersedia pada Sistem Pembangkit

Keandalan unit – unit pembangkit dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain gangguan kerusakan dan pemeliharaan rutin. Hal ini dapat menyebabkan unit pembangkit menjadi tidak siap beroperasi. Daya tersedia pada sistem tenaga listrik diharuskan mencukupi kebutuhan listrik dari para konsumen. Daya tersedia tergantung pada daya terpasang di setiap unit. Unit pembangkit yang tersedia untuk operasi sistem kemungkinan mengalami *forced outage* sehingga besarnya cadangan daya tersedia merupakan termasuk ukuran keandalan pada operasi sistem.

Namun keandalan operasi sistem tidak hanya tergantung pada cadangan daya tersedia pada sistem, tetapi juga pada besar kecilnya *forced outage hours* (jam-jam unit pembangkit/peralatan dalam keadaan gangguan) per tahun dari setiap unit

pembangkit yang beroperasi. Keandalan operasi sistem akan menjadi semakin tinggi jika daya yang tersedia dalam sistem semakin terjamin. Keandalan operasi sistem pembangkit ditentukan oleh:

- a. Jumlah unit pada pusat pembangkit yang mencakup besarnya cadangan daya tersedia
- b. Besarnya *force outage hours* tiap unit pembangkit dalam satu tahun

Secara kuantitatif tingkat ketersediaan tenaga listrik dalam sistem yaitu besarnya cadangan daya tersedia. Secara kualitatif yaitu sering tidaknya unit pembangkit yang mengalami gangguan, hal ini merupakan faktor utama dalam menentukan kualitas cadangan daya tersedia.

2.2.7 FOR (*Forced Outage Rate*)

Ukuran atau faktor yang menggambarkan sering tidaknya sebuah unit pembangkit mengalami gangguan dapat dinyatakan dengan *Forced Outage Rate* (FOR), yaitu:

$$FOR = \frac{\text{Jumlah Jam Gangguan Unit}}{\text{Jumlah Jam Operasi Unit} + \text{Jumlah Jam Gangguan Unit}} \dots\dots\dots(7)$$

Apabila suatu unit pembangkit mempunyai FOR = 0.01 maka kemungkinan unit ini benar- benar beroperasi pada masa waktu unit ini dioperasikan adalah $1 - 0,01 = 0,99$ sedangkan kemungkinannya mengalami gagguan adalah 0,01.

Semakin andal sebuah unit pembangkit (jarang mengalami gangguan), semakin kecil nilai FOR-nya. Semakin tidak andal sebuah unit pembangkit (sering mengalami gangguan), semakin besar nilai FOR-nya. Besarnya nilai FOR atau turunnya keandalan unit pembangkit umumnya disebabkan oleh kurang baiknya pemeliharaan.

Apabila sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa pusat listrik yang juga terdiri dari beberapa unit pembangkit maka keandalan dalam sistem atau tingkat jaminan tersedianya daya tergantung pada komposisi unit-unit pembangkit yang

ada dalam sistem, tergantung pada FOR dari unit-unit pembangkit yang ada dalam sistem.

Sebagai contoh suatu sistem terdiri dari 4 (empat) unit pembangkit. Ditinjau dari segi penyediaan daya dapat ditentukan banyaknya kombinasi yang dapat terjadi dalam operasi sistem tenaga listrik tersebut dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Banyak kombinasi : } 2^n \dots\dots\dots(8)$$

dimana :

n = banyaknya pembangkit

Sehingga dapat ditentukan kombinasi dengan 4 (empat) unit pembangkit, yaitu : $2^4 = 16$ kombinasi pembangkit yang dapat terjadi dalam operasi sistem yang dimana setiap kombinasi dapat dihitung kemungkinan terjadinya menggunakan FOR (*Forced Outage Rate*).

2.2.8 Kemungkinan Terjadinya/Probabilitas Individu (PI)

Dalam menentukan kemungkinan terjadinya setelah didapatkan kombinasi pembangkit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan – persamaan sebagai berikut :

$$y_n = \{(y_{n-1} + x) \text{ dan } (y_{n-1} + 0)\} \dots\dots\dots(9)$$

dimana :

y_n = angka-angka yang menunjukkan besarnya daya setelah ada unit ke- n

y_{n-1} = angka-angka yang menunjukkan besarnya daya sebelum ada unit ke- n

x = daya dari unit ke- n

Kemungkinan terjadinya daya setelah ada unit ke= n untuk angka-angka daya dalam persamaan (9).

$$P_n(y_{n-1} + x) = P_{n-1}(y_{n-1})(1 - q_n) \dots\dots\dots(10)$$

$$P_n(y_{n-1} + 0) = P_{n-1}(y_{n-1})q_n \dots\dots\dots(11)$$

dimana :

q_n = FOR unit ke-n

P_n = kemungkinan terjadinya (*probability*) setelah ada unit ke-n

P_{n-1} = kemungkinan terjadinya (*probability*) sebelum ada unit ke-n

Dengan menggunakan persamaan-persamaan diatas untuk sistem tenaga listrik dengan n unit pembangkit dapat dihitung kemungkinan terjadinya (*probability*) berbagai nilai daya yang mengalami *forced outage*.

Berikut cara menghitung keandalan sistem pembangkit dengan mengetahui kemungkinan terjadinya/probabilitas individu dari segi penyediaan daya yang mengalami *forced outage* mulai dari sistem yang mempunyai satu unit pembangkit, dua unit pembangkit, tiga unit pembangkit dan seterusnya.

a. Sistem hanya terdiri dari 1 (satu) unit :

1. Apabila nilai kW *on outage* yang tidak sama dengan nilai daya unit pembangkit maka kemungkinan terjadinya adalah nol
2. Apabila nilai kW *on outage* yang sama dengan nol maka kemungkinan terjadinya adalah 1-FOR
3. Apabila nilai kW *on outage* yang sama dengan daya unit pembangkit maka kemungkinan terjadinya adalah sama dengan FOR

b. Sistem terdiri dari 2 (dua) unit (misal unit 1 = FOR₁ dan unit 2 =FOR₂):

1. Apabila nilai nol kW *on outage* yang merupakan nilai permulaan maka kemungkinan terjadinya = (1-FOR₁) (1-FOR₂)
2. Apabila nilai kW terbesar *on outage* merupakan penjumlahan dari nilai terbesar *on outage* masing-masing kedua unit maka kemungkinan terjadinya = FOR₁ × FOR₂
3. Apabila nilai kW *on outage* yang berada diantara nol dan nilai terbesar kW maka kemungkinan terjadinya kW *on outage* adalah sebagai berikut
:

- a. Apabila pada masing-masing unit memiliki nilai 0 maka pada tabel hasil kemungkinan terjadinya juga memiliki nilai 0

- b. Apabila hanya di salah satu unit memiliki nilai -0 maka di tabel hasil kemungkinan terjadinya memiliki nilai sama dengan nilai dari salah satu tabel yang tidak sama dengan nol kali (1-FOR) unit dari tabel yang bernilai nol
4. Sistem terdiri dari 3 (tiga) (misal terdiri dari unit 1 = FOR₁, unit 2 =FOR₂, unit 3 = FOR₃ yang kemudian disusun menghasilkan tabel kemungkinan terjadinya yang baru
- a. Apabila kW *on outage* dari tabel sebelumnya yang terdiri dari dua unit sama dengan kW *on outage* pada tabel yang terdiri dari tiga unit pembangkit maka kemungkinan terjadinya harus dikalikan (1-FOR₃).
 - b. KW *on outage* pada tabel yang terdiri dari tiga unit pembangkit adalah kW *on outage* dari tabel yang terdiri dari dua unit ditambah dengan:
 1. Nol, untuk ini kemungkinan terjadinya adalah dikali (1-FOR₃)
 2. Nilai kW unit 3, untuk ini kemungkinan terjadinya adalah dikali FOR₃
 3. Apabila dalam sistem ada s unit yang mempunyai kapasitas sama, maka dalam perhitungan kemungkinan terjadinya kW *on outage* ada s nilai kW *on outage* yang mengandung penjumlahan dari s suku.

Dengan menggunakan persamaan – persamaan di atas dapat disimpulkan sebagai berikut :

$$(\text{Tabel } n \text{ unit}) = \{ \text{Tabel } (n-1) \text{ unit} + 0 \}$$

$$\{ \text{Tabel } (n-1) \text{ unit} + P_n \}$$

dimana :

P_n = kapasitas unit ke n

Sedangkan kolom kemungkinan terjadinya, yaitu:

Tabel (n-1) unit + 0 = kemungkinan terjadinya pada tabel (n-1) unit kali (1-FOR_n)

Tabel (n-1) unit + P_n = kemungkinan terjadinya pada tabel (n-1) unit kali FOR_n

2.2.9 Kemungkinan Kumulatif/Probabilitas Kumulatif (PK)

Selain kemungkinan terjadinya suatu kW *on outage* secara individu. Kemungkinan kumulatif sangat diperlukan dalam perhitungan LOLP atas terjadinya kW *on outage*. Kemungkinan kumulatif merupakan kemungkinan terjadinya suatu *forced outage* dengan nilai kW tertentu atau lebih.

2.2.10 Probabilitas Kehilangan Beban/*Loss Of Load Probability (LOLP)*

Kemungkinan sistem tidak dapat melayani beban, tidak dapat melayani kebutuhan konsumen akan tenaga listrik dapat dinyatakan dengan indeks LOLP. Kehilangan beban (*loss of load*) adalah suatu kondisi dengan kapasitas daya yang tersedia lebih kecil dari beban sistem sehingga ada pelepasan sebagian beban. Probabilitas kehilangan beban (*Loss of load probability*) menggambarkan besar kecilnya peluang atau kemungkinan terhadap terjadinya kehilangan beban sebagai akibat kurangnya daya yang tersedia dalam sistem. Yang dimaksud dengan kapasitas daya tersedia adalah kapasitas daya terpasang dikurangi kapasitas gangguan.

Berdasarkan gambar , menunjukkan bahwa garis kapasitas daya yang tersedia memotong garis kurva lama beban, sehingga menimbulkan kehilangan beban selama waktu *t*, maka secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$LOLP = P \times t \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

P : probabilitas terjadinya beban sama atau lebih besar dari besar daya tersedia

t : waktu terjadinya kehilangan beban

Nilai LOLP dinyatakan dalam hari per tahun. Semakin kecil nilai LOLP, semakin tinggi keandalan sistem. Sebaliknya, semakin besar nilai LOLP, maka semakin rendah keandalan sistem, karena hal ini berarti probabilitas sistem tidak dapat melayani beban yang semakin besar. Standard PLN mengenai LOLP adalah maksimal 3 hari per tahun untuk sistem tenaga listrik Jawa Bali dan 5 hari per tahun untuk sistem tenaga listrik di luar Jawa, serta standard PLN untuk pembangkit listrik yang menggunakan energi primer berupa energi terbarukan seperti PLTH mengenai LOLP adalah maksimal 1 hari per tahun.

Pada suatu sistem yang mempunyai beban tertentu, kurva lama beban sudah diketahui atau diperkirakan, jadi LOLP memiliki kaitan dengan jadwal pemeliharaan unit pembangkit hanya tergantung kepada kapasitas dan FOR unit-unit pembangkit yang tidak menjalani pemeliharaan atau unit-unit yang beroperasi. Semakin tinggi nilai LOLP, maka semakin luasa jadwal pemeliharaan unit pembangkit yang dapat dilakukan.

Pengertian tentang LOLP diperlukan dalam perencanaan operasi misalnya untuk menyusun jadwal pemeliharaan unit-unit pembangkit harus diatur sedemikian rupa sehingga daya yang tersedia tanpa gangguan atau unit-unit pembangkit yang dijadwalkan siap beroperasi. PLN dalam menyusun jadwal pemeliharaan sistem interkoneksi Jawa mengambil level resiko LOLP yaitu satu hari per tahun.