

Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik



Dean Corio, **Adrianti**, Ricky Maulana, **Putty Yunesti**, Zulka Hendri,
Rosnita Raul, Syamsyarief Baqaruzi, **Rizki Wahyu Pratama**, Dedi Tri
Laksono



ITER PRESS

Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dean Corio, Adrianti, Ricky Maulana, Puteh Satrio, Zulka Hendri,
Rosnita Rauli, Syamsyarief Baqaruzi, Rizki Nurani Pratama, Dedi Tri
Laksono

**PERENCANAAN DAN OPERASI
SISTEM TENAGA LISTRIK**

Penulis

Dean Corio, Adrianti, Ricky Maulana, Putty Yunesti, Zulka
Hendri, Rosnita Rauf, Syamsyarief Baqaruzi, Rizki Wahyu
Pratama, Dedi Tri Laksono

ISBN

978-623-8472-06-2

156 Hal: 14.8 x 21 cm

Terbitan Pertama, Desember 2023

Editor

Dean Corio

Desain Sampul dan Tata Letak

Dean Corio

Penerbit

ITERA Press

Redaksi

Gedung Kuliah Umum (GKU) Lantai 1

Institut Teknologi Sumatera (ITERA)

Jalan Terusan Ryacudu, Way Hui, Kecamatan Jati Agung,

Lampung Selatan 35365

Tel/ WhatsApp +6285768378398

Email: press@itera.ac.id

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari penulis dan/ penerbit

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	I
DAFTAR GAMBAR	V
KATA PENGANTAR	VIII
BAB I. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK	1
1.1. PENDAHULUAN	1
1.2. KOMPONEN UTAMA SISTEM TENAGA LISTRIK	5
1.3. TANTANGAN MODERN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK	6
1.4. TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM SISTEM KETENAGALISTRIKAN	8
1.5. REGULASI DAN KEBIJAKAN SISTEM TENAGA LISTRIK... 9	
1.5.1. <i>Regulasi dan Kebijakan Sistem Tenaga Listrik</i>	9
1.5.2. <i>Aspek Ekonomi Sistem Tenaga Listrik</i>	10
1.5.3. <i>Keselamatan dan Lingkungan dalam Sistem Tenaga Listrik</i>	10
1.5.4. <i>Arah Masa Depan Sistem Tenaga Listrik</i>	11
BAB II. DASAR-DASAR ANALISA SISTEM TENAGA LISTRIK	12
2.1. TEGANGAN DAN ARUS PADA SISTEM TIGA FASA SEIMBANG	12
2.2. DAYA TIGA FASA.....	16
2.3. DIAGRAM SATU GARIS	18
2.4. MODEL KOMPONEN SISTEM TENAGA	20
2.4.1. <i>Model Generator Sinkron</i>	20
2.4.2. <i>Model Transformator</i>	22
2.4.3. <i>Model Saluran Transmisi</i>	25

BAB III. PERENCANAAN SISTEM PEMBANGKITAN ... 30

3.1.	STRATEGI DAN METODOLOGI DALAM PERENCANAAN PENAMBAHAN KAPASITAS PEMBANGKIT.....	30
3.2.	PERHITUNGAN BEBAN PUNCAK	32
3.2.1.	<i>Faktor Beban</i>	34
3.2.2.	<i>Estimasi Beban</i>	34
3.2.3.	<i>Peramalan beban jangka pendek</i>	35
3.2.4.	<i>Peramalan beban jangka menengah</i>	36
3.2.5.	<i>Peramalan beban jangka Panjang</i>	37
3.3.	KEANDALAN SISTEM TENAGA	38
3.4.	ANALISIS BIAYA.....	42

BAB IV. DESAIN DAN OPERASI JARINGAN TRANSMISI..... 46

4.1.	SUTET	48
4.2.	SUTT	49
4.3.	SUTTAS	51

BAB V. TEKNOLOGI DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK... 54

5.1.	SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK	54
5.2.	KONFIGURASI JARINGAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK 54	
5.2.1.	<i>Struktur Jaringan Radial</i>	54
5.2.2.	<i>Struktur Jaringan Ring/Loop/Mesh</i>	56
5.3.	OTOMATISASI PADA SISTEM DISTRIBUSI.....	59
5.4.	SCADA PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK..	60
5.5.	MENINGKATKAN EFISIENSI SISTEM DISTRIBUSI.	63
5.6.	KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK.....	67
5.6.1.	<i>Indeks Keandalan Jaringan Distribusi.</i>	68

BAB VI. MANAJEMEN ASET & PEMELIHARAAN SISTEM..... 70

6.1.	PENDAHULUAN.....	70
------	------------------	----

6.2.	MANAJEMEN OPERASI SISTEM TENAGA LISTRIK	71
6.3.	PEMELIHARAAN SISTEM.....	72
6.3.1.	<i>Analisa Beban</i>	76
6.3.2.	<i>Perkiraan Beban</i>	77
6.4.	MANAJEMEN ASET	78
6.5.	PENGOPERASIAN DAN PEMELIHARAAN DALAM ASSET 82	
6.5.1.	<i>Pengoperasian Aset</i>	82
6.5.2.	<i>Pemeliharaan Aset</i>	83

BAB VII. INTEGRASI SUMBER ENERGI TERBARUKAN

..... **87**

7.1.	PENDAHULUAN	87
7.2.1.	<i>Energi Surya</i>	89
7.2.2.	<i>Energi Angin</i>	91
7.2.3.	<i>Energi Air</i>	93
7.2.4.	<i>Energi Panas Bumi</i>	94
7.2.5.	<i>Energi Biomassa</i>	96
7.3.	PENERAPAN TEKNOLOGI TERKINI DALAM ENERGI TERBARUKAN.....	97
7.3.1.	<i>PLTS</i>	97
7.3.2.	<i>PLTB</i>	99
7.3.3.	<i>PLTA</i>	101
7.3.4.	<i>PLTP</i>	103
7.3.5.	<i>PLTBm</i>	105
7.4.	PRINSIP INTEGRASI SUMBER ENERGI TERBARUKAN..	106
7.4.1.	<i>Konsep Sistem Hibrida</i>	107
7.4.2.	<i>Konsep Smartgrid</i>	109
7.5.	TANTANGAN, STRATEGI, DAN INOVASI DALAM INTEGRASI ENERGI TERBARUKAN.....	112

BAB VIII. PROTEKSI DAN KEAMANAN SISTEM 115

8.1.	PENDAHULUAN	115
8.2.	KLASIFIKASI DAN TIPE RELAY.....	115

8.3.	FUNGSI RELAY PENGAMAN	118
8.4.	DAERAH PENGAMANAN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK	121
8.5.	BACKUP RELAY DAN KONSEP BACKUP JARAK JAUH	122
8.6.	PRINSIP DASAR KERJA DAN TIPE RELAY ELEKTRO-MAGNETIS.....	123
8.7.	RELAY ARUS LEBIH DAN KARAKTERISTIKNYA.....	125
8.8.	KONSEP ARUS KERJA (<i>PICK-UP</i>) DAN ARUS KEMBALI (<i>DROP-OFF</i>)	127
8.9.	KONSTRUKSI RELAY ARUS LEBIH	128
8.10.	PEMILIHAN DAN PENYETELAN ARUS KERJA DAN KELAMBATAN WAKTU	129
BAB IX. PERATURAN DAN KEBIJAKAN ENERGI.....		131
9.1.	PERATURAN DAN KEBIJAKAN ENERGI NASIONAL....	133
9.2.	INSENTIF UNTUK ENERGI BERSIH.....	139
9.2.1.	<i>Insentif pada Sektor PLTP</i>	139
9.2.2.	<i>Insentif pada Sektor PLTS</i>	141
9.3.	HARGA LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN	147
9.4.	PARTISIPASI MASYARAKAT DAN KETERLIBATAN PUBLIK	154
DAFTAR PUSTAKA		1
APENDIX		1
BIODATA PENULIS.....		5

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1. GELOMBANG TEGANGAN FASA A,B,DAN C PADA SISTEM AC SEIMBANG.	12
GAMBAR 2.2. DIAGRAM FASOR TEGANGAN NETRAL	15
GAMBAR 2.3. HUBUNGAN TEGANGAN FASA-NETRAL DENGAN TEGANGAN ANTAR FASA.....	16
GAMBAR 2.4. SIMBOL KOMPONEN PADA DIAGRAM SATU GARIS.	18
GAMBAR 2.5. DIAGRAM SATU GARIS SISTEM TENAGA SEDERHANA	19
GAMBAR 2.6. RANGKAIAN EKIVALEN GENERATOR SINKRON	21
GAMBAR 2.7. RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR	23
GAMBAR 2.8. RANGKAIAN EKIVALEN TRANFORMATOR YANG DISERHANAKAN	24
GAMBAR 2.9. RANGKAIAN EKIVALEN SALURAN TRANSMISI PENDEK	26
GAMBAR 2.10. RANGKAIAN EKIVALEN SALURAN TRANSMISI MENENGAH (A) REPRESENTASI T, (B) REPRESENTASI Π	27
GAMBAR 2.11. RANGKAIAN EKIVALEN SALURAN TRANSMISI PANJANG.....	28
GAMBAR 3.1. INFRASTRUKTUR ENERGI LISTRIK	30
GAMBAR 3.2. KURVA BEBAN HARIAN	33
GAMBAR 4.1. SUTET KAPASITAS 500 kV (SUMBER: KUMPARAN, 2021)	48
GAMBAR 4.2. SUTT KAPASITAS 150 kVGAMBAR (SUMBER: RRI, 2022).....	50
GAMBAR 4.3. KONFIGURASI RANGKAIAN TUNGGAL (SUMBER: TRANSMISI DAYA LISTRIK, 2013).....	52

GAMBAR 4.4. KONFIGURASI RANGKAIAN GANDA (SUMBER: TRANSMISI DAYA LISTRIK, 2013).....	53
GAMBAR 5.1. JARINGAN DISTRIBUSI RADIAL 33 BUS (TAHER AND AFSARI, 2012).....	55
GAMBAR 5.2. DIAGRAM SATU GARIS JARINGAN DISTRIBUSI TIPE MESH (ISLAM ET AL., 2017).....	57
GAMBAR 5.3. SCADA PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK (SAYED & GABBAR, 2017).	62
GAMBAR 5. 4. SIKLUS MANAJEMEN ASET	81
GAMBAR 7. 1. RADIASI MATAHARI DI INDONESIA (SUMBER: WORLD BANK)	90
GAMBAR 7. 2. POTENSI ANGIN DI INDONESIA (SUMBER: WORLD BANK)	92
GAMBAR 7. 3. POTENSI DAN KAPASITAS ENERGI HIDRO DI INDONESIA (SUMBER: IESR)	94
GAMBAR 7. 4. POTENSI LOKASI PANAS BUMI DI INDONESIA (SUMBER: KEMENTERIAN ESDM).....	95
GAMBAR 7. 5. POTENSI PLTBM PADA 10 PROVINSI DI INDONESIA (SUMBER: IESR).....	97
GAMBAR 7. 6. CONTOH KONSEP SISTEM HIBDRIDA (SUMBER:HTTP://WWW1.EERE.ENERGY.GOV/BUILDINGS/RE SIDENTIAL/IMAGES/WIND- POWERED_ELECTRIC_SYSTEMS_3.GIF)	109
GAMBAR 7. 7. KONSEP SMARTGRID (SUMBER: IESR)	110
GAMBAR 7. 8. INFRASTRUKTUR SMARTGRID (SUMBER: EPRI) ..	111
GAMBAR 8. 1. CONTOH DIAGRAM SEGARIS DENGAN RELAY PENGAMANNYA.....	119
GAMBAR 8.2. PRINSIP SALING MEMPROTEKSI DARI RANGKAIAN RELAY PENGAMAN 1) C.B DIAPIT OLEH DUA TRAF0 ARUS 2) KEDUA TRAF0 ARUS DILETAKKAN DISAMPING C.B.....	120
GAMBAR 8.3. RELAY (A) NORMALY OPEN, (B) NORMALY CLOSE	125

GAMBAR 9.1. BAURAN SUMBER ENERGI PRIMER DI INDONESIA (DATA.INDONESIA.ID)	132
GAMBAR 9.2. TREN KAPASITAS PLT EBT 2013 – 2022 (KATADATA)	134
GAMBAR 9.3. PRESIDEN JOKO WIDODO SAAT KTT DI PARIS 2015 (REPUBLIKA)	136
GAMBAR 9.4. PERKEMBANGAN PLT EBT (RENSTRA DITJEN EBTKE 2020 – 2024)	138
GAMBAR 9.5. KAPASITAS PLT EBT HINGGA TAHUN 2019 (RENSTRA DITJEN EBTKE 2020 – 2024)	139
GAMBAR 9.6. DATA HARGA BELI LISTRIK PLTA ALIRAN/TERJUNAN	148
GAMBAR 9.7. DATA HARGA BELI LISTRIK PLTS FOTOVOLTAIK.	149
GAMBAR 9.8. DATA HARGA BELI LISTRIK PLTB.....	150
GAMBAR 9.9. DATA HARGA BELI LISTRIK PLTBM.....	151
GAMBAR 9.10. DATA HARGA BELI LISTRIK PLTBG	152
GAMBAR 9.11. DATA HARGA PEMBELIAN LISTRIK DARI PLTP NEGARA	153

KATA PENGANTAR

Dalam konteks evolusi yang terus-menerus dari infrastruktur tenaga listrik global, "Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik" hadir sebagai karya akademis yang memberikan wawasan mendalam tentang sistem tenaga listrik modern. Buku ini dirancang untuk memfasilitasi pemahaman komprehensif mengenai komponen-komponen esensial dan kerangka kerja operasional yang membentuk tulang punggung sektor energi. Dari perjalanan historis hingga tantangan zaman sekarang yang dihadapi industri tenaga listrik, Bab 1 menetapkan konteks dan memberikan dasar konseptual untuk diskusi yang lebih terperinci dalam bab-bab selanjutnya.

Penyajian materi buku ini secara sistematis membimbing pembaca melalui teori dan aplikasi yang krusial dalam analisis sistem tenaga listrik, sebagaimana dipaparkan dalam Bab 2. Teori arus bolak-balik, metodologi perhitungan daya, dan pengembangan model matematis komponen sistem dikaji dengan tujuan menanamkan kecakapan analitis yang dibutuhkan untuk memahami dan memecahkan problematika teknis. Bab 3 hingga 5 lebih lanjut mengungkapkan aspek-aspek penting dari perencanaan sistem pembangkitan, desain jaringan transmisi, serta manajemen operasional sistem distribusi tenaga listrik, semuanya merupakan

komponen penting dari infrastruktur tenaga listrik yang andal.

Penutupan buku ini, Bab 6 hingga 9, memperkenalkan pembaca pada nuansa strategis dari manajemen aset dan pemeliharaan sistem, integrasi sumber energi terbarukan, mekanisme proteksi sistem, serta dinamika peraturan dan kebijakan energi. Dengan penekanan pada aplikasi praktis diiringi analisis teoretis, buku ini tidak hanya bertujuan untuk menanamkan pengetahuan, tetapi juga untuk mendorong pembaca agar memikirkan solusi inovatif dalam menghadapi kompleksitas sektor energi yang terus berubah. Karya ini diharapkan dapat menjadi sumber daya akademis yang berharga dan referensi kritis bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang teknik tenaga listrik.

Tim Penulis

BAB I. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK

1.1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian kompleks yang terdiri dari beberapa elemen penting, yakni pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Dalam konteks pembangkitan, energi mekanik diubah menjadi energi listrik menggunakan generator di stasiun pembangkit. Pembangkitan dapat melibatkan berbagai sumber, termasuk bahan bakar fosil, tenaga nuklir, atau sumber terbarukan seperti tenaga surya dan angin.

Pada tingkat global, pembangkitan energi listrik didominasi oleh bahan bakar fosil (batu bara, gas alam, dan minyak), energi nuklir, dan sumber energi terbarukan (hidro, angin, surya, bioenergi, dan geotermal). Terjadi transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dalam rangka menanggapi perubahan iklim dan keberlanjutan lingkungan. Menurut laporan dari organisasi seperti *International Energy Agency (IEA)* dan *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)*, energi terbarukan menunjukkan tren pertumbuhan dengan investasi besar pada teknologi surya dan angin.

Di Indonesia, negara dengan ekonomi berkembang, terdapat peningkatan signifikan dalam pembangkitan listrik. Potensi besar untuk energi

terbarukan terutama berasal dari geotermal, hidro, dan surya, namun batu bara masih menjadi sumber utama. Data tahunan dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dan PLN menunjukkan batu bara masih mendominasi kapasitas pembangkitan, diikuti oleh gas alam, minyak, dan sumber terbarukan. Data ini dapat berubah seiring penambahan kapasitas baru dan perubahan kebijakan energi.

Transmisi tenaga listrik mengirimkan listrik dari pembangkit ke sub-stasiun distribusi atau pengguna industri. Sistem transmisi menyalurkan listrik dalam jumlah besar dengan jarak yang jauh (Pansini, A. J. 2020). Kerugian daya di konduktor berbanding lurus dengan kuadrat arus dan berbanding terbalik dengan resistansinya. Untuk mengurangi kerugian daya, transmisi dilakukan pada tegangan tinggi, memungkinkan pengiriman arus dengan arus rendah. Transformator *step-up* meningkatkan tegangan dari pembangkit ke level transmisi tinggi, yang kemudian diturunkan oleh transformator *step-down* di sub-stasiun sebelum masuk jaringan distribusi. Besaran daya yang ditransmisikan bervariasi tergantung kapasitas pembangkit dan kebutuhan permintaan, seperti lini transmisi 500 kV dengan arus 1000 A mengirimkan 500 MW. Rumus untuk menghitung daya dalam sistem AC (*alternating current*) tiga fasa diperlihatkan pada Persamaan 1.

$$P = V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (1.1)$$

Dimana, P adalah daya dalam watt (W), V_L adalah tegangan garis (*line voltage*), I_L adalah arus garis (*line current*), dan $\cos \varphi$ adalah faktor daya sistem.

Sistem transmisi juga dilengkapi dengan berbagai infrastruktur pendukung, seperti tower transmisi, kabel transmisi, peralatan proteksi seperti pemutus sirkuit dan relay, serta sistem kontrol dan komunikasi yang mengawasi dan mengelola aliran daya, memastikan keamanan dan keandalan jaringan. Kinerja sistem transmisi diukur berdasarkan kemampuannya untuk mengirimkan energi listrik dengan efisien dan aman, dengan kerugian yang minim, serta kemampuannya untuk menangani beban puncak dan mengelola gangguan dengan cepat untuk mempertahankan kestabilan jaringan listrik.

Distribusi energi listrik berkaitan dengan proses penyaluran listrik dari sub-stasiun distribusi ke konsumen akhir, seperti rumah tangga, industri, dan bisnis. Jaringan distribusi beroperasi pada tegangan lebih rendah dibandingkan jaringan transmisi, yang bertujuan menyesuaikan tingkat tegangan untuk peralatan pengguna akhir (Cekdin, C. 2021).

Sistem distribusi tenaga listrik memegang peranan penting dalam menyediakan energi secara aman dan efisien ke pelanggan. Proses ini dimulai dengan penurunan tegangan listrik melalui sub-stasiun distribusi. Selanjutnya, energi dialirkan melalui jaringan distribusi primer pada tegangan menengah, yang menghubungkan sub-stasiun dengan transformator

lokal atau tiang. Akhirnya, transformator distribusi menurunkan tegangan ini ke tingkat yang cocok untuk konsumen domestik dan komersial kecil melalui jaringan distribusi sekunder.

Dalam sistem distribusi, ada beberapa prinsip dasar yang diperhatikan untuk memastikan pengoperasian yang efektif. Daya (P), yang diukur dalam watt (W), dikalkulasi sebagai hasil dari tegangan (V) dalam volt dikalikan dengan arus (I) dalam ampere. Energi (E) dalam joule (J) adalah produk dari daya dikalikan waktu (t) penggunaan. Untuk sistem AC tiga fase, perhitungan daya menjadi lebih kompleks, melibatkan tegangan garis (V_L), arus garis (I_L), dan faktor daya ($\cos \varphi$) (Kersting, W. H. 2018).

Salah satu tantangan utama dalam distribusi adalah pengelolaan kerugian daya, yang berhubungan langsung dengan kuadrat arus dan resistansi kabel ($I^2 \times R$). Selain itu, tegangan jatuh (V_{drop}) atau penurunan tegangan yang terjadi karena adanya resistansi dalam kabel harus diminimalisir untuk mempertahankan kualitas energi listrik. Hal ini dihitung berdasarkan arus, resistansi per satuan panjang, dan panjang total kabel.

Untuk memastikan keandalan, komponen dalam sistem tenaga listrik dirancang untuk menangani variasi beban dan melindungi dari kondisi beban berlebih atau short circuit. Ini dilakukan dengan pemasangan fuse dan circuit breaker. Kualitas daya juga merupakan faktor

penting, dengan fokus khusus pada stabilitas tegangan dan minimisasi distorsi harmonik. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa konsumen menerima energi listrik yang tidak hanya handal, tetapi juga bersih dan stabil.

Integrasi setiap komponen dalam sistem penting untuk menjaga kelancaran dan keandalan pasokan listrik. Pembangkitan diatur untuk memenuhi permintaan yang berubah-ubah, sementara jaringan transmisi memerlukan pengawasan dan pemeliharaan yang berkelanjutan untuk mencegah gangguan. Sistem distribusi harus mampu menyesuaikan dengan perubahan beban lokal. Manajemen kegagalan sistem, pengelolaan beban, dan pemeliharaan infrastruktur adalah aspek kunci dalam pengoperasian sistem tenaga listrik yang efisien.

1.2. Komponen Utama Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik, terdapat empat komponen utama yang berperan penting dalam produksi, transmisi, dan distribusi listrik. Pertama, pembangkit listrik, yang bertugas mengubah berbagai sumber energi menjadi energi listrik. Pembangkitan ini bisa berasal dari sumber termal, hidroelektrik, nuklir, angin, atau surya. Efisiensi pembangkit dihitung dengan membagi output energi listrik dengan input energi, dan daya listriknya dihitung dengan Persamaan $P = VI$, $P =$

I^2R , atau $P = \frac{V^2}{R}$. Kedua, jaringan transmisi, yang mengirimkan energi listrik dari pembangkit ke substation. Dalam transmisi, rugi-rugi daya dihitung dengan $P_{loss} = I^2R$ dan tegangan jatuh dihitung dengan $\Delta V = IR$.

Ketiga, substation, yang berfungsi mengubah tingkat tegangan, mendistribusikan daya, dan mengontrol jaringan. Transformasi tegangan di substation dihitung dengan $V_{Secondary} = V_{primary} \frac{N_{Primary}}{N_{Secondary}}$, dimana V adalah tegangan dan N adalah jumlah lilitan pada transformator. Keempat dan terakhir, sistem distribusi, yang bertanggung jawab mendistribusikan energi listrik dari substation ke pengguna akhir. Sistem distribusi menggunakan prinsip yang sama dengan jaringan transmisi untuk menghitung rugi-rugi daya dan tegangan jatuh. Keseluruhan komponen ini saling terintegrasi untuk memastikan pasokan listrik yang efisien dan andal ke pengguna.

1.3. Tantangan Modern dalam Sistem Tenaga Listrik

Tantangan Modern dalam Sistem Tenaga Listrik meliputi keberlanjutan, keandalan, dan integrasi sumber energi terbarukan (Islam, M. R., Shah, M. R., & Ali, Mohd. H. 2021). Berikut ini beberapa tantangan yang dihadapi oleh industri tenaga listrik saat ini:

- a. Keberlanjutan: Industri tenaga listrik perlu mengurangi emisi gas rumah kaca dan beralih ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Penerapan energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidroelektrik menjadi solusi keberlanjutan yang menjanjikan.
- b. Keandalan: Keandalan pasokan listrik sangat penting untuk memastikan stabilitas ekonomi dan kesejahteraan masyarakat. Salah satu metode untuk menganalisis keandalan sistem tenaga listrik adalah metode EENS (*Expected Energy Not Supplied*). Namun, integrasi sumber energi terbarukan ke dalam jaringan listrik konvensional memiliki tantangan tersendiri, seperti fluktuasi dan ketidakpastian dalam produksi energi (Chaiyabut, N., & Damrongkulkamjorn, P. 2012).
- c. Integrasi Sumber Energi Terbarukan: Integrasi sumber energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik memerlukan teknologi dan infrastruktur yang tepat. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengintegrasikan energi terbarukan adalah smart grid, yang dapat meningkatkan keandalan sistem, mengurangi emisi karbon, dan mendiversifikasi sumber energi terbarukan.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, beberapa solusi yang dapat diterapkan meliputi:

- a. Pengembangan teknologi penyimpanan energi: Penyimpanan energi dapat membantu mengatasi

fluktuasi dalam produksi energi terbarukan dan meningkatkan keandalan pasokan listrik.

- b. Peningkatan efisiensi dan pengurangan kerugian teknis: Mengurangi kerugian teknis dalam transmisi dan distribusi energi listrik dapat meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi biaya operasional.
- c. Peningkatan koordinasi antar sektor dan peningkatan regulasi: Koordinasi yang lebih baik antara sektor energi, industri, dan pemerintah diperlukan untuk menciptakan lingkungan yang kondusif bagi pengembangan energi terbarukan.
- d. Investasi dalam penelitian dan pengembangan: Penelitian dan pengembangan teknologi energi terbarukan, seperti fotovoltaik, dapat membantu mengatasi tantangan dalam produksi dan keandalan energi.
- e. Penerapan teknologi digital dan otomasi: Teknologi digital dan otomasi, seperti smart grid dan sistem pengendalian SCADA, dapat membantu mengintegrasikan sumber energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik dan meningkatkan keandalan pasokan (Koutitas, G. 2012).

1.4. Teknologi dan Inovasi dalam sistem ketenagalistrikan

Industri kelistrikan saat ini mengalami perkembangan pesat dalam hal teknologi dan inovasi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem

tenaga listrik. Beberapa contoh teknologi terbaru yang diterapkan antara lain smart grid, penyimpanan energi, dan otomatisasi jaringan.

Smart grid memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi terintegrasi untuk memantau dan mengendalikan operasi sistem secara real-time. Hal ini memungkinkan respon yang lebih cepat terhadap gangguan, integrasi sumber terbarukan, dan partisipasi pelanggan dalam pengelolaan beban. Komponen smart grid antara lain smart meter, sensor, dan perangkat kontrol terdistribusi.

Baterai dan teknologi penyimpanan energi lainnya memungkinkan integrasi energi terbarukan yang intermiten serta mengurangi fluktuasi pasokan dan beban. Baterai dapat menyimpan kelebihan produksi pada waktu rendah beban dan melepaskannya pada waktu puncak. Hal ini meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Dengan penerapan teknologi terkini, diharapkan sistem kelistrikan menjadi lebih andal, efisien, dan ramah lingkungan. Inovasi berkelanjutan diperlukan untuk menghadapi tantangan industri kelistrikan saat ini dan masa depan.

1.5. Regulasi dan Kebijakan Sistem Tenaga Listrik

1.5.1. Regulasi dan Kebijakan Sistem Tenaga Listrik

Regulasi dan kebijakan dalam sistem tenaga listrik sangat penting untuk memastikan operasi dan pengembangan sistem yang efisien, andal, dan ramah

lingkungan. Di Indonesia, regulasi terkait ketenagalistrikan diatur dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan dan berbagai peraturan lainnya yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Beberapa peraturan penting meliputi Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 Tahun 2020 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (*Grid Code*) dan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik.

1.5.2. Aspek Ekonomi Sistem Tenaga Listrik

Aspek ekonomi dalam sistem tenaga listrik mencakup tarif, investasi, dan model bisnis yang mempengaruhi pengoperasian dan pengembangan sistem. Operasi ekonomis pembangkit tenaga listrik merupakan aspek penting dalam manajemen sistem tenaga listrik. Salah satu metode yang digunakan untuk mengoptimalkan operasi ekonomis adalah metode iterasi lambda, yang bertujuan untuk menentukan penjadwalan unit pembangkit agar menghasilkan daya keluaran yang optimal dengan biaya bahan bakar minimum.

1.5.3. Keselamatan dan Lingkungan dalam Sistem Tenaga Listrik

Keselamatan kerja dan dampak lingkungan menjadi perhatian utama dalam sistem tenaga listrik. Keselamatan Ketenagalistrikan (K2) mencakup upaya

pemenuhan standar peralatan dan pemanfaatan tenaga listrik, pengamanan instalasi tenaga listrik, dan pengamanan pemanfaatan tenaga listrik. Selain itu, perusahaan listrik harus memastikan bahwa operasi mereka ramah lingkungan, termasuk mengurangi emisi dan mempromosikan penggunaan energi terbarukan.

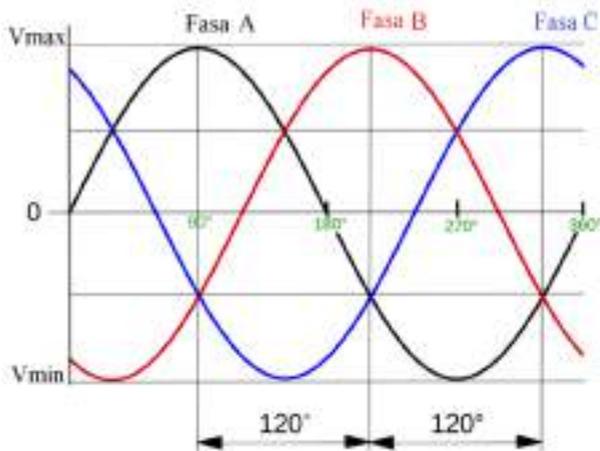
1.5.4. Arah Masa Depan Sistem Tenaga Listrik

Masa depan sistem tenaga listrik akan dipengaruhi oleh penggunaan teknologi baru dan perubahan dalam kebutuhan konsumsi energi. Salah satu teknologi yang diharapkan memainkan peran penting dalam masa depan sistem tenaga listrik adalah smart grid, yang merupakan jaringan distribusi energi yang dinamis dan cerdas yang memanfaatkan teknologi mutakhir untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan. Selain itu, perubahan kebijakan dan regulasi, seperti peningkatan target bauran energi terbarukan dan pengurangan ketergantungan pada energi fosil, akan mempengaruhi arah pengembangan sistem tenaga listrik di masa depan.

BAB II. DASAR-DASAR ANALISA SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1. Tegangan dan Arus pada Sistem Tiga Fasa Seimbang

Sistem tenaga listrik umumnya menggunakan arus bolak balik (AC) tiga fasa dengan frekuensi dijaga konstan sesuai nominal sistem, misalnya 50 Hz di Indonesia. Pada kondisi normal, ketiga fasa tersebut berada dalam kondisi seimbang, artinya ketiganya memiliki besar arus dan tegangan yang sama, namun berbeda fasa sebesar 120° , seperti ditunjukkan oleh gelombang tegangan fasa A, B dan C pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Gelombang tegangan fasa A,B,dan C pada sistem AC seimbang.

Tegangan pada Gambar 2.1 berubah terhadap waktu dalam fungsi sinusoidal. Untuk nilai-nilai parameter listrik dalam fungsi waktu biasanya digunakan simbol dalam huruf kecil. Sehingga tegangan fasa A, B dan C dapat ditulis (Wadhwa, 2006) :

$$v_A = V_{\max} \sin \omega t$$

$$v_B = V_{\max} \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$v_C = V_{\max} \sin (\omega t + 120^\circ)$$

Jika arus yang mengalir tertinggal dengan sudut ϕ dari tegangan, maka arus sesaat dapat ditulis

$$i_A = I_{\max} \sin (\omega t - \phi)$$

$$i_B = I_{\max} \sin (\omega t - 120^\circ - \phi)$$

$$i_C = I_{\max} \sin (\omega t + 120^\circ - \phi)$$

V_{\max} dan I_{\max} menunjukkan nilai maksimum fungsi sinusoidal tegangan dan arus. Arus dan tegangan ini menganut urutan fasa abc, karena fasa a mendahului fasa b sebesar 120° dan fasa b mendahului fasa c sebesar 120° (Stevenson, 1990).

Selain nilai sesaat, arus dan tegangan bolak balik, juga dapat ditampilkan dalam bentuk nilai rms (root mean square) yang merupakan pembagian nilai maksimum dengan $\sqrt{2}$. Nilai rms sering juga disebut nilai efektif yang merupakan nilai yang terbaca oleh alat ukur (Lister and Gunawan, 1988).

Dalam analisa di sistem tenaga, arus dan tegangan bolak balik umumnya ditampilkan dalam bentuk fasor yaitu bilangan kompleks yang merepresentasikan fungsi yang berubah terhadap waktu secara sinusoidal. Fasor menggunakan simbol huruf besar, seperti ditunjukkan fasor tegangan fasa A, B dan C dari sebuah sistem yang seimbang sebagai berikut:

$$V_A = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_B = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$V_C = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$$

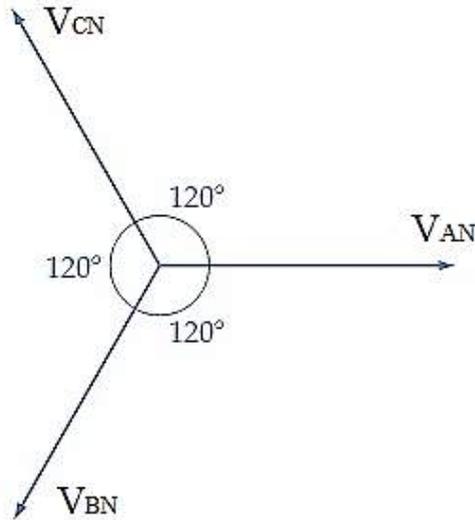
Tegangan dan arus yang diberikan diatas adalah nilai-nilai perfasa atau sering juga disebut nilai fasa ke netral, atau dapat ditulis sebagai:

$$V_{AN} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{BN} = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$V_{CN} = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$$

Jika digambarkan dalam diagram fasor, maka fasor tegangan fasa ke netral tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.2.

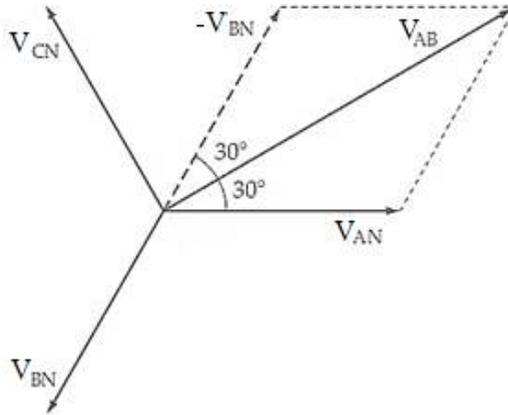


Gambar 2.2. Diagram fasor tegangan netral

Selain nilai fasa ke netral, nilai yang lebih sering digunakan adalah nilai fasa ke fasa atau antar fasa atau dalam bahasa Inggris disebut line to line. Misalnya tegangan nominal transmisi di Indonesia adalah 500 kV, 275 kV, 150 kV merupakan nilai tegangan antar fasa. Hubungan antara tegangan fasa ke netral dengan tegangan antar fasa ditunjukkan oleh persamaan (2.1) untuk tegangan antara fasa A ke fasa B.

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (2.1)$$

Hubungan antara fasor tegangan fasa ke netral dengan fasor tegangan antar fasa ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Hubungan tegangan fasa-netral dengan tegangan antar fasa

Berdasarkan Gambar 2.3 dapat dihitung besar V_{AB} yaitu:

$$|V_{AB}| = 2|V_{AN}| \cos 30^\circ = \sqrt{3}|V_{AN}| \quad (2.2)$$

V_{AB} mendahului V_{AN} sebesar 30° sehingga

$$V_{AB} = \sqrt{3}V_{AN} \angle 30^\circ \quad (2.3)$$

Tegangan antar fasa lainnya didapat dengan cara yang sama. Secara umum dapat dinyatakan bahwa tegangan antar fasa sama dengan $\sqrt{3}$ tegangan fasa ke netral.

2.2. Daya Tiga Fasa

Daya tiga fasa dapat dihitung dari arus dan tegangan fasa. Jika tegangan fasa pada terminal beban adalah $V = |V| \angle \alpha$ dan arus yang mengalir adalah

$I = |I| \angle \beta$ maka daya satu fasa adalah perkalian antara fasor tegangan dengan fasor arus konjugate:

$$S_{\text{fasa}} = VI^* = |V| \angle \alpha \ |I| \angle -\beta = |V| |I| \angle (\alpha - \beta) \quad (2.3)$$

Dalam bentuk rektangular, daya satu fasa yaitu

$$S_{\text{fasa}} = |V| |I| \cos \angle (\alpha - \beta) + j |V| |I| \sin \angle (\alpha - \beta) \quad (2.4)$$

$\alpha - \beta$ adalah perbedaan sudut fasa antara tegangan dan arus. Jika $\alpha - \beta = \varphi$, maka persamaan (2.4) menjadi

$$S_{\text{fasa}} = |V| |I| \cos \angle \varphi + j |V| |I| \sin \angle \varphi \quad (2.5)$$

Bagian real persamaan (2.5) merupakan daya nyata (P) dan bagian imajiner merupakan daya reaktif (Q), sehingga (El-Hawary, 2008):

$$P_{\text{fasa}} = |V| |I| \cos \angle \varphi \quad (2.6)$$

$$Q_{\text{fasa}} = |V| |I| \sin \angle \varphi \quad (2.7)$$

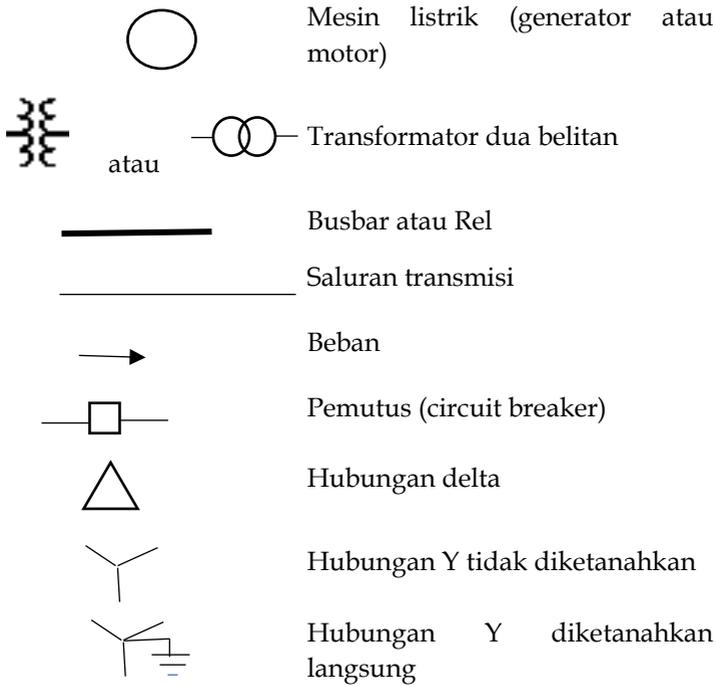
Daya tiga fasa adalah penjumlahan daya setiap fasa. Pada sistem tiga fasa yang seimbang, daya tiap fasa akan sama, sehingga daya tiga fasa sama dengan tiga kali daya satu fasa.

$$S = 3 S_{\text{fasa}} = 3 |V| |I| \cos \angle \varphi + j 3 |V| |I| \sin \angle \varphi \quad (2.8)$$

Daya reaktif akan positif jika φ positif yaitu arus tertinggal dari tegangan (lagging), dan daya reaktif akan negatif jika arus mendahului tegangan (leading).

2.3. Diagram Satu Garis

Sistem tenaga terdiri atas banyak sekali komponen, sehingga dalam penggambaran sistem tiga fasa tersebut perlu disederhanakan untuk memudahkan penggambaran dan juga memudahkan dalam memahami gambar sistem tenaga.



Gambar 2.4. Simbol komponen pada diagram satu garis

Disamping itu, sistem tenaga dalam kondisi normal bekerja dalam keadaan setimbang tiap fasanya, sehingga sistem tiga fasa dapat diwakili oleh gambar rangkaian satu fasa. Karena itu penggambaran sistem

tenaga lazimnya menggunakan diagram satu garis (*single line diagram*).

Pada diagram satu garis digunakan lambang-lambang standar untuk menunjukkan komponen sistem tenaga. Lambang-lambang tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4. Contoh sebuah diagram satu garis dari sebuah sistem tenaga sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sistem ini terdiri atas sebuah generator, dua transformator, satu saluran transmisi, dua busbar dan satu titik beban.



Gambar 2.5. Diagram satu garis sistem tenaga sederhana

Dengan menggunakan data dari diagram satu garis, analisa-analisa pada sistem tenaga dilakukan. Ada dua analisa yang paling mendasar pada sistem tenaga, yaitu analisa aliran daya dan analisa gangguan hubung singkat. Analisa aliran daya merupakan analisa sistem dalam kondisi normal. Dari hasil analisa aliran daya dapat diketahui tegangan diberbagai titik dalam sistem, arus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir diberbagai bagian sistem, juga rugi-rugi daya. Hasil perhitungan gangguan hubung singkat berupa besar arus gangguan yang mengalir di berbagai bagian sistem, juga tegangan di berbagai titik pada sistem.

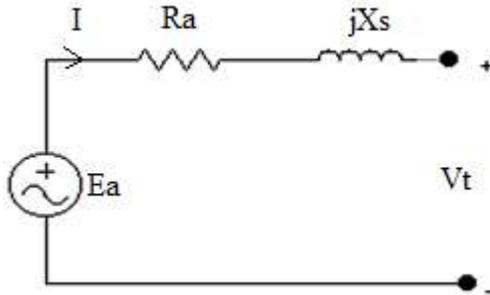
2.4. Model Komponen Sistem Tenaga

Untuk melakukan analisa-analisa di sistem tenaga, komponen sistem perlu dimodelkan. Pemodelan untuk analisa aliran daya lebih sederhana dari pada pemodelan untuk analisa gangguan hubung singkat. Pemodelan yang akan dibahas pada subbab ini adalah pemodelan untuk analisa gangguan hubung singkat.

2.4.1. Model Generator Sinkron

Generator sinkron adalah generator yang umumnya digunakan pada pembangkit-pembangkit konvensional seperti PLTA, PLTU, PLTG dan PLTN yang menggunakan turbin sebagai penggerak mula. Generator sinkron memiliki dua kumparan yaitu kumparan medan pada rotor dan kumparan armatur pada stator. Pada kumparan medan diberikan suplai arus DC untuk menghasilkan medan DC (eksitasi). Daya AC yang dibangkitkan generator dihasilkan pada kumparan armatur.

Rangkaian ekivalen generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.6. Tegangan terminal generator yaitu V_t . Tegangan yang diinduksi pada generator E_a sama dengan tegangan terminal V_t ditambah jatuh tegangan pada R_a dan X_s seperti ditunjukkan pada persamaan (2.9).



Gambar 2.6. Rangkaian ekivalen generator sinkron

$$V_t = E_a + I(R_a + jX_s) \quad (2.9)$$

Dimana :

V_t = tegangan terminal generator

E_a = tegangan internal (emf) pada generator

R_a = resistansi stator

X_s = reaktansi sinkron

I = arus generator

Nilai resistansi stator sangat kecil dibandingkan reaktansi sinkron, sehingga sering diabaikan untuk memudahkan perhitungan jika dilakukan secara manual. Sehingga persamaan (2.9) berubah menjadi persamaan (2.10)

$$V_t = E_a + I jX_s \quad (2.10)$$

Model untuk motor sinkron sama dengan generator sinkron, kecuali arah arusnya dibalik, karena

motor bukan menghasilkan arus listrik, tapi mengkonsumsi arus listrik. Akibatnya tanda negatif harus diberikan pada I di persamaan (2.9) dan (2.10).

2.4.2. Model Transformator

Transformator adalah alat untuk mengubah (menaikkan atau menurunkan) tegangan. Transformator terdiri atas dua atau lebih kumparan yang menggandeng sebuah inti besi untuk membuat jalur fluks. Pada transformator ideal, dimana diasumsikan tegangan pada terminal transformator sama dengan tegangan pada kumparan, maka akan diperoleh persamaan (2.11).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.11)$$

Dimana:

V_1 = tegangan pada terminal primer

V_2 = tegangan pada terminal sekunder

E_1 = tegangan pada kumparan primer

E_2 = tegangan yang diinduksikan pada kumparan sekunder

N_1 = jumlah lilitan pada kumparan primer

N_2 = jumlah lilitan pada kumparan sekunder.

Hubungan jumlah belitan dengan arus yang mengalir pada transformator diberikan pada persamaan (2.12)

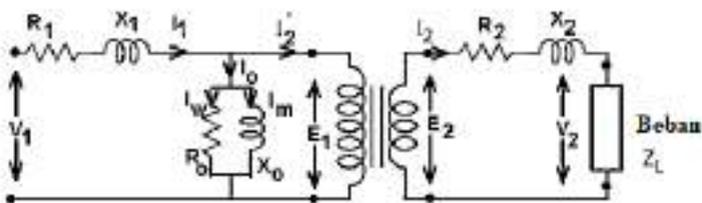
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.12)$$

Pada transformator ideal ini, daya pada sisi primer sama dengan daya pada sisi sekunder, seperti ditunjukkan pada persamaan (2.13).

$$V_1 I_1^* = V_2 I_2^* \quad (2.13)$$

Sehingga pada sisi tegangan tinggi akan diperoleh arus yang lebih rendah dibanding arus pada sisi tegangan rendah transformator.

Rangkaian ekivalen transformator ditunjukkan pada Gambar 2.7. Subskrip 1 menyatakan sisi primer, sedangkan subskrip 2 menyatakan sisi sekunder. R_1 dan R_2 masing-masingnya menyatakan resistansi belitan primer dan resistansi belitan sekunder. X_1 dan X_2 adalah reaktansi induktif belitan primer dan sekunder. V_1 adalah tegangan yang diinputkan dan V_2 adalah tegangan pada output trafo. I_1 adalah arus yang masuk disisi primer dan I_2 adalah arus yang keluar disisi sekunder.



Gambar 2.7. Rangkaian ekivalen transformator

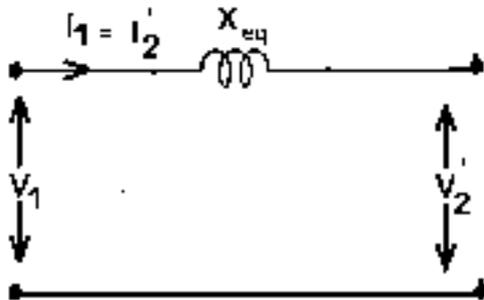
Arus yang masuk ke kumparan primer adalah I_2' dan memiliki hubungan dengan I_1 seperti ditunjukkan Gambar 2.7 dan persamaan (2.14).

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (2.14)$$

I_0 adalah arus eksitasi yang terdiri atas arus magnetisasi I_m dan komponen rugi-rugi inti besi, seperti ditunjukkan persamaan (2.15). R_0 adalah resistansi rugi-rugi inti besi, X_0 adalah reaktansi magnetisasi

$$I_0 = I_m + I_w \quad (2.15)$$

Namun untuk analisa di sistem tenaga rangkaian ekuivalen trafo mengalami penyederhanaan, dimana nilai-nilai impedansi yang relatif kecil diabaikan, sehingga yang tersisa, hanya reaktansi seri belitan primer ditambah belitan sekunder yang dibawa ke salah satu sisi (primer atau sekunder). Sehingga diperoleh rangkaian ekuivalen seperti Gambar 2.8 , dimana $X_{eq} = X_1 + X_2'$



Gambar 2.8. Rangkaian ekuivalen transformator yang disederhanakan

2.4.3. Model Saluran Transmisi

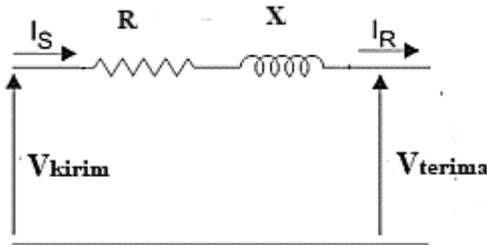
Saluran transmisi memiliki tiga parameter impedansi, yaitu resistansi, induktansi dan kapasitansi. Ketiga parameter ini tersebar merata di sepanjang saluran transmisi, sehingga nilainya dalam satuan per km panjang saluran. Resistansi saluran transmisi dipengaruhi material konduktor yang digunakan, luas penampang konduktor dan panjang konduktor. Induktansi saluran transmisi dipengaruhi arus yang mengalir pada saluran, sedangkan kapasitansi dipengaruhi oleh konfigurasi konduktor saluran.

Saluran transmisi dikelompokkan berdasarkan jaraknya (Grainger and Stevenson Jr, 1994):

- saluran pendek < 80 km
- saluran menengah 80-240 km
- saluran panjang > 240 km

Impedansi saluran transmisi (resistansi, reaktansi induktif, reaktansi kapasitif) merupakan parameter yang tersebar merata disepanjang saluran. Namun pada saluran pendek dan saluran menengah, parameter tersebut dapat dikumpul (terpusat) untuk memudahkan perhitungan, tanpa mengurangi tingkat ketelitian hasil perhitungan. Pada saluran panjang, perhitungan sebaiknya menggunakan nilai impedansi yang terdistribusi (konstanta tersebar), walaupun perhitungan terpusat masih dapat diterima hingga panjang saluran 320 km.

Rangkaian ekuivalen saluran transmisi pendek ditunjukkan pada Gambar 2.9. Pada representasi saluran pendek, hanya resistansi dan reaktansi induktif saja yang ada, sementara induktansi kapasitif dapat diabaikan karena nilainya sangat kecil.



Gambar 2.9. Rangkaian ekuivalen saluran transmisi pendek

Pada saluran transmisi pendek:

Arus kirim (I_S) sama dengan arus terima (I_R) :

$$I_S = I_R \quad (2.16)$$

Tegangan kirim adalah:

$$V_S = V_R + I_R(R + jX) \quad (2.17)$$

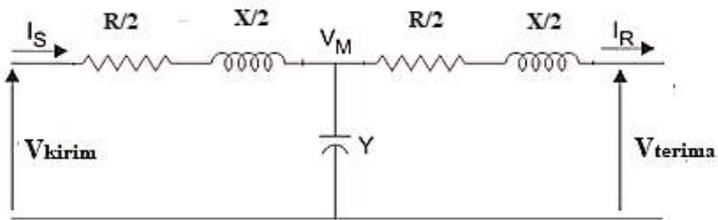
Dimana:

V_S = tegangan kirim

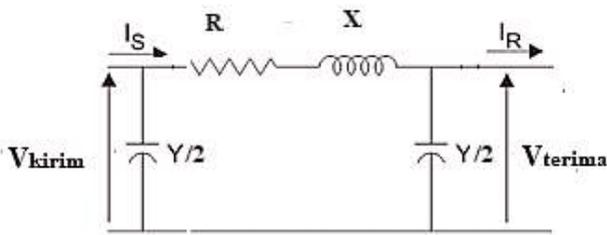
V_R = tegangan terima

Pada saluran menengah, reaktansi kapasitif tidak lagi diabaikan dan terhubung secara paralel (Saadat, 1999). Ada dua representasi saluran menengah yaitu

representasi T dan representasi π , seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. dimana komponen seri saluran yaitu $R + j X_L$ dan Y adalah komponen shunt saluran, yaitu $1/X_C$.



(a) Representasi T



(b) Representasi π

Gambar 2.10. Rangkaian ekivalen saluran transmisi menengah (a) representasi T, (b) representasi π

Persamaan untuk representasi π sebagai berikut, dimana impedansi seri adalah

$$Z = R + jX \quad (2.18)$$

Arus yang mengalir pada kapasitansi shunt ujung terima adalah $V_R Y/2$, dan arus yang melalui impedansi Z

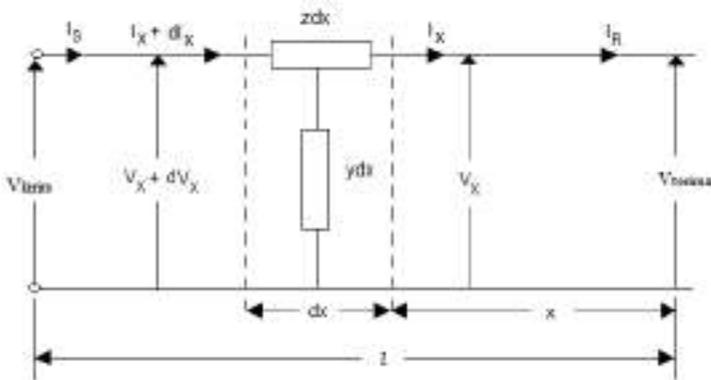
adalah $I_R + V_R Y/2$, sehingga dapat dihitung tegangan kirim yaitu:

$$V_s = (I_R + V_R Y/2)Z + V_R \quad (2.19)$$

Arus kirim dapat dihitung sebagai:

$$I_s = V_s \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.20)$$

Untuk perhitungan dengan ketelitian tinggi, model untuk saluran transmisi panjang tidak lagi dengan parameter terpusat, namun disesuaikan dengan kondisi realnya yaitu parameter tersebar. Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian ekuivalen saluran transmisi panjang dengan parameter tersebar.



Gambar 2.11. Rangkaian ekuivalen saluran transmisi panjang

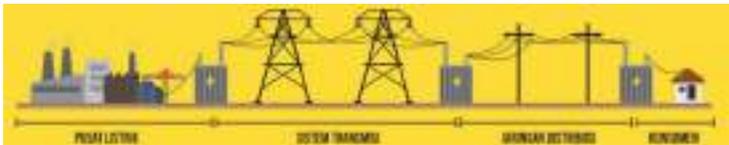
Jika ditinjau bagian yang sangat kecil dari panjang saluran transmisi pada Gambar 2.1, yaitu dx maka pada bagian tersebut impedansi seri adalah zdx

dan admitansi shunt adalah $y dx$. Perhitungan tegangan dan arus pada rangkaian ekivalen saluran transmisi panjang melibatkan persamaan differensial.

BAB III. PERENCANAAN SISTEM PEMBANGKITAN

3.1. Strategi dan Metodologi dalam Perencanaan Penambahan Kapasitas Pembangkit

Elemen infrastruktur listrik terdiri dari komponen utama, yaitu pembangkit listrik (pusat Listrik), sistem transmisi dan distribusi yang dikenal sebagai jaringan listrik, komponen sekunder disebut sebagai gardu listrik, dan akhirnya menuju konsumen listrik.



Gambar 3.1. Infrastruktur energi listrik

Tujuan dari perencanaan sistem pembangkit adalah untuk menentukan konfigurasi pembangkit yang optimal, yang memiliki NPV (*Net Present Value*) biaya listrik paling rendah (*least cost*) selama periode perencanaan, dan sesuai dengan standar keandalan yang ditetapkan. Untuk memenuhi permintaan listrik yang semakin meningkat dan memastikan pasokan listrik yang dapat diandalkan, penting untuk memiliki strategi perencanaan ekspansi kapasitas yang efektif.

Strategi ini harus mempertimbangkan faktor-faktor berikut:

1. Model dan tren permintaan listrik di masa depan yang diproyeksikan.

pemahaman yang menyeluruh tentang pola permintaan listrik yang berlaku, keterbatasan, dan tantangan masa depan sangat penting untuk perencanaan dan pengambilan keputusan ekspansi kapasitas yang efektif (Athukorala & Wilson, 2010). Dengan menganalisis data historis dan mempelajari faktor-faktor sosial-ekonomi, seperti pertumbuhan populasi, pengembangan industri, dan kemajuan teknologi, analis dapat memprediksi permintaan listrik di masa depan.

2. Sumber Daya Energi yang Tersedia

Penilaian sumber energi yang tersedia, seperti sumber energi terbarukan (solar, angin, hidrogen) dan bahan bakar fosil seperti batubara dan gas alam, diperlukan untuk menentukan potensi peningkatan kapasitas.

3. Perkembangan dan inovasi teknologi

Mengikuti kemajuan teknologi terbaru di sektor pembangkit listrik sangat penting untuk perencanaan ekspansi kapasitas. Teknologi dan inovasi baru dapat memiliki dampak yang signifikan pada efisiensi dan efektivitas biaya

pembangkit listrik, serta keberlanjutan lingkungan sistem.

4. Pertimbangan lingkungan

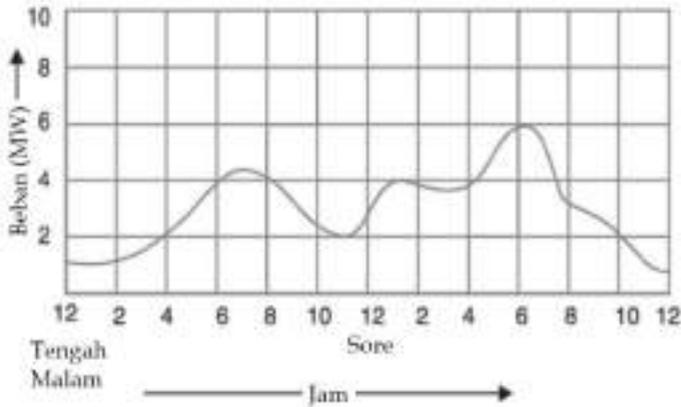
Perencanaan peningkatan kapasitas harus memperhitungkan dampak pada lingkungan dan bertujuan untuk meminimalkan emisi karbon dan polutan lainnya.

5. Kebijakan dan peraturan pemerintah

Perencanaan ekspansi kapasitas perlu disesuaikan dengan kebijakan pemerintah dan kerangka peraturan.

3.2. Perhitungan Beban Puncak

Perhitungan beban puncak dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapasitas pembangkit yang harus disediakan oleh sistem kelistrikan agar dapat melayani beban dengan keandalan yang tinggi. Perencanaan penambahan pembangkit harus mempertimbangkan pertumbuhan beban, faktor-faktor yang mempengaruhi beban, dan karakteristik beban pada sistem kelistrikan. Salah satu caranya dengan melakukan peramalan beban listrik.



Gambar 3.2. Kurva beban harian

Peramalan beban listrik adalah proses untuk mengestimasi kebutuhan daya listrik di masa depan berdasarkan data historis. Peramalan beban listrik sangat penting untuk perencanaan operasi dan pengembangan sistem listrik yang efisien dan andal. Beban listrik yang dilayani oleh sistem distribusi elektrik terdiri dari beberapa sektor, seperti perumahan, industri, komersial, dan usaha. Setiap sektor memiliki pola konsumsi energi yang berbeda-beda, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti aktivitas, cuaca, musim, dan lainnya. Sektor perumahan misalnya, memiliki pola pembebanan yang fluktuatif, karena konsumsi energi elektrik bergantung pada kebiasaan dan kebutuhan rumah tangga. Daya listrik dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$S = P + jQ \quad (3.1)$$

Dimana ; S = Daya Kompleks (VA), P = Daya Aktif (Watt) dan Q = Daya Reaktif (VAR)

3.2.1. Faktor Beban

Faktor beban adalah ukuran efisiensi penggunaan listrik dalam suatu periode waktu. Faktor beban dihitung dengan membagi beban rata-rata (dalam kilowatt) dengan beban puncak (dalam kilowatt) yang terjadi dalam periode yang sama. Semakin tinggi faktor beban, semakin baik, karena artinya beban listrik lebih merata dan pemanfaatan sumber daya lebih optimal. Sebaliknya, semakin rendah faktor beban, semakin buruk, karena artinya beban listrik lebih fluktuatif dan pemborosan energi lebih besar. Yang dijabarkan melalui persamaan berikut :

$$\text{Faktor beban} = \frac{\text{Beban rata-rata pada periode tertentu}}{\text{Beban puncak pada periode tertentu}} \quad (3.2)$$

3.2.2. Estimasi Beban

Estimasi beban adalah metode analisis data untuk meramalkan kebutuhan listrik di masa mendatang. Data yang dianalisis berasal dari riwayat pemakaian listrik dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi permintaan listrik, seperti cuaca, hari libur, atau kegiatan ekonomi. Estimasi beban membantu perusahaan listrik untuk merencanakan kapasitas produksi, mengatur jadwal operasi, dan mengoptimalkan pengelolaan sumber daya. Estimasi beban bisa dilakukan dalam berbagai skala waktu, mulai dari beberapa jam hingga beberapa tahun,

tergantung pada tujuan dan kebutuhan perusahaan listrik.

Untuk meramalkan kebutuhan energi listrik di masa depan, ada berbagai metode yang dapat digunakan sesuai dengan kondisi dan tujuan yang diinginkan. Beberapa metode yang umum digunakan adalah diffusi, regresi linear, model pertumbuhan logistik, dan lain-lain. Metode-metode ini dapat menghasilkan ramalan yang berbeda-beda tergantung pada faktor-faktor yang mempengaruhi permintaan listrik, seperti cuaca, hari libur, aktivitas ekonomi, dan sebagainya. Oleh karena itu, dalam praktiknya, seringkali diperlukan penggabungan antara pengetahuan ahli, data historis, dan analisis statistik untuk mendapatkan ramalan yang lebih akurat dan andal. Model estimasi yang dibuat harus bisa beradaptasi dengan perubahan-perubahan yang terjadi dan memberi informasi yang bermanfaat untuk membuat keputusan yang tepat (Mohammad et al., 2018).

3.2.3. Peramalan beban jangka pendek

Peramalan beban jangka pendek adalah proses untuk memprediksi besarnya kebutuhan daya listrik dalam rentang waktu beberapa jam hingga satu minggu. Peramalan beban jangka pendek sangat penting untuk perencanaan dan pengoperasian sistem kelistrikan agar dapat memenuhi permintaan listrik dengan efisien dan andal.

Ada berbagai metode yang digunakan untuk melakukan peramalan beban jangka pendek, seperti metode statistik, metode berbasis jaringan syaraf tiruan, metode berbasis mesin belajar, dan metode hibrid. Metode-metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, tergantung pada karakteristik data beban, faktor-faktor yang mempengaruhi beban, dan tingkat akurasi yang diinginkan.

Salah satu metoda yang sering digunakan dalam peramalan beban jangka pendek adalah regresi linier, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$y = a + bX \quad (3.3)$$

dimana y adalah beban listrik yang diramalkan, X adalah variabel independen yang mempengaruhi beban listrik, a adalah konstanta, dan b adalah koefisien regresi.

Rumus regresi linier didapat menggunakan metode *least square method*, yaitu:

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum y \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{\sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.5)$$

dimana n adalah jumlah data yang digunakan

3.2.4. Peramalan beban jangka menengah

Peramalan beban jangka menengah digunakan untuk memprediksi besarnya kebutuhan daya listrik dalam rentang waktu antara 3 bulan hingga 3 tahun.

Peramalan beban jangka menengah sangat penting untuk perencanaan dan pengembangan sistem kelistrikan agar dapat memenuhi permintaan listrik di masa depan dengan efektif dan efisien. Salah satu metoda yang sering digunakan untuk peramalan beban jangka menengah adalah rumus regresi linier berganda, yaitu:

$$y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (3.6)$$

dimana y adalah beban listrik yang diramalkan, X_1, X_2, \dots, X_n adalah variabel independen yang mempengaruhi beban listrik, a adalah konstanta, dan b_1, b_2, \dots, b_n adalah koefisien regresi.

3.2.5. Peramalan beban jangka Panjang

Peramalan beban jangka panjang adalah proses untuk memprediksi besarnya kebutuhan daya listrik dalam rentang waktu lebih dari 3 tahun. Peramalan beban jangka panjang sangat penting untuk perencanaan dan pengembangan sistem kelistrikan agar dapat memenuhi permintaan listrik di masa depan dengan efektif dan efisien.

Salah satu metoda sederhana yang sering digunakan untuk peramalan beban jangka panjang adalah rumus regresi eksponensial, yaitu:

$$y = a + b^x \quad (3.7)$$

y = beban listrik yang diramalkan

x = variabel independen yang mempengaruhi beban Listrik

a =konstanta

b = koefisien regresi.

3.3. Keandalan Sistem Tenaga

Keandalan sistem tenaga listrik adalah kemampuan menyediakan listrik ke seluruh konsumen sesuai dengan standar dan kuantitas yang diinginkan atau dapat diterima. Sistem Tenaga Listrik memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi karena dimensinya yang besar secara fisik dan distribusinya yang luas secara geografis. Selain itu, sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh adanya hubungan antara negara atau wilayah dan keterbatasan yang dimiliki oleh operator. Faktor lain yang mempengaruhi sistem tenaga listrik adalah energi listrik yang sulit disimpan secara efektif dan efisien dalam jumlah besar dan perilaku sistem yang tidak dapat diprediksi (“Introduction to Power System Reliability,” 2018).

Dua aspek penting yang sering diteliti dalam keandalan tenaga listrik adalah:

1. Kecukupan (*adequacy*); mengevaluasi apakah sistem memiliki fasilitas yang cukup untuk memenuhi permintaan sistem. Evaluasi ini biasanya dilakukan pada tahap perancangan.
2. Keamanan sistem (*security*); kemampuan sistem untuk menangani gangguan dengan cepat.

Untuk menghitung keandalan sistem tenaga, Anda dapat menggunakan beberapa indeks yang telah ditetapkan oleh standar IEEE 1366. Indeks-indeks tersebut adalah:

1. SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*): rata-rata jumlah gangguan berkelanjutan per konsumen sepanjang tahun. (Xiao et al., 2022)

$$SAIFI = \frac{(\text{Total jumlah gangguan berkelanjutan dalam setahun})}{(\text{Jumlah total konsumen})} \quad (3.8)$$

2. SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*): rata-rata durasi gangguan berkelanjutan per konsumen sepanjang tahun.

$$SAIDI = \frac{(\text{Total durasi gangguan berkelanjutan dalam setahun})}{(\text{Jumlah total konsumen})} \quad (3.9)$$

3. CAIFI (*Consumer Average Interruption Frequency Index*): rata-rata jumlah gangguan berkelanjutan per konsumen yang terganggu sepanjang tahun.

$$CAIFI = \frac{(\text{Total jumlah gangguan berkelanjutan dalam setahun})}{(\text{Jumlah total konsumen yang terganggu})} \quad (3.10)$$

4. CAIDI (*Consumer Average Interruption Duration Index*): rata-rata durasi gangguan berkelanjutan per konsumen yang terganggu sepanjang tahun.

$$CAIDI = \frac{(\text{Total durasi gangguan berkelanjutan dalam setahun})}{(\text{Total jumlah gangguan berkelanjutan dalam setahun})} \quad (3.11)$$

5. MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*): rata-rata jumlah gangguan sesaat per konsumen sepanjang tahun.

$$MAIFI = \frac{(\text{Total jumlah gangguan sesaat dalam setahun})}{(\text{Jumlah total konsumen})} \quad (3.12)$$

Indeks-indeks tersebut dapat dihitung dengan menggunakan data historis dari sistem tenaga listrik, seperti jumlah dan durasi gangguan, jumlah konsumen, dan jumlah konsumen yang terganggu. Indeks-indeks tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan kualitas pelayanan sistem tenaga listrik, serta untuk merencanakan strategi peningkatan keandalan sistem.

Penambahan kapasitas pembangkit dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga, asalkan dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan. Penambahan kapasitas pembangkit harus disesuaikan dengan perkiraan pertumbuhan beban, ketersediaan sumber energi, dan dampak lingkungan. Penambahan kapasitas pembangkit juga harus memperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan sistem tenaga, seperti:

1. *Loss of Load Probability* (LOLP)

Probabilitas kehilangan beban akibat kekurangan daya tersedia. Nilai LOLP yang rendah menunjukkan keandalan sistem tenaga yang tinggi. Penambahan kapasitas pembangkit dapat menurunkan nilai LOLP, asalkan pembangkit tersebut memiliki Forced Outage Rate (FOR) yang rendah dan dapat beroperasi secara

stabil. Untuk menghitung LOLP di gunakan persamaan berikut :

$$LOLP(t_n) = \sum_{j=1}^N P(C - L_j) \quad (3.13)$$

Di mana:

$LOLP(t_n)$ adalah probabilitas kehilangan beban pada periode t_n . C adalah kapasitas daya tersedia pada sistem tenaga listrik. L_j adalah beban pada jam ke- j . $P(C-L_j)$ adalah probabilitas bahwa kapasitas daya tersedia kurang dari beban pada jam ke- j .

Persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung LOLP pada sistem tenaga listrik yang terdiri dari N unit pembangkit dengan kapasitas dan tingkat kegagalan yang berbeda-beda. Rumus ini juga dapat dimodifikasi untuk memperhitungkan faktor-faktor lain, seperti interkoneksi, perawatan, dan cadangan.

2. *Expected Energy Not Supplied (EENS)*

Ekspektasi energi yang tidak tersuplai akibat kekurangan daya tersedia. Nilai EENS yang rendah menunjukkan keandalan sistem tenaga yang tinggi. Penambahan kapasitas pembangkit dapat menurunkan nilai EENS, asalkan pembangkit tersebut memiliki kapasitas yang cukup untuk memenuhi beban puncak dan beban rata-rata. Dengan persamaan sebagai berikut :

$$EENS = \sum_{i=1}^n E_i \cdot P_i \quad (3.14)$$

Dimana:

E_i = jumlah energi yang tidak dapat disuplai pada kondisi ke- i . P_i = probabilitas terjadinya kondisi ke- i . n = jumlah kondisi yang mungkin terjadi.

3. Arus hubung singkat

Arus yang terjadi akibat adanya hubungan antara dua atau lebih titik pada sistem tenaga yang memiliki beda potensial. Arus hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan dan gangguan pada sistem tenaga. Penambahan kapasitas pembangkit dapat meningkatkan arus hubung singkat, terutama jika pembangkit tersebut terhubung pada bus yang memiliki impedansi rendah. Oleh karena itu, penambahan kapasitas pembangkit harus disertai dengan peningkatan proteksi dan koordinasi sistem tenaga.

3.4. Analisis Biaya

Analisis biaya penambahan kapasitas pembangkit listrik adalah suatu proses untuk menghitung dan membandingkan biaya yang diperlukan untuk meningkatkan kapasitas produksi listrik dari suatu pembangkit listrik. Biaya ini meliputi biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya bahan bakar, dan biaya lingkungan. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan apakah penambahan kapasitas pembangkit listrik tersebut layak secara ekonomi dan teknis.

1. Analisis Analisis ekonomi kelayakan investasi

Merupakan proses penilaian yang dilakukan untuk mengecek kelayakan finansial dari suatu proyek investasi. Analisis ini meliputi perhitungan biaya investasi, perkiraan pendapatan, biaya operasional, dan tingkat penghasilan investasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelayakan investasi antara lain adalah tingkat bunga, inflasi, risiko, dan masa pakai proyek. Beberapa metode yang sering digunakan dalam analisis ekonomi kelayakan investasi adalah:

- *Net Present Value* (NPV): Selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar yang terkait dengan proyek. NPV positif menunjukkan bahwa proyek layak, sedangkan NPV negatif menunjukkan bahwa proyek tidak layak (Wetekamp, 2011). Dengan persamaan sebagai berikut:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3.15)$$

Dimana :

C_t adalah arus kas bersih pada periode t . r adalah tingkat diskonto atau suku bunga (dalam persen). n adalah jumlah periode arus kas (dalam tahun)

- *Internal Rate of Return* (IRR): Tingkat bunga yang membuat NPV proyek menjadi nol. IRR yang lebih besar dari tingkat bunga minimum yang diharapkan menunjukkan bahwa proyek layak, sedangkan IRR yang lebih kecil menunjukkan bahwa proyek tidak layak.

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (i_2 - i_1) \quad (3.16)$$

Dimana:

i_1 adalah tingkat diskonto yang menghasilkan NPV positif. i_2 adalah tingkat diskonto yang menghasilkan NPV negatif. NPV_1 adalah Net Present Value pada tingkat diskonto i_1 . NPV_2 adalah Net Present Value pada tingkat diskonto i_2

- *Payback Period* (PBP): Waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi awal dari proyek. PBP yang lebih pendek dari batas waktu yang ditetapkan menunjukkan bahwa proyek layak, sedangkan PBP yang lebih panjang menunjukkan bahwa proyek tidak layak.
- *Benefit-Cost Ratio* (B-CR): Perbandingan antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar yang terkait dengan proyek. B-CR yang lebih besar dari satu menunjukkan bahwa proyek layak, sedangkan B-CR yang lebih kecil dari satu menunjukkan bahwa proyek tidak layak.

Untuk menerapkan metode-metode tersebut, diperlukan data-data seperti biaya investasi, biaya operasional, pendapatan, tingkat bunga, inflasi, dan masa pakai proyek. Data-data tersebut dapat diperoleh dari studi kelayakan, analisis pasar, analisis teknis, analisis lingkungan, dan analisis manajemen.

2. Analisis Biaya Operasi Pembangunan

Analisis biaya operasi penambahan kapasitas pembangkit diperlukan untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dari proyek peningkatan kapasitas pembangkit listrik dan menentukan apakah biaya operasi penambahan kapasitas lebih rendah daripada biaya alternatif. Salah satu metode untuk menghitung biaya operasi pembangkitan listrik per kWh dari teknologi pembangkit yang dipilih yaitu menggunakan metode *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) yang merupakan ukuran rata-rata biaya saat ini dari pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh suatu aset selama masa pakainya dengan persamaan nya:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3.17)$$

BAB IV. DESAIN DAN OPERASI JARINGAN TRANSMISI

Jaringan transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pusat pembangkit listrik ke sistem distribusi menuju konsumen. Jaringan transmisi umumnya digunakan untuk mengirimkan tenaga listrik yang memiliki kapasitas besar untuk jarak yang relatif jauh. Pentransmisia tenaga listrik disalurkan melalui melalui tiga jenis saluran transmisi yang banyak digunakan, yaitu saluran udara (*overhead lines*), saluran kabel tanah (*underground lines*) dan saluran kabel bawah laut (*submarine lines*), dengan berbahan konduktor yang mengalirkan listrik. Di Indonesia, konstruksi transmisi secara umum, terdiri atas penggunaan kabel udara dan kabel bawah tanah untuk *low voltage* (tegangan rendah) dengan kisaran 115.000-1.100.00 VAC, *middle voltage* (tegangan menengah) dengan kisaran 2.400-69.000 VAC, dan *high voltage* (tegangan tinggi) dengan kisaran 240-600 VAC.

Saluran udara memiliki keunggulan dalam aspek ekonomis jika dibandingkan dengan saluran kabel tanah yang lebih mahal pada biaya instalasi, namun saluran udara memiliki keunggulan dalam aspek teknis, seperti bahaya petir, cuaca buruk, pohon tumbang, dan sebagainya. Saluran udara paling banyak digunakan, selain lebih murah dalam instalasi, saluran udara lebih

mudah dalam perawatan dan pengawasan. Saluran bawah tanah menggunakan kabel berisolasi yang lebih mahal, dan instalasi rumit, namun memiliki nilai estetika. Standar transmisi tegangan 70kV, dan 150kV di Indonesia paling banyak ditemukan dan digunakan, terutama di Pulau Jawa.

Syarat yang perlu diperhatikan dalam menetapkan jenis jaringan transmisi antara lain, jumlah tenaga listrik yang dialirkan, jarak dan jenis area yang dilalui, biaya instalasi dan proyeksi kebutuhan tenaga listrik di masa depan.

Saluran transmisi, penyaluran dan pusat pelayanan beban, serta gardu induk merupakan komponen penting dalam sistem jaringan transmisi. Terdapat tiga jenis jaringan transmisi, yaitu:

1. Jaringan transmisi jarak pendek,

Jaringan transmisi 30 kV dan 70 kV yang memiliki panjang kurang dari 80km.

2. Jaringan transmisi jarak menengah

Saluran transmisi 70 KV dan 150 KV yang memiliki panjang antara 80 – 240 km.

3. Jaringan jarak jauh.

Saluran transmisi 500kV yang memiliki panjang lebih dari 240km.

Berdasarkan tegangannya, jaringan transmisi dideskripsikan menjadi tiga, yaitu:

4.1. SUTET

SUTET atau saluran udara tegangan ekstra tinggi merupakan saluran tenaga listrik yang mempunyai kapasitas tegangan antara 275 kV hingga 800 kV. Saluran transmisi di Indonesia secara umum memiliki kapasitas 500 kV yang digunakan untuk transmisi listrik jarak jauh dengan mengalirkan listrik dari pusat pembangkit listrik menuju pusat beban menggunakan kawat telanjang (*bare conductor*) di udara. Saluran ini terdiri dari satu atau lebih konduktor yang terpasang di menara atau *tower*.



Gambar 4.1. SUTET Kapasitas 500 kV (Sumber: Kumparan, 2021)

SUTET dengan kapasitas 500kV paling banyak ditemukan di pulau Jawa. Tujuan dari pembuatan sistem pembangkit 500 kV adalah untuk mengurangi jatuh tegangan pada penampang konduktor di saluran transmisi semaksimal mungkin untuk menjamin pengoperasian yang efektif dan efisien. SUTET lebih unggul dibandingkan dengan SUTT dalam aspek ekonomi. SUTET memiliki kapasitas pentransmisian tenaga listrik yang lebih besar dibandingkan SUTT dengan ukuran kawat konduktor yang sama.

Keunggulan dari SUTET adalah pendistribusian listrik dapat dilakukan secara efisien, sehingga tenaga listrik dapat disalurkan dengan baik. SUTET sendiri memiliki kekurangan, salah satunya dalam hal pembangunan. Konstruksi menara atau tower yang besar dan tinggi memerlukan tanah yang luas, banyak insulasi sehingga membuat biaya instalasi tinggi. Selain itu, permasalahan sosial juga berdampak pada masalah biaya pengembangan area atau wilayah lokasi SUTET.

4.2. SUTT

SUTT atau saluran udara tegangan tinggi merupakan saluran tenaga listrik yang memiliki kapasitas antara 70kV hingga 150kV yang menggunakan kawat telanjang (*bare conductor*) di udara untuk transmisi listrik antar wilayah atau dapat disebut juga dengan jaringan transmisi menengah. Saluran ini sering terganggu akibat adanya bahaya petir yang dapat mengakibatkan kenaikan tegangan sehingga merusak peralatan yang digunakan sebagai pendukung

penyaluran tenaga listrik. Saluran ini beroperasi secara parsial, dengan jarak paling efektif adalah 100km. jarak transmisi lebih dari 100km akan menyebabkan tegangan jatuh (*drop voltage*) terlalu besar, sehingga tegangan diujung transmisi menjadi rendah. Badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI) telah memberikan rekomendasi ruang bebas pada SUTT berupa daerah yang dibentuk oleh jarak bebas minimum secara vertikal dan horizontal. Manusia atau makhluk hidup lain dan bangunan tidak boleh ada di dalam ruang bebas ini.



Gambar 4.2. SUTT Kapasitas 150 kV
Gambar (Sumber: RRI, 2022)

SUTT dan SUTET dapat diilustrasikan sebagai sarana yang mentransmisikan tenaga listrik dari pusat pembangkit menuju gardu induk (GI) atau gardu induk tegangan ekstra tinggi (GITET) dan atau dari gardu induk

atau gardu induk tegangan ekstra tinggi lainnya melalui menara atau tower berisulator pada sistem tegangan tinggi yang mempunyai kapasitas 30kV, 70kV, dan 150kV atau tegangan ekstra tinggi yang mempunya kapasitas 275kV dan 500kV.

Tanpa SUTT atau jaringan transmisi lainnya, tenaga listrik sulit menjangkau konsumen atau pelanggan, kecuali jika pembangkit terletak di dekat lokasi operasional.

4.3. SUTTAS

SUTTAS atau saluran udara tegangan arus searah merupakan saluran tenaga listrik yang menggunakan penghantar telanjang (*bare conductor*) udara dengan tegangan 250 kV dan 500 kV dan terdiri dari tegangan positif, negatif atau kombinasi dari kedua tegangan tersebut. Saluran ini menyalurkan tenaga listrik dengan tegangan dan arus searah. Pada pembangkit tenaga listrik, keluaran trafo *step-up* memerlukan penyearah yang mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah. Dalam hal ini, gardu induk juga memerlukan inverter, yaitu alat yang mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik sehingga dapat bekerja dengan trafo *step-down*. Kedua peralatan ini membuat instalasi saluran transmisi DC menjadi lebih kompleks dan mahal, namun transmisi DC lebih ekonomis bila daya yang ditransmisikan besar dan jarak transmisi jauh karena rugi-rugi daya dan penurunan tegangan relatif kecil.

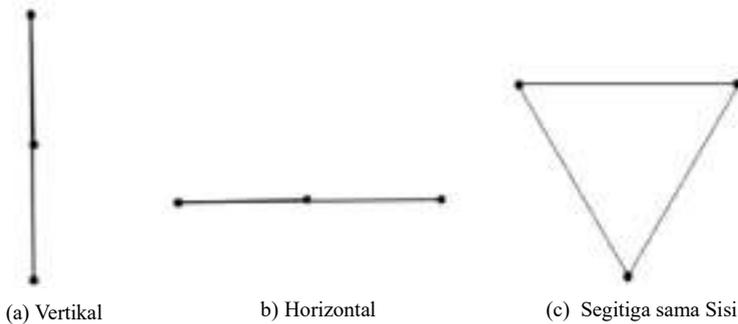
Desain jaringan transmisi memiliki beberapa hal yang perlu diperhatikan, antara lain:

- a) Besarnya daya yang disalurkan
- b) Jarak dan area yang dilalui
- c) Anggaran
- d) Proyeksi beban di masa yang akan datang

Konfigurasi saluran transmisi dibagi menjadi dua, yaitu:

- a. Rangkaian tunggal

Pada saluran transmisi ini memiliki tiga konfigurasi, yaitu vertikal, horizontal, dan segitiga sama sisi.



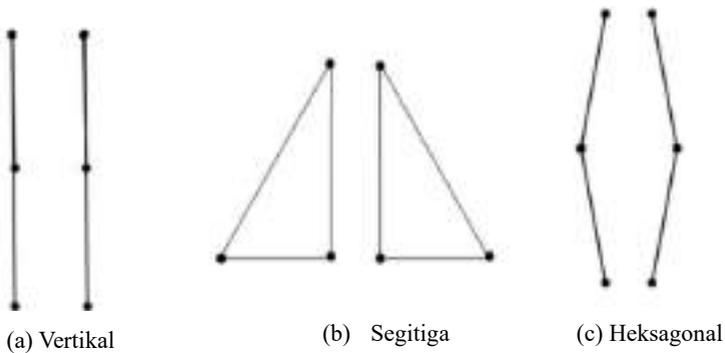
Gambar 4.3. Konfigurasi Rangkaian Tunggal (Sumber: Transmisi Daya Listrik, 2013)

Jarak pemisah antar konduktor sama besarnya atas ketiga kawat fasa dengan ketinggian yang sama pada konfigurasi horizontal, sedangkan ketiga kawat fasa yang tersusun menggunakan konfigurasi vertikal

memiliki jarak pemisah antar konduktor yang sama besarnya. Susunan ketiga kawat fasa sama besar dengan jarak fasanya pada konfigurasi segitiga sama sisi yang tersusun sesuai dengan nama konfigurasinya

b. Rangkaian Ganda

Saluran transmisi rangkaian ganda memiliki tiga konfigurasi, antara lain konfigurasi vertikal, segitiga sama sisi, dan heksagonal. Urutan fasa pada konfigurasi rangkaian ganda secara umum berkebalikan antara sisi penyalur satu dengan sisi penyalur yang lain.



Gambar 4.4. Konfigurasi Rangkaian Ganda (Sumber: Transmisi Daya Listrik, 2013)

BAB V. TEKNOLOGI DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

5.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah tahap dalam sistem tenaga listrik yang bertanggung jawab untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber produsen ke konsumen. Fungsi utama sistem distribusi adalah mengatur tegangan listrik, yang dilakukan melalui penggunaan transformator untuk menyesuaikan tegangan transmisi sesuai kebutuhan. Sistem distribusi ini memainkan peran penting dalam memastikan tenaga listrik dapat mencapai berbagai wilayah dan digunakan secara efisien oleh pengguna akhir. Tujuan dari setiap sistem distribusi adalah untuk menyampaikan daya ke beban dengan aman dan ekonomis (Murty, P. S. R., 2017).

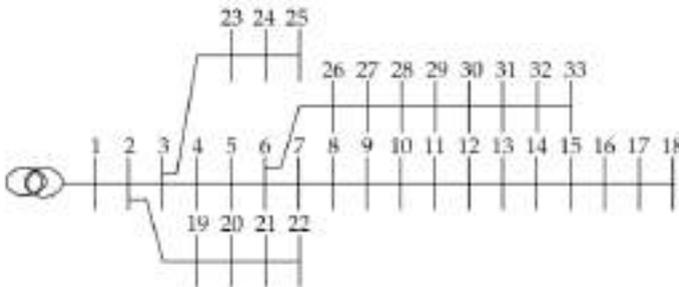
5.2. Konfigurasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Konfigurasi jaringan sistem distribusi merujuk pada susunan atau tata letak jalur distribusi tenaga listrik. Beberapa jenis konfigurasi jaringan distribusi mencakup:

5.2.1. Struktur Jaringan Radial

Struktur jaringan radial merupakan konfigurasi jaringan distribusi yang paling umum digunakan karena tidak ada *loop* tertutup (Mehta and Mehta, 2005).

Topologi jaringan ini merupakan topologi yang paling sederhana dan termurah, namun jika suatu saluran terputus karena alasan apa pun, semua saluran hilir tidak dapat disuplai. Konfigurasi radial terdiri dari generator pada titik awal yang terhubung ke pusat beban melalui trafo distribusi. Salah satu contoh jaringan distribusi radial ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Jaringan distribusi radial 33 bus (Taher and Afsari, 2012).

Konfigurasi ini mempunyai skema proteksi sirkuit yang sederhana dalam desain dan koordinasi, serta mudah untuk menemukan persyaratan rating sistem (Bayindir et al., 2014). Manfaat lain dari konfigurasi ini adalah teknik kompensasi tegangan, seperti penggunaan kompensator daya reaktif, yang dapat diimplementasikan dengan mudah. Konfigurasi radial terkenal dengan strukturnya yang sederhana dan biaya awal yang rendah, menjadikannya berguna untuk pembangkitan tegangan rendah. Kelebihan ini khususnya terasa ketika gardu induk berada dekat

dengan beban, memudahkan analisis dan pengoperasian sistem (Willis, 2004).

Salah satu kelemahan konfigurasi ini adalah terbatasnya fleksibilitas dalam merencanakan pemasangan generator baru atau beban tambahan. Hal ini memerlukan kabel baru atau pemasangan komponen tambahan, sehingga meningkatkan biaya proyek. Dalam konfigurasi ini, pengguna bergantung pada satu feeder atau distributor, dan kesalahan pada jaringan dapat menyebabkan gangguan pasokan listrik ke semua pengguna yang terhubung ke *feeder* (Isermann, 2006).

Ketersediaan daya untuk setiap beban mungkin lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya karena rumitnya pemeliharaan pengoperasian. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan rute alternatif dengan sirkuit redundan, di mana setidaknya dua sirkuit harus beroperasi secara bersamaan dari sumber ke beban tertentu (Prakash et al., 2016).

5.2.2. Struktur Jaringan Ring/Loop/Mesh

Konfigurasi jaringan distribusi ring, loop, atau mesh mengadopsi struktur cincin yang dimulai dari generator, melewati berbagai beban, dan kembali ke generator. Artinya, semua bus dalam konfigurasi loop dihubungkan sedemikian rupa sehingga membentuk struktur loop tertutup yang menyediakan daya untuk satu atau lebih trafo distribusi atau beban dan kembali ke gardu induk yang sama (Kaipia et al., 2006). Dalam konfigurasi ini, loop harus memenuhi semua persyaratan

Jaringan distribusi berbentuk cincin dengan banyak loop dikenal sebagai konfigurasi multi-ring atau multi-loop. Konfigurasi ini menawarkan fleksibilitas besar dalam pemeliharaan atau saat terjadi kesalahan, karena berbagai jalur transfer daya mungkin tersedia. Namun, keberagaman jalur tersebut juga membuat perlindungan jaringan menjadi rumit, sulit menentukan lokasi kesalahan, dan mengambil tindakan yang sesuai untuk meminimalkan dampaknya (Sortomme et al., 2010; Saleh, 2014; Haj-Ahmed dan Illindala, 2015). Pengambilan keputusan untuk mengisolasi kesalahan memerlukan pertimbangan optimal tergantung pada kondisi operasional (Plesnick et al., 2000).

Konfigurasi cincin, khususnya di daerah pemukiman, memungkinkan aliran arus listrik ke berbagai arah, mengurangi rugi daya, dan meningkatkan stabilitas tegangan (Reed et al., 2012). Struktur cincin membentuk loop tertutup melalui penggabungan bus, menciptakan beberapa zona perlindungan. Kinerja konfigurasi cincin lebih unggul daripada konfigurasi radial karena tidak terpengaruh oleh penambahan perangkat tambahan ke jaringan. Bahkan saat ada kesalahan atau pemeliharaan pada penyulang, distributor cincin tetap dapat dienergikan oleh penyulang lain, menjaga kelangsungan pasokan listrik ke pengguna (Kishorbha dan Mangroliya, 2015). Meskipun memiliki beberapa kelemahan, seperti ketergantungan pada kabel dan biaya yang tinggi, konfigurasi cincin tetap lebih unggul dalam kapasitas

hosting jaringan dibandingkan konfigurasi radial (Willis, 2004).

5.3. Otomatisasi Pada Sistem Distribusi

Otomatisasi sistem distribusi (OSD) tenaga listrik adalah penerapan teknologi pada instalasi multifitur dengan rentang kendali, pengoperasian, perencanaan, peralihan, dan masalah kinerja sistem yang lebih luas untuk personel utilitas. Setiap perangkat menyediakan fungsionalitas SCADA tertentu, mendukung operasi kontrol sistem, mencakup deteksi kesalahan, mengumpulkan data perencanaan, dan mencatat informasi kualitas daya. Perangkat ini biasanya terdapat di gardu induk tenaga listrik dan di lokasi tertentu di sepanjang saluran transmisi. Kemampuan multifitur pada perangkat OSD meningkatkan kemampuannya untuk digunakan dalam sistem tenaga listrik (Sayed & Gabbar, 2017).

Beberapa aspek otomatisasi pada sistem distribusi melibatkan:

1. Pemantauan Jarak Jauh: Sistem otomatisasi memungkinkan pemantauan peralatan distribusi dari jarak jauh, memungkinkan identifikasi cepat masalah dan perawatan preventif.
2. Pengumpulan Data: Automasi memungkinkan pengumpulan data yang akurat terkait dengan performa sistem distribusi, memfasilitasi analisis dan pengambilan keputusan yang lebih baik.

3. Kontrol Otomatis: Sistem otomatisasi dapat merespons secara otomatis terhadap perubahan beban atau kondisi jaringan, memastikan distribusi listrik tetap efisien dan andal (Souran & Safa, 2015).
4. Analisis dan Optimalisasi: Otomatisasi memungkinkan analisis dan optimisasi sistem distribusi, termasuk pengelolaan aliran daya, identifikasi kegagalan, dan perbaikan keandalan (Gers, 2013).

Otomatisasi pada sistem distribusi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan responsibilitas operasional. Hal ini dapat mencakup implementasi perangkat lunak pintar, sensor cerdas, dan sistem kontrol yang terkoneksi secara digital (Kiswantonono et al., 2021).

5.4. SCADA Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Manajemen Energi (SME) menangani energi listrik dari gardu transmisi/distribusi ke berbagai jenis beban dengan menggunakan kabel dan saluran transmisi tegangan tinggi/menengah. Sebagian besar utilitas distribusi tenaga listrik bergantung pada tenaga kerja manual untuk melaksanakan tugas-tugas jaringan distribusi, seperti menyambung atau memutus daya ke beban, menghilangkan gangguan, memulihkan layanan, dan melakukan pembacaan tegangan dan arus dengan observasi setiap jam. Implementasi SCADA (*Super Visory*

Gambar 5.3. SCADA Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Sayed & Gabbar, 2017).

Perangkat akuisisi data seperti RTU atau PLC (*Programmable Logic Controllers*) di gardu listrik terus memonitor CB gardu induk dan trafo, lalu mentransfer data ini ke komputer utama sistem SCADA terpusat. Ketika terjadi pemadaman listrik, sistem SCADA mendeteksi jenis dan lokasi gangguan tanpa perlu menunggu panggilan pelanggan. SCADA memberikan alarm jika titik kendali melebihi atau melanggar batas. Peristiwa dan alarm diteruskan ke operator untuk diidentifikasi dan dianalisis, tergantung pada kondisi operasi jaringan. SCADA di gardu induk secara otomatis mengontrol CB, trafo, *bus coupler*, dan sakelar pembumian jika melampaui batas parameter; sehingga, pemeriksaan terus-menerus terhadap status dan parameter jaringan dilakukan secara berkala tanpa keterlibatan pekerja lapangan. Beberapa fungsi SCADA dalam sistem distribusi tenaga listrik melibatkan (Sayed & Gabbar, 2017):

- Meningkatkan kualitas daya dengan memperbaiki faktor daya dan kandungan harmonisa.
- Membatasi permintaan beban puncak.
- Pemantauan dan pengendalian real-time jaringan listrik.

- Trending dan alarm untuk memungkinkan penyelesaian masalah pemadaman listrik.
- Pengarsipan data historis.
- Respon cepat terhadap panggilan layanan pelanggan.
- Kontrol motor dan integrasi dengan SCADA.
- Algoritma kontrol daya.
- Pelepasan beban dan pemulihan beban.

5.5. Meningkatkan Efisiensi Sistem Distribusi.

Beberapa teknik yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik antara lain; Rekonfigurasi Jaringan: Melibatkan penyesuaian konfigurasi jaringan distribusi untuk mengoptimalkan aliran daya dan mengurangi rugi-rugi daya (Syahputra & Soesanti, 2020).

Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah suatu proses di mana susunan fisik dan topologi dari saluran distribusi listrik diubah untuk mengoptimalkan kinerja jaringan dengan membuka dan menutup saklar. Tujuan utamanya adalah mengurangi rugi daya, memenuhi permintaan pelanggan (Ushashree et al., 2023), meningkatkan keandalan pasokan, dan memperbaiki kualitas layanan (Tran The et al., 2020).

Beberapa metode dan algoritma digunakan dalam rekonfigurasi jaringan distribusi, dan ini sering melibatkan pembukaan dan penutupan saklar untuk membentuk struktur jaringan baru.

Dengan rekonfigurasi jaringan distribusi, sistem dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas layanan listrik secara keseluruhan.

1. **Optimisasi Multi-Objektif:** Optimisasi multi-objektif pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan suatu pendekatan yang mempertimbangkan beberapa tujuan sekaligus untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja jaringan distribusi. Dalam penelitian oleh R. Syahputra tahun 2020, judulnya "Optimisasi Multi-objektif pada Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik dengan Integrasi Pembangkit Terdistribusi Menggunakan Metode Sistem Kekebalan" mencakup integrasi pembangkit terdistribusi dan menggunakan metode sistem kekebalan untuk merancang rekonfigurasi jaringan distribusi dengan lebih optimal (Syahputra & Soesanti, 2020).
2. **Efisiensi Energi Listrik:** Upaya meningkatkan efisiensi dalam penggunaan energi listrik, termasuk pengaturan sistem instalasi dan pemasangan peralatan listrik yang optimal (Setya & Agung, 2017).

3. Analisis Rugi Daya: Melalui analisis rugi daya, dapat diidentifikasi dan diatasi masalah yang menyebabkan rugi daya pada jaringan distribusi (Muhtar et al., 2021).

Analisis rugi daya pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan evaluasi terhadap kehilangan energi yang terjadi selama proses penyaluran. Beberapa aspek yang dianalisis meliputi:

- a. Penyebab Rugi Daya: Rugi daya disebabkan oleh panas yang dihasilkan akibat hambatan dalam kabel dan peralatan distribusi, serta komponen lainnya seperti transformator dan switch (Kurniati A & S, 2016).
- b. Dampak Ketidakseimbangan Fasa: Pembebanan yang tidak seimbang antara ketiga fasa sistem dapat menyebabkan rugi-rugi daya. Analisis melibatkan evaluasi distribusi beban secara merata (Kurniati A & S, 2016).
- c. Kondisi Sebelum dan Sesudah: Analisis dapat melibatkan perbandingan kondisi rugi daya dan jatuh tegangan sebelum dan sesudah perbaikan atau rekonfigurasi jaringan distribusi (Husu et al., 2019).
- d. Perhitungan Rugi Daya: Penghitungan rugi daya pada objek sistem distribusi melibatkan analisis menggunakan data kelistrikan dan

parameter teknis lainnya (Rachmat & Taufik , 2020).

- e. Upaya Mengatasi Rugi Daya: Penelitian juga fokus pada cara mengatasi rugi daya, seperti rekonfigurasi jaringan distribusi untuk meningkatkan efisiensi (Muhtar et al., 2021).

4. Optimisasi Penggunaan Peralatan:

Optimisasi penggunaan peralatan pada sistem distribusi tenaga listrik adalah suatu pendekatan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan performa keseluruhan jaringan distribusi.

Beberapa aspek optimisasi melibatkan:

- a. Penempatan *Recloser*: Penelitian menunjukkan bahwa penempatan yang optimal dari peralatan seperti recloser pada sistem distribusi dapat meningkatkan keandalan jaringan dengan mengurangi waktu pemadaman dan mempercepat pemulihan (D et al., 2017)
- b. Optimasi Kapasitas *Distributed Generation* (DG): Penggunaan algoritma optimasi seperti *Ant Colony Optimization* digunakan untuk menentukan kapasitas optimal *Distributed Generation* (DG) pada sistem distribusi, dengan tujuan mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi (F. Hia et al., 2015)

- c. Optimalisasi LBS *Motorized Key Point*: Peningkatan keandalan dapat dicapai dengan optimalisasi peralatan seperti *Motorized Load Break Switch* (LBS) pada jaringan distribusi (Sukadana & Suartika, 2019).
- d. Optimalisasi Kinerja Proteksi Recloser: Pemahaman yang mendalam terhadap kinerja proteksi *recloser* pada jaringan distribusi dapat ditingkatkan melalui optimalisasi, memastikan reaksi yang cepat terhadap gangguan (Waritza et al., 2023).

Setiap teknik ini diarahkan untuk meningkatkan efisiensi, menurunkan rugi daya, dan mengoptimalkan kinerja sistem distribusi tenaga listrik.

5.6. Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Keandalan dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah parameter penting untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik kepada konsumen. Tingkat keandalan mencerminkan seberapa baik sistem distribusi dapat mengatasi gangguan dan pemadaman dalam periode waktu tertentu. Beberapa aspek analisis keandalan sistem distribusi melibatkan:

1. Indeks Keandalan: Indeks keandalan, seperti yang diukur dalam analisis nilai indeks keandalan sistem jaringan distribusi, adalah besaran yang membandingkan penampilan suatu sistem distribusi, dan ini menjadi faktor kunci

untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik (Arifani & Winarno, 2013).

2. Analisis Gangguan dan Pemadaman: Suatu sistem distribusi dianggap andal jika dapat mengatasi gangguan dan pemadaman dalam periode waktu tertentu, dan analisis ini memberikan gambaran seberapa baik sistem dapat memenuhi kebutuhan listrik konsumen (Setiawan et al., 2021).
3. Peran Sistem Keandalan: Sistem keandalan pada jaringan distribusi memiliki peran besar dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik pada setiap konsumen, dan analisis keandalan bertujuan untuk memastikan ketersediaan pasokan listrik secara terus-menerus (Imran, 2019).

5.6.1. Indeks Keandalan Jaringan Distribusi.

Indeks keandalan dalam jaringan distribusi listrik adalah parameter kritis yang mengukur sejauh mana sistem dapat memberikan pasokan listrik yang dapat diandalkan kepada pelanggan. Beberapa indeks keandalan umum dalam konteks jaringan distribusi termasuk:

1. *Failure Rate*: Tingkat kegagalan mengukur frekuensi gangguan atau kegagalan dalam jaringan distribusi. Ini dapat dievaluasi untuk menentukan seberapa sering gangguan terjadi (Sucita et al., 2018).

2. *Reliability Index*: Indeks keandalan memberikan gambaran holistik tentang kinerja jaringan distribusi. Ini dapat mencakup berbagai parameter, seperti waktu pemulihan dan tingkat kegagalan (Ali et al., 2017).
3. SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*): Indeks ini mengukur rata-rata frekuensi gangguan per pelanggan dalam suatu periode waktu tertentu.
4. SADI (*System Average Duration of Interruption Index*): Menunjukkan rata-rata durasi gangguan per pelanggan dan memberikan gambaran tentang seberapa lama pelanggan mengalami gangguan

Indeks-indeks ini memberikan pemahaman mendalam tentang keandalan jaringan distribusi, membantu operator untuk mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan, dan memastikan pelayanan listrik yang lebih handal kepada pelanggan. Evaluasi keandalan jaringan distribusi melibatkan perhitungan matematis yang mempertimbangkan data gangguan dan waktu pemulihan.

BAB VI. Manajemen Aset & Pemeliharaan Sistem

6.1. Pendahuluan

Jaringan sistem tenaga listrik terdiri dari berbagai komponen listrik yang berinterkoneksi, termasuk stasiun pembangkit listrik dan substation, yang terkoneksi melalui sistem transmisi untuk memasok kebutuhan listrik kepada konsumen. Umumnya, biaya untuk menjalankan sistem tenaga listrik ini mendominasi sebagian besar biaya operasional sebuah perusahaan penyedia tenaga listrik. Biaya ini mencakup pengeluaran untuk pembelian listrik, gaji karyawan, biaya bahan bakar dan material untuk operasional, serta pengeluaran lain seperti biaya perawatan, asuransi, dan amortisasi. Biaya operasional lain ini juga berkontribusi sekitar 60% dari total biaya keseluruhan.

Mengingat betapa pentingnya mengelola biaya operasi sistem tenaga listrik, manajemen operasi harus mempertimbangkan faktor-faktor berikut.

- a. Perkiraan beban yang akan terjadi.
- b. Persyaratan untuk pemeliharaan peralatan harus dipenuhi.
- c. Keandalan sistem yang dimaksud.

Terakhir, pembagian beban manajemen operasi sistem tenaga listrik dapat menyediakan tenaga listrik

dengan biaya yang efisien dan tetap menjaga citra PLN di mata masyarakat.

6.2. Manajemen Operasi Sistem Tenaga Listrik

Untuk memasok listrik kepada pelanggan, diperlukan rangkaian peralatan listrik yang saling terhubung, termasuk stasiun pembangkit dan substation. Sistem ini dihubungkan melalui jaringan transmisi. Biaya yang berkaitan dengan operasi sistem tenaga listrik ini mencakup pengadaan listrik, tenaga kerja, bahan bakar, bahan untuk operasi, serta biaya operasional lainnya. Oleh karena itu, pengelolaan operasional sistem tenaga listrik ini memerlukan pertimbangan terhadap aspek-aspek seperti estimasi beban, pemeliharaan peralatan, keandalan, alokasi beban, dan efisiensi produksi pembangkit untuk menyediakan listrik yang terjangkau serta mempertahankan reputasi PLN di mata masyarakat. Perencanaan operasional melibatkan strategi untuk menjalankan sistem listrik dalam periode waktu tertentu, termasuk pengaturan pemeliharaan peralatan, optimasi penggunaan energi, serta menjaga keandalan dan kualitas listrik.

Tahap implementasi dan pengawasan dari rencana operasi ini melibatkan penerapan dan pengawasan operasional. Selama tahap implementasi, pengawasan dilakukan untuk memastikan kepatuhan terhadap rencana operasi yang telah disusun. Analisis operasi, sebagai bagian dari proses ini, berperan penting dalam mengevaluasi hasil operasi untuk memberikan umpan

balik konstruktif terhadap perencanaan, implementasi, dan pengendalian operasi. Analisis ini juga krusial dalam memberikan rekomendasi untuk pengembangan sistem listrik dan perbaikan pemeliharaan instalasi yang ada. Manajemen operasi sistem tenaga listrik harus mempertimbangkan aspek-aspek seperti:

- Estimasi beban.
- Persyaratan pemeliharaan peralatan.
- Tingkat keandalan yang diinginkan.
- Alokasi beban dan produksi pembangkit yang efisien.

6.3. Pemeliharaan Sistem

Pemeliharaan dalam konteks operasional bukanlah tugas yang terlalu rumit, asalkan dikelola dengan efisien dan diikuti secara konsisten. Dengan manajemen pemeliharaan yang baik, peralatan bisa bertahan lebih lama dan biaya operasional bisa ditekan. Pentingnya pemeliharaan ini tidak boleh diabaikan. Pemeliharaan didefinisikan sebagai serangkaian upaya dan aktivitas yang diarahkan pada instalasi dan sarana pendukungnya untuk mencegah kerusakan atau untuk mengembalikannya ke kondisi normal atau kondisi yang memadai. Tujuan dari pemeliharaan adalah untuk memastikan bahwa instalasi dan sarana:

- Berumur panjang.
- Menunjukkan kinerja, daya tahan, dan efisiensi yang tinggi.

- Selalu dalam kondisi siap pakai dan terawat dengan baik.
- Tertata rapi dan menciptakan lingkungan yang nyaman.
- Memberikan pengembalian investasi yang tepat dan menghasilkan keuntungan.
- Aman untuk pengguna dan lingkungan.

Peralatan dalam sistem harus dirawat secara teratur sesuai petunjuk dari pabrikannya. Namun, pemeliharaan harus dilakukan dengan cara yang tidak mengganggu kesiapan operasional peralatan dan memastikan bahwa pasokan listrik selalu memenuhi kebutuhan dan mengurangi kerugian. Selain itu, harus ada cadangan daya yang cukup untuk menjamin ketersediaan pembangkit listrik, yang menandakan keandalan sistem.

Menurut Surat Edaran Direksi PT.PLN (Persero) Nomor 040.E/152/DIR/1999, kegiatan pemeliharaan, terutama pada sistem jaringan distribusi, ditujukan untuk:

- Memastikan peralatan/ komponen dapat dioperasikan secara optimal dan berfungsi baik selama masa pakainya.
- Menjamin kelancaran jaringan dalam mendistribusikan listrik dari pembangkit ke pelanggan.
- Menjamin kualitas dan stabilitas listrik yang diterima pelanggan.

- Menjamin keamanan sistem dan peralatan bagi personel dan masyarakat umum.
- Mengurangi waktu downtime peralatan untuk menekan biaya operasional.
- Memelihara kondisi sistem atau peralatan dengan baik.

Aktivitas pemeliharaan dalam sistem distribusi listrik mencakup berbagai prosedur seperti inspeksi, pencegahan, perbaikan, dan penggantian peralatan, baik secara berkala maupun sesuai kebutuhan. Tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan kualitas dan keandalan sistem, mengurangi kemungkinan kerusakan mendadak pada peralatan, meminimalkan biaya pemeliharaan, dan memenuhi harapan pelanggan dalam pelayanan listrik.

Untuk melaksanakan pemeliharaan dengan efektif, beberapa langkah penting harus diperhatikan:

- Merencanakan sistem distribusi secara hati-hati dan akurat, memilih bahan dan peralatan yang berkualitas tinggi sesuai dengan standar yang berlaku.
- Melakukan pemeriksaan menyeluruh pada sistem distribusi yang baru dibangun dan segera memperbaiki kerusakan kecil yang ditemukan.
- Memastikan staf dan petugas pemeliharaan memiliki pelatihan yang memadai dan jumlahnya mencukupi.

- Menyediakan peralatan kerja yang cukup dan berkualitas untuk pemeliharaan, baik dalam kondisi tidak bertegangan maupun bertegangan.
- Menyimpan dan menggunakan buku serta brosur peralatan dari pabrik pembuat sebagai referensi untuk pemeliharaan.

Dengan mengikuti panduan ini, pemeliharaan sistem distribusi listrik dapat dilakukan dengan lebih efisien dan efektif, membantu memastikan layanan listrik yang handal dan aman bagi pelanggan. Pemeliharaan rutin (terjadwal) dan tanpa jadwal (mendadak) berbeda.

1. Ada dua jenis pekerjaan yang termasuk dalam pemeliharaan rutin.
 - Pertama, pemeliharaan servis dilakukan dalam jangka waktu pendek dan mencakup pekerjaan ringan kecil, seperti membersihkan ROW jaringan.
 - Pemeliharaan inspeksi dilakukan dalam jangka waktu panjang dan mencakup penyetelan, perbaikan, dan penggantian peralatan serta bagian-bagian sistem distribusi.
2. Di sisi lain, pemeliharaan tanpa jadwal atau mendadak dilakukan secara tidak terencana dan dilakukan hanya ketika terjadi gangguan, kerusakan, atau masalah lainnya.

Pemeliharaan pembangkit listrik harus dilakukan dengan prosedur dan memiliki standar OED (*Original Equipment Manufacturer*).

6.3.1. Analisa Beban

Analisis beban harus dilakukan secara menyeluruh untuk menjaga keseimbangan beban sistem agar tidak menimbulkan masalah yang berdampak pada aspek manajemen dan operasional perusahaan listrik. Untuk melakukan ini, analisis sistem tenaga listrik yang sedang berjalan harus dilakukan.

Perkiraan beban jangka panjang:

1. Perkiraan beban jangka panjang adalah perkiraan yang dibuat untuk waktu yang lebih lama daripada satu tahun. Faktor ekonomi makro seperti pendapatan per kapita penduduk Indonesia menjadi penggerak utama perkiraan beban jangka panjang. Oleh karena itu, pemerintah harus memberikan bimbingan selama penyusunannya.
2. Prediksi beban jangka menengah
3. Perkiraan beban jangka menengah memperhitungkan faktor-faktor manajemen perusahaan seperti kemampuan teknis dalam.
4. Perkiraan beban jangka pendek
5. Perkiraan beban jangka pendek berlangsung dari beberapa jam hingga satu minggu (168 jam). Batas atas dan bawah beban maksimum ditentukan oleh perkiraan beban jangka menengah. Berdasarkan pola beban sebelumnya, serta variabel seperti acara televisi, cuaca, dan suhu udara, besarnya beban sistem dapat dihitung

setiap jam. (“Operasi Sistem Tenaga Listrik | PDF,” 2012, pp. 12-13)

Konsumsi energi listrik naik dan turun selama aktivitas sehari-hari manusia. Peningkatan energi listrik selalu sebanding dengan pemakaian energi sistem. Penjadwalan unit yang aktif dan tidak aktif didasarkan pada siklus pembangkitan daya dalam jangka waktu tertentu. Penjadwalan ini mengoptimalkan kondisi ekonomi dan memenuhi batasan teknis pengoperasian pembangkit dalam sistem tenaga.

Proses penjadwalan ini disebut komitmen unit. Unit komitmen, juga disebut UC, adalah penjadwalan produksi daya yang dilakukan oleh unit pembangkit dalam periode harian atau mingguan yang akan datang dengan tujuan untuk mencapai biaya operasional yang ekonomis.

Unit komitmen merupakan masalah penting dalam perencanaan operasi sistem listrik jangka pendek. Akibatnya, ada kebutuhan untuk kombinasi unit pembangkit yang aktif dan tidak aktif dalam suatu sistem.

6.3.2. Perkiraan Beban

Memenuhi kebutuhan listrik pelanggan membutuhkan peralatan listrik yang terhubung. Pusat listrik dan gardu induk membentuk sistem tenaga listrik, yang terhubung melalui jaringan transmisi. Semua biaya yang terkait dengan menjalankan sistem tenaga listrik

termasuk pembelian listrik, tenaga kerja, bahan bakar, material operasi, dan biaya operasi lainnya.

Oleh karena itu, manajemen operasi sistem tenaga listrik harus mempertimbangkan hal-hal seperti perkiraan beban, pemeliharaan peralatan, keandalan, alokasi beban, dan produksi pembangkit yang ekonomis untuk menyediakan listrik murah dan mempertahankan citra PLN di masyarakat. Perencanaan operasi melibatkan memikirkan bagaimana sistem listrik akan bekerja dalam jangka waktu tertentu.

Perencanaan ini mengatur pemeliharaan peralatan, mengoptimalkan penggunaan energi, dan memastikan keandalan dan kualitas listrik. Grafik beban mengalami perubahan secara bertahap dalam hal kuantitatif dan kualitatif. Berikut ini adalah beberapa faktor yang bertanggung jawab atas perubahan ini:

- Peningkatan jumlah pelanggan.
- Peningkatan penggunaan listrik.
- Suhu udara.
- Aktivitas ekonomi masyarakat.
- Aktivitas sosial.

6.4. Manajemen Aset

Aset yang dimiliki atau dikontrol oleh pemerintah, yang dapat memberikan manfaat ekonomi dan/atau sosial dan dapat diukur dalam nilai moneter, termasuk sumber daya non-keuangan yang penting untuk penyediaan layanan publik. Aset tersebut dapat digunakan tidak hanya untuk operasional sehari-hari

tetapi juga sebagai investasi, mengingat nilai potensialnya di masa depan. Oleh karena itu, manajemen aset yang efektif menjadi penting (Florentina Widita, 2019, hlm. 1).

Manajemen aset adalah proses mengatur aset berwujud dan tidak berwujud yang memiliki nilai ekonomis, komersial, dan nilai tukar. Tujuannya adalah untuk mencapai tujuan organisasi dan individu melalui perencanaan, pengorganisasian, kepemimpinan, dan pengendalian, sehingga menghasilkan keuntungan dan mengurangi biaya secara efektif dan efisien. Manajemen aset melibatkan serangkaian kegiatan yang rumit, terstruktur, dan terintegrasi selama seluruh siklus hidup aset, dari perencanaan hingga penghapusan, untuk memastikan bahwa aset memberikan nilai terbaik bagi pemiliknya.

Menurut Sutrisno (2004), tujuan umum manajemen aset adalah menciptakan sistem pengelolaan aset yang efektif, di mana efektivitas berhubungan dengan pencapaian tujuan, sementara efisiensi berhubungan dengan jumlah biaya yang dikeluarkan. Selain tujuan umum, manajemen aset juga memiliki tujuan khusus.

Siregar (2004) menyebutkan bahwa manajemen aset memiliki tiga tujuan utama, yaitu efisiensi dalam pemilikan dan pemanfaatan, menjaga nilai ekonomis dan potensi aset, serta objektivitas dalam pengawasan dan pengendalian penggunaan dan pengalihan aset. Dengan manajemen yang baik, aset dapat dimanfaatkan secara optimal, dan nilainya dapat dikembalikan.

Sugiama pada tahun 2013 menemukan bahwa siklus manajemen aset melibatkan beberapa tahap yang harus diikuti secara berurutan, dari perencanaan hingga penghapusan. Manajemen aset bertujuan untuk menghasilkan keuntungan dan mengurangi biaya. Menurut Sutrisno (2004), tujuan umum dari manajemen aset adalah menyusun sistem pengelolaan aset agar dapat digunakan secara efektif, dengan mempertimbangkan biaya yang dihabiskan.

Pada sektor tenaga listrik, pembangkitan, transmisi, dan distribusi merupakan langkah awal dalam proses produksi. Tata kelola yang baik penting untuk menjaga stabilitas dan efisiensi pembangkit listrik, baik yang baru maupun yang sudah ada. Tujuan utama pembangkit listrik adalah beroperasi dengan biaya rendah dan kinerja tinggi, mengelola siklus hidup aset secara optimal.

Penerapan manajemen aset dalam konteks ini dapat dibagi menjadi empat tahap: Tahap Persiapan, Tahap Pembangunan Strategis, Tahap Sistem, Tools dan Pengembangan Metodologi, serta Tahap Implementasi dan Pengukuran (Dhebye Irawan, 2019, hlm. 1).

Untuk perusahaan pembangkit listrik, penerapan manajemen aset menjadi aspek krusial untuk mencapai optimalisasi dan efisiensi energi yang tinggi. Enterprise Asset Management (EAM) memainkan peran signifikan dalam mengoptimalkan penggunaan dan kualitas aset yang dimiliki, serta berperan penting dalam

memprediksi dan mencegah potensi kerusakan pada sistem.



Gambar 5.4. Siklus manajemen aset

Dalam konteks global dimana kelangkaan energi menjadi perhatian utama, strategi manajemen aset menjadi sangat penting untuk memastikan kelangsungan operasional pembangkit listrik. Prinsip operasional dalam sistem tenaga listrik mencakup tiga aspek utama: kepastian dalam penyaluran energi listrik, pemeliharaan kualitas daya yang baik, serta pemenuhan aspek ekonomis. Tantangan ini juga dialami oleh sistem pembangkit listrik di Indonesia, seperti yang diungkapkan oleh Mudassir pada tahun 2021, yang

menekankan pentingnya manajemen aset yang efisien dalam mengatasi masalah tersebut.

Manajemen aset yang efektif tidak hanya membantu dalam mengurangi biaya operasional tetapi juga meningkatkan keandalan dan ketersediaan pasokan energi, aspek-aspek yang sangat penting bagi keberlanjutan dan efisiensi industri pembangkit listrik. Dengan mengadopsi pendekatan yang terstruktur dan strategis dalam manajemen aset, perusahaan pembangkit listrik dapat meningkatkan performa operasional mereka sekaligus berkontribusi terhadap penanganan tantangan energi di tingkat global.

6.5. Pengoperasian dan Pemeliharaan Dalam Aset

Proses pengoperasian dan pemeliharaan aset adalah tahap penting dalam mengelola aset untuk memastikan penggunaan jangka panjangnya. Pengoperasian aset mencakup perbaikan berkala, penggantian aset yang rusak selama penggunaannya, dan pemeliharaan aset, yang merupakan langkah krusial dalam memastikan aset tersebut dapat beroperasi untuk jangka waktu yang diharapkan.

6.5.1. Pengoperasian Aset

Aset dianggap produktif dan berdaya guna jika mampu menghasilkan keuntungan yang signifikan. Kinerja aset diukur berdasarkan tingkat operasinya; aset dengan operasi rendah dapat dianggap memiliki kinerja baik, sedangkan aset dengan operasi tinggi dapat

dianggap kurang produktif. Asumsinya adalah semakin banyak aset yang digunakan, semakin banyak manfaat yang dihasilkan. Sebelum mengoperasikan aset, status penggunaannya harus didefinisikan untuk mendukung tugas dan fungsi yang relevan. Penggunaan aset melibatkan pengelolaan dan penataan aset negara oleh pengguna barang sesuai dengan fungsi dan tanggung jawab organisasi mereka.

Pengoperasian aset mencakup pekerjaan, kontrol aset, dan biaya. Hal ini sangat penting untuk aset yang dinamis atau berumur pendek. Pengoperasian aset memerlukan sumber daya manusia yang mahir dalam penggunaannya untuk memastikan aset tidak cepat rusak ketika dioperasikan.

6.5.2. Pemeliharaan Aset

Pemeliharaan aset adalah upaya untuk menjaga kondisi aset agar tetap baik dan meningkatkan nilai serta fungsinya. Efektivitas pemeliharaan aset menentukan nilainya. Pemeliharaan aset dilakukan untuk melindungi nilai aset dari kerusakan akibat usia atau keausan sebelum masa pakainya berakhir.

Pemeliharaan melibatkan lebih dari sekadar aktivitas fisik, termasuk pembiayaan dan tanggung jawab. Kondisi yang dapat diterima adalah kebutuhan operasional yang harus dipenuhi agar aset dapat beroperasi sesuai rencana. Pemeliharaan fisik bertujuan

untuk mengoptimalkan dan mempertahankan umur pakai aset. Kegiatan pemeliharaan mencakup penilaian kondisi, inventarisasi, perencanaan waktu, penetapan spesifikasi pekerjaan, pelaksanaan, pembiayaan, dan pencatatan.

Perencanaan pemeliharaan aset memungkinkan tindakan preventif. Ini akan memastikan bahwa aset tetap layak dan produktif dengan biaya jangka panjang yang minimal. Sebagai langkah awal, organisasi harus menentukan aset mana yang perlu dipelihara, menilai materialitasnya. Beberapa aset mungkin memiliki nilai rendah atau umur pakai yang pendek, sementara yang lain mungkin memerlukan sedikit atau bahkan tidak memerlukan pemeliharaan. Strategi pemeliharaan aset di sektor publik diperlukan untuk meningkatkan efektivitas penggunaan aset.

Dalam pemeliharaan aset, beberapa elemen krusial perlu dipertimbangkan untuk memastikan efisiensi dan efektivitas proses:

1. Kebijakan Pemeliharaan Aset

- Ini dibentuk dengan mempertimbangkan elemen-elemen seperti kebutuhan organisasi, risiko, dan dampak kerusakan aset.
- Kebijakan ini memberikan fondasi untuk menentukan jenis pemeliharaan yang diperlukan dan berkaitan langsung dengan strategi pemeliharaan.

- Strategi pemeliharaan melibatkan gabungan prosedur dan kemampuan untuk melakukan perubahan dan perbaikan sesuai kebutuhan, termasuk pemeliharaan korektif (dilakukan hanya ketika aset tidak berfungsi sesuai standar) dan pemeliharaan preventif (terprogram untuk mengurangi risiko kerusakan aset).

2. Strategi Pemeliharaan

- Mendefinisikan kinerja yang diharapkan dari aset dan tingkat pemeliharaan yang akan dilakukan.
- Menjelaskan sistem dan prosedur untuk merencanakan dan mengelola pekerjaan pemeliharaan.
- Menentukan jenis pemeliharaan yang akan dilakukan dan alasan pemilihan jenis tersebut.
- Mengidentifikasi sumber daya yang diperlukan untuk melaksanakan pemeliharaan.
- Menyajikan persyaratan khusus untuk inhouse plant, peralatan, atau suku cadang.
- Merencanakan dan memproyeksikan biaya pemeliharaan rutin, termasuk rencana penggantian besar dalam jangka waktu lima puluh tahun.

3. Tingkat Pemeliharaan yang Diperlukan

- Mendefinisikan tingkat pemeliharaan yang dibutuhkan untuk menjaga aset tetap berfungsi dengan baik.

- Merencanakan tingkat pemeliharaan yang konsisten dengan peran aset dalam penyediaan layanan.
- Mematuhi peraturan perundang-undangan terkait kesehatan, keamanan, kebakaran, manajemen lingkungan, dan lainnya.
- Mempertimbangkan realitas kondisi dan usia aset, ketersediaan sumber daya, serta mendapatkan persetujuan dari pengguna aset.
- Menetapkan waktu respons yang diperlukan untuk kerusakan.

4. Prioritas Pemeliharaan

- Mengidentifikasi tugas pemeliharaan dengan prioritas tertinggi.
- Fokus pada area prioritas jika sumber daya lebih rendah dari yang direncanakan.
- Menyusun mekanisme akuntabilitas yang efektif untuk memastikan penggunaan dan pemeliharaan aset tetap relevan dengan kebutuhan pelayanan dan standar pelayanan yang tercantum dalam rencana pengadaan.

Pemahaman dan implementasi yang tepat atas elemen-elemen ini penting dalam mengatur pemeliharaan aset secara efektif, untuk memastikan kinerja optimal aset dan keberlanjutan pelayanan yang disediakan oleh organisasi (ISS, 2020).

BAB VII. INTEGRASI SUMBER ENERGI TERBARUKAN

7.1. Pendahuluan

Sumber energi terbarukan adalah sumber daya alam yang dapat diperbaharui secara alami dan tidak habis terpakai. Merupakan sumber energi yang memiliki sifat berkelanjutan dan ramah lingkungan. Beberapa jenis sumber energi terbarukan yang paling umum digunakan meliputi: Energi Surya, Energi Angin, Energi Air, Energi Panas Bumi, dan Energi Biomassa. Integrasi sumber energi terbarukan dalam sistem energi modern sangatlah diperlukan. Dalam era di mana sumber daya energi konvensional semakin terbatas dan dampak lingkungan menjadi perhatian utama, penggunaan sumber energi terbarukan menjadi semakin penting. Dalam bab ini, kita akan menjelajahi berbagai jenis sumber energi terbarukan, bagaimana cara sumber energi terbarukan ini menghasilkan energi, dan mengapa integrasi mereka dalam perencanaan dan pengoperasian dapat diadaptasi ke dalam sistem tenaga listrik. Tentunya, fokus utama dalam upaya menjaga lingkungan dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya energi fosil yang semakin hari semakin terbatas.

Alasan penting perlunya integrasi sumber energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik saat ini adalah bagaimana sebuah pembangkit tenaga listrik memiliki

emisi gas rumah kaca yang sedikit dan/atau tidak ada. Karena ini merupakan penyebab utama terjadinya perubahan iklim global. Sedangkan ketersediaan energi yang berkelanjutan yang diwacanakan oleh Pemerintah terus mendorong pengintegrasian sumber energi ini. Harapannya adalah bagaimana terjadi pengurangan biaya energi yang terus menurun secara signifikan akibat penggunaan sumber energi ini, sebanding dengan kemajuan teknologi dalam mengimplementasi energi terbarukan kedalam sistem tenaga listrik.

Sumber energi terbarukan juga dapat menjadi batas untuk menjaga keamanan energi melalui program diversifikasi sumber energi, kita dapat meningkatkan keamanan energi negara. Ketergantungan yang berlebihan pada energi fosil tentunya dapat membuat kita rentan terhadap fluktuasi harga dan pasokan yang menyebabkan melonjaknya harga kebutuhan dasar. Hal ini beriringan dengan terus terciptanya lapangan kerja dalam peningkatan ekonomi, sejalan dengan target Indonesia emas tahun 2045. Hal fundamental inilah yang harus menjadi perhatian bagaimana pengintegrasian sumber energi terbarukan dalam sistem energi saat ini adalah langkah penting dalam menjaga keberlanjutan lingkungan dan memenuhi kebutuhan energi global. Sub-bab selanjutnya akan membahas lebih lanjut mengenai bagaimana sumber energi terbarukan dapat diintegrasikan dalam sistem tenaga listrik.

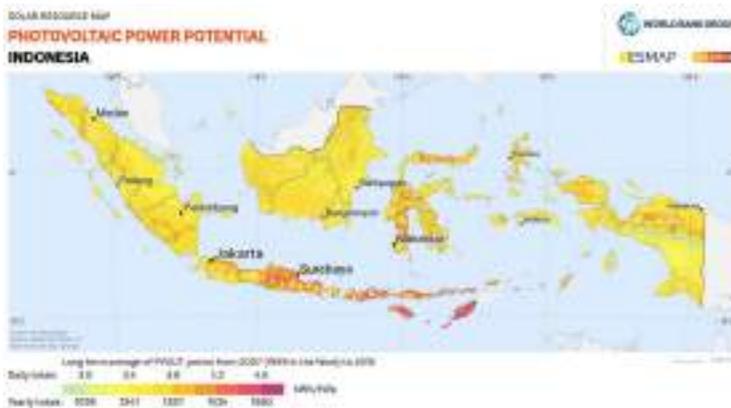
7.2. Sumber Energi Terbarukan

Manusia merupakan makhluk hidup yang sangat bergantung pada energi dalam melakukan aktifitas setiap hari guna memenuhi kebutuhan dasar hidupnya. Hal mendasar dalam pemakaian energi ialah akan kebutuhan terhadap penerangan pada saat malam hari atau kondisi gelap, melakukan kegiatan memasak dalam memenuhi kecukupan energi tubuhnya, berpindah-pindah tempat dengan menggunakan komoditas transportasi dalam melaksanakan kegiatan fisik. Hal tersebut memicu penerapan mendalam akan penggunaan sumber energi terbarukan. Seperti yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya sumber energi terbarukan utama akan dibahas secara menyeluruh dalam pemanfaatan sumber energi yang tersedia dari alam yang tidak akan pernah habis dikarenakan terbentuk oleh pola proses alam berkelanjutan. Sejalan dengan hukum kekekalan energi, yakni "energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan". Hukum ini dirumuskan oleh fisikawan yang berasal dari Inggris Raya, James Prescott Joule pada tahun 1847.

7.2.1. Energi Surya

Indonesia yang terletak dititik pertemuan khatulistiwa memiliki potensi energi surya sebesar 200.000 megawatt (MW) dengan pemanfaatan sampai tahun 2021 sebesar 0,08% dari potensinya. Berlimpahnya intensitas radiasi matahari yang ada di seluruh wilayah Indonesia dengan rata-rata sekitar 4.8 kWh/m² per hari,

masih belum terasa optimal ketika energi ini dijangkau untuk mengalir listrik sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sistemnya yang bersifat modular serta mudah dipindahkan merupakan salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pembangkit listrik alternatif.



Gambar 7. 1. Radiasi matahari di Indonesia (Sumber: World Bank)

Kekurangan PLTS adalah masih mahalnya harga perangkatnya dan juga adanya degradasi penurunan kapasitas PLTS tersebut, serta kurang handal dikarenakan PLTS yang terintegrasi dengan jaringan listrik secara langsung (*on-grid*) sangat bergantung dengan energi matahari yang menyinari bumi umumnya dimulai dari pukul 07:00 sampai pukul 15:00. Selain itu karena masih merupakan energi yang baru atau belum familiar di masyarakat tingkat kandungan lokal seluruh

peralatan piranti PLTS masih banyak didatangkan dari luar negeri.

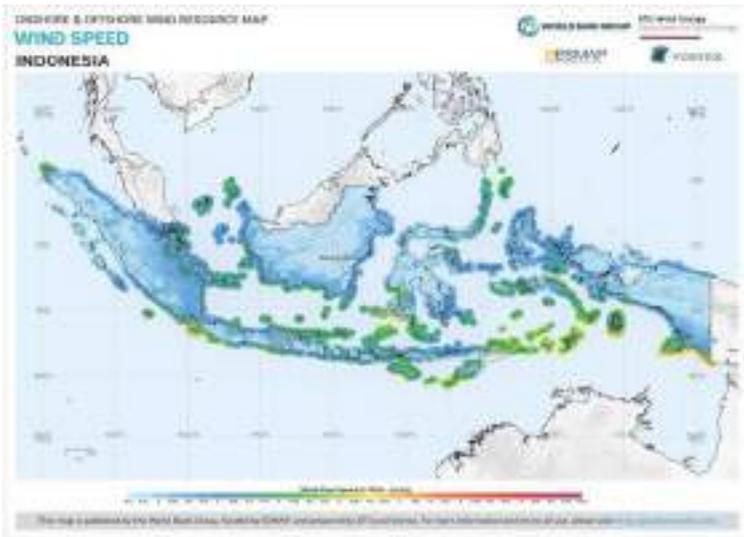
Satuan yang digunakan untuk menggambarkan sumber daya matahari adalah sebagai berikut: Irradiansi (W/m^2) adalah total energi. Insolasi (J/m^2 atau kWh/m^2) adalah energi datang per satuan luas pada suatu permukaan. Hal ini ditemukan dengan mengintegrasikan radiasi pada waktu tertentu, biasanya satu hari meskipun periode satu bulan atau satu tahun juga digunakan. Satuan jam (h) biasanya digunakan untuk insolasi selama sehari penuh.

7.2.2. Energi Angin

Indonesia juga memiliki potensi akan energi angin yang telah tersedia di alam. *Outlook* Energi Indonesia pada tahun 2022 menyatakan potensi energi angin mencapai 154,9 gigawatt (GW). Energi ini mempunyai dua sisi yang bertolak belakang. Pada satu sisi, angin bisa menjadi musibah, seperti angin badai dan topan. Di sisi lain, angin bisa menjadi sumber tenaga yang dibutuhkan manusia, untuk membantu dan mempermudah kegiatannya. Dikarenakan sifatnya dan kemajuan ilmu teknologi, tenaga angin yang jumlahnya tidak terbatas, tersebar cukup luas dan merata, dan tidak menimbulkan efek rumah kaca dapat dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

PLTB dapat diterapkan bisa dalam bentuk *wind farm* yang terkoneksi kedalam jaringan primer listrik, maupun *stand alone*. Pada dasarnya penerapan PLTB di

Indonesia diterapkan pada lokasi terpencil dengan potensi kecepatan angin antara 4 m/s sampai 10 m/s. Daerah-daerah yang berpotensi memiliki kecepatan angin tinggi adalah daerah dataran rendah. Keberadaan dan kelangsungan suatu PLTB ditentukan oleh perangkat yang ada untuk mengubah energi angin tersebut menjadi energi listrik.



Gambar 7. 1. Potensi angin di Indonesia (Sumber: World Bank)

Jika kecepatan angin lebih tinggi, biasanya daya yang ditangkap oleh rotor akan dibatasi dengan mengontrol luaran yang dihasilkan oleh bilah pada turbin angin. Kecepatan angin yang sangat tinggi bukan malah menghasilkan sedikit energi, sehingga sangat diperlukan perencanaan yang matang saat membangun

PLTB, selain itu PLTB juga memiliki sifat yang sama dengan PLTS, yakni memiliki sumber energi yang terbatas pada satuan waktu tertentu.

7.2.3. Energi Air

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki sumber daya air dapat diperbaharui (*renewable resources*). Potensi sumber daya air yang dimiliki oleh bumi adalah terdiri dari 97% air laut dan 3% air tawar. Sebagai Energi air dapat diartikan sebagai energi yang menghasilkan gerakan dari air atau bersifat kinetik. Umumnya penyebutan energi air sering dijumpai sebagai energi hidro.

Potensi energi hidro di Indonesia sebesar 75.000 megawatt (MW) yang didapatkan hasil kajian PLN bersama Nipon Koei pada tahun 1983. Kemudian, kajian ini melakukan *screening* langsung terhadap beberapa lokasi potensial yang tercantum dalam Rencana Pengembangan Energi Hidro tahun 2011. Kualitas data yang diperoleh dari *screening* ini meningkatkan potensi sebesar 75.000 MW di 1.249 lokasi menjadi 12.894 MW di 89 lokasi. Hasilnya kemudian dimasukkan ke dalam rencana pengembangan sumber daya energi hingga tahun 2027 oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM).

Dalam proses konversi energi air menjadi energi listrik dilakukan dengan membuat bendungan untuk menampung air. Air dari bendungan kemudian digabungkan dengan pipa air yang diarahkan ke turbin.

Semakin banyak air yang mengalir pada turbin, semakin banyak energi yang dihasilkan, hal ini dapat disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)



Gambar 7. 2. Potensi dan kapasitas energi hidro di Indonesia (Sumber: IESR)

7.2.4. Energi Panas Bumi

Energi panas yang terbentuk dan ditemukan di kerak bumi dikenal sebagai energi panas bumi. Suhu dari temperatur di bawah permukaan bumi naik seiring dengan kedalaman, dengan gradien panas bumi rata-rata sebesar $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, biasanya terkait dengan keberadaan gunung api seperti di Indonesia yang memiliki banyak gunung aktif karena secara geografis Indonesia berada di wilayah lingkaran api pasifik atau cincin api pasifik. Kelimpahan akan sumber energi panas bumi ini dapat ditemukan dalam air panas, uap air, batuan, mineral ikutan, dan gas lainnya.

Menurut Kementerian ESDM Indonesia menyimpan 40% cadangan panas bumi dunia. Pada tahun 2020. Potensi energi panas bumi yang ada Indonesia diperkirakan mencapai 23,7 gigawatt (GW). Negara ini sudah mulai memanfaatkan energi panas bumi secara langsung maupun panas bumi tidak langsung. Sebagai contoh dari pemanfaatan sumber energi ini, yakni pemanasan kolam renang, pengeringan hasil pertanian, pembuatan gula aren, budidaya jamur, *green house heating* dan lain-lain.



Gambar 7. 3. Potensi lokasi panas bumi di Indonesia
(Sumber: Kementerian ESDM)

Energi panas bumi dapat dimanfaatkan secara tidak langsung sebagai energi listrik yang dihasilkan dari gerak turbin yang digerakkan oleh panas bumi. Ini dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Energi panas bumi memiliki karakteristik umum

sebagai sumber energi yang sangat bersih, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Karbondioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh PLTP hanya sekitar 1,5% dibandingkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan sebesar 2,7% dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas.

7.2.5. Energi Biomassa

Biomassa adalah bahan organik apa pun yang berasal dari tumbuhan atau hewan dan dapat digunakan secara langsung untuk menghasilkan energi yang berguna atau diolah menjadi bahan bakar hayati antara padat, cair, atau gas. Energi biomassa dapat menghasilkan energi. Biomassa dapat berasal dari tanaman (*biofuel crops* dan *plantation*) dan sampah (*Municipal Solid Waste*). Proses pengolahan sampah dapat menghasilkan berbagai bentuk bahan bakar, seperti *solid fuel*, *liquid fuel*, dan *gaseous fuel*.

Proses bahan bakar tersebut bisa dikatakan sebagai bioenergi yang mana hingga tahun 2021 menyumbang sekitar 50% energi terbarukan di dunia. Dikarenakan harga biomassa saat ini masih tergolong murah, tantangan utama kedepannya adalah memperoleh sumber energi biomassa yang mencukupi dan mengedepankan teknologi sehingga sumber energi ini dapat bersaing dengan sumber energi terbaruka lainnya

Biomassa tidak hanya digunakan sebagai bahan bakar tetapi juga digunakan sebagai pembangkit listrik. Prinsip kerja PLTBm hampir sama dengan prinsip kerja

PLTU, yaitu menghasilkan air yang dapat memutar turbin dengan menggunakan energi panas. Namun, PLTU menggunakan batubara yang tidak terbarukan, sedangkan PLTBm menggunakan biomassa yang terbarukan dan dapat diakses dengan cukup mudah.



Gambar 7. 4. Potensi PLTBm pada 10 Provinsi di Indonesia (Sumber: IESR)

7.3. Penerapan Teknologi Terkini dalam Energi Terbarukan

7.3.1. PLTS

Fotovoltaik atau (PV) terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon dan titanium oksida. Semikonduktor ini, ketika terkena sinar matahari, membuat elektron-elektron pada pita energi memiliki

energi cukup untuk terlepas dari ikatan, menghasilkan aliran elektron ke dalam rangkaian menuju beban. Setelah terlepas, elektron ini meninggalkan "lubang" yang dapat diisi oleh elektron lainnya, menciptakan aliran listrik. Beberapa material PV yang umum digunakan melibatkan teknologi lapisan film tipis dan berbasis wafer, seperti silikon monokristalin, silikon polikristalin, silikon amorf, silikon mikro-kristal, kadmium telluride, dan tembaga indium sulfida (CIS). Masing-masing memiliki struktur dan karakteristik atom yang berbeda.

PLTS melibatkan beberapa komponen seperti modul PV, solar charge controller, inverter, baterai, sumber energi tambahan, dan beban. Modul PV mengubah sinar matahari menjadi listrik DC, *solar charge controller* mengatur tegangan dan arus dari panel PV ke baterai, inverter mengubah DC menjadi AC untuk peralatan, baterai menyimpan energi, dan beban adalah peralatan yang terhubung ke sistem. Dalam membangun PLTS, konsumsi daya perlu dipertimbangkan, dan pemilihan modul PV harus memenuhi kebutuhan total Watt-Peak. Inverter harus sesuai dengan kebutuhan daya dan tegangan baterai, sedangkan baterai yang direkomendasikan adalah deep cycle. Penggunaan solar charge controller harus disesuaikan dengan voltase PV dan baterai. Namun, perlu memperhatikan detail seperti konsumsi daya, pemilihan modul PV, inverter, baterai, dan pengontrol muatan surya untuk memastikan operasi yang efisien dan memenuhi kebutuhan energi listrik dengan baik.

7.3.2. PLTB

Turbin angin berperan utama dalam pembangkit listrik dengan mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanis melalui rotor yang dipasang pada sumbu turbin. Energi mekanis tersebut selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator listrik, menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan. Desain turbin angin didasarkan pada prinsip Bernoulli, di mana tekanan udara berkurang ketika kecepatan angin meningkat. Selain itu, kemampuan turbin untuk diatur memungkinkan optimalisasi penangkapan energi dengan merubah sudut bilah atau mengarahkan turbin sesuai dengan arah angin. Dengan kontribusinya dalam mengonversi energi angin menjadi listrik, turbin angin menjadi komponen kunci dalam upaya pemanfaatan sumber energi terbarukan. Berikut merupakan beberapa jenis turbin angin:

1. Turbin Angin dengan Poros Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT*):

Turbin angin ini sering ditemui di seluruh dunia. Mereka memiliki baling-baling yang terpasang secara horizontal pada poros vertikal. Prinsip kerjanya adalah mengubah energi angin yang datang dari depan baling-baling menjadi gerakan rotasi, yang selanjutnya menggerakkan generator listrik. Jenis turbin ini umumnya dianggap lebih efisien dan lebih mudah dipasang dibandingkan jenis lainnya.

2. Turbin Angin dengan Poros Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine – VAWT*):

Turbin ini memiliki baling-baling yang dipasang secara vertikal pada poros horizontal. Meskipun memiliki beberapa keunggulan, seperti kemampuan untuk beroperasi dalam angin yang berubah dan arah angin yang tidak tetap, efisiensi VAWT biasanya lebih rendah dibandingkan HAWT. Jenis ini lebih cocok untuk lingkungan perkotaan karena tidak perlu menghadap secara langsung ke arah angin.

3. Turbin Angin di Darat (*Onshore Wind Turbine*):

Jenis ini paling umum digunakan dan ditempatkan di daratan seperti perbukitan, padang rumput, atau daerah pertanian. Ukurannya bervariasi, mulai dari turbin kecil untuk penggunaan pribadi hingga turbin besar untuk pembangkit listrik tenaga angin komersial.

4. Turbin Angin di Laut (*Offshore Wind Turbine*):

Ditempatkan di perairan laut, turbin ini umumnya lebih besar daripada turbin darat dan dapat menghasilkan lebih banyak energi. Keunggulan utamanya adalah angin laut yang lebih konsisten dan kuat. Meskipun mahal dalam pemasangan dan pemeliharaan, turbin angin laut memberikan potensi energi yang signifikan.

5. Turbin Angin Terapung (*Floating Wind Turbine*):

Inovasi terbaru, turbin ini mengapung di permukaan air laut dan memungkinkan pemasangan di kedalaman laut yang lebih besar. Turbin angin terapung memanfaatkan potensi energi angin laut yang lebih besar, terutama di daerah laut dengan kedalaman yang signifikan.

6. Turbin Angin Mikro (*Micro Wind Turbine*):

Jenis ini adalah turbin kecil yang cocok untuk penggunaan pribadi atau komersial kecil. Meskipun memiliki daya output yang lebih rendah, turbin ini dapat memberikan listrik untuk rumah, pertanian, atau bisnis kecil.

Selain itu, pada PLTB terdapat teknologi yang terus berkembang. Misalnya, penggunaan sistem kincir angin raksasa dengan baling-baling yang besar pada PLTB dapat meningkatkan efisiensi dan kapasitas energi yang dihasilkan. Dengan terus berkembangnya teknologi, PLTB menjadi lebih efisien dan dapat memainkan peran penting dalam penyediaan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan.

7.3.3. PLTA

PLTA adalah teknologi yang memanfaatkan energi potensial dari aliran air untuk menghasilkan energi listrik. Secara sederhana, PLTA bekerja dengan menggunakan energi potensial aliran air untuk menggerakkan turbin. Turbin tersebut berputar dan menghasilkan energi mekanik, yang selanjutnya

digunakan untuk memutar generator dan menciptakan energi listrik.

Energi mekanik dari turbin PLTA dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu ketinggian jatuhnya air dan jumlah debit air. Semakin tinggi air jatuh dan semakin besar debit air, maka semakin besar pula energi potensial yang dihasilkan. PLTA memiliki komponen utama, termasuk reservoir atau waduk yang menyimpan air, *penstock* atau pipa untuk mengarahkan aliran air ke turbin, turbin yang menerima aliran air dan menghasilkan energi mekanik, generator untuk mengubah energi mekanik menjadi listrik, dan transformator untuk menaikkan tegangan listrik.

PLTA dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan kapasitas terpasangnya:

- PLTA Picohydro: Kurang dari 0,5 kW
- PLTA Microhydro: 0,5 kW hingga 100 kW
- PLTA Minihydro: 100 kW hingga 1.000 kW
- PLTA Skala Kecil: 1 MW hingga 10 MW
- PLTA Skala Besar: Di atas 10 MW

Setiap jenis PLTA memiliki karakteristik dan kapasitas tertentu, sesuai dengan kebutuhan dan potensi sumber daya air yang tersedia di lokasi tersebut. Keseluruhan, PLTA menjadi solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan, memanfaatkan potensi air untuk menghasilkan listrik secara berkelanjutan.

7.3.4. PLTP

PLTP yang berperan dalam mengubah energi panas bumi menjadi energi listrik. Cara kerjanya mirip dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), menggunakan panas untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Perbedaannya terletak pada pemanfaatan fluida thermal dari sumber panas bumi untuk memutar turbin. Fluida thermal diperoleh melalui pengeboran sumur panas bumi dengan kedalaman 1.500 sampai 2.500 meter.

Setelah dilakukan pengeboran, fluida panas bumi dialirkan ke turbin, menghasilkan energi mekanik untuk memutar generator dan menghasilkan listrik. Fluida thermal yang digunakan tidak hanya dibuang; melainkan, dialirkan kembali ke dalam bumi melalui sumur reinjeksi untuk menjaga keseimbangan fluida dan panas. PLTP memiliki empat jenis utama, yakni PLTP *dry steam*, PLTP *single flash*, PLTP *double flash*, dan PLTP *binary cycle*, masing-masing dengan prinsip kerja karakteristiknya sendiri sebagai berikut:

- PLTP *Dry Steam*:

Prinsip Kerja: Mengambil uap panas dari bawah permukaan. Uap ini langsung dimanfaatkan untuk memutar turbin, yang kemudian menghasilkan energi listrik. Karakteristik PLTP ini digunakan jika fluida thermal berupa fase uap.

- PLTP *Single Flash*:

Prinsip Kerja: Menggunakan air panas dari sumur produksi yang mengandung kadar air tinggi. Air panas dialirkan ke atas melalui pipa sumur produksi, dan setelah uap terpisah dari air, digunakan untuk memutar turbin. Karakteristik PLTP ini cocok untuk sumur produksi dengan kadar air tinggi.

- PLTP *Double Flash*:

Prinsip Kerja: Dikembangkan untuk konfigurasi konversi energi listrik saat sumur produksi menghasilkan fluida uap dan cairan. Meningkatkan output daya listrik hingga 25% dibandingkan dengan PLTP single flash. Karakteristik PLTP ini cukup Kompleks namun menghasilkan daya listrik lebih besar.

- PLTP *Binary Cycle*:

Prinsip Kerja: Menggunakan fluida kerja (senyawa organik) yang dipanaskan oleh air panas bumi melalui penukar panas. Fluida kerja berubah menjadi uap, dan uap tersebut memutar turbin untuk menghasilkan listrik. Karakteristik PLTP ini menggunakan sistem tertutup tanpa emisi ke atmosfer, cocok untuk temperatur rendah pada fluida thermal.

Masing-masing jenis PLTP dirancang untuk optimal di lingkungan geotermal tertentu, dengan keunggulan dan kelemahan tertentu. Pemilihan jenis PLTP yang sesuai sangat tergantung pada kondisi geotermal di lokasi tersebut. PLTP beroperasi dengan komponen-komponen utama seperti *steam receiving*

header, vent structure, separator, demister, turbin, generator, transformator, switch yard, kondensor, dan main cooling water pump. Proses ini membuktikan bahwa PLTP merupakan sumber energi terbarukan yang efisien, dengan potensi untuk menjadi solusi dalam transisi menuju energi baru terbarukan.

7.3.5. PLTBm

Dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga biomassa, pemilihan teknologi menjadi langkah krusial yang harus mempertimbangkan berbagai kriteria. Secara teknis, evaluasi potensi biomassa dan kematangan teknologi menjadi fokus utama. Potensi biomassa diukur dari jumlah energi listrik yang dapat dihasilkan, dengan penekanan pada nilai kalori biomassa. Kematangan teknologi lebih diutamakan pada yang sudah komersial dan telah diadopsi di negara lain. Aspek ekonomi melibatkan penilaian investasi dan biaya operasional. Pemilihan teknologi dengan biaya investasi yang terjangkau dan biaya operasional minimal menjadi kunci dalam aspek ini. Dalam konteks lingkungan, pilihan jatuh pada biomassa dengan emisi karbon rendah, terutama yang berkalori tinggi. Sementara itu, aspek sosial menyoroti penerimaan masyarakat terhadap teknologi yang dipilih, menekankan kekhawatiran keamanan operasional.

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga biomassa dapat diwujudkan melalui beberapa jenis teknologi. Insinerasi, yang membakar biomassa secara langsung,

menawarkan proses sederhana yang cocok untuk berbagai jenis biomassa. Pirolisis, dengan memanaskan biomassa tanpa oksigen, efisien untuk biomassa kering. Gasifikasi, mengubah biomassa menjadi gas sintetis, menonjolkan tingkat efisiensi tinggi dan kemampuan menggunakan berbagai jenis biomassa. Sementara itu, biogas melalui proses anaerobik menangani biomassa organik basah, seperti limbah pertanian.

Dalam memilih jenis pembangkit listrik tenaga biomassa, ketersediaan biomassa, biaya operasional, keberlanjutan lingkungan, dan penerimaan masyarakat menjadi faktor-faktor penentu. Meskipun gasifikasi menawarkan efisiensi dan daya listrik tinggi, kompleksitas teknologi juga menjadi pertimbangan penting. Jika tingkat efisiensi dan daya listrik yang dihasilkan menjadi prioritas, teknologi gasifikasi dapat menjadi pilihan yang optimal meskipun memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi.

7.4. Prinsip Integrasi Sumber Energi Terbarukan

Pengembangan keberlanjutan energi memerlukan pendekatan terpadu melalui integrasi berbagai sumber energi terbarukan. Integrasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), dan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM) menjadi kunci dalam membentuk sistem energi yang holistik dan efisien.

Pada tingkat dasar, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat memberikan kontribusi signifikan melalui pemanfaatan sinar matahari sebagai sumber energi terbarukan. Begitu juga dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik. Integrasi keduanya dapat dilakukan untuk mengatasi fluktuasi produksi energi yang disebabkan oleh keadaan faktor alam atau cuaca yang berubah-ubah.

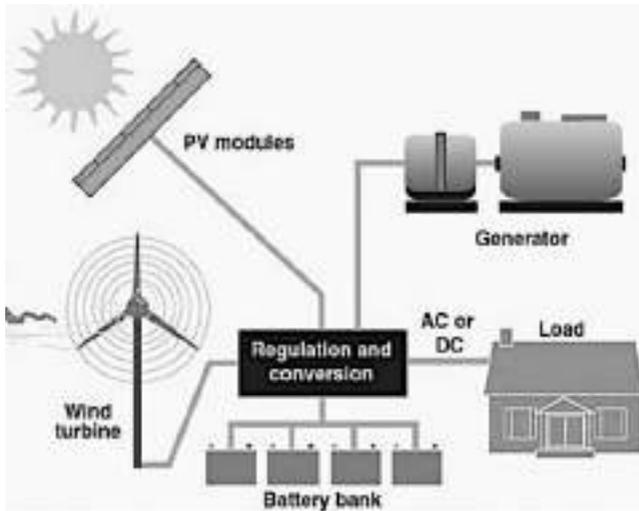
Melalui integrasi ini, sistem energi dapat diatur secara lebih efektif, dengan mengoptimalkan kekuatan masing-masing sumber energi terbarukan. Sebagai contoh, kelebihan energi yang dihasilkan oleh PLTB dapat dikonversi dan disimpan untuk digunakan ketika produksi PLTS menurun. Dengan pemikiran sistem terintegrasi, kolaborasi antar berbagai jenis pembangkit listrik terbarukan bukan hanya menjadi konsep, tetapi juga landasan untuk mencapai ketahanan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

7.4.1. Konsep Sistem Hibrida

Konsep sistem hibrida jaringan listrik melibatkan integrasi yang sinergis antara berbagai jenis sumber energi dan teknologi penyimpanan energi dalam satu sistem yang terpadu. Tujuan utama dari sistem hibrida ini adalah untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan ketersediaan pasokan energi listrik. Dalam konteks ini, integrasi antara PLTS, PLTA, PLTB, PLTP, PLTBm menjadi elemen kunci dalam menciptakan jaringan

listrik yang lebih handal dan responsif. Sistem hibrida jaringan listrik memungkinkan penyesuaian pasokan energi berdasarkan variasi dalam produksi energi dari sumber-sumber berbeda. Misalnya, ketika produksi energi dari PLTS dan PLTA sedang tinggi, energi berlebih dapat disimpan dalam PLTBM untuk digunakan ketika produksi dari sumber terbarukan lainnya sedang rendah. Ini menciptakan keseimbangan yang optimal dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan dan meminimalkan ketergantungan pada sumber energi konvensional.

Kelebihan utama dari konsep sistem hibrida jaringan listrik adalah kemampuannya untuk mengatasi fluktuasi produksi energi terbarukan dan menyediakan pasokan energi yang stabil. Dengan memanfaatkan kombinasi sumber energi yang beragam, sistem ini dapat memberikan ketersediaan energi yang lebih konsisten. Selain itu, penggunaan teknologi penyimpanan energi seperti baterai memungkinkan penyimpanan energi berlebih untuk digunakan pada saat dibutuhkan, mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya.



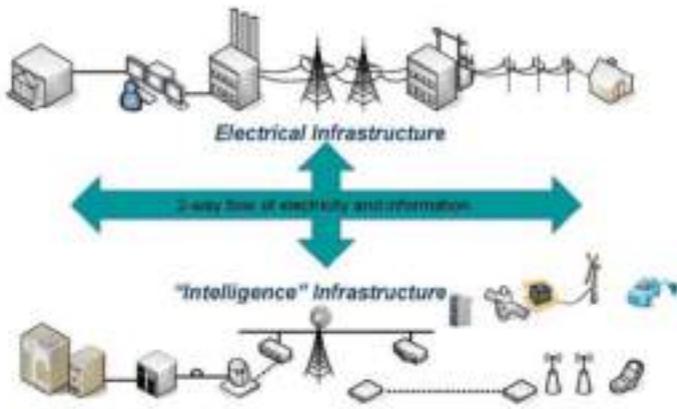
Gambar 7. 5. Contoh konsep sistem hibrida
(Sumber:http://www1.eere.energy.gov/buildings/residential/images/wind-powered_electric_systems_3.gif)

Secara keseluruhan, konsep sistem hibrida jaringan listrik mencerminkan pendekatan terintegrasi dalam memenuhi kebutuhan energi yang berkelanjutan dan handal. Integrasi PLTS, PLTA, PLTB, PLTP, dan PLTBM dalam satu sistem menyediakan solusi yang adaptif dan efisien untuk mendukung jaringan listrik masa depan.

7.4.2. Konsep Smartgrid

Teknologi *smartgrid* memperkenalkan jutaan komponen pintar baru ke dalam jaringan listrik, seperti yang memungkinkan komunikasi dua arah, optimasi dinamis, dan komunikasi kabel dan nirkabel (lihat gambar 7.6.) Perangkat-perangkat ini berkomunikasi

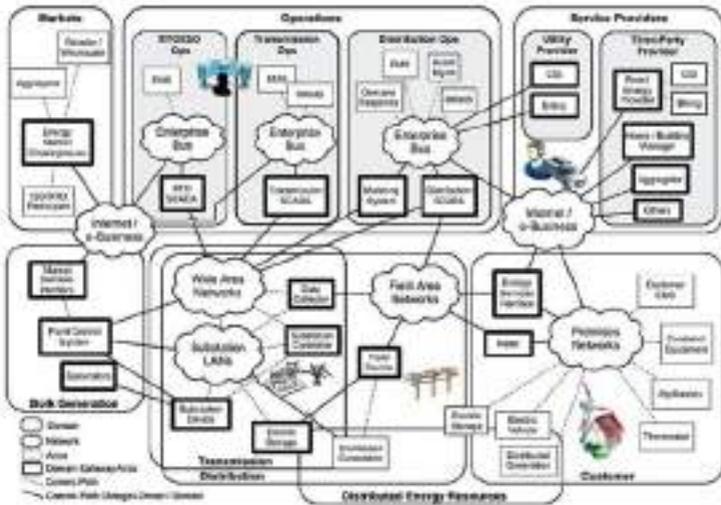
dengan cara yang lebih canggih, karena aliran komunikasi dan kemampuan kontrol yang bidireksional antar interkoneksi sistem lintas jaringan untuk berbagai tujuan seperti ekspor/impor listrik, menyediakan data kesadaran situasional terkini, dan mampu menerima data pasar secara *realtime*.



Gambar 7. 6. Konsep Smartgrid (Sumber: IESR)

Informasi digital dan teknologi kontrol terintegrasi ke dalam jaringan listrik, memungkinkan pengaturan pasokan listrik yang lebih efisien dan responsif, serta optimalisasi pemanfaatan energi. Keberadaan *smartgrid* membawa manfaat besar dalam hal efisiensi, keandalan, keamanan, dan keberlanjutan jaringan listrik, dengan potensi pengurangan biaya operasional dan pemeliharaan. *Smartgrid* juga berperan dalam mendukung penggunaan sumber energi terbarukan dan mengurangi emisi karbon dalam sektor energi,

memberikan dampak positif baik pada lingkungan maupun ekonomi.



Gambar 7. 7. Infrastruktur Smartgrid (Sumber: EPRI)

Smartgrid dapat mengurangi emisi karbon dengan mendorong pengembangan energi terbarukan, meningkatkan efisiensi energi melalui teknologi cerdas yang mengoptimalkan penggunaan sumber daya, memungkinkan integrasi pembangkit listrik dan berbagi pasokan untuk meningkatkan ketersediaan energi, serta membantu mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit listrik konvensional. Selain itu, *smartgrid* dapat menjaga stabilitas jaringan listrik, mencegah pemadaman, dan mengurangi risiko kerusakan peralatan listrik yang dapat berdampak negatif pada lingkungan. Pentingnya keamanan siber juga perlu

diperhatikan untuk melindungi *smartgrid* dari potensi ancaman terhadap fungsionalitas dan keamanannya.

Dari perspektif ekonomi, *smartgrid* memberikan manfaat seperti pengurangan biaya operasional dan pemeliharaan melalui pemantauan dan kontrol jaringan listrik yang lebih efektif. Selain itu, smart grid meningkatkan efisiensi penggunaan energi dengan pemantauan dan regulasi konsumsi energi, mendukung produktivitas industri dan pertumbuhan ekonomi melalui pasokan listrik yang stabil, dan mengurangi biaya energi bagi konsumen dan industri melalui pengembangan energi terbarukan yang lebih ekonomis. Inovasi juga didorong oleh perkembangan teknologi smart grid, menciptakan peluang industri baru dan lapangan kerja. Pentingnya keamanan siber dalam konteks smart grid menjadi krusial untuk melindungi infrastruktur kritis ini dari potensi ancaman siber yang dapat membahayakan operasional dan keberlanjutan sistem jaringan listrik.

7.5. Tantangan, Strategi, dan Inovasi dalam Integrasi Energi Terbarukan

Energi terbarukan sangat bermanfaat bagi keberlanjutan dan keberlangsungan lingkungan. Salah satu karakteristik utama sumber energi terbarukan adalah keberlimpahan, kelestarian, dan ramah lingkungan. Sumber energi terbarukan seperti yang dijelaskan pada sub-bab di atas tidak hanya menyediakan jumlah energi yang tidak terbatas, tetapi mereka juga tidak akan habis dan dapat digunakan secara

berkelanjutan. Keunggulan tambahan termasuk tingkat polusi dan limbah yang rendah, yang membuat energi terbarukan sebagai opsi yang bersih dan berkelanjutan.

Selain itu, penggunaan energi terbarukan menghasilkan manfaat ekonomi. Sumber daya energi ini dapat dimanfaatkan secara efektif dan bahkan secara gratis dengan investasi dalam teknologi yang tepat. Sumber energi konvensional lebih mahal daripada yang ini karena biaya operasional dan perawatan yang rendah. Selain itu, pemberdayaan sumber daya energi terbarukan mendorong pertumbuhan ekonomi dan menciptakan lapangan kerja, yang berdampak positif pada masyarakat secara keseluruhan.

Menimbulkan sifat akan kemandirian energi yang mana keuntungan strategis tambahan. Dengan bergantung pada sumber energi terbarukan, negara tidak perlu mengimpor bahan bakar fosil dari negara lain secara terus-menerus. Ini mengurangi ketergantungan dan meminimalkan perubahan harga pasar yang seringkali tidak stabil dari bahan bakar fosil. Energi terbarukan juga terbukti lebih hemat biaya daripada energi konvensional dalam jangka panjang.

Meskipun energi terbarukan memiliki banyak manfaat, ada beberapa masalah yang harus diperhatikan. Beberapa kendala utama termasuk biaya awal yang tinggi dan ketergantungan pada cuaca. Kurangnya infrastruktur yang mendukung penyimpanan dan distribusi energi tambahan dapat menjadi kendala. Selain itu, karena teknologi terus berkembang, beberapa

masyarakat belum memiliki kebiasaan dan pengetahuan tentang energi terbarukan.

Perlu diingat bahwa setiap jenis energi terbarukan memiliki kekurangan teknis dan sosial. Namun, dengan riset dan pengembangan yang terus-menerus, serta dengan meningkatkan kesadaran masyarakat, energi terbarukan dapat menjadi pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan.

BAB VIII. PROTEKSI DAN KEAMANAN SISTEM

8.1. Pendahuluan

Dalam dunia tenaga listrik, keandalan sistem proteksi memegang peran krusial. Keandalan ini bukan hanya berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menjaga konsistensi kerja, tetapi juga menyangkut aspek '*Dependability*' dan '*Security*'. '*Dependability*' dalam konteks ini mengacu pada kemampuan sistem untuk terus beroperasi secara efektif tanpa hambatan, sedangkan '*Security*' merujuk pada kemampuan sistem dalam melindungi diri dari ancaman eksternal yang bisa mengganggu operasionalnya. Kedua aspek ini sangat penting dalam menjamin keamanan dan efisiensi dalam sistem tenaga listrik, dimana setiap komponen harus dapat bekerja dengan optimal dan terlindungi dari segala jenis gangguan. Penelitian dan praktik di bidang ini terus berkembang, menunjukkan betapa pentingnya mengintegrasikan kedua aspek tersebut dalam desain dan operasional sistem proteksi tenaga listrik.

8.2. Klasifikasi dan Tipe Relay

Relay merupakan komponen kunci dalam sistem tenaga listrik, berfungsi sebagai pengatur dan pelindung. Terdapat beragam jenis relay yang diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerjanya, konstruksi, dan jenis

besaran yang diukur. Pertama, kita memiliki relay elektro-magnetis yang menggunakan prinsip elektromagnetisme untuk beroperasi. Selanjutnya, ada relay termis yang bekerja berdasarkan perubahan suhu. Terakhir, relay elektronis yang menggunakan komponen elektronik untuk fungsi pengendalian dan pengukurannya.

Dalam konteks penghubungan sensing element, relay dibagi menjadi dua, yaitu *primary* dan *secondary* relay. *Primary* relay langsung terhubung dengan besaran yang diukur, sedangkan *secondary* relay bekerja berdasarkan sinyal dari *primary* relay. Untuk kontrol elemen, ada yang bertindak langsung (*direct acting*), di mana perubahan langsung mempengaruhi operasi relay, dan ada juga yang bertindak tidak langsung (*indirect acting*), yang membutuhkan tahap antara sebelum relay bereaksi. Relay memiliki berbagai tugas dan kegunaan. Main relay bertugas sebagai pelindung utama dalam sistem, sedangkan *supplementary* relay menambah fungsi perlindungan atau pengendalian tambahan. Kedua jenis relay ini saling melengkapi dalam memastikan efisiensi dan keamanan dalam sistem tenaga listrik.

Relay proteksi dapat mengurangi kerusakan pada peralatan listrik dan meningkatkan keberlanjutan penyediaan energi listrik.

Berdasarkan teknologinya, relay proteksi dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Relay elektromagnetik, Relay ini sederhana dan mudah dipahami, tidak mahal, dan mudah diperbaiki secara teknik.
2. Relay statik, Relay ini tidak memiliki gerakan mekanis.
3. Relay berbasis mikroprosesor, Relay modern ini telah memanfaatkan teknologi elektronik.

Sementara itu, berdasarkan fungsinya, relay proteksi dapat diklasifikasikan menjadi:

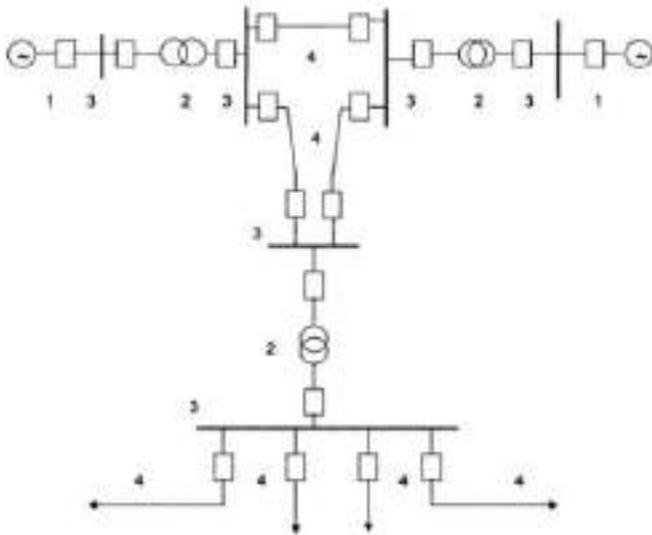
1. Relay arus lebih (*overcurrent relays*), Relay ini bekerja ketika arus yang mengalir melebihi batas yang telah ditentukan.
2. Relay tegangan jatuh (*undervoltage relays*), Relay ini bekerja ketika tegangan jatuh di bawah batas yang telah ditentukan.
3. Relay impedansi (*impedance relays*), Relay ini bekerja berdasarkan perubahan impedansi dalam sistem.
4. Relay frekuensi jatuh (*underfrequency relays*), Relay ini bekerja ketika frekuensi sistem jatuh di bawah batas yang telah ditentukan.
5. Relay arah (*directional relays*), Relay ini bekerja berdasarkan arah arus atau daya dalam sistem.
6. Dan lain-lain.

Skema proteksi sendiri dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Proteksi arus lebih (*Overcurrent protection*), Skema ini melindungi sistem dari arus yang melebihi batas yang telah ditentukan.
2. Proteksi jarak (*Distance protection*), Skema ini melindungi sistem berdasarkan jarak dari sumber gangguan.
3. Proteksi arus pembawa (*Carrier-current protection*), Skema ini menggunakan arus pembawa untuk mendeteksi dan melindungi sistem dari gangguan.
4. Proteksi diferensial (*Differential protection*), Skema ini melindungi sistem dengan membandingkan arus masuk dan arus keluar dalam suatu bagian sistem.

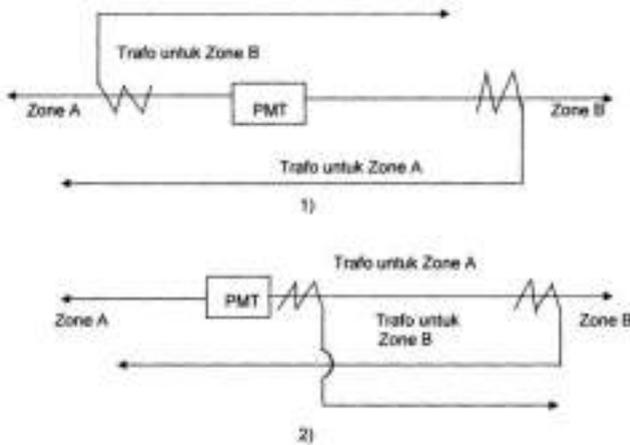
8.3. Fungsi Relay Pengaman

Relay pengaman memainkan peran vital dalam sistem tenaga listrik, terutama dalam mendeteksi dan merespons situasi yang tidak normal atau gangguan. Fungsi utama relay pengaman adalah untuk memastikan kestabilan dan keamanan sistem dengan cara mengidentifikasi kondisi-kondisi yang berpotensi membahayakan, seperti beban berlebih, hubung singkat, atau ketidakseimbangan fase. Saat terdeteksi adanya kondisi yang abnormal, relay pengaman bertindak cepat untuk memicu mekanisme pemutusan atau pengaturan ulang, sehingga menghindari kerusakan lebih lanjut pada sistem atau peralatan.



Gambar 8. 8. Contoh diagram segaris dengan relay pengamannya

Relay ini beroperasi dengan prinsip pengukuran dan pemantauan berkelanjutan terhadap variabel-variabel kritis dalam sistem, seperti arus, tegangan, frekuensi, dan temperatur. Dengan demikian, relay pengaman tidak hanya berperan sebagai garda terdepan dalam mendeteksi anomali, tetapi juga sebagai pengendali yang mengambil langkah korektif untuk menjaga integritas dan operasi sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Keberadaan relay pengaman, oleh karena itu, sangat penting untuk menjamin kelancaran dan keandalan pasokan tenaga listrik.



Gambar 8.9. Prinsip saling memproteksi dari rangkaian relay pengaman 1) C.B diapit oleh dua trafo arus 2) kedua trafo arus diletakkan disamping C.B

Dalam sistem tenaga listrik, relay pengaman memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas dan keamanan operasional. Relay ini bertugas mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal dan mengaktifkan pemutus sirkuit (Circuit Breaker, C.B.) untuk memutus aliran listrik dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Apabila relay pengaman utama gagal dalam menjalankan tugasnya, maka relay pengaman kedua, yang disebut sebagai back-up relay, harus siap mengambil alih fungsi tersebut, seperti diperlihatkan pada Gambar 8.2.

Relay pengaman kedua ini dapat ditempatkan pada dua skenario berbeda:

1. Local Back-Up

- ✓ Relay pengaman utama dan *back-up* relay ditempatkan pada lokasi yang sama.
- ✓ Contoh aplikasinya adalah pada pilot relay, di mana relay *back-up* diletakkan bersama dengan relay utama di stasiun yang sama.

2. Remote Back-Up

- ✓ Relay pengaman back-up ditempatkan di lokasi atau stasiun yang berbeda, biasanya di sisi berikutnya yang berdampingan.
- ✓ Contohnya adalah pada *distance relay* untuk Sistem Udara Tegangan Tinggi (S.U.T.T.), di mana relay *back-up* diletakkan pada stasiun yang berbeda.

Kehadiran relay pengaman kedua sebagai back-up adalah penting untuk menjamin keandalan sistem. Hal ini memastikan bahwa bahkan jika satu elemen gagal, sistem tetap terlindungi dan dapat beroperasi dengan aman, mengurangi risiko kerusakan lebih lanjut pada peralatan dan infrastruktur.

8.4. Daerah Pengamanan dalam Sistem Tenaga Listrik

Konsep daerah pengamanan dalam sistem tenaga listrik merupakan aspek penting dalam desain dan operasional sistem proteksi. Daerah pengamanan ini merujuk pada zona atau wilayah tertentu dalam sistem yang dilindungi oleh perangkat pengaman, seperti relay. Penentuan daerah pengamanan ini dilakukan dengan

cermat agar setiap segmen dari sistem tenaga listrik mendapat perlindungan yang adekuat.

Salah satu prinsip kunci dalam penentuan daerah pengamanan adalah konsep *overlapping*. *Overlapping* atau tumpang tindih di sini berarti bahwa setiap daerah pengamanan tidak berdiri sendiri, melainkan memiliki interseksi atau overlap dengan daerah pengamanan lain. Tujuannya adalah untuk menyediakan lapisan pengamanan tambahan, sehingga jika terjadi gangguan atau kegagalan pada satu daerah, daerah lain yang bertumpang tindih dapat mengambil alih fungsi proteksi. Ini menjamin tidak ada bagian dari sistem yang tidak terlindungi, meminimalisir risiko kerusakan atau kegagalan sistem akibat gangguan yang tidak terdeteksi.

Konsep daerah pengamanan dan *overlapping* ini sangat penting untuk memastikan efektivitas sistem proteksi tenaga listrik. Dengan cara ini, keselamatan dan keandalan dalam penyediaan tenaga listrik dapat terjaga, menghindari dampak negatif pada infrastruktur dan konsumen akhir.

8.5. Backup Relay dan Konsep Backup Jarak Jauh

Dalam sistem proteksi tenaga listrik, backup relay memainkan peran kritis. Relay ini berfungsi sebagai lapisan proteksi tambahan, yang beroperasi apabila relay utama gagal atau tidak mampu merespons dengan cepat terhadap gangguan. Backup relay ini memastikan bahwa

sistem tetap aman dan terlindungi, bahkan ketika terjadi situasi yang tidak terduga atau ekstrem.

Konsep backup jarak jauh, atau *remote backup*, merupakan pengembangan lanjutan dari ide backup relay. Backup jarak jauh dirancang untuk menyediakan proteksi tambahan dengan cara menempatkan relay backup pada lokasi yang jauh dari relay utama. Hal ini menjamin bahwa jika terjadi gangguan yang meluas atau masalah serius pada lokasi utama, relay di lokasi jauh ini dapat mengambil alih kontrol untuk mencegah kegagalan sistem yang lebih besar. Implementasi dari backup jarak jauh biasanya melibatkan pengaturan yang canggih, termasuk sistem komunikasi dan kontrol yang mampu merespons secara efektif dari jarak jauh.

Pentingnya backup relay dan konsep backup jarak jauh terletak pada kemampuan mereka untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi tenaga listrik. Dengan adanya lapisan proteksi tambahan ini, risiko kerusakan akibat gangguan listrik dapat diminimalisir, sehingga menjamin keamanan dan kelancaran penyediaan tenaga listrik kepada pengguna.

8.6. Prinsip Dasar Kerja dan Tipe Relay Elektro-Magnetis

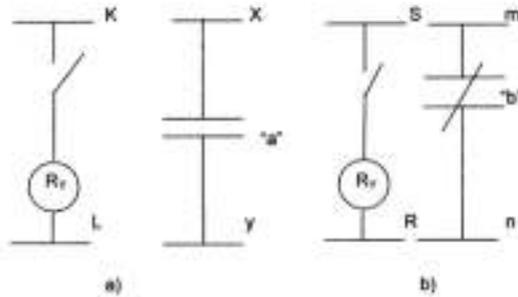
Relay elektro-magnetis beroperasi berdasarkan prinsip induksi magnetik. Komponen utama dari relay ini adalah kumparan yang, ketika dialiri arus listrik, menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini

kemudian digunakan untuk menggerakkan berbagai mekanisme relay, yang memicu aksi atau pemutusan dalam sistem tenaga listrik, tipe kerja relaynya diperlihatkan pada Gambar 8.3.

Salah satu tipe relay elektro-magnetis adalah relay tipe torak atau plunger. Tipe ini menggunakan prinsip torak magnetik yang bergerak masuk dan keluar dari kumparan, menghasilkan gerakan linear. Keuntungannya adalah respons yang cepat dan desain yang sederhana, tetapi kerugiannya termasuk keterbatasan dalam hal penyesuaian dan sensitivitas.

Tipe lainnya adalah relay tipe armatur yang digantung atau hinged armature relay. Relay ini memiliki armatur yang digantung pada pivot, yang bergerak karena tarikan medan magnet. Relay ini lebih sensitif dan dapat diatur dengan lebih presisi, tetapi memiliki desain yang lebih kompleks.

Selanjutnya, ada relay tipe batang seimbang atau balanced beam relay. Relay ini menggunakan batang yang seimbang pada titik tengah, dengan beban pada kedua ujungnya. Perubahan dalam kondisi listrik akan menggerakkan batang ini, menyebabkan aksi relay. Relay ini memberikan keakuratan yang tinggi, tetapi kompleksitas desainnya bisa menjadi kerugian.



Gambar 8.10. Relay (a) *Normaly open*, (b) *normaly close*

Relay cakram induksi dan relay kap induksi adalah tipe lain yang penting. Kedua tipe ini menggunakan prinsip induksi elektromagnetik untuk memutar cakram atau kap, yang kemudian menggerakkan mekanisme switch. Mereka menawarkan keuntungan dalam hal sensitivitas dan keakuratan, tetapi memerlukan pemeliharaan yang lebih hati-hati dan terpengaruh oleh perubahan frekuensi.

8.7. Relay Arus Lebih dan Karakteristiknya

Relay arus lebih atau over current relay merupakan salah satu komponen penting dalam sistem proteksi tenaga listrik. Relay ini dirancang untuk merespons kondisi di mana arus yang mengalir melebihi batas aman, yang bisa mengindikasikan adanya gangguan seperti hubungan singkat atau beban berlebih.

Ada beberapa jenis relay arus lebih, masing-masing dengan karakteristik khususnya. Pertama, ada relay arus lebih seketika (*instantaneous over current relay*). Jenis relay ini dirancang untuk merespons dengan sangat cepat terhadap kondisi arus lebih, tanpa keterlambatan waktu. Relay ini cocok untuk kondisi di mana respon cepat sangat dibutuhkan untuk mencegah kerusakan.

Kedua, relay arus lebih waktu tertentu (*definite time over current relay*). Relay ini memiliki setting waktu tertentu sebelum beroperasi setelah mendeteksi arus lebih. Waktu ini bisa disesuaikan sesuai kebutuhan sistem. Relay jenis ini memberikan fleksibilitas dalam koordinasi proteksi, tetapi mungkin tidak secepat relay seketika dalam merespons kondisi darurat.

Ketiga, relay arus lebih berbanding terbalik (*inverse time over current relay*). Karakteristiknya adalah waktu operasi relay ini berbanding terbalik dengan besarnya arus yang melebihi batas normal. Semakin besar arusnya, semakin cepat relay ini bereaksi. Jenis relay ini sangat berguna dalam situasi dimana kebutuhan akan respon yang lebih cepat meningkat seiring dengan peningkatan keparahan kondisi arus lebih.

Setiap jenis relay arus lebih ini memiliki peran khusus dalam sistem proteksi, dan pemilihan tipe yang tepat tergantung pada karakteristik dan kebutuhan spesifik dari sistem tenaga listrik yang dilindungi.

8.8. Konsep Arus Kerja (*Pick-up*) dan Arus Kembali (*Drop-off*)

Dalam sistem proteksi tenaga listrik, terutama pada relay arus lebih, konsep arus kerja (*pick-up*) dan arus kembali (*drop-off*) memiliki peran penting. Arus kerja atau *pick-up* merujuk pada nilai minimum arus yang memicu relay untuk beroperasi. Ini adalah batas arus di mana relay diatur untuk merespons terhadap kondisi yang tidak normal, seperti kelebihan beban atau hubungan singkat. Nilai ini harus diatur dengan teliti agar relay dapat merespons secara akurat sesuai dengan kebutuhan proteksi.

Di sisi lain, arus kembali atau *drop-off* adalah nilai arus di mana relay akan kembali ke keadaan semula (tidak aktif) setelah beroperasi. Nilai ini biasanya lebih rendah dari nilai arus kerja, dan perbedaan antara kedua nilai ini penting untuk mencegah operasi yang tidak stabil dari relay (seperti terus-menerus menyala dan mati).

Pemahaman yang baik terhadap konsep arus kerja dan arus kembali penting dalam pengaturan sistem proteksi. Nilai-nilai ini memastikan bahwa relay hanya beroperasi pada kondisi yang benar-benar memerlukan intervensi, sehingga mencegah gangguan yang tidak perlu pada sistem tenaga listrik. Pengaturan yang tepat pada kedua parameter ini membantu dalam mencapai keseimbangan antara keandalan dan sensitivitas proteksi, yang merupakan faktor kunci dalam desain sistem proteksi yang efektif.

8.9. Konstruksi Relay Arus Lebih

Konstruksi relay arus lebih merupakan aspek kritis dalam sistem proteksi tenaga listrik. Relay ini dirancang khusus untuk merespons kondisi di mana arus melampaui nilai tertentu, yang mengindikasikan adanya gangguan. Dalam konstruksinya, relay arus lebih memiliki beberapa komponen utama, seperti kumparan, inti magnetis, mekanisme penggerak, dan kontak switch.

Ada beberapa tipe relay arus lebih yang umum digunakan dalam sistem proteksi, masing-masing dengan karakteristik dan aplikasi khusus. Contohnya:

1. **Relay Arus Lebih Seketika:** Jenis ini memiliki konstruksi sederhana tanpa elemen waktu. Mereka langsung merespons ketika arus melebihi nilai tertentu, sangat cocok untuk kondisi darurat di mana respon cepat diperlukan.
2. **Relay Arus Lebih Waktu Tertentu:** Relay ini memiliki elemen waktu yang memungkinkan pengaturan keterlambatan operasi setelah deteksi arus lebih. Konstruksinya lebih kompleks, memungkinkan koordinasi yang lebih baik dalam sistem proteksi yang besar.
3. **Relay Arus Lebih Berbanding Terbalik:** Menggunakan prinsip di mana waktu respons berbanding terbalik dengan besarnya arus. Konstruksinya melibatkan elemen yang sensitif

terhadap perubahan arus, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan respons adaptif.

Dalam aplikasi sistem proteksi, relay arus lebih dipasang untuk mengawasi kondisi tertentu dalam sistem, seperti bagian dari jaringan, transformator, atau peralatan lainnya. Penempatan dan pengaturan relay ini sangat penting untuk memastikan bahwa mereka beroperasi secara efisien dan efektif, memberikan perlindungan yang diperlukan tanpa menyebabkan interupsi yang tidak perlu.

Konstruksi dan aplikasi relay arus lebih harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari sistem tenaga listrik. Ini memastikan bahwa setiap bagian dari sistem dilindungi secara adekuat, meminimalkan risiko kerusakan akibat gangguan listrik.

8.10. Pemilihan dan Penyetelan Arus Kerja dan Kelambatan Waktu

Pemilihan dan penyetelan arus kerja serta kelambatan waktu pada relay arus lebih adalah langkah kritis dalam desain sistem proteksi tenaga listrik. Arus kerja, atau *pick-up setting*, adalah nilai arus di mana relay mulai bereaksi, sedangkan kelambatan waktu adalah durasi yang dibutuhkan relay untuk merespons setelah mendeteksi kondisi arus lebih. Dalam menetapkan arus kerja, pertimbangan utama adalah besarnya arus normal dalam sistem dan tingkat arus yang mungkin terjadi

selama kondisi gangguan. Nilai arus kerja harus lebih tinggi dari arus normal untuk menghindari operasi relay yang tidak perlu, namun cukup rendah untuk mendeteksi kondisi gangguan secara akurat.

Kelambatan waktu diatur berdasarkan kebutuhan koordinasi proteksi dalam sistem. Tujuannya adalah untuk memberikan waktu yang cukup bagi relay yang lebih hulu (*upstream*) untuk merespons terlebih dahulu, dan jika gagal, relay yang lebih hilir (*downstream*) akan beroperasi. Penyetelan ini memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu dari sistem yang terpengaruh, meminimalkan dampak pada sistem secara keseluruhan.

Sebagai contoh, dalam sebuah sistem tenaga listrik, relay arus lebih pada feeder utama mungkin diatur dengan arus kerja yang tinggi dan waktu tunda yang pendek untuk merespons cepat terhadap gangguan besar. Sedangkan relay pada cabang yang lebih kecil mungkin memiliki arus kerja yang lebih rendah dan waktu tunda yang lebih panjang, memberikan prioritas kepada proteksi di tingkat yang lebih tinggi.

Pemilihan dan penyetelan yang tepat pada arus kerja dan kelambatan waktu adalah kunci untuk menciptakan sistem proteksi yang efisien dan andal. Ini memastikan bahwa relay bereaksi secara tepat waktu dan akurat, memberikan perlindungan optimal pada sistem tenaga listrik.

BAB IX. PERATURAN DAN KEBIJAKAN ENERGI

Peraturan dan kebijakan energi mempengaruhi operasi dan perencanaan sistem tenaga listrik dapat sangat kompleks dan bervariasi untuk setiap negara. Namun, secara umum faktor utama yang perlu dipertimbangkan untuk kebijakan energi untuk Indonesia ini, yakni terkait isu - isu terkini seperti peraturan dan kebijakan energi nasional, tarif, dan insentif untuk energi bersih dan partisipasi masyarakat. Menurut UU No. 30 tahun 2009, pengembangan tenaga listrik di Indonesia memiliki tujuan untuk mengamankan pasokan listrik dengan harga dan kualitas baik yang dapat menjangkau masyarakat menuju pembangunan berkelanjutan. Target kontribusi minimal pada produksi energi tahun 2020 yakni tertuang dalam Peraturan Presiden Nomor 5 tahun 2006 mengenai KEN. Andil energi untuk biofuel mencapai 5%, sumber panas bumi mencapai 5%, sementara sumber lainnya seperti angin, matahari, nuklir, air, dan biomassa mencapai 2%.

Berdasarkan data Kementerian BUMN, Bauran sumber energi primer di Indonesia sebesar 67,21% pada tahun 2022. Mayoritas sumber energi berasal dari batu bara (CNBC, 2023). Menariknya, integrasi energi dari batu bara mengalami kenaikan dibandingkan tahun 2021 yang hanya 66,01%. Pemerintah terus berupaya untuk menuju transisi energi yang bersih. Satu diantaranya

dengan menambah integrasi energi sektor EBT yang juga mengalami kenaikan, dari tahun 2021 sebesar 13,65% menjadi 14,11% pada 2022. Meskipun secara porsi nasional masih terbilang kecil dibandingkan batu bara, Pemerintah mencoba melakukan pengembangan EBT dengan menerbitkan peraturan dan kebijakan pendukungnya. Gambar 9.1. Menunjukkan bauran aset energi utama pembangkit listrik yang ada di Indonesia.



Gambar 9.1. Bauran sumber energi primer di Indonesia (data.indonesia.id)

Indonesia menempati urutan tujuh dunia sebagai penghasil emisi GRK tahun 2022 (dataindonesia.id 2023). Kita tahu bahwa GRK ini bisa berdampak pada perubahan iklim dunia. Perubahan iklim yang

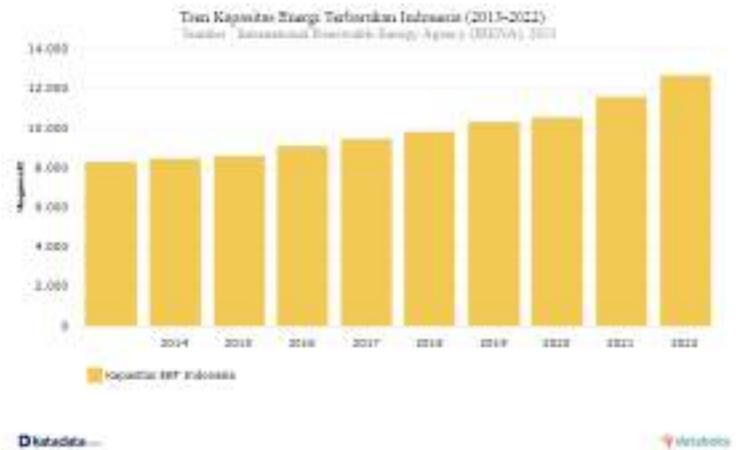
berkelanjutan akan mempengaruhi pemanasan global dan kesehatan manusia. Ada tiga upaya yang dapat dilakukan untuk menekan atau mengurangi perubahan iklim ini, yakni elektrifikasi pada pengguna akhir, pengurangan emisi karbon dari sumber energi listrik, dan upaya efisiensi energi (Vidinopoulos, Whale, and Fuentes, 2020). Indonesia menerbitkan beberapa peraturan dan kebijakan yang akan dibahas selanjutnya, sebagai bentuk tindak lanjut kontribusi pengurangan emisi GRK.

9.1. Peraturan dan Kebijakan Energi Nasional

Pedoman kebijakan pengelolaan energi di masa depan mengikuti konsep baru dengan mencapai tujuan untuk menciptakan lingkungan yang sehat melalui implementasi program energi bersih. Penegasan ini diperkuat berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 tahun 2014 yang terkait dengan Kebijakan Energi Nasional dengan salah satu fokus utamanya adalah pertumbuhan EBT. Sasaran pertumbuhan energi terbarukan yang diusulkan adalah sekitar hingga 2025 tercapai 23% dan 31% ditargetkan hingga 2050 dari keseluruhan kebutuhan energi di tingkat nasional.

Prioritas pertumbuhan EBT dilakukan sejalan dengan visi yang tertuang pada Peraturan Presiden Nomor 22 tahun 2017 mengenai Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) menyatakan tujuan mencapai pengelolaan energi yang adil, berkesinambungan, dan

berfokus pada lingkungan bersih. Fokus diberikan pada pengembangan energi terbarukan dan upaya konservasi energi sebagai langkah untuk mencapai kemandirian dan ketahanan energi di tingkat nasional. Kemandirian yang dimaksud yakni menyediakan energi dengan menggunakan sumber daya lokal di Indonesia. Sedangkan ketahanan energi nasional yang dimaksud adalah bagi masyarakat mendapatkan energi listrik secara berkelanjutan dengan harga yang relatif murah namun dengan fokus menjaga lingkungan sekitar.



Gambar 9.2. Tren kapasitas PLT EBT 2013 – 2022
(katadata)

Adapun misi berdasarkan KEN yaitu berorientasi pada pengoptimalan sumber daya energi dan SDM untuk mencapai kemandirian dan ketahanan energi. Isu

saat ini yang terjadi yakni sumber daya energi saat ini masih dianggap sebagai komoditas yang memberikan kontribusi kepada penerimaan devisa negara, namun belum dianggap sebagai modal untuk pembangunan.. Aset energi seperti batu bara dan gas ini kedepannya akan mulai dikendalikan untuk eksportnya, bahkan bisa saja dihentikan. Hal ini untuk mencapai tujuan KEN, yang mana aset energi tersebut dimanfaatkan sebagai investasi untuk mendorong kemajuan pembangunan di Indonesia.

Tujuan dari KEN ini masih merujuk pada RUEN, yakni bagaimana pemanfaatan aset energi dapat dikelola dengan efisien, terintegrasi, dan berkesinambungan.. Tentu dengan fokus kemandirian dalam pengelolaannya. Ini akan mencanangkan penciptaan peluang pekerjaan baru dan meningkatkan kemampuan sumber daya manusia. Tujuan lain yang tak kalah penting yaitu mewujudkan kelestarian lingkungan hidup dan terkendalinya dampak perubahan iklim. Sejalan dengan kesepakatan Paris, pemerintah berkomitmen agar suhu global tetap di bawah 1,5°C, dan hal ini diterapkan melalui Penetapan Nomor 6 tahun 2016. Itulah mengapa pemerintah berupaya untuk terus mengembangkan sektor EBT sebagai diversifikasi ketenagalistrikan dimasa mendatang.

Sebagai bagian utama dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK), sektor energi menjadi fokus utama. Lebih lanjut pembangunan dan pengembangan infrastruktur tenaga listrik berbasis terbarukan semakin

mendorong penurunan GRK yang Indonesia telah merumuskan tujuan untuk mengurangi sebesar 29% pada tahun 2030 melalui inisiatif internal, serta 41% dengan bantuan dan dukungan dari komunitas internasional (ahmad maghfuri, Suyono, Yanif, 2022). Keseriusan pemerintah dalam penanganan perubahan iklim tertuang dalam penerbitan Peraturan Presiden Nomor 98 tahun 2021. Sub sektor difokuskan pada bagian mitigasi perubahan iklim adalah sub sektor pembangkit. Berdasarkan hal tersebut, Presiden Joko Widodo melakukan upaya percepatan pengembangan energi baru terbarukan (EBT). Maksudnya adalah untuk mempercepat integrasi EBT ke dalam campuran energi nasional sesuai dengan Rencana KEN, dan upaya penurunan GRK.



Gambar 9.3. Presiden Joko Widodo saat KTT di Paris 2015 (Republika)

Pengembangan infrastruktur tenaga listrik kedepannya akan dilakukan diversifikasi sumber energi. Upaya percepatan pengembangan EBT melalui diterbitkannya Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022. Didalamnya terdiri dari tujuh bagian utama dan 42 pasal, yang mengatur berbagai aspek, termasuk: 1. Aspek umum, mencakup regulasi mengenai Rencana Umum Pembangunan Ketenagalistrikan berbasis energi terbarukan dan fase transisi energi dengan mengakhiri operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU); 2. Regulasi mengenai penetapan harga pembelian tenaga listrik; 3. Panduan pelaksanaan pembelian tenaga listrik; 4. Peraturan terkait perjanjian jual beli listrik; 5. Aspek dukungan pemerintah; 6. Aturan mengenai pembinaan dan pengawasan; dan 7. Regulasi peralihan. Dengan adanya Perpres ini, kebijakan harga EBT menjadi lebih terperinci, diharapkan dapat merangsang peningkatan investasi untuk meningkatkan ketersediaan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan.

Lantas, bagaimana perkembangan PLT EBT saat ini di Indonesia? Berikut data yang dapat dipaparkan yang diambil dari Renstra Ditjen EBTKE 2020 - 2024. Pemerintah melalui Ditjen EBTKE berkomitmen untuk terus melakukan pengembangan dan pembangunan energi bersih secara berkelanjutan. Hal tersebut dapat terlihat dari peningkatan pembangunan infrastruktur pembangkitan tenaga listrik mulai dari Pembangkit listrik yang menggunakan energi dari panas bumi, sumber air kecil (minihidro), tenaga air (hidro), matahari (surya), biogas, biomassa, dan limbah. Upaya

Pemerintah dalam peningkatan PLT EBT setiap tahunnya terus meningkat. Hal utama yang menjadi target kedepan dari pemerintah yakni upaya diversifikasi sumber energi listrik yang merata dan difokuskan ke energi hijau.



Gambar 9.4. Perkembangan PLT EBT (Renstra Ditjen EBTKE 2020 – 2024)

Diharapkan dengan diversifikasi sumber energi listrik ini dapat menjadikan kemandirian dan ketahanan energi dimasa mendatang, selain itu sebagai bentuk dekarbonisasi aset energi utama di Indonesia. Peningkatan kapasitas PLT EBT terlihat pada gambar 9.5. Dampak dari upaya pengurangan emisi GRK dan pengembangan PLT EBT, tertuang pada pasal 3 pada Perpres No. 112 tahun 2022 adalah akselerasi penghentian operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang saat ini menjadi kontributor utama dalam produksi listrik Indonesia. Proses transisi energi ini,

diharapkan akan mengurangi PLTU bahkan berangsur hingga 2050.



Gambar 9.5. Kapasitas PLT EBT hingga tahun 2019 (Renstra Ditjen EBTKE 2020 – 2024)

9.2. Insentif untuk Energi Bersih

Insentif merupakan upaya pemerintah dalam menarik investor untuk pengembangan dan pembangunan PLT EBT. Pemerintah Pusat dan Pemerintah Daerah memberikan berbagai insentif sesuai dengan kewenangan masing - masing. Berikut ini pemaparan insentif terkait pengembangan PLT EBT berdasarkan Renstra Ditjen EBTKE 2020 – 2024.

9.2.1. Insentif pada Sektor PLTP

Selama proses pengembangan proyek Pembangkitan Listrik bertenaga Panas Bumi (PLTP), pelaksanaan ini selain berfokus pada perkembangan

infrastruktur setempat seperti jembatan, jalan raya, sistem pengairan, fasilitas pelabuhan, dan khususnya aspek kelistrikan, namun juga secara substansial membentuk landasan bagi kemajuan masyarakat setempat. Fasilitas infrastruktur yang tersedia bukan hanya menjadi aset bagi penduduk dan sektor industri kecil di sekitarnya, melainkan juga menjadi pendorong yang berpengaruh secara substansial terhadap pertumbuhan ekonomi di tingkat daerah. Selain berperan sebagai pemasok sumber daya bagi masyarakat dan sektor industri kecil di lingkungan sekitar, fasilitas ini juga memiliki potensi untuk mendukung pengembangan sektor pariwisata setempat, memberikan kontribusi positif pada kegiatan lingkungan dan pelestarian hutan, dan meningkatkan kapasitas dalam pencegahan serta penanggulangan bencana. Kesemuanya ini pada akhirnya menciptakan dampak positif pada peningkatan kualitas hidup dan kesejahteraan masyarakat setempat.

Penting untuk diperhatikan bahwa pengembang panas bumi tidak sepenuhnya bertanggung jawab atas pembangunan infrastruktur di sekitar proyek ini. Proyek PLTP menghadapi tantangan signifikan dalam hal investasi dan risiko pengembangan, terutama pada fase awal pengembangan. Dalam konteks ini, bantuan atau insentif pada pembangunan infrastruktur memiliki peranan krusial untuk meningkatkan kelayakan dan keberlanjutan proyek PLTP. Dalam rangka mengurangi tekanan keuangan terhadap Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN) atau Anggaran Pendapatan dan

Belanja Daerah (APBD) terkait pembangunan infrastruktur, dapat diterapkan skema insentif. Skema ini melibatkan penggantian selisih antara tarif ekonomi proyek dan daya beli dari PLN, dengan melakukan analisis yang sangat terperinci untuk setiap proyek PLTP.

PLTP sebagai energi hijau yang bersahabat dengan lingkungan ditargetkan dapat mencapai 7,2GW (Giga Watt) pada tahun 2025, kemudian 17,6 GW hingga tahun 2050. PLTP ini diproyeksikan sebagai kontributor kapasitas pembangkit yang cukup banyak dibandingkan dengan PLT EBT lainnya. Dengan emisi GRK yang lebih rendah dibanding PLTU ataupun PLTD, pemberian insentif lingkungan bisa dilakukan untuk meningkatkan keberlanjutan proyek PLTP.

9.2.2. Insentif pada Sektor PLTS

Untuk memastikan para pengembang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memperoleh insentif fiskal dari kegiatan impor barang, diperlukan aturan baru yang tentang fasilitas untuk pengembangan energi terbarukan ini. Insentif fiskal tidak hanya diberikan kepada pengembang PLTS, melainkan juga diperluas ke industri yang memproduksi alat dan bahan terkait PLTS. Fasilitas insentif fiskal yang diharapkan mencakup pembebasan bea masuk, Pajak Pertambahan Nilai (PPN), dan Pajak Penghasilan (PPh) 22. Selain itu, pembebasan impor barang ini juga mencakup suku cadang yang terkait. Upaya ini bertujuan untuk mendorong pertumbuhan

sektor energi terbarukan dan meningkatkan penerapan teknologi ramah lingkungan di berbagai industri terkait.

Peraturan Menteri Keuangan (PMK) Nomor 21 tahun 2010 yang membicarakan tentang pemberian fasilitas perpajakan dan kepastian untuk terkait pengelolaan EBT, telah memberikan rangkaian fasilitas insentif fiskal secara menyeluruh kepada para pengembang energi terbarukan. Penting untuk dicatat bahwa PMK 21/2010 bukan merupakan PMK implementasi. Salah satu saran pada pernyataan pertama dapat diwujudkan dengan dua cara, yaitu dengan membuat Peraturan Menteri Keuangan (PMK) yang baru secara spesifik untuk pengembangan EBT atau dengan merevisi PMK Nomor 21 tahun 2010 agar lebih sesuai dengan kebutuhan dan perkembangan terkini dalam industri energi terbarukan.

Selain sektor PLT EBT yang sudah dijelaskan di atas, sektor PLT EBT lainnya pun juga mendapatkan insentif yang kurang lebih sama. Berdasarkan Perpres No. 112 tahun 2022, Badan usaha yang mengembangkan PLT EBT mendapatkan insentif tersebut. Berkenaan dengan insentif fiskal, terdapat fasilitas pengurangan pajak penghasilan sesuai dengan regulasi yang berlaku. Selain itu, terdapat fasilitas pembebasan bea masuk impor. Juga, terdapat dukungan melalui fasilitas pajak untuk tanah dan bangunan, upaya pembangunan panas bumi, serta bantuan fasilitas pembiayaan dan jaminan melalui Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang ditunjuk oleh pemerintah. Sementara itu, insentif

nonfiskal disediakan oleh pemerintah pusat atau pemerintah daerah berdasarkan ketentuan hukum yang berlaku.

Selain insentif, melalui Perpres yang sama Pasal 23 *Ayat 1*, menjelaskan bahwa menteri, pejabat terkait, kepala lembaga, atau pemerintah daerah harus mendukung pengembangan pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan sesuai dengan kewenangan masing - masing.

Ayat 2 menegaskan bahwa menteri memberikan bantuan sebagaimana yang dijelaskan pada ayat 1 yakni penyusunan strategi pengembangan pembangkit listrik yang menggunakan EBT.

Ayat 3 menekankan bahwa menteri yang bertanggung jawab atas urusan keuangan negara memberikan dukungan seperti yang dijelaskan pada ayat (1), yang mencakup pemberian insentif fiskal yang diatur pada Pasal 22 ayat (2).

Ayat 4 menerangkan bahwa menteri yang bertanggung jawab atas urusan agraria, pertanahan, dan tata ruang memberikan dukungan sebagaimana dijelaskan pada ayat (1). Dukungan meliputi pemberian skala prioritas pada pengembangan PLT yang menggunakan EBT dalam perencanaan tata ruang nasional, serta kemudahan perizinan di sektor agraria, pertanahan, dan tata ruang untuk pengelolaan energi terbarukan. Tujuannya adalah untuk mengurangi biaya investasi dalam pemanfaatan EBT.

Ayat 5 menjelaskan bahwa menteri terkait urusan lingkungan hidup dan kehutanan memberikan dukungan sebagaimana dijelaskan pada ayat (1). Dukungan ini mencakup penyediaan kemudahan perizinan di wilayah hutan dan pengurangan biaya untuk mendukung pengelolaan EBT.

Ayat 6 menerangkan bahwa menteri yang bertanggung jawab atas urusan pemerintahan di bidang pekerjaan umum dan perumahan rakyat memberikan dukungan sebagaimana dijelaskan pada ayat (1). Dukungan ini melibatkan penyediaan kemudahan perizinan dan pengurangan biaya untuk mendukung pengembangan energi terbarukan.

Ayat 7 memaparkan bahwa menteri yang memimpin urusan pemerintahan di bidang pemerintahan dalam negeri memberikan dukungan sebagaimana yang dijelaskan pada ayat (1). Dukungan ini mencakup penyusunan kebijakan yang bertujuan untuk mendukung pengembangan PLT EBT di tingkat pemerintah daerah.

Ayat 8 menjelaskan bahwa menteri yang memimpin pemerintahan dalam pengelolaan badan usaha milik negara memberikan dukungan sesuai dengan yang dijelaskan pada ayat (1). Dukungan ini mencakup penetapan target penggunaan EBT sebagai bagian dari indikator kinerja PT. PLN (Persero).

Ayat 9 menerangkan bahwa menteri yang bertanggung jawab atas pemerintahan di sektor perindustrian

memberikan dukungan sesuai dengan yang dijelaskan pada ayat (1). Dukungan ini diberikan kepada Badan Usaha dengan menekankan prioritas pada penggunaan produk buatan negeri melalui:

- a. Pembentukan kapabilitas pasokan yang mencakup aspek kualitas, biaya, serta pengiriman yang dapat diterima, dan meningkatkan kedalaman struktur industri;
- b. Penetapan batas impor untuk komponen pembangkit energi terbarukan, dengan merujuk pada kapasitas nasional atau pasokan dalam negeri;
- c. Verifikasi tingkat komponen dalam negeri untuk komponen pembangkit energi terbarukan; dan
- d. Penyusunan peta jalan untuk pengembangan industri pendukung dalam sektor ketenagalistrikan.

Pasal 10 menjelaskan terkait prioritas dukungan terhadap penggunaan produk buatan sendiri, seperti yang diuraikan pada Pasal 9, akan diatur lebih lanjut oleh menteri yang memimpin urusan pemerintahan di bidang industri.

Pasal 11 memaparkan terkait menteri atau kepala lembaga yang bertanggung jawab atas urusan pemerintahan di bidang investasi atau koordinasi penanaman modal memberikan dukungan sesuai dengan yang dijelaskan pada Pasal 1. Dukungan ini

mencakup pelaksanaan proses perizinan usaha dan fasilitas penanaman modal dalam pengembangan EBT di tingkat pusat dan daerah.

Pasal 12 menerangkan bahwa pemerintah daerah, seperti yang disebutkan pada Pasal 1, memberikan dukungan berupa penyediaan kemudahan perizinan, insentif, dan jaminan ketersediaan lahan sesuai dengan peruntukannya untuk pengembangan pembangkit listrik EBT.

Dengan segala kemudahan dan dukungan fasilitas dari pemerintah ini, diharapkan banyak badan usaha yang ikut serta dalam pengembangan PLT EBT demi transisi energi yang berjalan dengan baik.

Langkah - langkah percepatan dalam mengembangkan Bahan Bakar Nabati (BBN) diterapkan berdasarkan petunjuk yang diuraikan dalam Instruksi Presiden Nomor 1 tahun 2006 tentang pemenuhan dan pemanfaatan Bahan Bakar Nabati (Biofuel) sebagai varian bahan bakar. Program Biodiesel telah dijalankan sejak tahun 2006 melalui 500 Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) di DKI Jakarta, Surabaya, Malang, dan Denpasar. Selanjutnya, sejak tahun 2008, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 32 Tahun 2008 mengamanatkan kepada pelaku usaha dan konsumen Bahan Bakar Minyak (BBM) untuk secara aktif mendukung pemanfaatan Bahan Bakar Nabati (BBN) sebagai bahan tambahan dalam BBM. Kewajiban ini sejalan dengan komitmen Presiden Republik Indonesia dalam Konferensi Pihak-pihak

(COP) 21 Paris 2015 dan Marakesh (Maroko) 2016 untuk mengurangi emisi sebesar 29% pada tahun 2030. Upaya ini mencakup peningkatan penggunaan sumber energi terbarukan hingga mencapai 23% dari total konsumsi energi nasional pada tahun 2025, termasuk di dalamnya adalah pemanfaatan Biodiesel.

9.3. Harga Listrik Energi Baru Terbarukan

Penentuan harga listrik EBT ini menjadikan “angin segar” bagi para pelaku usaha PLT EBT. Pasalnya, hadirnya harga yang jelas yang ditetapkan pemerintah menjadikan investasi pengembangan PLT EBT ini menjadi lebih menarik. Berdasarkan Perpres No. 112 tahun 2022, pemerintah telah menetapkan harga beli pada tiap - tiap produksi listrik yang dihasilkan dari EBT. Seperti pada PLTA aliran atau terjunan air, pemerintah menetapkan harga dikisaran sebesar USD 11.23 sen untuk kapasitas sampai dengan 1MW. Harga relatif semakin menurun ketika kapasitas semakin naik. Tercatat untuk kapasitas >100MW, pemerintah menghargai sebesar USD 6.74 sen. Khusus untuk tahun 1 - 10 ini, pemerintah mengalikan dengan faktor F. Faktor F ini tiap lokasi, tiap wilayah memiliki variasi nilai yang beragam. Pada tahun 11 - 30 tahun, pemerintah menghargai harga beli listrik pada kisaran USD 7.02 sen pada kapasitas terendah. Untuk kapasitas PLTA tertinggi harga beli listriknya adalah USD 4.21 sen. Bedanya, pada kisaran tahun tersebut, tidak ada faktor F sebagai pengalinya.



Gambar 9.6. Data harga beli listrik PLTA aliran/terjunan

(Harga patokan tertinggi tahun 1-10 dikalikan faktor F)

Baik harga pembelian listrik untuk PLTA yang menggunakan waduk/irigasi milik negara ataupun PLTA ekspansi, dihargai sama oleh pemerintah seperti pada gambar 9.6. Perbedaannya adalah pada faktor kali. Pada PLTA waduk/irigasi negara, dikalikan 0.8 seluruh skema tahunnya. Sedangkan untuk PLTA ekspansi, dikalikan 0.7. Khusus untuk PLTA excess power, seluruh kapasitas dihargai USD 5.80 sen dikalikan 0.7.

Untuk pembelian listrik yang dihasilkan dari PLTS (tenaga surya) dibagi setidaknya menjadi tiga jenis. Seperti halnya PLTS Fotovoltaik, Fotovoltaik ekspansi, dan PLTS yang lahannya disediakan oleh negara. Tiap jenis tersebut memiliki nilai beli yang sama, perbedaannya adalah pada faktor kalinya. Pada kapasitas s.d. 1MW, pemerintah menghargai sebesar

USD 11.47 sen. Kapasitas tertingginya yakni >20MW, pemerintah memberlakukan harga USD 6.95 sen. Harga beli yang disebutkan adalah untuk skema 1 - 10 tahun. Untuk skema 11 - 30 tahun, pemerintah memberikan harga USD 6.88 sen untuk kapasitas terkecilnya, dan kapasitas terbesarnya adalah USD 4.17 sen. Pada PLTS fotovoltaik, tidak ada faktor kali. Sedangkan untuk Fotovoltaik ekspansi memiliki faktor kali 0.8 dan Fotovoltaik lahan negara faktor kalinya 0.95. Tiap data harga beli listrik yang disebutkan belum termasuk baterai ataupun fasilitas penyimpanan energi yang dihasilkan dari tenaga surya ini.



Gambar 9.7. Data harga beli listrik PLTS Fotovoltaik

PLTB atau tenaga bayu (angin) memiliki *range* kapasitas yang relatif sedikit dibandingkan PLT EBT sebelumnya. *Range* kapasitas PLTB berdasarkan yang telah ditetapkan oleh pemerintah sebanyak tiga buah.

Kapasitas terendahnya yakni sampai dengan 5MW, pemerintah memberikan harga beli USD 11.22 sen. Untuk kapasitas tertingginya sebesar USD 9.54 sen, skema tahun pertama hingga kesepuluh. Sedangkan untuk skema tahun 11 hingga 30, kapasitas terendahnya senilai USD 6.73 sen dan tertingginya USD 5.73 sen. Pengali faktor F hanya diberlakukan pada skema 1 - 10 tahun saja. Sama halnya dengan PLTS, harga yang sudah disebutkan belum termasuk fasilitas penyimpanan energi. Untuk PLTB ekspansi, selain faktor F juga ada faktor pengali sebesar 0.7 untuk tiap skemanya.



Gambar 9.8. Data harga beli listrik PLTB

Pembangkit listrik dari biomassa atau dikenal PLTBm ini dibagi menjadi tiga oleh pemerintah. PLTBm, PLTBm ekspansi, dan PLTBm *excess power*. Untuk *range* kapasitasnya cukup beragam. Untuk skema tahun pertama hingga kesepuluh, kapasitas terendahnya sampai

dengan 1MW, pemerintah memberikan harga USD 11.55 sen. Sedangkan kapasitas tertinggi yakni >10MW bernilai USD 9.29 sen. Untuk skema tahun 11 hingga 25, kapasitas terendah USD 9.24 sen dan kapasitas tertingginya USD 7.43 sen. Faktor kali 0.8 hanya diberlakukan untuk PLTBm ekspansi disemua skema. Khusus untuk PLTBm *excess power*, seluruh kapasitas diberikan satu harga yakni USD 9.29 sen.



Gambar 9.9. Data harga beli listrik PLTBm

Data pembelian PLTBg atau dari biogas ini rentang tahun yang relatif sedikit dibanding PLT EBT lainnya. Skema terpanjangnya hanya sampai tahun ke-20. *Range* kapasitas terendahnya adalah sampai dengan 1MW berkisar USD 10.18 sen, sedangkan kapasitas tertingginya USD 7.44 sen pada skema tahun pertama hingga kesepuluh. Untuk skema kedua, kapasitas terendahnya USD 6.11 sen dan tertingginya USD 4.46

sen. Khusus untuk PLTBg *excess power*, diberlakukan satu harga yakni USD 7.44 sen.

PLTBg ini dibagi menjadi tiga jenis, PLTBg, PLTBg ekspansi, dan PLTBg *excess power*. Skema pertama, hanya PLTBg dan PLTBg ekspansi yang dikalikan faktor F. Sedangkan faktor kali 0.8 hanya untuk ekspansi. Untuk *excess power*, harga beli listrik tidak dipengaruhi faktor kali ataupun faktor F.



Gambar 9.10. Data harga beli listrik PLTBg

Biaya akuisisi energi listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) yang sepenuhnya dibangun oleh entitas bisnis dan yang sepenuhnya atau sebagian dibangun oleh pemerintah pusat atau pemerintah daerah, termasuk yang diberikan melalui hibah. Khusus skema pertama dikalikan faktor F.



Gambar 9.11. Data harga pembelian listrik dari PLTP negara

Harga pembelian tertinggi untuk tenaga listrik yang berasal dari berbagai jenis pembangkit yang dibangun oleh Pemerintah Pusat atau Daerah, termasuk yang diperoleh dari hibah. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) memiliki harga patokan tertinggi sebesar 3,76 cent USD per kilowatt jam. Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik (PLTS Fotovoltaik) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), harga patokan tertingginya sama, yaitu 5,63 cent USD per kilowatt jam. Sedangkan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm), harga pembelian tertinggi adalah 9,29 cent USD per kilowatt jam. Terakhir, Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) memiliki harga patokan tertinggi sebesar 7,44 cent USD per kilowatt jam.

Besaran faktor lokasi (F) untuk berbagai wilayah di Indonesia disajikan. Untuk wilayah Jawa, Madura, dan Bali, faktor lokasi ditetapkan pada 1,00, sementara pulau-pulau kecil di daerah tersebut memiliki faktor lokasi yang sedikit lebih tinggi, yakni 1,10. Di Sumatera, faktor lokasinya adalah 1,10, tetapi untuk Kepulauan Riau, Mentawai, dan Bangka Belitung, angka tersebut meningkat menjadi 1,20, kecuali untuk pulau-pulau kecil di Sumatera yang memiliki faktor 1,15. Kalimantan dan Sulawesi sama-sama memiliki faktor lokasi 1,10, namun pulau-pulau kecil di kedua daerah tersebut memiliki faktor 1,15. Nusa Tenggara menetapkan faktor lokasi pada 1,20, sementara pulau-pulau kecil di wilayah tersebut lebih tinggi lagi, yaitu 1,25. Untuk Maluku Utara dan Maluku, faktor lokasi adalah 1,25, sedangkan pulau-pulau kecil di kedua wilayah tersebut memiliki faktor 1,30. Terakhir, Papua Barat dan Papua sama-sama memiliki faktor lokasi yang paling tinggi di tabel ini, yaitu 1,50.

Kejelasan tarif listrik yang ditetapkan oleh pemerintah ini, diharapkan menjadikan tonggak semangat para pelaku usaha di sektor energi listrik.

9.4. Partisipasi Masyarakat dan Keterlibatan Publik

Rancangan Undang-Undang Energi Baru Terbarukan (RUU EBT), masyarakat diberikan hak untuk terlibat secara aktif dalam pengembangan dan

pelaksanaan energi baru terbarukan. Hak-hak ini meliputi:

1. Partisipasi dalam Kebijakan: Masyarakat memiliki hak untuk memberikan masukan dalam menetapkan arah kebijakan energi baru terbarukan. Hal ini memungkinkan suara publik untuk berperan dalam pembentukan kebijakan energi yang lebih inklusif dan berkelanjutan.
2. Pengajuan Keberatan: Masyarakat dapat mengajukan keberatan terhadap pelaksanaan peraturan atau kebijakan terkait energi baru dan terbarukan. Ini memberikan sarana untuk menanggapi dan menyesuaikan kebijakan yang mungkin tidak sesuai dengan kebutuhan atau aspirasi masyarakat.
3. Inisiatif dan Kolaborasi: Individu atau kelompok dalam masyarakat berhak mengambil inisiatif, baik secara perorangan maupun melalui kolaborasi, dalam penyediaan, penelitian, pengembangan, dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Ini mendorong inovasi dan partisipasi langsung masyarakat dalam transisi energi.
4. Pengawasan dan Evaluasi: Masyarakat juga berhak melakukan pengawasan dan evaluasi terhadap pelaksanaan peraturan atau kebijakan energi baru terbarukan. Ini memastikan transparansi dan akuntabilitas dalam pelaksanaan kebijakan energi.

Selain itu, dalam proses penyelenggaraan energi baru terbarukan, masyarakat juga diberikan hak tambahan, yaitu:

- a. Akses Informasi: Mendapatkan informasi terkait dengan perusahaan energi baru dan terbarukan dari Pemerintah Pusat dan/atau Pemerintah Daerah sesuai kewenangan mereka.
- b. Penerimaan Manfaat: Berhak menerima manfaat dari kegiatan perusahaan energi baru dan terbarukan. Ini bisa berupa manfaat ekonomi, sosial, atau lingkungan.
- c. Kesempatan Kerja: Memperoleh kesempatan kerja yang dihasilkan dari kegiatan penyelenggaraan energi baru terbarukan, mendukung penciptaan lapangan kerja dan pengembangan keterampilan dalam sektor ini.

Keseluruhan hak ini dirancang untuk memastikan bahwa masyarakat tidak hanya menjadi penerima pasif dari kebijakan energi, tetapi juga sebagai partisipan aktif dalam mengembangkan dan menerapkan solusi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Maghfuri, Suyono Thamrin, Yanif Dwi Kuntjoro, "Strategi Penurunan Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Di Kabupaten Cilacap Dalam Mendukung Nationally Determined Contribution", *Jurnal Ketahanan Energi*, Vol. 8 No.1 Hal 66-80.
- Alif Karnadi, "Mayoritas Bauran Energi Primer Indonesia dari Batu Bara", [dataindonesia.id](https://dataindonesia.id/energi-sda/detail/mayoritas-bauran-energi-primer-indonesia-dari-batu-bara), <https://dataindonesia.id/energi-sda/detail/mayoritas-bauran-energi-primer-indonesia-dari-batu-bara> (accessed 29 November 2023).
- Andrawina Narasura, 2021. *Metode Pemeliharaan JTR (Sutrsktr, SR & App) Berbasis Manajemen Aset | PDF [WWW Document]*. Scribd. URL <https://id.scribd.com/document/511006468/7-Metode-Pemeliharaan-Jtr-Sutrsktr-Sr-App-Berbasis-Manajemen-Aset> (accessed 12.3.23).
- Aulia Mutiara, "EBT Jauh, Pembangkit Listrik RI Masih Didominasi Batu Bara", *CNBC Indonesia*, <https://www.cnbcindonesia.com/research/20230523113140-128-439740/ebt-jauh-pembangkit-listrik-ri-masih-didominasi-batu-bara> (accessed 30 November 2023).

- Cekdin, C. (2021). *DISTRIBUSI DAYA LISTRIK: Teori dan Praktik*. Penerbit Andi.
- Chaiyabut, N., & Damrongkulkamjorn, P. (2012). Uncertainty Costs of Wind Power Generation Considering Expected Energy not Supplied under Different Spinning Reserve Levels. *Power and Energy Systems and Applications*. <http://dx.doi.org/10.2316/p.2012.788-052>
- Cindy Mutia Annur, "Kapasitas Energi Terbarukan Indonesia Terus Meningkatkan dalam Sedekade Terakhir", databoks.katadata.co.id, <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/10/27/kapasitas-energi-terbarukan-indonesia-terus-meningkat-dalam-sedekade-terakhir> (accessed 26 November 2023).
- Corio, D, Rahmi Berlianti Indra, Hartarto Tambunan, Aminur, Harry Yuliansyah, Rizki Wahyu Pratama, Rosnita Rauf, Muh. Setiawan Sukardin Muhammad Ihsan Mukrim. (2023). *Optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Daerah Kepulauan*. Yayasan Kita Menulis.
- Corio, D, Rosnita Rauf. Ritnawati, Muhammad 'Atiq, Muhammad Ihsan Mukrim Yanti, Muh. Setiawan Sukardin, Ahmad Thamrin Dahri, Muh. Rais Nita Suleman, Haerul Ahmadi, Mursalim. (2023). *Energi Indonesia: Masalah dan Potensi Pembangkit Listrik dalam Mewujudkan Kemandirian Energi*. Yayasan Kita Menulis.

Dhebye Irawan, 2019. Management Aset | PDF [WWW Document]. Scribd. URL <https://id.scribd.com/document/397559820/Management-Aset> (accessed 12.3.23).

El-Hawary, M.E., 2008. Introduction to electrical power systems, Adapted and updated ed. ed, IEEE press series on power engineering. IEEE Press; Wiley, Piscataway (N.J.): Hoboken (N.J.).

Florentina Widita, 2019. Manajemen Aset | PDF [WWW Document]. Scribd. URL <https://id.scribd.com/presentation/403275856/Manajemen-aset> (accessed 12.3.23).

Grainger, J.J., Stevenson Jr, Wu.D., 1994. Power system analysis. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering.

Islam, M. R., Shah, M. R., & Ali, Mohd. H. (2021). Emerging power converters for renewable energy and electric vehicles: Modeling, design, and control. CRC Press.

ISS, A., 2020. PENGOPERASIAN DAN PEMELIHARAAN DALAM ASSET - Fixed Asset Tracking. URL <https://fixedasset.id/2020/05/19/pengoperasian-dan-pemeliharaan-dalam-asset/> (accessed 12.4.23).

Kersting, W. H. (2018). Distribution system modeling and analysis. In Electric Power Generation,

Transmission, and Distribution: The Electric Power Engineering Handbook (pp. 26-1-26-58). CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/978131522424-27>

Koutitas, G. (2012). Control of flexible smart devices in the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1333-1343. <https://doi.org/10.1109/tsg.2012.2204410>

Lister, E.C., Gunawan, H., 1988. *Mesin dan Rangkaian Listrik*. Penerbit Erlangga, Jakarta.

Manajemen Aset (Definisi, Tujuan, Aspek dan Siklus), 2020. URL <https://www.kajianpustaka.com/2020/03/manajemen-aset-definisi-tujuan-aspek.html> (accessed 12.4.23).

Melisa Riska Putri, "Indonesia Sahkan Paris Agreement Jadi Undang - Undang", *Republika*, <https://news.republika.co.id/berita/ofalg5382/indonesia-sahkan-paris-agreement-jadi-undangundang> (accessed 20 November 2023).

Monavia Ayu Rizaty, "8 Negara Penghasil Emisi Terbesar pada 2022, Termasuk Indonesia", *dataindonesia.id*, <https://dataindonesia.id/varia/detail/8-negara-penghasil-emisi-terbesar-pada-2022-termasuk-indonesia> (accessed 27 November 2023).

Mudassir, R., 2021. Ini Pentingnya Manajemen Aset untuk Operasional Pembangkit Listrik [WWW Document]. Bisnis.com. URL <https://ekonomi.bisnis.com/read/20211123/44/1469465/ini-pentingnya-manajemen-aset-untuk-operasional-pembangkit-listrik> (accessed 12.4.23).

Operasi Sistem Tenaga Listrik | PDF [WWW Document], 2012. . Scribd. URL <https://id.scribd.com/doc/91688666/Operasi-Sistem-Tenaga-Listrik> (accessed 12.3.23).

Pansini, A. J. (2020). Power transmission & distribution, second edition. CRC Press.

Ritnawati, R., Sari, S. P., Noviana, L., Chaerul, M., Kunusa, W. R., Mohamad, E., ... & Amran, A. (2023). Pengantar Limbah dan Energi Terbarukan. Yayasan Kita Menulis.

Saadat, H., 1999. Power system analysis. McGraw-hill.

Stevenson, W.D., 1990. Analisa Sistem Tenaga Listrik, ed 4. Penerbit Erlangga, Jakarta.

Surat Edaran Direksi Tentang Pemeliharaan | PDF [WWW Document], 1999. . Scribd. URL <https://id.scribd.com/document/354017137/Surat-Edaran-Direksi-Tentang-Pemeliharaan> (accessed 12.3.23).

Syahputra, R., 2021. Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik. LP3M UMY, Yogyakarta.

T.S. Hutauruk, 1996, "Transmisi Daya Listrik", Erlangga, Jakarta.

Vidinopoulos, Ashley, Jonathan W., Ursula F. S. (2022), "Assessing the Technical Potential of ASEAN Countries to Achieve 100% Renewable Energy Supply", *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 42 (October): 100878. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100878>. (accessed 2 December 2023).

Wadhwa, C., 2006. *Electrical power systems*. New Age International.

APENDIX

B

Benefit-Cost Ratio

Perbandingan antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar yang terkait dengan proyek	44
---	----

C

Consumer Average Interruption Duration Index

rata-rata durasi gangguan berkelanjutan per konsumen yang terganggu sepanjang tahun	39
---	----

Consumer Average Interruption Frequency Index

rata-rata jumlah gangguan berkelanjutan per konsumen yang terganggu sepanjang tahun	39
---	----

$\cos \phi$

Faktor daya sistem	3
--------------------------	---

D

Daya

Kemampuan suatu peralatan listrik untuk melakukan usaha akibat adanya perubahan kerja dan perubahan muatan listrik tiap satuan waktu	4
--	---

Diagram Satu Garis

Merupakan gambar rangkaian semua komponen sistem tenaga dalam satu garis sederhana	i, vi, 18, 57
--	---------------

F

Failure Rate

Tingkat kegagalan mengukur frekuensi gangguan atau kegagalan dalam jaringan distribusi	68
--	----

Lampiran 1

G

Generator sinkron

Generator sinkron, yang juga dikenal sebagai alternator, merupakan suatu perangkat listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (alternating current, AC) dengan mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik melalui proses induksi medan magnet.20

I

Internal Rate of Return

Tingkat bunga yang membuat NPV proyek menjadi nol.43

International Energy Agency (IEA).....1

J

Jaringan jarak jauh.

Saluran transmisi 500kV yang memiliki panjang lebih dari 240km.47

Jaringan transmisi jarak menengah

Saluran transmisi 70 KV dan 150 KV yang memiliki panjang antara 80 – 240 km.47

Jaringan transmisi jarak pendek,

Jaringan transmisi 30 kV dan 70 kV yang memiliki panjang kurang dari 80km.47

L

line current

arus saluran adalah arus dalam satu fasa3

line voltage

Tegangan saluran dalam sistem tiga fasa merupakan beda potensial antara dua saluran atau fasa yang ada dalam sistem. 3

Loss of Load Probability

Indeks tingkat risiko dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik.40

M

<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i> rata-rata jumlah gangguan sesaat per konsumen sepanjang tahun.....	39
---	----

N

<i>Net Present Value</i> perbedaan antara nilai arus kas yang masuk pada saat ini dan keluar selama suatu periode waktu tertentu.	30, 43, 44
--	------------

O

Otomatisasi sistem distribusi penerapan teknologi pada instalasi multifitur dengan rentang kendali, pengoperasian, perencanaan, peralihan, dan masalah kinerja sistem yang lebih luas untuk personel utilitas.	59
--	----

P

<i>Payback Period</i> Waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi awal dari proyek.	44
--	----

R

<i>Reliability Index</i> Indeks keandalan memberikan gambaran holistik tentang kinerja jaringan distribusi.	68
<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)</i>	1

S

SUTET saluran udara tegangan ekstra tinggi merupakan saluran tenaga listrik yang mempunyai kapasitas tegangan antara 275 kV hingga 800 kV... ii, v, 48, 49, 50	
---	--

Lampiran 3

SUTT

saluran udara tegangan tinggi merupakan saluran tenaga listrik yang memiliki kapasitas antara 70kV hingga 150kVii, vi, 49, 50, 51

SUTTAS

saluran udara tegangan arus searah merupakan saluran tenaga listrik yang menggunakan penghantar telanjang (bare conductor) udara dengan tegangan 250 kV dan 500 kV ii, 51

System Average Interruption Duration Index):

Rata-rata durasi gangguan berkelanjutan per konsumen sepanjang tahun.....39

System Average Interruption Frequency Index

Rasio jumlah konsumen yang mengalami pemadaman dalam satu tahun dibagi dengan jumlah konsumen yang dilayani.....39

T

tegangan jatuh

Beda antara tegangan di sisi terima terhadap sisi kirim.....4

Transformator

merupakan suatu perangkat elektronika yang berperan dalam meningkatkan atau mengurangi tegangan listrik.22

transformator *step-down*

Trfo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan atau arus.....2

Transformator *step-up*

Trafo yang fungsi utamanya untuk menaikkan tegangan ataupun arus.....2

BIODATA PENULIS



Dean Corio saat in sedang mengejar gelar Doktor di bidang Teknik Elektro dan Informatika di Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung (STEI ITB). Sebelumnya, Dean telah menempuh pendidikan sarjana dan magister di Universitas Andalas, Padang. Dalam karir akademiknya, ia telah mengambil peran sebagai dosen tetap di Program Teknik Elektro, Jurusan Teknologi Industri dan Produksi di Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Email: dean.corio@el.itera.ac.id



Adrianti menyelesaikan pendidikan sarjana pada jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya dan pendidikan Magister pada Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung. Gelar Doktor diperolehnya dari Electronic and Electrical Departement, University of Strathclyde, Inggris. Saat ini bekerja sebagai staf pengajar di Departemen Teknik Elektro, Universitas Andalas. Area risetnya meliputi proteksi sistem tenaga, keandalan sistem tenaga, integrasi energi terbarukan pada sistem tenaga.

Email: adrianti@eng.unand.ac.id



Ricky Maulana, menyelesaikan pendidikan sarjana pada jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas dan pendidikan Magister pada Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung. Dan sedang melanjutkan pendidikan Doktor di Universitas Andalas, Padang. Saat ini bekerja sebagai staf pengajar di Departemen Teknik Elektro, Universitas Negeri Padang. Area risetnya meliputi Analisa dan komputasi sistem tenaga listrik, integrasi sumber energi terbarukan pada sistem tenaga listrik. Email: ricky.maulana@ft.unp.ac.id



Putty Yunesti menyelesaikan pendidikan pada D3 Elektronika dan Instrumentasi - Universitas Gadjah Mada, S1 Teknik Elektro - Universitas Islam Indonesia, dan Magister Teknik Sistem Universitas Gadjah Mada. Saat ini bertugas sebagai Dosen di Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Sumatera. adapun bidang keahlian dan riset yang ditekuni meliputi Manajemen dan Audit Energi dan Perancangan Sistem Energi. Email: putty.yunesti@gmail.com



Zulka Hendri merupakan lulusan S1 Teknik Elektro Universitas Andalas, dan S2 Teknik Elektro di Universitas Andalas. Saat ini ditugaskan sebagai Dosen Program Studi D2 Instalasi dan Pemeliharaan Kabel Bertegangan Rendah. Mata kuliah yang diampu: Rangkaian Listrik 1, Rangkaian Listrik 2, Praktikum Listrik Dasar dan Instrumentasi, Elektronika Dasar, Praktikum Elektronika Dasar, dan Mikrokontroler. Saat ini aktif sebagai team perencana pengembangan Program Studi D3 Teknik Listrik. Telah menulis modul pembelajaran elektronika dasar dan Jobsheet Praktikum Listrik Dasar dan Instrumentasi. E-mail: zulka.hendri04@gmail.com, zulkahendri@pnp.ac.id



Rosnita Rauf merupakan seorang akademisi di Universitas Ekasakti. Ia lahir pada 5 September 1974 dan menempati posisi sebagai anak ke-11 dalam keluarga yang terdiri dari dua belas bersaudara. Sebagai salah satu anak termuda, Rosnita senantiasa berambisi untuk mengimbangi prestasi kakak-kakaknya yang telah menorehkan berbagai keberhasilan.

Setelah menyelesaikan studi sarjananya di Universitas Ekasakti pada September 1997, Rosnita kemudian diberi kepercayaan untuk bergabung sebagai dosen di universitas yang sama. Dalam rangka meningkatkan kompetensinya, ia melanjutkan pendidikan magisternya

di Universitas Andalas dengan mengambil spesialisasi Teknik Elektro. Ia berhasil meraih gelar magisternya pada September 2015.

Sebagai dosen, Rosnita tidak hanya berfokus pada pengajaran tetapi juga aktif dalam pelaksanaan Tridharma Perguruan Tinggi. Ia terlibat dalam berbagai penelitian dan pengabdian masyarakat, khususnya di bidang energi. Salah satu kegiatan yang menjadi fokusnya adalah transformasi energi primer menjadi energi alternatif.



Syamsyarief Baqaruzi mendapatkan gelar Sarjana Teknik Elektro dari Universitas Sumatera Utara pada tahun 2012, kemudian Magister Teknik Elektro di Universitas Indonesia pada tahun 2018. Saat ini penulis merupakan dosen teknik elektro di Institut Teknologi Sumatera. Latar belakang minat riset dan keahlian penulis pada bidang Pembangkit Tenaga Listrik, Energi Terbarukan, Manajemen Energi, Sistem Distribusi Tenaga Listrik, dan Energi Listrik Cerdas.

Email: syamsyarief.baqaruzi@el.itera.ac.id



Rizki Wahyu Pratama lahir di Bukittinggi, Sumatera Barat, Indonesia pada tahun 1986. Ia memperoleh gelar Sarjana Teknik dan Magister Teknik dalam bidang Teknik Elektro dari Universitas Andalas dan Institut Teknologi Bandung, Indonesia, pada tahun 2011 dan 2014, masing-masing. Sejak tahun 2019, ia menjadi dosen di Universitas Andalas, Indonesia. Minat penelitiannya adalah energi listrik dan aplikasi tegangan tinggi.



Dedi Tri Laksono adalah seorang dosen tetap di Program Studi Teknik Listrik, yang tergabung dalam Jurusan Teknik Elektro di Politeknik Negeri Padang (PNP). Dedi meraih gelar sarjana dari Universitas Negeri Malang dan magister dari Institut Teknologi Bandung.

Email: deditrilaksono@pnp.ac.id

Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Ingin memperdalam pengetahuan Anda dalam bidang teknik tenaga listrik? "Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik" adalah buku yang harus anda baca! Buku ini menyediakan pemahaman komprehensif tentang infrastruktur tenaga listrik global yang terus berkembang. Mulai dari perjalanan historis hingga tantangan industri saat ini, buku ini mendirikan landasan konseptual yang kuat.

Dilengkapi dengan analisis sistematis, buku ini membawa Anda melalui aspek teori dan aplikasi krusial dalam sistem tenaga listrik. Pelajari tentang teori arus bolak-balik, metodologi perhitungan daya, dan pengembangan model matematis, sembari memperkuat kemampuan analitis Anda.

Bab 3 hingga 5 menjelajahi perencanaan sistem pembangkitan, desain jaringan transmisi, dan manajemen operasional sistem distribusi tenaga listrik. Dapatkan pengetahuan tentang komponen esensial infrastruktur tenaga listrik yang andal.

Bab 6 hingga 9 membawa Anda pada aspek strategis seperti manajemen aset, pemeliharaan sistem, integrasi energi terbarukan, proteksi sistem, serta dinamika regulasi dan kebijakan energi. Buku ini menggabungkan aplikasi praktis dengan analisis teoretis untuk tidak hanya memberikan pengetahuan, tetapi juga untuk mendorong pemikiran solutif dalam menghadapi kompleksitas sektor energi.

Sebagai sumber daya akademis yang berharga, buku ini adalah referensi kritis bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang teknik tenaga listrik. Jadikan "Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik" pilihan Anda untuk memperluas wawasan dan keterampilan di dunia tenaga listrik yang dinamis!

ITERA Press
Website: press.itera.ac.id
Email: press@itera.ac.id

