



ISBN 978-623-198-397-8



PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

PENULIS :

**Aldi Cahya Muhammad, Nita Nurdiana, Rahmaniar
Habibi Santoso, Normansyah, Marina Artiyasa
Bambang Winardi, Agus Junaidi, Atika Nandini
Dwi Feriyanto**

PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Aldi Cahya Muhammad

Nita Nurdiana

Rahmaniar

Habibi Santoso

Normansyah

Marina Artiyasa

Bambang Winardi

Agus Junaidi

Atika Nandini

Dwi Feriyanto



PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Penulis :

Aldi Cahya Muhammad
Nita Nurdiana
Rahmaniar
Habibi Santoso
Normansyah
Marina Artiyasa
Bambang Winardi
Agus Junaidi
Atika Nandini
Dwi Feryanto

ISBN : 978-623-198-397-8

Editor : Mila Sari, M.Si.

Dede Ahsani, S.T.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penerbit : PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jl. Pasir Sebelah No. 30 RT 002 RW 001
Kelurahan Pasie Nan Tigo Kecamatan Koto Tengah
Padang Sumatera Barat
Website : www.globaleksekuatifteknologi.co.id
Email : globaleksekuatifteknologi@gmail.com

Cetakan pertama, Juni 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul Pembangkit Tenaga Listrik dapat terselesaikan dengan baik atas kerjasama tim penulis. Buku ini membahas tentang pengenalan sistem tenaga listrik, jenis-jenis pembangkit tenaga listrik, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga uap, pembangkit listrik tenaga gas-uap (PLTGU), pembangkit listrik tenaga nuklir, pembangkit listrik tenaga panas bumi, pemodelan generator, pembangkit listrik tenaga surya, pembangkit listrik tenaga angin.

Buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan buku ini selanjutnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Buku ini. Semoga Buku ini dapat menjadi sumber referensi dan literatur yang mudah dipahami.

Padang, Juni 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
BAB 1 PENGENALAN SISTEM TENAGA LISTRIK	1
1.1 Konsep Dasar Listrik	1
1.2 Komponen Sistem	3
1.3 Jaringan Distribusi Listrik	4
1.4 Perlindungan dan Perawatan Sistem	5
1.5 Permasalahan dalam sistem tenaga listrik	7
1.6 Aplikasi Sistem	9
1.7 Perkembangan Sistem	10
DAFTAR PUSTAKA	13
BAB 2 JENIS-JENIS PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK	15
2.1 Pendahuluan	15
2.2 Jenis-Jenis Pembangkit	15
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	16
2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)	17
2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	18
2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)	19
2.2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	20
2.2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)	21
2.2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)	22
2.2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	23
DAFTAR PUSTAKA	24
BAB 3 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA)	27
3.1 Pendahuluan	27
3.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Air	29
3.3 Mekanisme Pengukuran Potensi Daerah Aliran Sungai (DAS) untuk PLTMH	33
3.3.1 Penentuan lokasi dan potensi <i>hydro-power</i>	33
3.3.2 Pengukuran dan Analisis Potensi <i>Hydro-Power</i>	34
3.3.3 <i>Global Positioning System</i> (GPS)	37
3.3.4. Analisis Potensi Energi Listrik pada DAS	39
DAFTAR PUSTAKA	40
BAB 4 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP	41
4.1 Pendahuluan	41
4.2 Prinsip kerja PLTU	43
4.3 Komponen utama PLTU	45
4.3.1 Boiler	45
4.3.2 Turbin	49
4.3.3 Generator	51

4.3.4 Kondensor.....	51
4.3.5 Pompa.....	52
4.3.6 <i>Feed water heater</i>	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
BAB 5 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS-UAP (PLTGU).....	57
5.1 Pengertian PLTGU	57
5.2 Prinsip Kerja PLTGU.....	58
5.2.1. Siklus PLTGU (Combine Cycle)	59
5.2.2. Hasil Pembangkitan PLTG	68
5.2.3. Perbandingan Efisiensi PLTG dan PLTU.....	68
DAFTAR PUSTAKA.....	70
BAB 6 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR	71
6.1 Pendahuluan	71
6.2 Komponen PLTN.....	73
6.2.1 Uranium dan Plutonium	73
6.2.2 PLTN yang ada di dunia saat ini.....	74
6.3.Keamanan PLTN.....	74
6.4. PLTN di Indonesia	76
DAFTAR PUSTAKA.....	78
BAB 7 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI.....	81
7.1 Pendahuluan.....	81
7.2 Tinjauan Desain Pembangkit Listrik.....	83
7.2.1 Sistem tipe tekanan balik.....	83
7.2.2 Sistem tipe kondensasi.....	84
7.2.3 Sistem tipe biner	85
7.2.3 Sistem konversi hibrid	86
7.3 Peralatan rumah pembangkit	87
7.3.1 Turbin	87
7.3.2 Kondensor.....	89
7.3.3 Kontrol otomatis dan sistem komunikasi.....	89
7.3.4 Sistem menara pendingin	90
7.3.5 Sistem pemompaan kondensor	91
7.3.6 Penukar panas.....	91
7.3.7 Sistem evakuasi gas	92
7.3.8 Sistem injeksi ulang	93
DAFTAR PUSTAKA.....	94
BAB 8 PEMODELAN GENERATOR.....	95
8.1 Pendahuluan	95
8.2 Pemodelan Sistem Generator Tunggal.....	96
8.2.1 <i>Single Machine Infinite Bus</i> (SMIB)	96
8.2.2. Variasi Koefisien Redaman D terhadap Performansi Generator	99
8.2.3 Efektif.....	100

8.2.4 Reaksi Jangkar.....	101
8.2.5 Pengaruh Pengaturan Tegangan.....	102
8.2.6 Perubahan Tegangan Terminal.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....	107
BAB 9 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA	109
9.1 Pendahuluan	109
9.2 Energi Tenaga Surya dan Pemanfaatannya	110
9.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	111
9.3.1 Jenis-jenis PLTS	112
9.3.2 Cara Kerja PLTS	115
9.4 Komponen dalam Sistem PLTS.....	116
9.4.1 Sistem Panel Surya.....	116
9.4.2 Kontroler Solar Charge.....	118
9.4.3 Inverter	118
9.4.4 Baterai	119
DAFTAR PUSTAKA.....	121
BAB 10 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN	123
10.1 Pendahuluan	123
10.2 Potensi sumber daya alam (Angin)	124
10.2.1 Kecepatan angin	126
10.2.2 Jenis-jenis angin.....	127
10.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin	130
10.3.1 Turbin.....	133
10.3.2 <i>Gearbox</i>	139
10.3.3 <i>Brake System</i>	139
10.3.4 Generator.....	140
10.3.5 Penyimpan energi.....	140
10.3.6 <i>Rectifier-inverter</i>	141
10.3.7 <i>Tower</i>	141
10.4 Kelebihan dan kekurangan	142
DAFTAR PUSTAKA.....	144
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. (a) PLTS Off Grid (b) PLTS On Grid	16
Gambar 2.2. PLTB	17
Gambar 2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Air	18
Gambar 2.4. PLTP	19
Gambar 2.5. PLTU	20
Gambar 2.6. Prinsip Kerja PLTGU	22
Gambar 2.7. PLTD	22
Gambar 2.8. Prinsip Kerja PLTN	23
Gambar 3.1. Komponen Utama PLTA	29
Gambar 3.2. Waduk dan Dam (Sumber PLTA Sigura-Gura Asahan).....	30
Gambar 3.3. Jenis Turbin Pelton	31
Gambar 3.4. Konstruksi Generator	32
Gambar 3.5. Konstruksi Transformator	33
Gambar 3.6. Peta lokasi Pengukuran Potensi DAS Bandar Pasir Mandoge	36
Gambar 3.7. <i>Portable Remote Reading Water Current Meter</i>	36
Gambar 3.8. Alat ukur kecepatan aliran Air.....	37
Gambar 3.9. Photo Lokasi Air Terjun koordinat: 2°46'30.02"N, 99°16'53.31"	38
Gambar 3.10. Sample data pengukuran luas sungai dan ketinggian air DAS	38
Gambar 4.1. PLTU Cilacap PT S2P	41
Gambar 4.2. Konversi energi kerja PLTU	42
Gambar 4.3. Siklus Renkine Ideal	43
Gambar 4.4. Siklus Rankine Pemanasan Ulang (<i>Reheat</i>)	44
Gambar 4.5. Sistem Boiler.....	46
Gambar 4.6. Sistem Water Tube Boiler.....	48
Gambar 4.7. Sistem Fire Tube Boiler	48
Gambar 4.8. Turbin Uap.....	49
Gambar 4.9. Grafik Tekanan dan Kecepatan Uap Turbin Impulse (a) dan Turbin Reaksi (b)	50
Gambar 4.10. Generator	51
Gambar 4.11. Kondensor	52
Gambar 4.12. Pompa	52
Gambar 4.13. Siklus Rankine dengan Regenerative Open Feed Water Heater.....	53
Gambar 5.1. Diagram Siklus PLTGU (<i>Combine Cycle</i>)	59
Gambar 5.2. Siklus awal PLTG pada Diverter Damper	59
Gambar 5.3. Siklus awal PLTG <i>Open Cycle</i>	60
Gambar 5.4. Siklus pada HRSG.....	61

Gambar 5.5. Siklus pada Sistem Air Pendingin (<i>Sea Water</i>).....	61
Gambar 5.6. Sistem Air Pengisis pada HRSG (<i>Feed Water</i>).....	62
Gambar 5.7. Sistem Tubing pada HRSG	63
Gambar 5.8. Sistem 3 Jenis Turbin	64
Gambar 5.9. Sistem <i>High Pressure</i> (pada HRSG).....	64
Gambar 5.10. Sistem <i>Intermediate Pressure</i> pada HRSG	65
Gambar 5.11. Sistem <i>Low Pressure</i> pada HRSG	66
Gambar 5.12. Sistem Proses Kondensasi dan Sirkulasi	66
Gambar 5.12. Proses Generator Menghasilkan Listrik	67
Gambar 5.13. Trafo Gardu Induk.....	67
Gambar 5.14. Proses Pada Trafo.....	70
Gambar 5.15. Ilustrasi Perbandingan Efisiensi PLTGU- <i>Combine Cycle</i>	69
Gambar 7.1. Skematis terjadinya sumber air panas.....	82
Gambar 7.2. Tipikal sistem konversi tekanan balik	84
Gambar 7.3. Unit turbin/generator tipe kondensasi	85
Gambar 7.4. Siklus Rankin Organik tipe Ormat.....	86
Gambar 7.5. Sistem konversi hibrida.....	87
Gambar 8.1. Generator dengan Primeover.....	96
Gambar 8.2. Model SMIB	97
Gambar 8.3. Model torsi mekanik dipengaruhi oleh tori elektrik generator berbeban	98
Gambar 8.4. Blok Tm, Te dengan pengaruh TS dan D	99
Gambar 8.5. Model Simulink dari Model gambar 4	99
Gambar 8.6 Hasil Simulasi beberapa Kondisi Generator Sinkron Berbeban.....	100
Gambar 8.7. Respons Kecepatan dan Sudut terhadap Gangguan Kecil	101
Gambar 8.8. Pengaruh parameter K4 terhadap kenaikan sudut rotor	101
Gambar 8.9. Pengaruh Pengaturan tegangan terhadap TD dan TS	102
Gambar 8.10. Perubahan beban K5 pada merubah tegangan terminal	103
Gambar 8.11. Loop Mekanik dan Loop Listrik pada Pemodelan Generator Sinkron	103
Gambar 9.1 PLTS <i>Ground Mounted</i>	113
Gambar 9.2 PLTS <i>Rooftop</i>	114
Gambar 9.3 PLTS Terapung	114
Gambar 9.4 Sistem Instalasi menggunakan Solar Cell	115
Gambar 9.5 Tipe sel surya : (a) monokristalin, (b) polikristalin.....	117
Gambar 9.6 Solar Charge Controller	118
Gambar 9.7 Inverter DC 12V-AC220V	119
Gambar 9.8 Baterai lead acid.....	119
Gambar 9.9 Baterai jenis VRLA Opzv.....	120
Gambar 10.1. Pola Sirkulasi Udara Akibat Rotasi Bumi	128
Gambar 10.2. Diagram skematik dari turbin angin.....	131

Gambar 10.3. Sistem PLTB kecepatan konstan (<i>fixed-speed</i>)	132
Gambar 10.4. Sistem PLTB kecepatan berubah (<i>variable-speed</i>) (rotor belitan).	133
Gambar 10.6. Arah Putaran Kipas Baling-Baling PLTB.	134
Gambar 10.7. Jenis – Jenis Kincir Angin.....	136
Gambar 10.8. Karakteristik Kincir Angin	137
Gambar 10.9. Tower PLTB (kiri) Guyed (Tengah) <i>Lattice</i> (kanan) <i>Mono-structure</i>	141

BAB 1

Pengenalan Sistem Tenaga Listrik

1.1 Konsep Dasar Listrik

Sistem tenaga listrik adalah jaringan infrastruktur yang menyediakan energi listrik dari sumber daya alam seperti air, angin, matahari, atau bahan bakar fosil ke berbagai jenis beban listrik seperti peralatan rumah tangga, industri, transportasi, dan lain-lain. Listrik menjadi bagian penting dalam kehidupan sehari-hari karena hampir semua aktivitas manusia saat ini bergantung pada sumber energi listrik (Husain, 2007).

Sejarah perkembangan sistem tenaga listrik dimulai pada awal abad ke-19 ketika penemuan baterai oleh Alessandro Volta pada tahun 1800 memungkinkan adanya penggunaan listrik dalam aplikasi praktis. Namun, sistem tenaga listrik modern baru dikembangkan pada akhir abad ke-19 ketika Thomas Edison menemukan lampu pijar pada tahun 1879 dan membangun stasiun listrik pertama di New York pada tahun 1882.

Sejak itu, sistem tenaga listrik terus berkembang dan menjadi semakin kompleks dengan adanya penemuan-penemuan baru seperti generator listrik, transformator, dan jaringan transmisi. Perkembangan teknologi komputer dan elektronika juga telah memungkinkan sistem tenaga listrik untuk dikontrol dan dimonitor dengan lebih efisien.

Kegunaan sistem tenaga listrik dalam kehidupan sehari-hari sangatlah penting. Tanpa listrik, banyak aspek kehidupan

modern seperti penerangan, pendinginan dan pemanasan rumah, serta penggunaan berbagai jenis peralatan rumah tangga dan industri tidak mungkin terwujud. Kegunaan listrik juga sangat penting dalam bidang medis, transportasi, dan komunikasi. Hampir semua aktivitas manusia saat ini bergantung pada sumber energi listrik yang memungkinkan terwujudnya berbagai kemajuan teknologi dan kesejahteraan masyarakat.

Namun, penggunaan sistem tenaga listrik juga memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama terkait dengan emisi gas rumah kaca dan pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, penting bagi kita untuk menggunakan energi listrik dengan bijak dan beralih ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan seperti energi terbarukan.

Selain itu, perkembangan teknologi terbaru seperti smart grid dan penyimpanan energi juga telah membuka peluang baru dalam mengoptimalkan penggunaan listrik dan meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik. Dengan teknologi smart grid, sistem tenaga listrik dapat dikontrol dan dimonitor dengan lebih efektif sehingga dapat mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan keandalan pasokan listrik.

Konsep Dasar Listrik merupakan dasar yang penting dalam memahami cara kerja sistem tenaga listrik. Dalam bab ini, kita akan membahas beberapa konsep dasar listrik seperti arus, tegangan, daya, energi, hambatan, dan lain-lain. Arus listrik adalah aliran elektron di dalam suatu rangkaian listrik. Arus listrik diukur dalam satuan ampere (A). Tegangan listrik adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam suatu rangkaian. Tegangan listrik diukur dalam satuan volt (V). Daya listrik adalah energi listrik yang digunakan per unit waktu. Daya listrik diukur dalam satuan watt (W). Energi listrik adalah daya listrik yang digunakan selama suatu periode waktu. Energi listrik diukur dalam satuan joule (J) atau kilowatt jam (kWh).

Hambatan listrik adalah resistansi suatu bahan terhadap aliran arus listrik. Hambatan listrik diukur dalam satuan ohm (Ω).

Konsep dasar listrik tersebut sangat penting untuk dipahami dalam rangka memahami cara kerja sistem tenaga listrik. Dalam sistem tenaga listrik, arus listrik dan tegangan listrik bekerja bersama-sama untuk menghasilkan daya listrik yang kemudian digunakan sebagai sumber energi. Selain itu, pemahaman konsep dasar listrik juga penting dalam memahami cara kerja perangkat listrik yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti lampu, kipas angin, dan lain-lain.

1.2 Komponen Sistem

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari berbagai komponen yang bekerja bersama-sama untuk menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik dari sumber daya listrik ke konsumen akhir. Komponen-komponen sistem tenaga listrik yang penting meliputi pembangkit listrik, transformator, jaringan transmisi, jaringan distribusi, dan meteran listrik (Meier, 2006)

Pembangkit listrik merupakan komponen yang paling mendasar dalam sistem tenaga listrik karena menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber daya primer seperti batu bara, minyak bumi, gas alam, energi air, nuklir, surya, atau angin. Transformator, di sisi lain, digunakan untuk mentransformasikan tegangan listrik dari tingkat yang dihasilkan oleh pembangkit listrik menjadi tegangan yang lebih rendah yang cocok untuk didistribusikan melalui jaringan transmisi dan distribusi.

Transformator digunakan untuk mentransformasikan tegangan listrik dari tingkat yang dihasilkan oleh pembangkit listrik menjadi tegangan yang lebih rendah yang cocok untuk didistribusikan melalui jaringan transmisi dan distribusi.

Transformator juga digunakan untuk mengubah tegangan listrik dari tingkat yang lebih rendah menjadi tingkat yang lebih tinggi untuk mentransmisikan listrik ke jarak yang lebih jauh.

Jaringan transmisi terdiri dari serangkaian kabel listrik dan menara yang mentransmisikan energi listrik dari pembangkit listrik ke stasiun transformator. Jaringan transmisi umumnya memiliki tegangan yang sangat tinggi, biasanya antara 115 kV hingga 765 kV.

Setelah energi listrik ditransformasikan menjadi tegangan yang lebih rendah di stasiun transformator, energi listrik kemudian didistribusikan melalui jaringan distribusi ke pelanggan akhir. Jaringan distribusi terdiri dari serangkaian kabel listrik yang lebih kecil dan menara yang memasok listrik ke pelanggan akhir di daerah yang lebih kecil, seperti rumah, toko, dan bangunan lainnya.

Meteran listrik digunakan untuk mengukur jumlah energi listrik yang digunakan oleh pelanggan dan menentukan biaya yang harus dibayar oleh pelanggan kepada penyedia layanan listrik.

Secara keseluruhan, sistem tenaga listrik merupakan sistem yang kompleks dan melibatkan banyak komponen yang saling terkait. Keberhasilan sistem tenaga listrik dalam memberikan pasokan listrik yang aman, andal, dan terjangkau kepada konsumen akhir bergantung pada kinerja semua komponen sistem tersebut.

1.3 Jaringan Distribusi Listrik

Jaringan distribusi listrik terdiri dari berbagai peralatan dan komponen yang digunakan untuk mendistribusikan listrik dari pembangkit listrik ke konsumen akhir. Peralatan dan komponen tersebut meliputi transformator, jaringan kabel, jaringan pipa, jaringan penghantar udara, switchgear, dan

berbagai peralatan lainnya. Selain itu, jaringan distribusi listrik dilengkapi dengan sistem proteksi dan pengendalian yang bertujuan untuk memastikan keamanan dan kualitas listrik yang disalurkan ke konsumen (Sallam & Malik, 2018).

Transformator adalah salah satu peralatan utama dalam jaringan distribusi listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan listrik dari jaringan transmisi menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan konsumen. Jaringan kabel dan pipa digunakan sebagai media penghantar listrik di bawah tanah, sedangkan jaringan penghantar udara digunakan sebagai media penghantar listrik di atas tanah. *Switchgear* digunakan untuk mengatur arus listrik dan memastikan keamanan sistem distribusi listrik.

Selain itu, sistem proteksi dan pengendalian juga sangat penting dalam jaringan distribusi listrik. Sistem proteksi bertujuan untuk melindungi peralatan dan konsumen dari gangguan dan kerusakan, sedangkan sistem pengendalian bertujuan untuk memastikan kestabilan dan keandalan sistem distribusi listrik.

1.4 Perlindungan dan Perawatan Sistem

Perlindungan sistem tenaga listrik merupakan hal yang sangat penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan jaringan listrik. Perlindungan tersebut terdiri dari berbagai sistem yang bertujuan untuk melindungi peralatan dan manusia dari bahaya yang mungkin timbul akibat gangguan atau kegagalan pada jaringan listrik (Glover et al., 2012).

Sistem perlindungan pada jaringan listrik dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu proteksi sistem transmisi dan proteksi sistem distribusi. Proteksi sistem transmisi dilakukan pada jaringan listrik yang menghubungkan pembangkit listrik dengan gardu induk, sedangkan proteksi sistem distribusi dilakukan

pada jaringan listrik yang menghubungkan gardu induk dengan konsumen akhir.

Beberapa jenis sistem perlindungan yang umum digunakan pada jaringan listrik antara lain: Proteksi Overcurrent, Proteksi Differential, Proteksi Ground Fault, Proteksi Distance.

Teknologi canggih seperti microprocessor-based protection juga dapat digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem perlindungan pada jaringan listrik. Teknologi ini dapat memonitor jaringan listrik secara real-time dan mengambil tindakan proteksi yang diperlukan dalam waktu yang sangat cepat.

Pemeliharaan dan perawatan sistem tenaga listrik adalah proses penting dalam menjaga keandalan, efisiensi, dan umur pakai jaringan listrik. Pemeliharaan dan perawatan dilakukan untuk memastikan bahwa peralatan listrik berfungsi dengan baik, menghindari kerusakan, dan meminimalkan risiko kegagalan sistem.

Beberapa kegiatan pemeliharaan dan perawatan yang umum dilakukan pada jaringan listrik antara lain: Pembersihan dan Inspeksi, Pengujian dan Kalibrasi, Pemeliharaan Rutin, Perbaikan dan Penggantian Peralatan. Pemeliharaan dan perawatan sistem tenaga listrik yang baik dapat meningkatkan efisiensi, meningkatkan keandalan, dan memperpanjang umur pakai jaringan listrik. Selain itu, pemeliharaan dan perawatan yang teratur dan baik juga dapat membantu mengurangi biaya perbaikan dan penggantian peralatan listrik.

Pengukuran dan monitoring sistem tenaga listrik sangat penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi jaringan listrik. Pengukuran dan monitoring dilakukan untuk memantau kinerja jaringan listrik, mendeteksi kerusakan atau gangguan pada jaringan listrik, dan mengoptimalkan kinerja jaringan listrik.

Beberapa teknik pengukuran yang umum digunakan pada jaringan listrik diantaranya:

Pengukuran Tegangan - Pengukuran tegangan dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan listrik yang masuk ke beban tidak melebihi batas aman.

Pengukuran Arus - Pengukuran arus dilakukan untuk memastikan bahwa arus listrik yang mengalir melalui kabel listrik tidak melebihi kapasitas kabel listrik.

Pengukuran Daya - Pengukuran daya dilakukan untuk memastikan bahwa daya listrik yang dikonsumsi oleh beban tidak melebihi kapasitas sumber daya listrik.

Pengukuran Resistansi - Pengukuran resistansi dilakukan untuk memastikan bahwa resistansi pada kabel listrik atau peralatan listrik tidak terlalu besar sehingga dapat menyebabkan kegagalan pada jaringan listrik.

Pengukuran Frekuensi - Pengukuran frekuensi dilakukan untuk memastikan bahwa frekuensi listrik pada jaringan listrik sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Pengukuran dan monitoring sistem tenaga listrik yang teratur dan baik dapat membantu meningkatkan efisiensi, meningkatkan keandalan, dan memperpanjang umur pakai jaringan listrik. Selain itu, pengukuran dan monitoring yang teratur dan baik juga dapat membantu mengurangi biaya perbaikan dan penggantian peralatan listrik.

1.5 Permasalahan dalam sistem tenaga listrik

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur penting dalam kehidupan modern yang mendukung hampir semua aspek kehidupan sehari-hari. Namun, meskipun jaringan listrik telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, masih

ada sejumlah masalah dan tantangan yang perlu diatasi untuk menjaga keberlanjutan dan kehandalan sistem tenaga listrik.

Beberapa masalah dan tantangan yang dihadapi dalam sistem tenaga listrik antara lain; Keamanan - Keamanan merupakan masalah utama dalam sistem tenaga listrik. Ancaman keamanan dapat datang dari berbagai sumber, seperti serangan siber, kebakaran, dan bencana alam. Kebocoran energi listrik juga dapat menjadi masalah keamanan dan dapat menyebabkan bahaya bagi masyarakat.

Efisiensi-Efisiensi merupakan tantangan lain dalam sistem tenaga listrik. Meskipun teknologi yang lebih efisien telah dikembangkan, masih ada banyak kehilangan energi yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Kehilangan ini dapat terjadi karena resistansi pada kabel, transformator, dan peralatan lainnya. Kehilangan ini menyebabkan biaya yang tinggi dan dapat mengurangi keandalan jaringan.

Pengelolaan sumber daya-Sumber daya listrik yang semakin terbatas dan tekanan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca telah mendorong perusahaan listrik untuk mencari alternatif energi. Namun, penggunaan sumber daya alternatif seperti energi matahari dan angin masih menghadapi tantangan. Biaya yang tinggi, kurangnya infrastruktur, dan kurangnya dukungan pemerintah dapat menjadi hambatan dalam penggunaan sumber daya alternatif.

Pengelolaan beban-Pengelolaan beban menjadi tantangan lain dalam sistem tenaga listrik. Peningkatan permintaan energi, terutama pada puncak waktu, dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan energi. Jika tidak dikelola dengan baik, hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada sistem dan kehilangan daya.

Perubahan teknologi-Perubahan teknologi yang cepat dalam sistem tenaga listrik juga menjadi tantangan. Teknologi

baru, seperti kendaraan listrik dan sistem baterai besar, memerlukan infrastruktur yang berbeda dari yang ada saat ini. Perusahaan listrik harus beradaptasi dengan cepat untuk memenuhi permintaan ini.

Untuk mengatasi masalah dan tantangan dalam sistem tenaga listrik, perusahaan listrik harus berinovasi dan mengembangkan teknologi baru yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan. Perusahaan listrik juga harus meningkatkan penggunaan sumber daya alternatif dan meningkatkan pengelolaan beban. Selain itu, kerjasama antara perusahaan listrik, pemerintah, dan masyarakat sangat penting dalam memastikan keberlanjutan sistem tenaga listrik.

1.6 Aplikasi Sistem

Sistem tenaga listrik telah digunakan dalam berbagai aplikasi di bidang industri, transportasi, rumah tangga, dan lain-lain. Beberapa aplikasi sistem tenaga listrik yang paling umum antara lain: Pembangkitan Listrik - Pembangkitan listrik adalah salah satu aplikasi utama dari sistem tenaga listrik. Pembangkitan listrik dilakukan dengan menggunakan sumber energi yang berbeda seperti batubara, gas alam, nuklir, air, dan energi matahari. Pembangkitan listrik juga dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi terbarukan seperti angin dan biomassa. Setelah energi listrik dihasilkan, energi listrik ini akan didistribusikan melalui jaringan listrik ke pengguna akhir.

Distribusi Listrik-Distribusi listrik adalah proses mengirimkan energi listrik dari pembangkit listrik ke konsumen akhir. Distribusi listrik melibatkan penggunaan transformator, kabel listrik, dan peralatan distribusi lainnya untuk mengirimkan energi listrik dari jaringan transmisi tinggi ke jaringan distribusi lokal. Distribusi listrik juga melibatkan

perencanaan dan pengaturan beban listrik untuk memastikan pasokan listrik yang stabil dan terjamin.

Aplikasi Listrik di Bidang Industri - Sistem tenaga listrik juga digunakan dalam berbagai aplikasi di bidang industri. Misalnya, energi listrik digunakan untuk menggerakkan mesin, sistem penerangan, sistem pendinginan, dan sistem kontrol proses. Aplikasi listrik di bidang industri dapat membantu mengurangi biaya operasional dan meningkatkan efisiensi produksi.

Aplikasi Listrik di Bidang Transportasi - Aplikasi listrik juga dapat ditemukan di bidang transportasi. Kendaraan listrik, bus listrik, dan kereta listrik semakin populer karena kinerja yang lebih baik dan harga yang semakin terjangkau. Kendaraan listrik dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan menghemat biaya bahan bakar.

Aplikasi Listrik di Rumah Tangga - Sistem tenaga listrik juga digunakan di rumah tangga untuk sistem penerangan, pendingin udara, pemanas air, dan sistem elektronik lainnya. Teknologi terbaru seperti panel surya dan sistem baterai dapat membantu meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya energi.

Dalam perkembangan masa depan, aplikasi sistem tenaga listrik diharapkan dapat berkembang lebih luas lagi dan semakin inovatif, terutama dengan penggunaan teknologi terbaru dan teknologi canggih lainnya.

1.7 Perkembangan Sistem

Perkembangan teknologi dan kebijakan energi dalam beberapa tahun terakhir telah membawa perubahan signifikan dalam sistem tenaga listrik. Beberapa perkembangan terbaru dalam sistem tenaga listrik meliputi:

Teknologi Terbarukan - Teknologi terbarukan seperti panel surya, turbin angin, dan pembangkit listrik hidrokinetik semakin populer karena efisiensi yang lebih baik dan harga yang semakin terjangkau. Dengan semakin banyaknya sumber daya energi terbarukan yang tersedia, sistem tenaga listrik semakin dapat diandalkan dan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca.

Jaringan Listrik Cerdas - Jaringan listrik cerdas (smart grid) adalah konsep jaringan listrik yang terintegrasi dengan teknologi informasi dan komunikasi. Jaringan listrik cerdas dapat membantu meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik dan memungkinkan penggunaan sumber daya energi yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan.

Penyimpanan Energi - Teknologi penyimpanan energi seperti baterai dan flywheel semakin berkembang dan semakin terjangkau. Penyimpanan energi dapat membantu mengatasi masalah fluktuasi pasokan energi terbarukan dan meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik.

Kendaraan Listrik - Kendaraan listrik semakin populer dan semakin banyak diproduksi oleh berbagai produsen otomotif. Kendaraan listrik dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan menghemat biaya bahan bakar.

Kebijakan Energi - Banyak negara mengadopsi kebijakan energi yang bertujuan untuk meningkatkan penggunaan sumber daya energi terbarukan dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Kebijakan energi ini dapat membantu mempercepat pengembangan sistem tenaga listrik yang lebih berkelanjutan dan dapat diandalkan.

Tren masa depan dalam sistem tenaga listrik termasuk pengembangan teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien dan terjangkau, penggunaan kendaraan listrik yang semakin luas, dan pengembangan jaringan listrik cerdas yang lebih terintegrasi dengan teknologi informasi dan komunikasi.

Diharapkan bahwa perkembangan terbaru dalam sistem tenaga listrik akan membantu meningkatkan efisiensi, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan menciptakan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2012). *Power Systems Analysis And Design*. Cengage.
- Husain, A. (2007). *Electrical Power Systems*. CBS.
- Meier, A. von. (2006). *Electrical Power Generation*. Wiley.
- Sallam, A. A., & Malik, O. P. (2018). *Electrical Distribution Systems*. Wiley.

BAB 2

JENIS-JENIS PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

2.1 Pendahuluan

Listrik, sebagai energi yang umum digunakan, diproduksi di pembangkit listrik, menggunakan prinsip medan listrik dan menggerakkan turbin, generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. (Saefudin et al., 2017)

Energi dikelompokkan menjadi dua bagian: energi terbarukan dan energi tak terbarukan. Pembangkit listrik menggunakan berbagai sumber energi, mulai dari sumber energi tak terbarukan hingga sumber energi alternatif terbarukan. Surya, angin, air, panas bumi, biomassa, energi gelombang, dan lain-lain diklasifikasikan sebagai energi terbarukan karena energi tidak pernah berakhir.

2.2 Jenis-Jenis Pembangkit

Dalam hal bahan bakar, proses pembangkitan listrik dapat dibagi menjadi dua yaitu. pembangkit energi terbarukan dan pembangkit listrik tak terbarukan.

Pembangkit listrik energi terbarukan meliputi Pembangkit Listrik Tenaga Fotovoltaik (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap. (PLTGU). Pembangkit Listrik Tak Terbarukan meliputi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik

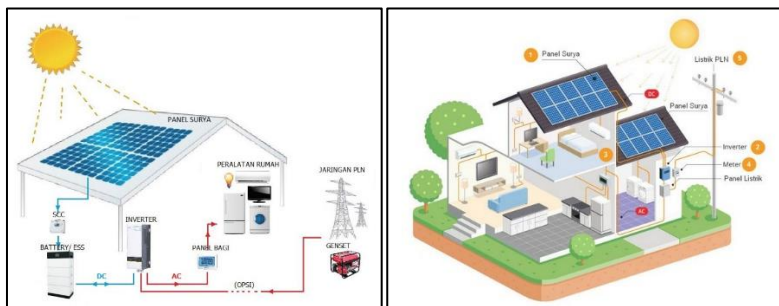
Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)(Yuniarti & Aji, 2019)

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik fotovoltaik (PLTS) menyediakan sistem pembangkit energi dari radiasi matahari dengan mengkonversi sel surya. Semakin kuat jumlah radiasi matahari, semakin tinggi jumlah daya yang dihasilkan (Kementerian Sumber Daya Mineral, 2020).

Secara umum sistem PLTS dapat dibagi sebagai berikut :

1. Cara pengoperasian yaitu. PLTS *On Grid* dan PLTS *Off Grid*. Pada PLTS *off-grid* menggunakan baterai untuk menyimpan listrik sedangkan PLTN on grid tidak.
2. Posisi pemasangan, yaitu. dipasang di atas tanah, dipasang di atap terapan.
3. Desain Sistem yaitu Terpusat, Terdistribusi.



(a)

(b)

Gambar 2.1. (a) PLTS Off Grid (b) PLTS On Grid(Sunergi, n.d.)

PLTS terdiri dari modul PV, solar charge controller, inverter/charger, pendukung modul PV, baterai, solar inverter/baterai, dan piranometer

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Alternatif pembangkit listrik lainnya adalah energi angin. Angin merupakan salah satu bentuk energi yang ada di alam. Angin terjadi karena perubahan udara berdasarkan tekanan tinggi ke tekanan rendah atau berdasarkan suhu udara rendah ke suhu udara tinggi dampak pemanasan matahari pada atmosfer dan bumi. Energi ini diperoleh dengan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Pengurangan emisi karbon dapat dikurangi dalam penggunaan pembangkit ini, karena turbin angin ini tidak menghasilkan emisi karbon (Baruna, n.d.)



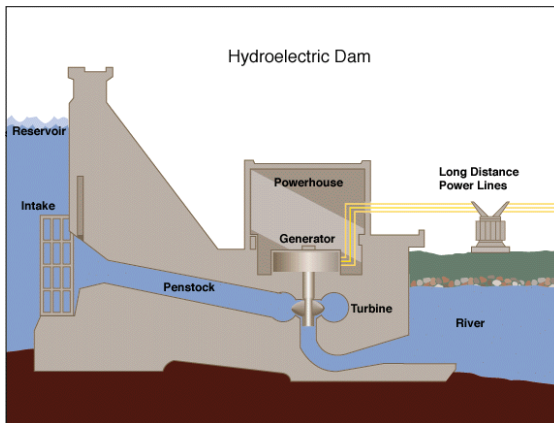
Gambar 2.2. PLTB (Sumber : (Syah, n.d.)

Pengoperasian generator angin yang dikenal dengan nama Turbin Angin (PLTB). Energi angin memutar baling-baling kincir angin dari arah depan sehingga generator di belakang kincir bergerak menghasilkan listrik. Prinsip pengoperasian PLTB secara mekanis sama dengan pembangkit listrik tenaga air. Bedanya, pada PLTB, energi kinetik yang digunakan untuk memutar turbin berasal dari aliran angin. Bentuk sudu turbin dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik aerodinamis, umumnya dikenal sebagai sudu aerodinamis. Seperti dalam desain sayap pesawat terbang, angin yg mengalir pada atas bagian atas sudu turbin membangun gaya angkat dalam sudu turbin. Lift ini berpengaruh pada putaran sudu-sudu turbin (Re, n.d.). Komponen utama PLTB terdiri dari Generator,

Anemometer, sudu/pisau Turbin), pengontrol, system pengeraman, dan menara.

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Energi mekanik pada turbin pembangkit listrik tenaga air dihasilkan dari energi potensial air yang jatuh dibawah pengaruh gravitasi. Selanjutnya melalui poros, energi mekanik disalurkan ke generator sehingga menghasilkan energi listrik. Energi potensial yang dihasilkan dipengaruhi oleh ketinggian air yang jatuh. Listrik yang dihasilkan akan dipengaruhi dengan kecepatan turbin berputar. Semakin banyak air mengalir, maka semakin cepat turbin berputar.



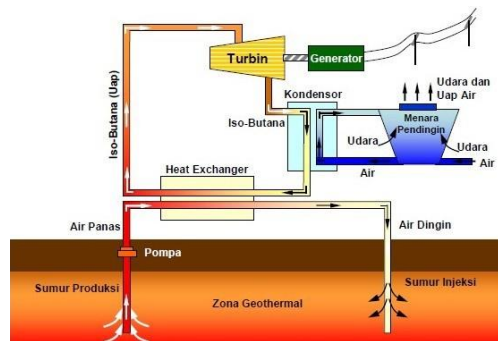
Gambar 2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Air
(Tennessee Valley Authority, n.d.)

Pada pembangunan pembangkit listrik tenaga air diperlukan reservoir atau tangki, bangunan bendungan, bangunan pelimpah, bangunan penyedia air (*intake*), saluran air utama, turbin, generator, trafo, transmisi. Pada turbin terjadi perubahan dari energi potensial menjadi energi mekanik. Putaran turbin terjadi karena adanya air yang mengenai sudu-sudu turbin. Gerakan turbin yang terhubung ke generator oleh

poros dan kotak roda gigi, memutar kumparan magnet di dalam generator untuk memindahkan elektron, menciptakan arus bolak-balik. (Zenius, n.d.).

2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Prinsip pengoperasian pembangkit listrik energi geothermal hampir sama menggunakan pembangkit listrik energi uap/PLTU. Pada PLTP, uap yg disuplai menurut sumur produksi/reservoir masuk ke pipa penerima uap, yang berfungsi menjadi media pengumpul uap & penstabil tekanan. Jika terjadi tekanan berlebih, uap keluar melalui struktur ventilasi. Dari ujung penerima, uap kemudian mengalir ke separator. Fungsinya untuk memisahkan uap dari padatan/polutan seperti partikel berat (natrium, kalium, kalsium, silika, borana, amonia, fluor, dan lain-lain).



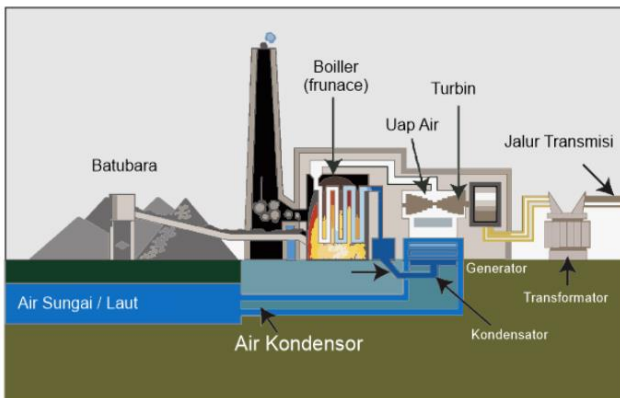
Gambar 2.4. PLTP (Rianta, n.d.)

Uap yang masuk ke separator berputar karena perbedaan berat jenis, sedangkan uap murni keluar melalui tabung di bagian atas separator. Uap kemudian mengalir ke unit yang bertindak sebagai pemisah uap air di dalam uap, sehingga hanya uap bersih yang dapat masuk ke turbin. (Erilia, 2022)

Sebuah PLTP terdiri dari Steam receiving header, Separator dan demister, Generator, Step-up transformer, Kondensor, Cooling water pump.

2.2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU merupakan pembangkit listrik thermal, pembangkit ini memanfaatkan energi panas bumi sebagai komponen utama untuk menghasilkan energi listrik. Metode pembangkitan listrik dinilai ekonomis dengan efisiensi pembangkitan yang tinggi. Pada PLTU terjadi konversi energi energi kimia menjadi energi listrik. Terdapat tiga tahapan dalam konversi energi pada PLTU yaitu: Pertama, Energi kimia pada bahan bakar diubah menjadi energi termal pada uap denga suhu dan temperatur tinggi. Kedua, energi panas diubah menjadi energi mekanik berupa putaran. Ketiga, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik



Gambar 2.5. PLTU

Proses yang terjadi pada PLTU yaitu pada boiler, air diubah menjadi uap panas untuk menggerakkan turbin. Selanjutnya pada turbin, energi panas diubah menjadi energi mekanik. Pengembunan uap dikerjakan pada kondensor turbin. Energi

listrik dihasilkan dengan mengubah energi putaran turbin oleh generator (PT. PLN (persero), 2015)

2.2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Selama beroperasi, PLTG sering digabungkan dengan PLTU. Panas yang dihasilkan oleh PLTG digunakan untuk memanaskan cairan dan menghasilkan uap, yang digunakan oleh sistem operasi PLTU. Pembangkit listrik energi gas merupakan jenis pembangkit listrik dimana sudu-sudu turbin yang terhubung ke generator diputar menggunakan gas bertekanan dan temperatur tinggi.

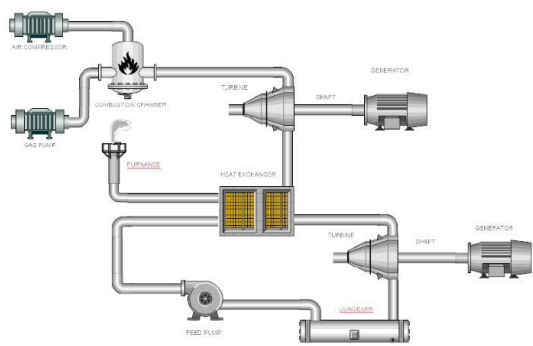
Energi mekanik dihasilkan dari gas yang terbentuk dari reaksi udara dan bahan bakar, dan selanjutnya menghasilkan energi listrik. Diesel dan gas alam cari (LNG) digunakan sebagai bahan bakar pembangkit turbin gas. Diperlukan tiga komponen utama pada proses pembakaran di ruang bakar yaitu udara pembakaran, bahan bakar, panas. (Girsang, 2016)

2.2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pembangkit listrik tenaga gas-uap (PLTGU) adalah pembangkit listrik gabungan antara sirkuit gas dan sirkuit uap, dan generator uap pemulihan panas (HRSG) bertindak sebagai penghubung antara dua sirkuit. Listrik PLTGU dihasilkan oleh generator yang digerakkan oleh turbin gas dan turbin uap. (Girsang, 2016)

Proses pembangkitan PLTGU yaitu kompresor dan pompa bahan bakar mengkompresi udara dan bahan bakar di ruang bakar. Gas bertekanan tinggi dihasilkan dengan mencampur dan membakar campuran gas dan udara. Gas bertekanan tinggi ini kemudian dikirim ke turbin gas dan menghasilkan listrik dengan generator. Saat gas buang melewati turbin, boiler mensirkulasi ulang sisa gas buang untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi sebelum dilepaskan ke lingkungan. Selain itu, uap air bertekanan

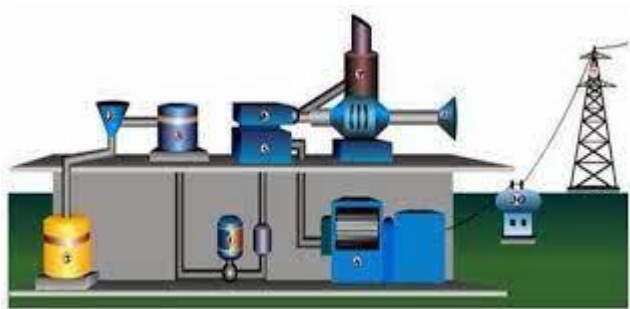
tinggi dialirkan ke turbin uap untuk menghasilkan listrik melalui generator.(Yuniarti & Aji, 2019)



Gambar 2.6. Prinsip Kerja PLTGU

2.2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

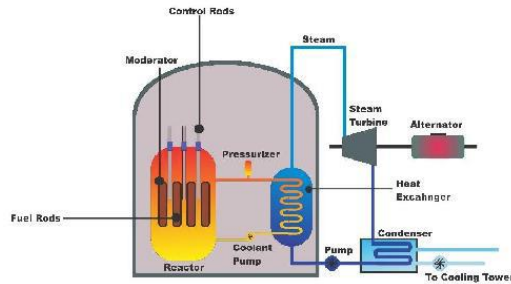
Mesin diesel digunakan sebagai sumber energi pada pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Selama proses pembakaran bahan bakar pada mesin terjadi perubahan energi dari energi bahan bakar menjadi energi mekanik. (Syahrir Habiba et al., 2017). Pada sebuah PLTD memerlukan tangki bahan bakar utama, tangki bahan bakar sementara, tangki bahan bakar, pompa bahan bakar, mesin diesel dan genset.(Sianturi, n.d.)



Gambar 2.7. PLTD (Sinaga, n.d.)

2.2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

PLTN sendiri merupakan pembangkit listrik termal dimana panas yang dihasilkan didapat dari satu atau lebih reaktor nuklir. Pembangkit listrik tenaga Uap (PLTU) dan PLTN memiliki cara kerja yang tidak jauh berbeda. Yang membedakan adalah energi panas yang dihasilkan berasal dari reaksi nuklir. Panas ini nantinya digunakan untuk menguapkan air pendingin. Listrik yang dihasilkan generator pada pembangkit ini berasal dari energi kinetik turbin yang digerakkan oleh uap. (Afri Yahdi, 2015)



Gambar 2.8. Prinsip Kerja PLTN

Komponen PLTGU adalah bak mesin, filter udara, kompresor, ruang bakar, turbin, penukar panas, kondensor

DAFTAR PUSTAKA

- Afri Yahdi, et all. (2015). *Makalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Pltn)*.
- Baruna, E. S. (n.d.). *Pembangkit Listrik Tenaga Angin: Pengertian, Komponen dan Cara Kerjanya*. KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA.
- Erilia, E. (2022). *Cara Kerja PLTP-Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi & Komponen*. <https://tirto.id/gyxn>
- Girsang, R. O. (2016). *Analisis Performa PLTGU PLN Sektor Keragaman Menggunakan Software Cycle Tempo*.
- Kementerian Sumber Daya Mineral. (2020). Panduan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). *Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan Dan Konservasi Energi Kementrian Sumber Daya Mineral*, 1, 84.
- PT. PLN (persero). (2015). PENGOPERASIAN PLTU. *Galang Tanjung*, 2504, 1–9.
- Re, I. (n.d.). *Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Mekanisme Kegagalan pada Turbin Angin*. <https://indonesiare.co.id/id/article/mengenal-pembangkit-listrik-tenaga-bayu-pltb-dan-mekanisme-kegagalan-pada-turbin-angin>
- Rianta, M. G. (n.d.). *Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)*. <https://indonesiare.co.id/id/article/pembangkit-listrik-tenaga-panas-bumi-pltp>
- Saefudin, E., Kristyadi, T., Rifki, M., & Arifin, S. (2017). Turbin Screw untuk Pembangkit Listrik Skala Mikrohidro Ramah Lingkungan. *Rekayasa Hijau*, 1(3). <https://doi.org/10.26760/jrh.v1i3.1775>
- Sianturi, R. S. (n.d.). *Studi Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Aplikasi PT. Musim Mas Kim II Medan*.
- Sinaga, F. (n.d.). *Prinsip Kerja PLTD*.

- Sunergi. (n.d.). *Sistem On Grid dan Off Grid*.
<https://www.sunergi.co.id/id/sistem-on-grid/>
- Syah, M. A. R. (n.d.). *Pengetahuan Teknik Elektro : Bayu si Penghasil Listrik*. Journalism and Website Division Staff - Humas Elektro ITK.
- Syahrir Habiba, M., Darmulia, D., Efendi, R., & Irsal, I. (2017). Analisis Kinerja Mesin Diesel Terhadap Pemakaian Bahan Bakar Heavy Fuel Oil (Hfo) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (Pltd) Tallasa Kabupaten Takalar. *ILTEK : Jurnal Teknologi*, 12(02), 1790–1795.
<https://doi.org/10.47398/iltek.v12i02.383>
- Tennessee Valley Authority. (n.d.). *Hydropower explained*.
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower>
- Yuniarti, N., & Aji, I. W. (2019). Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik. *Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FT. Universitas Negeri Yogyakarta*, 41–48.
- Zenius. (n.d.). *Pengertian, Prinsip, dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)*.
<https://www.zenius.net/blog/pembangkit-listrik-tenaga-air>

BAB 3

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA)

3.1 Pendahuluan

Sistem tenaga listrik merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan antara pembangkit, sistem penyaluran dan pemanfaatannya di sisi beban atau konsumen. Pada sistem tenaga listrik yang kompleks terdiri dari beberapa pembangkit terinterkoneksi dengan beberapa bus atau gardu induk dalam melayani beban. Dalam upaya melayani beban, terdapat banyak gangguan, studi fundamental analisis gangguan menjadi bagian dalam proses perencanaan pembangkit listrik. Analisis untuk gangguan sistem interkoneksi 14-Bus diuji coba dalam menentukan keandalan sistem (Agus, 2021). Keandalan sistem dapat ditentukan dari kemampuan pembangkit dalam melayani beban dengan kualitas parameter tegangan, ferkewensi, dan tegangan yang memenuhi standar kebutuhannya. Pengaturan dan kualitas pelayanan pembebanan pada sistem tenaga listrik dapat dilakukan dari stasiun pembangkit.

Stasiun pembangkit atau *power house* ditentukan dari jenis *prime over* (penggerak mula) genarator, untuk pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial pada tingkat ketinggian dengan air sebagai sumber energi yang dapat menghasilkan energi listrik, hal ini dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga air (Vineet, 2015). Pada level ketinggian tertentu, air disimpan di bendungan dari sumber-sumber Daerah Aliran Sungai (DAS). Air yang tersimpan ini mengandung energi

potensial, karena tinggi atau tinggi bendungan (Stefan, 2018). Pada saat air dialirkan menuju turbin melalui pipa Penstock, pada saat itu energi kinetik diubah menjadi energi mekanik. Turbin atau penggerak utama secara mekanis digabungkan dengan generator (Marten, 2013). Setiap kali turbin mulai berputar dengan bantuan air bertekanan tinggi, secara otomatis generator mulai berputar dan menghasilkan energi listrik (Egill, 2016).

Pemilihan lokasi serta rencana dalam pengadaan pembangkit listrik tenaga air, memperhatikan syarat syarat sebagai berikut:

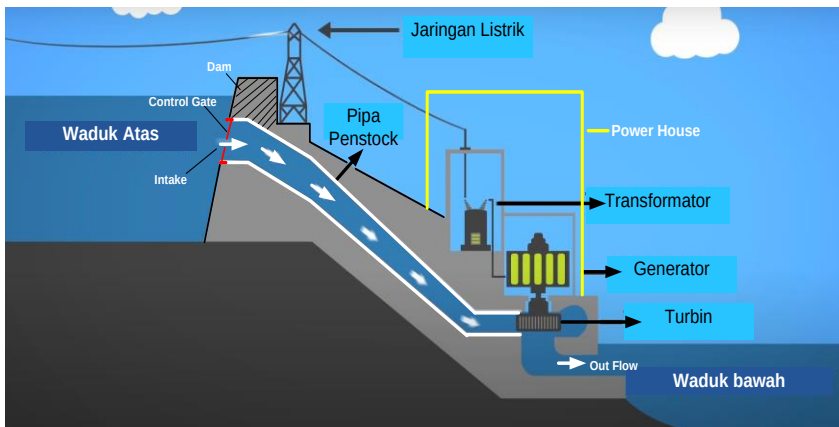
1. Jumlah Air yang dibutuhkan, Seperti yang di ketahui pembangkit listrik tenaga air membutuhkan air sebagai media utama pembangkit, jadi bahwa jumlah air yang cukup tersedia secara terus menerus sepanjang tahun.
2. Area Pegunungan/Berbukit yang dibutuhkan: Untuk penyimpanan volume air dalam jumlah yang cukup besar, kedua sisi area bendungan di daerah berbukit atau pegunungan yang diperlukan untuk penyimpanan air.
3. Pekerjaan Sipil: Konstruksi PLTA harus memiliki fondasi yang kuat dalam membendung air.
4. Area Tangkapan Besar: Diperlukan daerah resapan air yang luas pada PLTA
5. Fasilitas Transportasi: Untuk pekerja pembangunan PLTA dan material Sipil diperlukan fasilitas transportasi yang lebih baik
6. Dekat dengan pusat beban, untuk mengurangi biaya transmisi dan distribusi, pabrik harus ditempatkan dekat dengan pusat beban.
7. Ketersediaan bahan, pada saat mendirikan bendungan dan *power plant* pembangkit listrik, harus diperhitungkan jumlah bahan/material untuk konstruksi bangunan mudah didapat dan didistribusikan.
8. Daerah bebas gempa, jumlah penyimpanan air cukup besar di bendungan pembangkit listrik tenaga air,

sehingga perhitungan area rawan gempa menjadi perhatian karena gempa bumi berdampak terhadap kemungkinan terjadi banjir, untuk menghindari daerah ini harus bebas dari gempa.

9. Fasilitas akomodasi untuk staf operasional dan pemeliharaan, fasilitas akomodasi yang lebih baik adalah disediakan dengan tarif yang wajar.
10. Ekspansi Masa Depan: untuk meningkatkan kapasitas pembangkit per MW, diperlukan rencana ketersediaan area ruang untuk pengembangan sarana dan prasarana PLTA dimasa depan.

3.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Air

PLTA merupakan prinsip konversi energi dengan memanfaatkan air dan energi potensial sebagai penggerak turbin. Bagian utama PLTA yang terdiri dari dam (bendungan), waduk penampungan (reservoir), turbin, media aliran air melalui pipa pesat yang disebut dengan *penstock*, *power house* dan sistem kelistrikan. Bagian utama dari PLTA dengan instalasi sistemnya secara skematik ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Komponen Utama PLTA

Beberapa fungsi komponen utama PLTA, seperti ditunjukkan pada gambar satu, sebagai berikut:

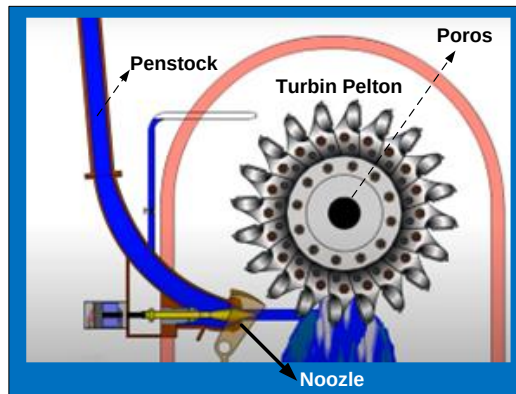
1. **Waduk:** Fungsi waduk adalah untuk menyimpan air di dekat bendungan. Fungsi waduk adalah tempat penyimpanan air dalam volume yang cukup besar berguna untuk menggerakkan turbin air, seperti terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Waduk dan Dam (Sumber PLTA Sigura-Gura Asahan)

2. **Dam (Bendungan):** Bendungan berfungsi menahan air yang akan mengalir ke dataran yang lebih rendah. Melalui Dam ini air akan terkumpul pada waduk yang digunakan dalam pembangkit **listrik** tenaga air. Bendungan memiliki fungsi pengendali debit air, jika curah hujan lebih tinggi terjadi maka pintu bendungan dibuka untuk aliran air
3. **Intake** (Bangunan pemasok air); adalah suatu bangunan yang digunakan untuk mengambil air dari bendungan ke dalam pipa Penstocks untuk kemudian disalurkan ke turbin. Intake pada suatu PLTA didesain untuk membawa air ke turbin melalui penstock untuk meminimisasi kehilangan rugi-rugi energi.

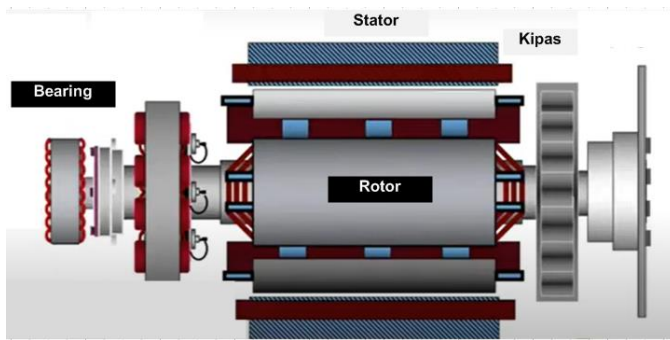
4. **Penstock:** Merupakan perangkat yang digunakan untuk aliran air dari intake menuju turbin. Aliran air dari dam menuju turbin dengan bantuan penstock. Ini mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik. Penstocks terdiri dari besi cor atau bahan beton. Penstock berlubang & berdiameter besar.
5. **Turbin:** Fungsi utamanya sebagai penggerak utama, melalui aliran air pada pipa penstock, turbin akan mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik energi. Pada pembangkit listrik tenaga air tergantung dengan berbagai jenis turbin yang digunakan seperti roda pelton, Jenis turbin Francis, Kaplan dan Propeller yang dapat digunakan, berdasarkan kebutuhan penggunaan turbin pada PLTA. Gambar 3, menunjukkan salah satu jenis turbin (turbin pelton) yang digunakan sebagai penggerak pada PLTA.



Gambar 3.3. Jenis Turbin Pelton

6. **Generator:** digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Untuk itu turbin dan generator digabungkan secara mekanis. Bagian utama generator terdiri dari stator yang memiliki belitan untuk menghasilkan tegangan listrik, dan rotor, bagian yang diberikan tegangan DC dari sistem exitasi, untuk proses pembangkitan Gaya Gerak Listrik (GGL) pada belitan stator, sehingga tegangan

listrik pada kumparan stator dapat dibangkitkan saat rotor diputar oleh penggerak mula (turbin). Konstruksi generator dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 3.4. Konstruksi Generator

7. **Transformator:** merupakan komponen yang sangat vital di hampir semua bagian dari sistem tenaga listrik seperti pembangkitan, daerah transmisi, distribusi dan pemanfaatan esensial lain. Transformator berfungsi menaikkan atau menurunkan tegangan pada suatu sistem. Transformator dapat mengubah kuantitas tegangan atau arus listrik menjadi kuantitas tegangan atau arus listrik yang berdasarkan nilai rasio perbandingan beitan, yang dapat mengubah kauntitas tersebut. Perubahan kuantitas tegangan atau arus menghasilkan jenis transformatir sebagai penaik tegangan atau penurun tegangan. Transformator ditempatkan pada sistem rangkaian listrik ke sistem rangkaian listrik yang lain, untuk mentransfer energi listrik. Pada PLTA, penggunaan tranformator daya diperlukan untuk mengirimkan energi listrik dari power house ke pemakai atau pengguna dengan jarak yang raltif jauh. Pengiriman daya melalui power house oleh tarfo daya ke pengguna melalui jaringan transmisi. Konstruksi Trafo daya seperti ditunjukkan pada gambar 5 (Mounika, 2020).



Gambar 3.5. Konstruksi Transformator

8. **Power House:** Merupakan komponen utama pembangkit listrik tenaga air. Pada Power house terdapat generator, turbin, transformator daya serta peralatan pendukung lainnya seperti relay proteksi, instrumen pengukuran dan kendali. Pada turbin atau **penggerak** utama dikopel secara mekanis dengan generator. Energi mekanik diubah menjadi energi listrik melalui generator. Kecepatan penggerak pada turbin berputar dengan kecepatan konstant akan menghasilkan kualitas output daya listrik yang baik pada generator.

3.3 Mekanisme Pengukuran Potensi Daerah Aliran Sungai (DAS) untuk PLTMH

3.3.1 Penentuan lokasi dan potensi *hydro-power*

Pembangkit listrik tenaga air/*mikro hydro* berasal dari air yang bekerja, air yang bergerak. Prosesnya dari energi matahari yang menggerakkan siklus hidrologi. Beberapa dari air menguap, tetapi sebagian besar meresap ke dalam tanah atau menjadi limpasan permukaan. Air dari hujan dan salju yang mencair akhirnya mencapai kolam, danau, waduk, di mana penguapan terus terjadi. Hidrologi DAS didorong oleh interaksi

antara kondisi cuaca, tutupan permukaan, dan geomorfologi. Cuaca memberikan input energi dan air ke DAS. Kehilangan air melalui penguapan, dan pemanasan atau pendinginan tanah pada gilirannya akan mempengaruhi air permukaan aliran sungai pada DAS.

Kajian potensi pembangunan PLTMH dilakukan dengan metode (a) Penentuan lokasi sungai; (b) Pengukuran ketinggian jatuh air; (c) Pengukuran debit air dan (d) Perhitungan potensi daya yang dihasilkan dan energi tahunan Beberapa alat ukur yang dibutuhkan seperti GPS, *Current meter-flowatch* dan meteran digunakan sebagai alat utama dan didukung peralatan penunjang lainnya (Kiki, 2018). Proses observasi sasaran survei potensi DAS dilakukan pada sungai-sungai yang besar. Pengukuran potensial dilakukan sebagai dasar perhitungan dan analisis potensi *hydro* untuk proses konversi energi.

Pada proses konversi energi yang menghasilkan listrik, tidak ada energi baru yang tercipta. Sebenarnya bentuk energi diubah menjadi bentuk lain. Pada pembangkit listrik tenaga air, Untuk menghasilkan listrik, air harus bergerak, memanfaatkan debit air dan ketinggian menghasilkan energi kinetik (Parabelem, 2011). Air yang mengalir memutar sudu-sudu dalam suatu turbin, bentuknya diubah menjadi energi mekanik (mesin). Turbin memutar rotor generator yang kemudian mengubah energi mekanik ini menjadi yang lain bentuk energi listrik. Karena air adalah sumber energi awal, maka proses pembangkitannya dengan istilah *hydro-power* disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

3.3.2 Pengukuran dan Analisis Potensi *Hydro-Power*

Pengukuran dan analisis potensi DAS, dilakukan untuk eksplorasi aliran sungai untuk pembangkit listrik (Denosive 2017). Hasilnya akan dapat digunakan masyarakat sekitar dalam menggerakkan ekonomi. Lebih lanjut untuk ketersediaan iar

pada aliran sungai yang cukup besar, akan mengubah suatu daerah menjadi daerah mandiri energi, dengan memanfaatkan sumber daya alam sebagai pemasok energi utama.

Energi yang dihasilkan diproses dengan konversi. Persamaan konversinya dapat dinyatakan dengan:

$$P_{in} = P_{out} + Losses \quad (1)$$

Keterangan rumus,

P_{in} = Daya masuk

P_{out} = Daya Keluar

Losses = Kehilangan-rugi rugi daya

Atau dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{out} = P_{in} \times \eta_{konversi} \quad (2)$$

Analisis perhitungan potensi *Hydro-Power* dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = g \times Q \times h \times \eta \quad (3)$$

Keterangan rumus :

P = daya keluaran yang dihasilkan (kW)

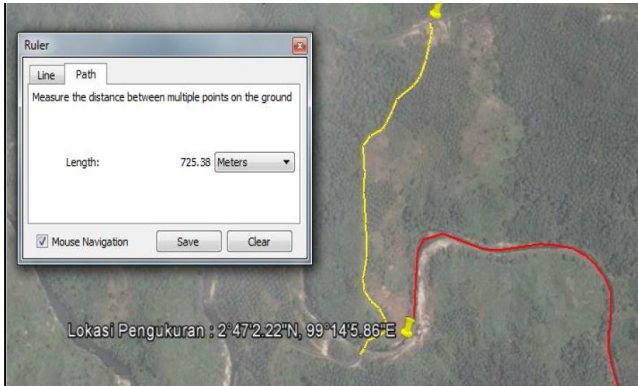
g = gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h = tinggi jatuh air (m)

Q = debit air sungai (m^3/s)

η = efisiensi

Ujicoba analisis potensi daerah Aliran sungai untuk menentukan kapasitas pembangkit PLTA, dilakukan ujicoba pengukuran DAS Bandar pasir mandoge dari pengamatan satelit terletak di $20^{\circ}47'21,27''\text{N}, 99^{\circ}14'3.63$ seperti ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Peta lokasi Pengukuran Potensi DAS Bandar Pasir Mandoge

Identifikasi potensi DAS Bandar pasir mandoge dilakukan untuk mengukur besar potensi debit Air, ketinggian air terjun dan potensi DAS untuk PLTA. Dengan peralatan pengukuran seperti (1) Alat ukur debit Water Velocity (Kecepatan Aliran Air) (2) GPS dan (3) Alat ukur Jarak/mengukur kedalaman Sungai (meter). Fungsi masing-masing perangkat alat ukur dijelaskan sebagai berikut: (1) Alat ukur debit *Water Velocity*, pengukuran kecepatan aliran air menggunakan alat ukur current meter merk. *FLOWATCH* s.n 1401874, alat ini memiliki fungsi yang penting dalam menentukan kecepatan aliran air DAS Bandar Pasir Mandoge, seperti gambar 3.7.



Gambar 3.7. Portable Remote Reading Water Current Meter

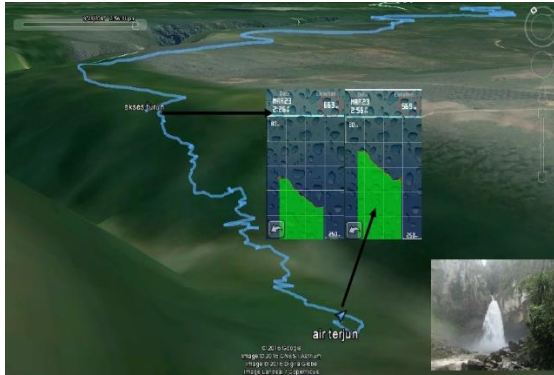
Penggunaan alat ini dilakukan dengan tahapan (1) Menghidupkan pembacaan digital (*power on*) pada perangkat alat, (2) Memasang kincir pada slot tungkai atas perangkat sebagai instrument mendeteksi kecepatan aliran air (3) Menghubungkan konektor ke perangkat display (4) Merendam perangkat kincir ke dalam aliran sungai dengan posisi kincir menghadap/ melawan aliran sungai (5) mengamati dan mencatat hasil pengukuran dari alat kecepatan Air. Pengukuran kecepatan aliran air pada DAS, menggunakan perangkat seperti ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.8. Alat ukur kecepatan aliran Air

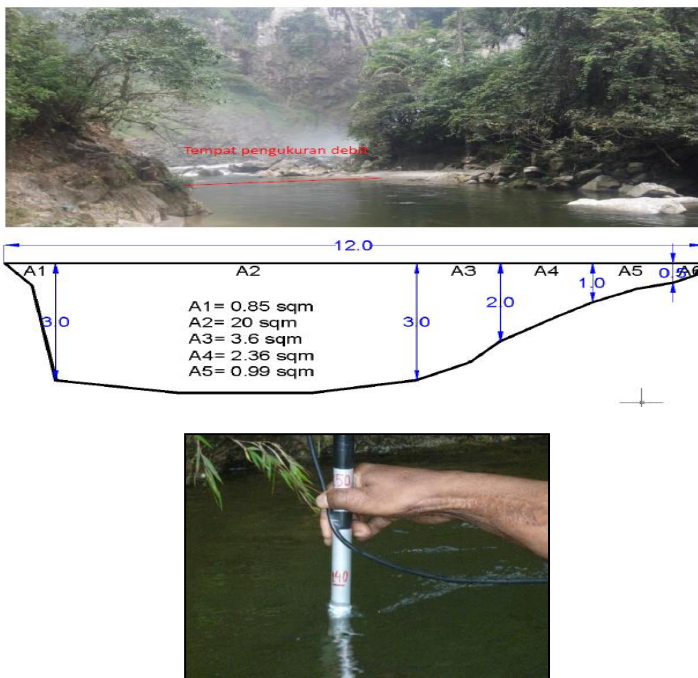
3.3.3 *Global Positioning System (GPS)*

Perangkat ini memiliki peran penting dalam melihat kondisi geografis kedudukan DAS, posisi ketinggian air terjun pada DAS Bandar pasir mandoge serta mengetahui kemiringan/derajat permukaan air terjun terhadap permukaan DAS. Gambar 9 menunjukkan potret melalui perangkat GBS, daerah lokasi obeservasi melalui perekaman data Lokasi Air Terjun koordinat : $2^{\circ}46'30.02''\text{N}$, $99^{\circ}16'53.31''$



Gambar 3.9. Photo Lokasi Air Terjun koordinat: $2^{\circ}46'30.02''\text{N}$, $99^{\circ}16'53.31''$

Besaran nilai debit air pada DAS Bandar pasir mandoge, ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10. Sample data pengukuran luas sungai dan ketinggian air DAS

3.3.4. Analisis Potensi Energi Listrik pada DAS

Dari hasil pengukuran diperoleh data – data sebagai berikut :

$$\text{Flow Air Maksimum} = 1,7 \text{ m/s}$$

$$\text{Flow Air Minimum} = 1,3 \text{ m/s}$$

$$\text{Luas Penampang} = 12 \text{ m}^2$$

Dari hasil pengukuran, diperoleh nilai debit air di dapat :

$$\begin{aligned}\text{Debit Air} &= \text{Flow Air} \times \text{Luas Penampang} \\ &= (1,7 + 1,3)/2 \text{ m/s} \times 12 \text{ m}^2 \\ &= 18 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Nilai Kapasitas Daya Pembangkit, dengan persamaan

$$P = Q \times H \times G \times \text{eff.}$$

Keterangan rumus:

$$P = \text{Daya terbangkit dalam Watt}$$

$$Q = \text{Debit air dalam liter/detik}$$

$$H = \text{Beda Tinggi (meter)}$$

$$G = \text{Grafitasi } 9,81 \text{ m/detik}$$

$$\text{Eff} = 0,54 - 0,8$$

Dengan memasukkan data-data yang diperoleh ke persamaan (3), maka adak diperoleh:

$$\begin{aligned}P &= Q \times H \times G \times \text{eff.} \\ &= 18 \text{ m}^3/\text{s} \times 9,8 \times 42 \text{ m} \times 0,8 \\ &= 4741,632 \text{ KW} \\ &= 4,7 \text{ MW}\end{aligned}$$

Maka di dapat potensi air pada DAS Bandar pasir mandoge berdasarkan observasi pengukuran untuk pembangkit listrik tenaga air/PLTMH ada lah sebesar **4,7 MW**

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Junaidi, Rahmانيar, Rudi Salman, Joni S. Rambey, A. Hamid K, Baharuddin, 2021. Modelling And Simulation of Symmetrical and Unsymmetrical Faults on 14 Bus IEEE-Power Systems, Journal of Theoretical and Applied Information Technology. ISSN: 1992-8645 Vol.99. No 20
- Egill Benedikt Hreinsson," *Electric Load Forecasting in a Hydro- and Renewable Based power System*," 978-1-5090-1298-5, Journal IEEE 2016
- Parabelem T.D. Rompas "Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Pada Daerah Aliran Sungai Ongkak Mongondow Di Desa Muntoi Kabupaten Bolaang Mongondow" , Jurnal Penelitian Saintek, Vol. 16, No2, 2011, <http://journal.uny.ac.id/index.php/saintek/article/viewFile/3390/2875> diakses pada tanggal 1/12/2016.
- Mounika Reddy K, N. Sai Krishna, K. Koti Reddy, B. Durga Naik. 2020. Power Transformer 2020: Explained Practically, International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET) Vol. 7, Issue 5, ISSN 2394-3777.
- Kiki Kananda, 2018. Potential Analysis of Hydro Power Plants in Pesisir Barat District, Lampung Province, Proceeding Journal of Science and Applicative Technology. COSITER 2018
- Vineet Kumar Singh, Neha Singh Chauhan and Deepti Kushwaha. 2015. An Overview Of Hydro-Electric Power Plant. ISST Journal of Mechanical Engineering, Vol. 6 No. 1, (January - June 2015), p.p. 59-62 ISSN 0976-7371 © Intellectuals Society for Socio-Techno Welfare
- Stefan Tkac. 2018. Hydro power plants, an overview of the current types and technology .SSP - JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING Special Issue, March 2018.
- Marten Grabbe.2013. Hydro-Kinetic Energy Conversion. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1025. ISSN 1651-6214 ISBN 978-91-554-8608-2.
- Denosive S.E. 2017. Analysis of Hydropower Potential and the Prospects of Developing Hydropower Engineering in South Ural of the Russian Federation' Procedia Engineering Volume 206, 2017, Pages 881-885

BAB 4

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

4.1 Pendahuluan

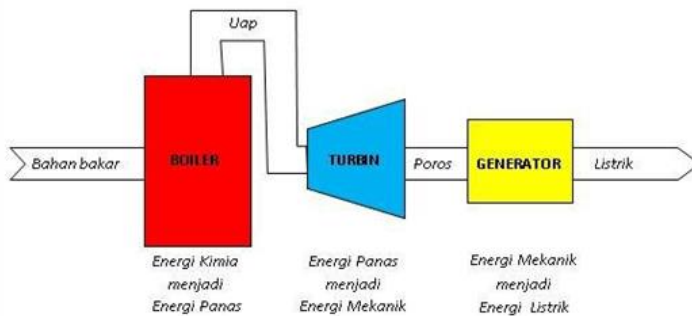


Gambar 4.1. PLTU Cilacap PT S2P
Sumber: Maghfuri, A dkk, 2022.

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap bertekanan sebagai tenaga utama. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ialah salah satu (Katolik, dkk. 2018). Pembangkit tak terbarukan yang menggunakan sistem energi kinetik dengan proses berawal dari uap sampai menghasilkan energi listrik. Untuk menghasilkan uap, harus ada proses pembakaran untuk memanaskan air atau dengan kata lain PLTU adalah sistem pembangkit listrik yang

mengubah energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap. Air yang di panaskan akan menghasilkan uap bertekanan untuk menggerakkan turbin dan meneruskan putaran ke generator untuk dirubah menjadi energi listrik. Bahan bakar yang di gunakan adalah batu bara, minyak bumi, gas alam, sampah organik (biomassa).

Kelebihan dari pembangkit listrik jenis ini adalah dapat di bangun atau di desain dengan berbagai besaran kapasitas dan penyesuaian keadaan. Beberapa perangkat pendukung pembangkit listrik jenis ini adalah boiler/ketel uap, pompa air, turbin uap, generator dan heat exchanger.



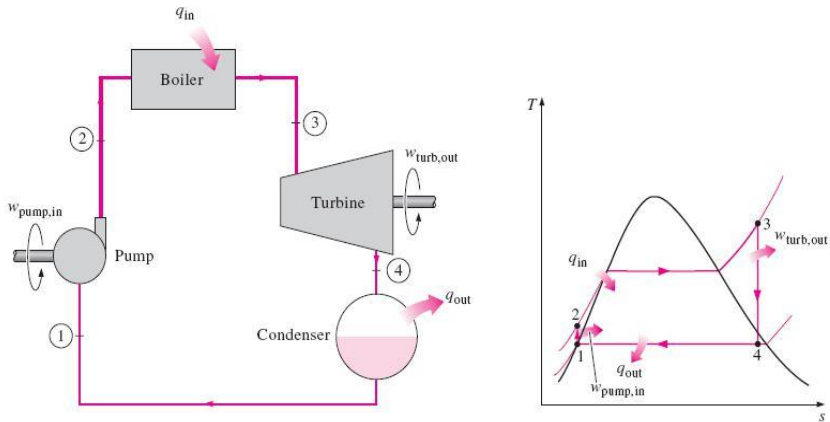
Gambar 4.2. Konversi energi kerja PLTU
(Sumber: Rakhman, 2013)

Pada proses kerjanya, PLTU menggunakan siklus Rankine. siklus Rankine merupakan PLTU menggunakan siklus Rankine dalam proses kerjanya. 3 macam siklus konversi energi pada pengoperasian PLTU, yaitu:

- Mengkonversi energi dari kimia bahan bakar menjadi energi uap bertekanan dan suhu yang
- Mengubah energi panas dan tekanan uap untuk menggerakkan
- Konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

4.2 Prinsip kerja PLTU

Prinsip kerja pada PLTU menggunakan siklus renkine ideal yang di jelaskan pada Gambar 4.3.

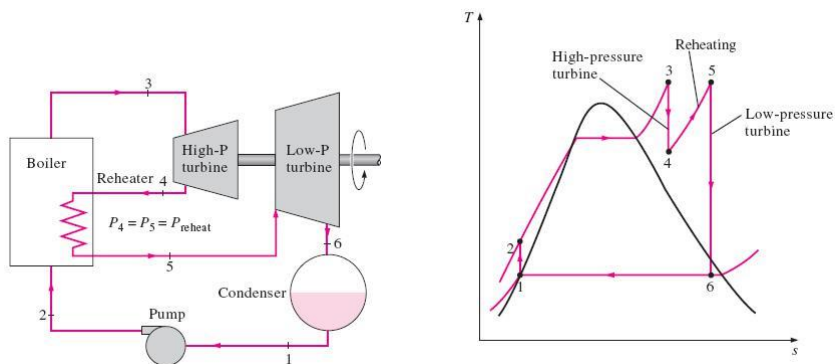


Gambar 4.3. Siklus Renkine Ideal
Sumber: Chengel, Y dkk (2007)

Dari Gambar 3 dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Proses 1 - 2 adalah pemompaan air untuk mengisi boiler. Tahapan ini merupakan kompresi isentropik dan proses ini terjadi pada pompa air umpan boiler.
- Proses 2-3 adalah pemanasan air pada boiler. Suhu air dinaikan hingga mencapai titik didih hingga air berubah menjadi uap jenuh. Uap jenuh di panaskan kembali menjadi uap kering bertekanan.
- Proses 3 - 4 : Uap superheat bekerja di dalam turbin dan mendorong sudu-sudu turbin dan di teruskan putaran turbin ke generator untuk menghasilkan listrik, sehingga tekanan dan temperatur menjadi turun. Langkah ini merupakan ekspansi isentropik.

- d) Proses 4–1: pelepasan panas dari steam di kondensor untuk membentuk air kondensat pada tekanan konstan.
- e) efisiensi siklus renkine dapat ditingkatkan dengan melakukan pemanasan kermballi uap hasil ekspansi turbin pertama dengan menggunakan heater dengan tujuan menaikkan nilai entalphi dari uap, sehingga tekanan uap kembali meningkat. Selain itu steam/uap yang dihasilkan tidak lagi mengandung air, sehingga suap yang akan digunakan untuk ekspansi turbin tidak merusak sudu-sudu turbin. Pada gambar 4.4. berikut merupakan siklus Rechine ideal dengan perlakuan pemanasan.



Gambar 4.4. Siklus Rankine Pemanasan Ulang (Reheat)
Sumber : Chengel, 2020

Berikut ini adalah penjelasan siklus Rankine Pemanasan Ulang:

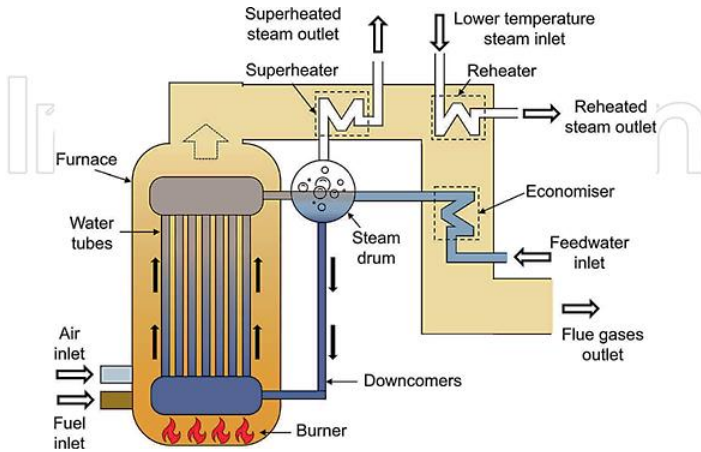
- a) Proses 1 - 2 : pemompaan air untuk mengisi boiler. Tahapan ini merupakan kompresi isentropik yang terjadi pada pompa air untuk mengisi boiler.
- b) Proses 2 - 3 : pemanasan air pada boiler. Suhu air dinaikan hingga titik didih tercapai dan merubah air menjadi uap

- jenuh. Uap jenuh di panaskan kembali menjadi uap kering bertekanan.
- c) Proses 3 - 4 : Superheated steam bekerja pada *high pressure turbine*, sehingga tekanan dan temperatur turun. Langkah ini merupakan ekspansi isentropik.
 - d) Proses 4 - 5 : proses pemanasan uap kembali oleh boiler setelah uap digunakan untuk melakukan kerja pada turbin tekanan tinggi.
 - e) Proses 5 - 6 : Uap panas yang dipanaskan dari boiler kembali digunakan untuk kerja pada turbin bertekanan rendah sehingga uap bekas tekanan dan temperatur pada uap bekas menjadi turun. Dalam proses ini, uap panas reheat menjadi uap basah.
 - f) Proses 6-1: membuang panas dari uap pada tekanan konstan di kondensor sehingga uap basah akan berubah menjadi air.

4.3 Komponen utama PLTU

4.3.1 Boiler

Boiler/ketel adalah salah satu alat pada pembangkit listrik yang memiliki fungsi untuk memanaskan serta mengubah fluida cair menjadi uap bertekanan dan bersuhu tinggi. Konstruksi boiler berupa pipa-pipa tempat fluida mengalir. Susunan pipa-pipa ini membentuk ruang bakar dan merupakan tempat berlangsungnya pembakaran.



Gambar 4.5. Sistem Boiler
(Sumber: Cruz, C.E, 2021)

Boiler dilengkapi oleh komponen seperti dinding pipa, ruang bakar, pembakar, kelompok kipas, sistem penanganan abu batubara dan penumpuk (cerobong asap). Unit Paiton 3 menggunakan vertical single tube reheat boiler dimana steam yang digunakan untuk memutar high pressure turbine dipanaskan kembali melalui pipa reheater sebelum masuk ke medium pressure turbine.

Menurut Cahyo Adi Basuki, dkk (2011) laju aliran uap lanjut (*superheated*) didalam boiler selalu mengalami perubahan. Dampaknya adalah perubahan laju aliran bahan bakar yang berbeda-beda, mengikuti besar perubahan beban. Komponen utama boiler adalah:

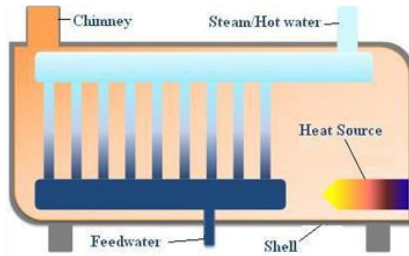
- Economizer sebagai pemanas air dari heater bertekanan tinggi.
- Dinding air berfungsi untuk penguapan air.
- Superheater sebagai pemanas uap air untuk menghasilkan uap kering.
- Pemanas yang memanaskan steam kering bertekanan tinggi yang keluar dari turbin bertekanan tinggi.

- e) Separator digunakan untuk memisahkan fluida kerja yang masih dalam fase air untuk di panaskan kembali.
- f) Pompa sirkulasi berfungsi untuk memompa air yang dipisahkan oleh separator ke dinding air untuk dipanaskan kembali.

Proses perubahan air menjadi uap dilakukan dengan cara pemanasan air dalam pipa dengan menggunakan pemanasan dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara terus menerus pada ruang bakar dengan menyalurkan bahan bakar dan udara untuk proses pembakaran. Uap yang dihasilkan merupakan uap superheated pada tekanan dan temperatur tinggi. Jumlah steam yang dihasilkan tergantung pada kapasitas heat exchanger, supply bahan bakar dan panas pembakaran. Berdasarkan jenisnya, boiler terbagi menjadi 2, yaitu:

a. Water tube boiler

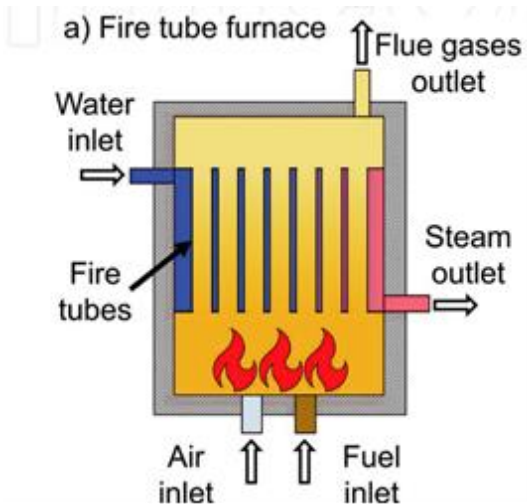
Boiler tipe water tube memiliki karakteristik menghasilkan kapasitas dan tekanan steam yang tinggi. Prinsip pengoperasiannya adalah proses penyalaan terjadi di luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air dan sebelumnya air tersebut dikondisikan terlebih dahulu melalui economizer, kemudian uap yang dihasilkan terlebih dahulu ditampung dalam steam drum. Sampai tekanan dan suhu cocok, lalu tahap uap superheater sekunder dan superheater primer yang baru dibuang ke pipa distribusi utama



Gambar 4.6. Sistem Water Tube Boiler
(Sumber: Murni, 2012)

b. Fire tube boiler

Boiler tipe fire tube memiliki karakteristik menghasilkan kapasitas dan tekanan steam yang rendah. Prinsip pengoperasiannya adalah proses penyalan terjadi di dalam pipa, kemudian panas yang dihasilkan dialirkan langsung ke boiler yang berisi air. Ukuran dan konstruksi boiler mempengaruhi kapasitas dan tekanan yang dihasilkan oleh boiler



Gambar 4.7. Sistem Fire Tube Boiler
(Sumber: Cruz, C.E, 2021)

4.3.2 Turbin

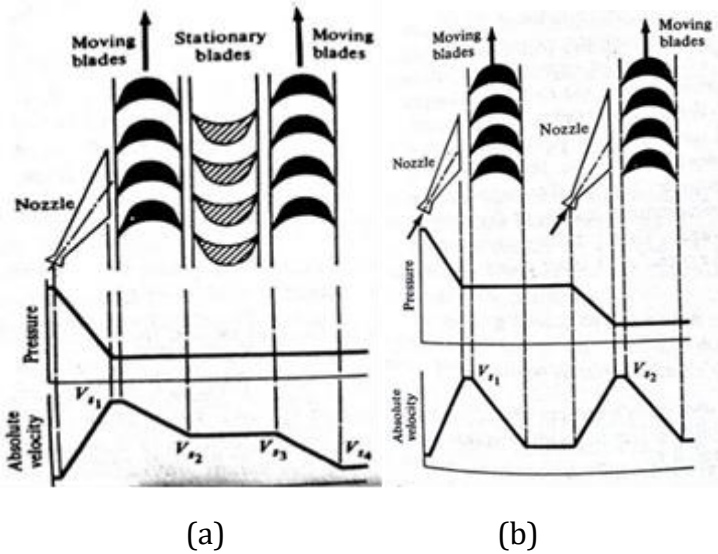
Turbin uap adalah unit yang mengubah energi tekanan dari uap menjadi energi mekanik berputar. Turbin adalah sebuah alat yang berputar dan merubah energi dari aliran fluida (Santoso. H, 2018). Uap bertekanan dan bertemperatur tinggi mengalir melalui nozel pada turbin sehingga kecepatannya meningkat dan berjalan dengan baik untuk menggerakkan sudu-sudu turbin yang terpasang pada poros.



Gambar 4.8. Turbin Uap
(Sumber: Apriandi, R, 2016)

Secara umum, ada 3 jenis tahapan turbin uap yang digunakan, yaitu:

- a) Turbin bertekanan rendah (*low pressure turbine*)
- b) Turbin bertekanan menengah (*intermediate pressure turbine*)
- c) Turbin bertekanan tinggi (*high pressure turbine*)

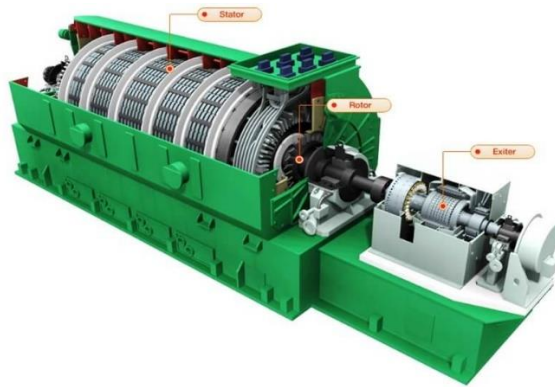


Gambar 4.9. Grafik Tekanan dan Kecepatan Uap Turbin Impulse (a) dan Turbin Reaksi (b)
(Sumber: Wakil, E.M.M, 1990)

Menurut Shilyakin, 1990. Siklus turbin uap adalah siklus Rankine, yang terdiri dari 2 jenis siklus yaitu:

- Siklus terbuka, dimana sisa uap dari turbin langsung dipakai untuk keperluan proses.
- Siklus tertutup, dimana uap bekas dari tubin dapat digunakan kembali dengan cara mendinginkannya dengan menggundakan kondensor, kemudian akan dihasilkan titik-titik air yang dialirkan menuju kolam penampungan untuk dipompakan menuju boiler kembali.

4.3.3 Generator



Gambar 4.10. Generator
(Sumber: Rakhman, 2020)

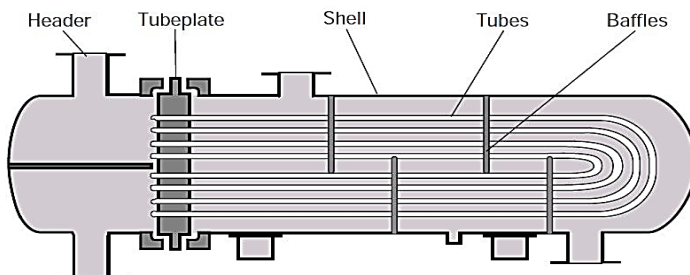
Energi listrik pada PLTU di hasilkan dari hasil kerja dari generator yang mengubah putaran dari turbin yang di teruskan pada As generator dan dari putaran tersebut akan menghasilkan energi listrik dengan penerapan prinsip induksi magnet. Cara kerja generator adalah steam dialirkan ke sudu-sudu turbin sampai turbin berputar. Turbin yang berputar telah terhubung ke generator. Jadi saat turbin berputar, generator juga ikut berputar. Putaran generator menghasilkan listrik yang akan disalurkan (Santoso,H. 2017)

Komponen utama pada generator adalah bagian bergerak yang di sebut rotor yang terdiri dari kumparan tempat medan magnet listrik dan bagian yang diam di sebut stator yang berupa housing yang berisi kumparan.

4.3.4 Kondensor

Kondensor adalah unit yang mengubah uap bekas atau uap keluar turbin menjadi air. Di samping itu, perangkat ini digunakan juga untuk mengkondensasikan fluida kerja dan

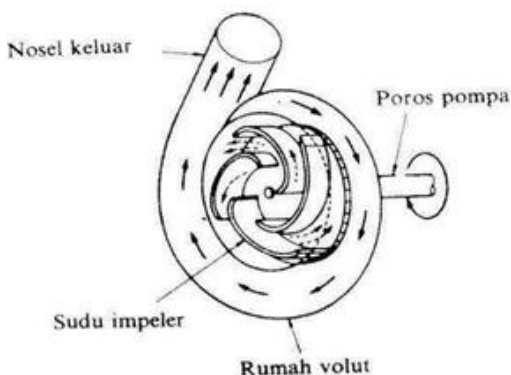
dapat sebagai chiller pada peralatan yang membutuhkan pendingin.



Gambar 4.11. Kondensor
Sumber: Napitupulu F.H dkk (2018)

4.3.5 Pompa

Pompa adalah alat yang digunakan untuk mengalir dan mengubah tekanan pada fluida kerja. Peran pompa pada pembangkit listrik tenaga uap sangat penting dan memiliki jenis dan fungsi yang beragam seperti boiler feed pump. Boiler feed pump adalah jenis pompa yang merupakan perangkat yang tidak dapat dipisahkan pada PLTU. Pompa jenis inilah yang memompakan air menuju boiler.

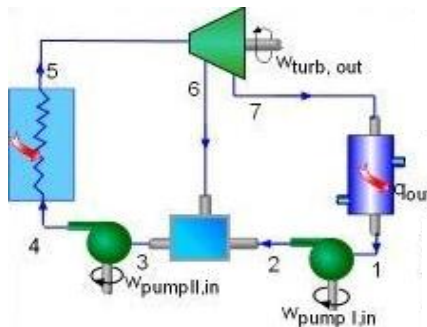


Gambar 4.12. Pompa
Sumber: Sularso dan Tahara, 1991

Jenis pompa yang sering digunakan pada PLTU adalah, sebagai berikut:

- Pompa kondensat adalah pompa yang digunakan untuk memompakan air pengisi dari sumur panas (tangki air kondensor) ke deaerator.
- Boiler feed pump merupakan jenis pompa tekanan tinggi yang digunakan untuk memompakan air dari deaerator menuju boiler.
- Booster pump beroperasi untuk meningkatkan tekanan pada fluida setelah dipompa melalui boiler feed pump.
- Pompa sirkulasi berfungsi untuk memompa fluida kerja yang masih dalam fase cair untuk dihangatkan hingga benar-benar berubah menjadi uap.

4.3.6 Feed water heater



Gambar 4.13. Siklus Rankine dengan *Regenerative Open Feed Water Heater*

(Sumber: Fajar A.F & Bachtiar.A, 2014)

Feed water heater adalah unit yang digunakan dalam siklus generator uap regeneratif. Feedwater heater digunakan untuk menaikkan suhu pada fluida kerja sebelum masuk ke boiler. Unit ini membantu kinerja boiler sehingga panas dbahan bakar lebih sedikit untuk mencapai temperatur yang sama jika

dibandingkan dengan PLTU yang tidak menggunakan *feedwater heater*.

Penambahan *feedwater heater* dapat mengurangi panas yang masuk (*boiler* dan *heater*) mungkin dengan cara mengekstraksi steam melalui tahapan turbin pada beberapa *feedwater heater* hal ini akan menghemat panas yang hilang saat steam bersirkulasi di aliran sistem (Junaedi, 2010).

Prinsip kerja *feedwater heater* adalah memanaskan air hasil keluaran dari kondensor melalui *steam nozzle* dari turbin dan pada beberapa instalasi juga ditambahkan drain dari *feedwater heater* lainnya.

Feed water heater terbagi menjadi 2 jenis, yaitu *open feed water heater* dan *closed feed water heater*. *Open feed water heater* generator ini merupakan deaerator yang berguna untuk menghilangkan kandungan oksigen yang terkandung dalam air kondensat hasil proses turbin tekanan rendah. Air kondensasi di pisahkan dari kandungan oksigen (udara) dengan semburan uap yang secara bersamaan memanaskan air yang disimpan dalam tangki deaerator.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriandi, R dan Mursadin, A. 2016. Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Pltu PT. Indocement P-12 Tarjun. *Jurnal sjme KINEMATIKA* 1(1)
- Chengel, Yunus A., Boles, Michael A. 2007. *Thermodynamics an Engineering Approach in SI Units, 6th Edition*. McGraw-Hill, inc United States of America.
- Cruz, I. De Ia & CE Ugalde-Loo, C.E. 2021. District Heating and Cooling Systems.
<https://www.intechopen.com/chapters/78400>. (Diakses 18 Mei 2023)
- Fajar. A. F dan Bachtiar. A. 2014. Pengaruh Feedwater Heater Terhadap Efisiensi Sistem Pembangkit 410 MW dengan Pemodelan Gate Cycle, paper and Presentations of Mechanical Engineering RSM 621.402 5
- Hetharia. M dan Lewerissa. Y. J. 2018. Analisis Energi Pada Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Dengan Cycle Tempo. *Jurnal Voering Politeknik Saint Paul Sorong* 3(1)
- Junaedi, D. 2010. Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa. *Jurnal Sinergi Jurusan Teknik Mesin* 11(1)
- Murni, 2012. Buku Ajar Ketel Uap. Semarang : Lembaga Pengembangan dan Penjamin Mutu Pendidikan Universitas Diponegoro
- Napitupulu, F. H dkk. 2018. Rancang Bangun Alat Penukar Kalor Shell dan Tube Dengan Satu Laluan Cangkang Dan Dua Laluan Tabung Sebagai Pemanas Air. *TALENTA Conference Series: Science & Technology Universitas Sumatera Utara* 2654-7082
- Rakhman, A. 2013. Fungsi dan Prinsip Kerja PLTU di <https://rakhman.net/power-plants-id/fungsi-dan-prinsip-kerja-pltu/>. (Diakses 14 Mei 2023)
- Rakhman, A. 2020. Pemeliharaan Generator
<https://rakhman.net/electrical-id/pemeliharaan-generator/>. (Diakses 18 Mei 2023)

- Santoso, H. 2018. Optimalisasi Untuk Menghasilkan Efisiensi Ideal Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Kapasitas 20 MW. *Jurnal String Universitas Indraprasta PGRI* 3 (2)
- Shlyakin, P. 1990. *Turbin Uap Teori dan Perancangan*. Jakarta : Erlangga.
- Sularso dan Tahara, H. 1991. Pompa dan Kompresor. Jakarta: Pradnya Paramitha
- Wakil, E.M.M. Instalasi Pembangkit Daya. Jakarta: Erlangga. 1992

BAB 5

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS-UAP (PLTGU)

5.1 Pengertian PLTGU

Pembangkit listrik tenaga gas dan uap adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi kimia yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil seperti gas alam, minyak, atau batu bara untuk memanaskan air dalam sebuah boiler dan menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin yang terhubung ke generator listrik. Proses ini menghasilkan energi kinetik yang dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

Pembangkit listrik tenaga gas dan uap biasanya lebih efisien dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya seperti pembangkit listrik tenaga diesel atau pembangkit listrik tenaga uap konvensional. Mereka juga dapat dengan cepat disesuaikan dengan permintaan listrik yang berubah-ubah dan dapat dioperasikan dengan lebih bersih dan lebih sedikit emisi gas rumah kaca daripada pembangkit listrik konvensional lainnya. Namun, pembangkit listrik tenaga gas dan uap masih membutuhkan bahan bakar fosil yang dapat menyebabkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara, sehingga perlu dikembangkan teknologi yang lebih ramah lingkungan untuk mengurangi dampaknya pada lingkungan.

5.2 Prinsip Kerja PLTGU

Prinsip kerja turbin gas uap pada dasarnya melibatkan beberapa komponen, seperti kompresor, pembakar, turbin, dan generator. Berikut adalah penjelasan prinsip kerja turbin gas uap:

Kompresor Kompresor berfungsi untuk memampatkan udara dan memasukkannya ke dalam ruang pembakaran. Udara yang masuk ke dalam kompresor akan dipadatkan dan dinaikkan suhunya, sehingga mempersiapkan udara untuk dicampur dengan bahan bakar di ruang pembakaran.

Pembakar Di dalam ruang pembakaran, udara yang sudah terkompresi dicampur dengan bahan bakar, seperti gas alam atau minyak. Campuran udara-bahan bakar kemudian dibakar, menghasilkan panas yang sangat tinggi. Panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan air dalam boiler dan menghasilkan uap.

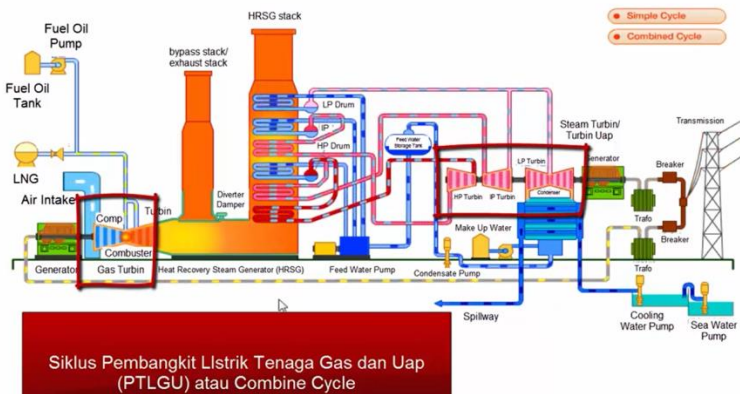
Turbin Uap yang dihasilkan dari boiler kemudian mengalir melalui pipa dan masuk ke turbin. Turbin berfungsi untuk mengubah energi kinetik uap menjadi energi kinetik mekanik yang dapat digunakan untuk memutar poros turbin. Ketika uap mengalir melalui turbin, ia menyebabkan sudu-sudu turbin berputar dengan kecepatan tinggi.

Generator Poros turbin terhubung ke generator melalui kopling. Ketika turbin berputar, poros juga akan berputar, dan ini akan memutar generator. Generator akan menghasilkan listrik yang dapat digunakan untuk memasok kebutuhan listrik rumah tangga, industri, atau untuk keperluan lainnya.

Secara sederhana, prinsip kerja turbin gas uap adalah mengubah energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar menjadi energi kinetik mekanik melalui perputaran turbin, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

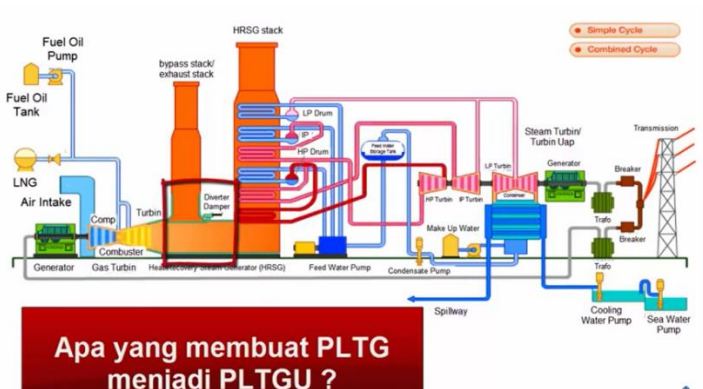
5.2.1. Siklus PLTGU (Combine Cycle)

Berikut adalah siklus pembangkit listrik tenaga gas dan uap atau biasa disebut dengan PLTU (Gb. 5.1)



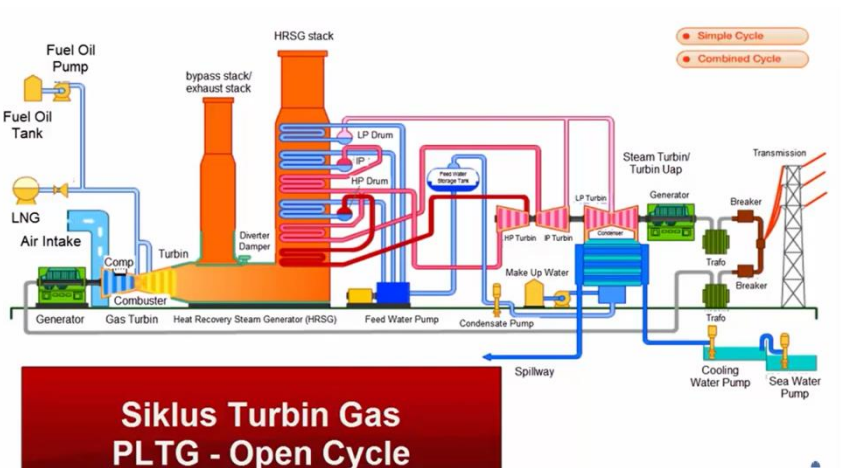
Gambar 5.1. Diagram Siklus PLTGU (Combine Cycle)

Jika hanya turbin gas tanpa ada turbin uap maka disebut dengan pembangkit listrik tenaga gas atau PLTG atau *Open cycle* atau *simple cycle* kalau gas buang PLTG dimanfaatkan lagi untuk membuat uap. Kemudian untuk memutar turbin uap maka disebut dengan combine cycle atau PLTU. Apa yang membuat PLTG menjadi PLTU kuncinya ada di diverter damper (Gb. 5.2).



Gambar 5.2. Siklus awal PLTG pada Divertor Damper

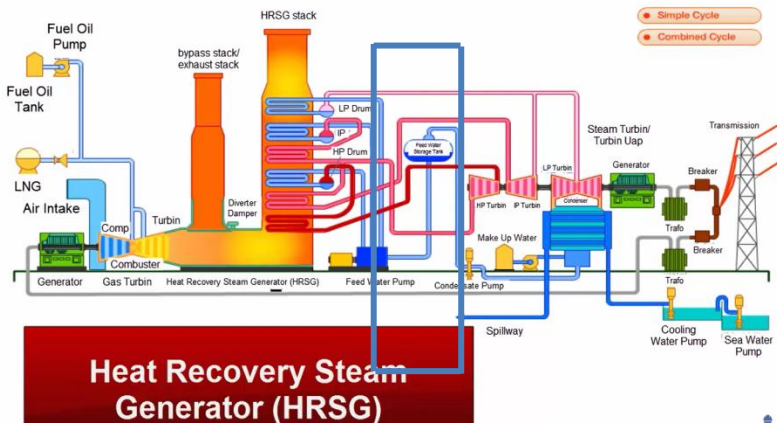
Bagian ini yang akan mengatur gas buang PLTG apakah akan langsung dibuang atau akan dimanfaatkan kembali. Pada proses PLTG bahan bakar PLTG bisa menggunakan minyak diesel atau SD namun bisa juga menggunakan gas LNG, untuk proses pembakaran diperlukan udara, udara berasal dari bagian air intake kemudian dinaikkan tekanannya dengan kompresor sehingga menjadi udara tekanan tinggi dan campuran udara dan bahan bakar tadi dibakar di dalam komposter sehingga akan memutar turbin gas (Gb 5.3) Putaran turbin gas ini yang akan memutar generator sehingga generator akan menghasilkan listrik



Gambar 5.3. Siklus awal PLTG Open Cylce

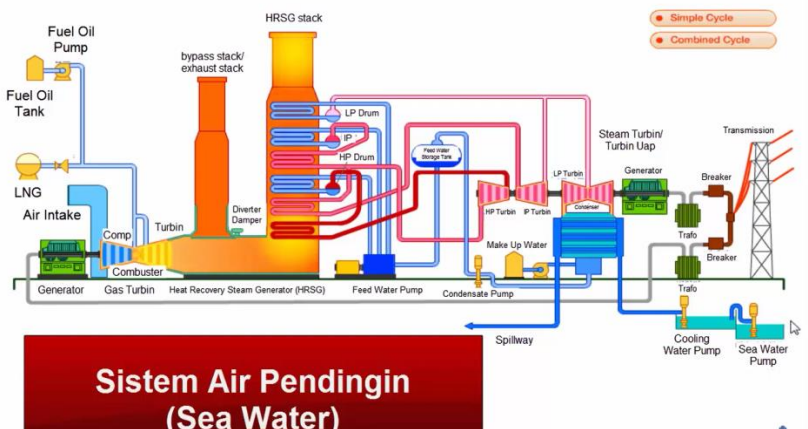
Kembali lagi ke turbin gas buang setelah keluar dari turbin akan dibuang langsung ke udara melalui bypass stack/exhaust stack, maka pada tahap inilah disebut dengan siklus PLTG atau Open cycle.

Sedangkan pada proses PLTG atau commbine cycle, gas buang yang tadi sebetulnya masih sangat panas suhunya bisa sekitar 600 hingga 700° Celcius setelah Diverter damper menutup balik bypass stack maka gas buang akan dialirkan menuju hrsg atau heat recovery steam generator (Gb 5.4).



Gambar 5.4. Siklus pada HRSG

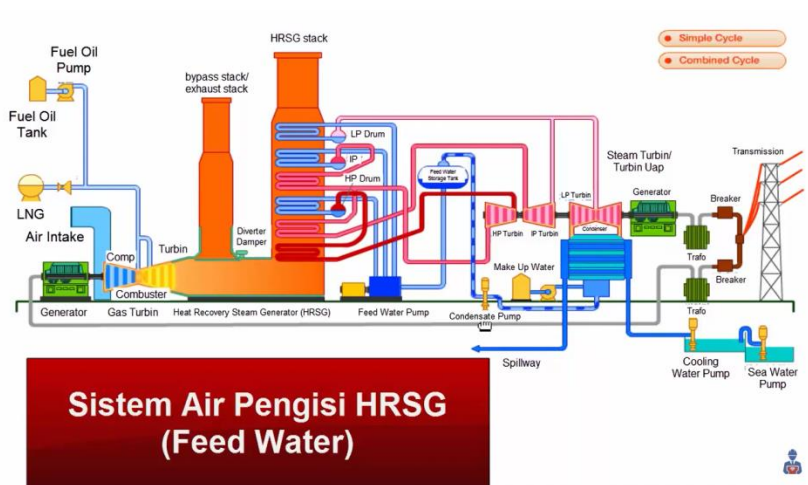
Heat Recovery Steam Generator merupakan tempat disusunnya pipa-pipa air untuk dirubah menjadi uap namun sebelum hrsg dioperasikan maka perlu dipersiapkan air pengisinya terlebih dahulu, untuk mempersiapkan air pengisi maka perlu diaktifkan sistem air pendingin (Gb. 5.5)



Gambar 5.5. Siklus pada Sistem Air Pendingin (*Sea Water*)

Penggunaan air pendingin ini dapat menggunakan air laut, ini Seabnya kenapa pembangkit-pembangkit PLTG banyak berlokasi di dekat laut, air laut akan melalui pompa sea water

pump selanjutnya air laut itu ada yang dialirkan ke desalination plant, air laut tadi menjadi air tawar dan ditampung didalam makeup water tank ada juga yang dialirkan melalui cooling water pump menuju kondensor didalam kondensor air laut itu akan mendinginkan uap sehingga menjadi air atau proses kondensasi selanjutnya setelah digunakan untuk pendingin air laut tadi akan dibuang kembali ke laut melalui spillway, setelah sistem pendingin diaktifkan selanjutnya diaktifkan air pengisi atau fit water (Gb. 5.6)

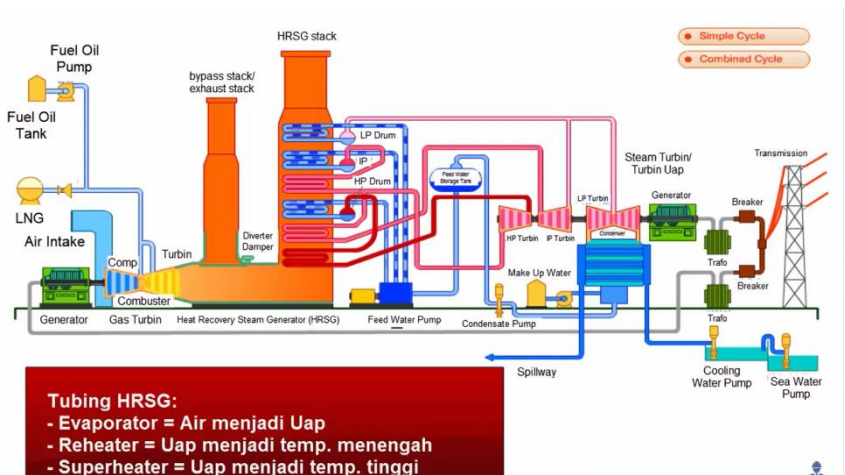


Gambar 5.6. Sistem Air Pengisis pada HRSG (*Feed Water*)

Adapun bagaimana prosesnya pengisian hrsg adalah, pertama air dari *makeup water tank* akan dialirkan melalui *makeup water pump* untuk mengisi pipa, air ini digabungkan dengan air dari hasil kondensasi tadi kemudian air dipompa oleh kondensat pump menuju *feed water storage tank* kemudian air dari *stored tank* ini akan dipompa oleh feed water pump menuju beberapa tingkatan hrsg.

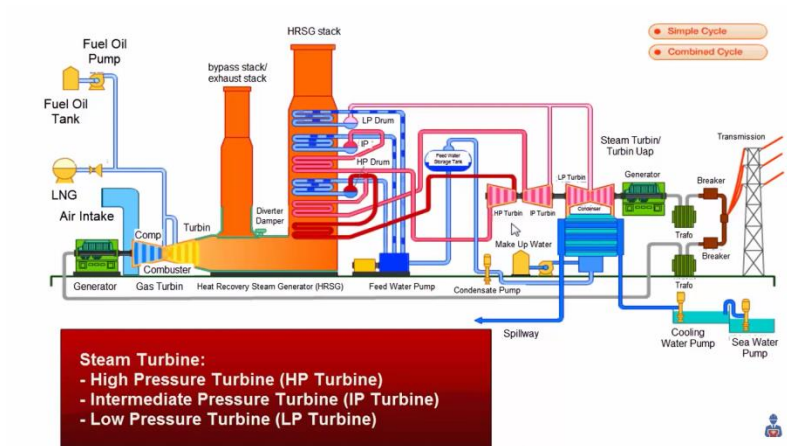
Pada pipa hrsg dengan pipa di luar hrsg berbeda materialnya, pipa di dalam hrsg digunakan untuk mengalirkan air atau uap serta menyerap panas sehingga pipa ini biasa

disebut dengan tubing bukan pipa. Bahannya juga dari material yang tahan panas dan tahan korosi. Kenapa banyak tubing di dalam hrsg, adapun fungsi dari hrsg adalah menyerap panas gas buang semakin banyak tubing di dalam hrsg akan semakin optimal penyerapan panasnya dan semakin dekat posisi tubing dengan gas buang maka akan semakin panas uap yang dihasilkan. Beberapa jenis yaitu, Tubing berwarna biru menandakan isinya adalah air sedangkan warna merah muda berisi uap air menengah dan warna merah tua berisi uap superheater yaitu uap yang paling panas dan tekanannya paling tinggi. (Gb. 5.7).



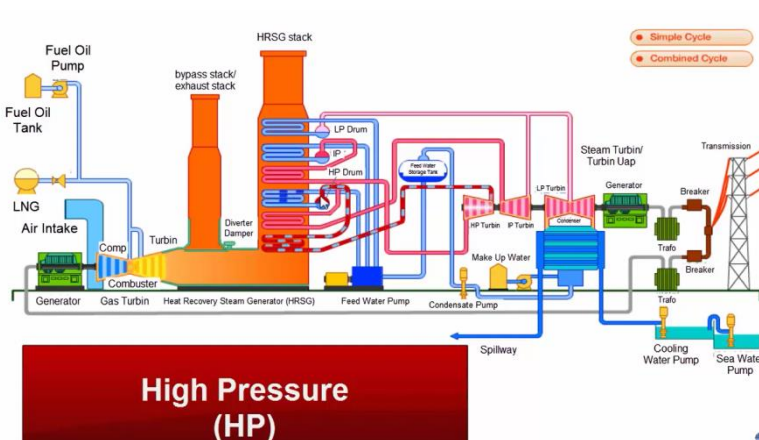
Gambar 5.7. Sistem Tubing pada HRSG

Selanjutnya proses air setelah dari feed water pump di sini ada tiga tingkat tekanan pada turbin yaitu tekanan tinggi atau hipertensi tekanan menengah atau intermediate pressure dan terakhir adalah tingkat rendah atau low pressure (Gb. 5.8)



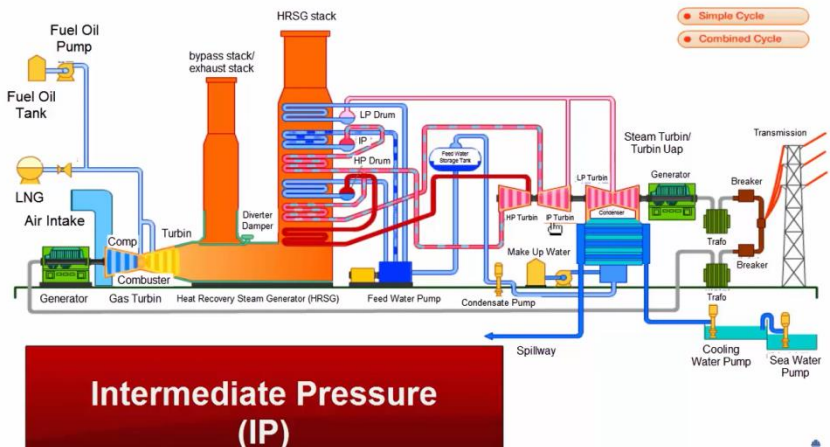
Gambar 5.8. Sistem 3 Jenis Turbin

Bagaimana proses untuk Highpressure, untuk high pressure atau tekanan tinggi air akan dialirkan ke hrsg kemudian akan dipisahkan antara air dan uap di dalam HP steam drum, uap yang dihasilkan akan dialirkan menuju tubing primer risper header sehingga uap akan memiliki tekanan dan suhu yang tinggi uap superheater itu akan digunakan untuk memutar turbin uap tekanan tinggi atau HP turbin (Gb 5.9)



Gambar 5.9. Sistem *High Pressure* (pada HRSG)

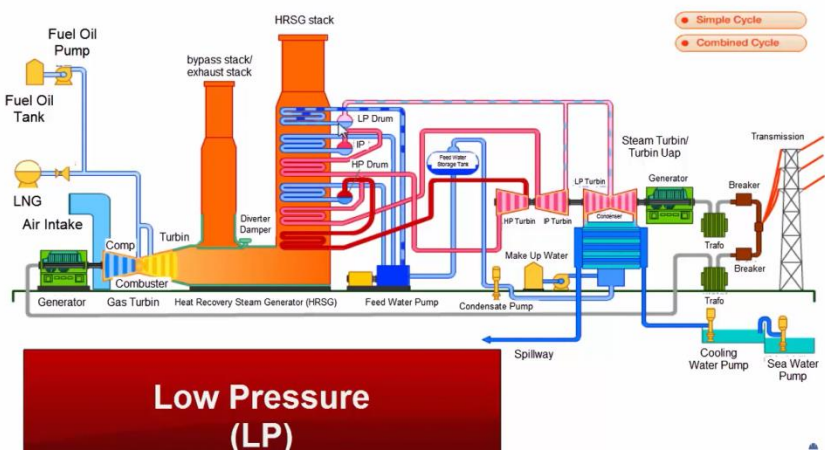
Sedangkan pada proses intermediate pressure atau tekanan menengah, untuk intermediate pressure atau tekanan menengah air dari feed water pump akan dialirkan ke hrsg kemudian akan dipisahkan antara air dan uap dalam IP steam drum, uap yang dihasilkan akan dialirkan melalui Tubing Heater Kemudian uap dari heater ini digabungkan dengan uap keluaran dari HP turbin kemudian dipanaskan kembali dalam Tubing sekunder superheater sehingga uap yang memiliki tekanan atau suhu yang menengah akan digunakan untuk memutar turbin uap tekanan menengah atau IP turbin (Gb. 5.10.)



Gambar 5.10. Sistem *Intermediate Pressure* pada HRSG

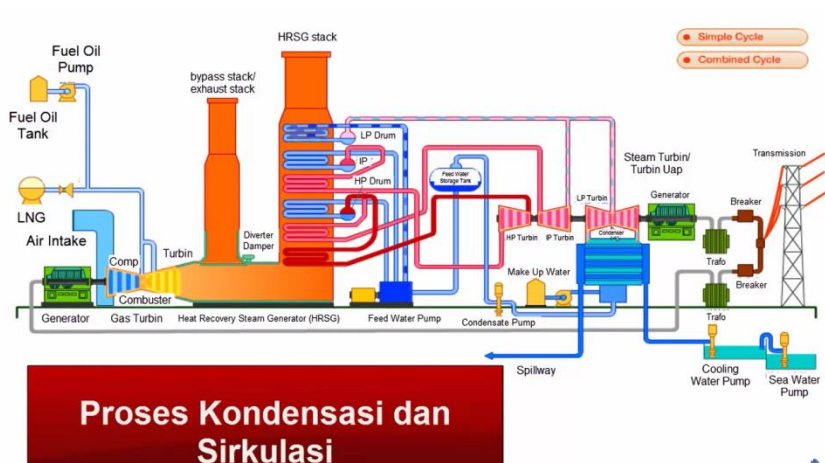
Selanjutnya pada proses untuk lowpressure atau tekanan rendah, untuk lowpressure atau tekanan rendah air dari feed water pump akan dialirkan ke hrsg dalam tubing evaporator kemudian akan dipisahkan antara air dan uap dalam LP steam drum, uap yang dihasilkan akan digabungkan dengan uap keluaran dari IP turbin, Kemudian uap ini akan digunakan untuk memutar turbin uap tekanan rendah atau LP turbin rotor. Adapun LP turbin bentuknya dibuat simetris agar tekanan uap yang masuk ke turbin memiliki gaya dorong ke arah aksial

sehingga untuk mengimbangi gaya tersebut maka turbin dibuat simetris dengan arah yang berlawanan (Gb 5.11).



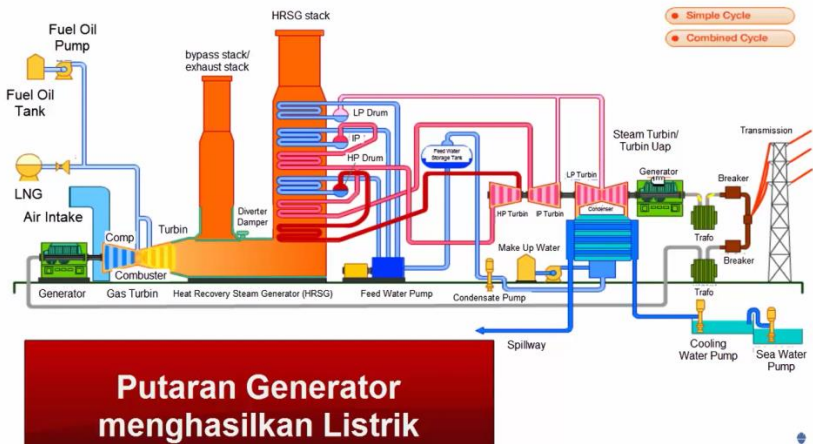
Gambar 5.11. Sistem *Low Pressure* pada HRSG

Proses selanjutnya uap keluaran LP turbin ini akan didinginkan menggunakan air laut di dalam kondensor sehingga uap akan menjadi air kembali dan akan disirkulasikan kembali menjadi Fit water. (Gb 5.12).



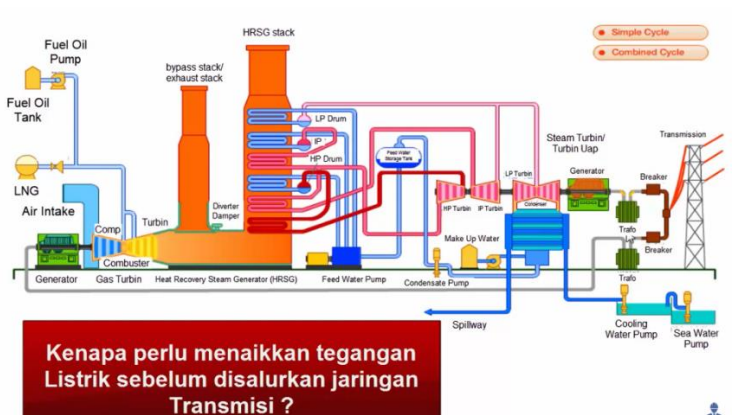
Gambar 5.12. Sistem Proses Kondensasi dan Sirkulasi

Kembali ke turbin HP turbin IP turbin dan LP turbin akan memutar generator sehingga generator akan menghasilkan listrik. (Gb 5.13)



Gambar 5.12. Proses Generator Menghasilkan Listrik

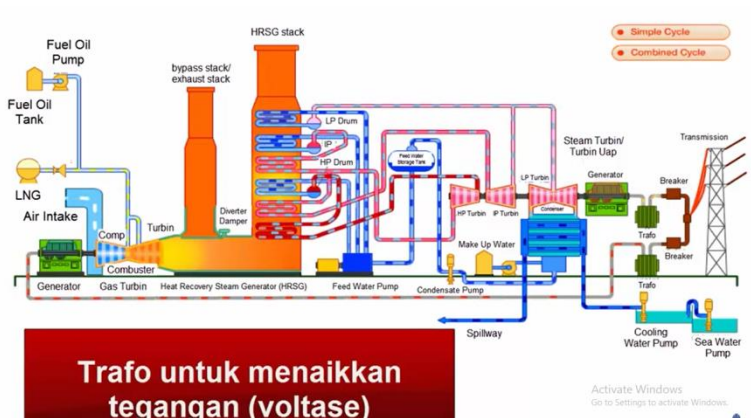
Listrik dari generator turbin uap ini dan generator turbin gas tadi akan ditingkatkan tegangan voltasenya melalui trafo Gardu Induk (Gb. 5.13)



Gambar 5.13. Trafo Gardu Induk

5.2.2. Hasil Pembangkitan PLTG

Energi listrik yang dihasilkan pembangkit ini sangat besar energi listrik tersebut harus dialirkan melalui jaringan transmisi yang sangat panjang sebelum didistribusikan ke daerah-daerah karena jaringan listrik tersebut sangat panjang sehingga hambatannya juga akan sangat besar apabila arus listrik yang dialiri cukup besar. Maka akan banyak energi yang akan terbuang menjadi energi panas sehingga arus listrik dibuat sekecil mungkin. cara menurunkan arus listrik yaitu dengan cara menaikkan voltase atau tegangannya (Gb. 5.14).



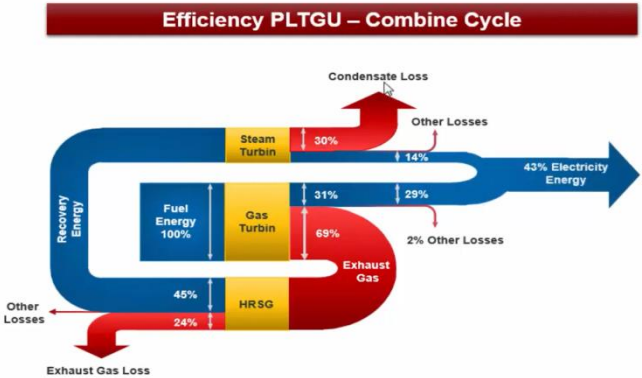
Gambar 5.14. Proses Pada Trafo

Selanjutnya listrik tegangan tinggi ini akan disalurkan atau disinkronisasi dengan jaringan listrik transmisi.

5.2.3. Perbandingan Efisiensi PLTG dan PLTU

Berikut adalah ilustrasi perbandingan efisiensi antara PLTG dan PLTU pada saat pengoperasian PLTG ataupun cycle maka energi dari bahan bakar yang akan dimanfaatkan adalah 31 persen sisanya sebesar 69 Persen Energi akan terbuang bersama exhaust gas atau gas buang dan karena adanya energi yang berubah menjadi energi panas pada generator atau peralatan lainnya. maka hanya 29 persen yang menjadi energi

listrik apabila gas buang atau exhaust gas digunakan kembali untuk memanaskan air di hrsg maka dari 69 persen energi hanya 45 persen energi panas yang dapat dimanfaatkan, selebihnya akan terbuang menjadi gas buang sebesar 24 persen. Namun apabila 45 persen energi ini dimanfaatkan untuk memutar turbin uap, maka hanya 14 persen yang dapat dirubah menjadi energi listrik Sisanya adalah berupa energi panas yang terbuang di kondensor. Apabila tadi efisiensi PLTG adalah sebesar 29 persen maka efisiensi PLTG merupakan gabungan efisiensi turbin gas dan turbin uap yaitu 43 persen. Maka dari ilustrasi diatas dapat diasumsikan bahwa PLTU memiliki efisiensi lebih besar daripada PLTG sehingga daya listrik yang dihasilkan juga akan besar (Gb. 5.15)



Gambar 5.15. Ilustrasi Perbandingan Efisiensi PLTGU-Combine Cycle

DAFTAR PUSTAKA

- Dr. phil. Nurhening Yuniarti, M.T, Ilham Wisnu Aji, Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Negeri Yogyakarta (2019), Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik, Kosasih, E. A., & Suwono, A. (2017). Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Dan Uap Tanjung Priuk. *Mesin*, 12(1), 1-12. Diambil dari <https://journals.itb.ac.id/index.php/jtms/article/view/4812>
- Tengku Khairunnisa, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya (2019), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap(PLTGU) Unit 1 Keramasan. <http://kin.perpusnas.go.id/DisplayData.aspx?pId=57241&pRegionCode=UKPSBY&pClientId=705> <https://www.youtube.com/watch?v=V2sKnzMnUFU&t=125s> <https://www.youtube.com/watch?v=tj6FEr4aWwo> <https://www.youtube.com/watch?v=DEW3D3plaYM> https://www.academia.edu/39643141/1_Prinsip_Kerja_PLTGU_1_PRINSIP_KERJA_PLTGU_1_1_Turbin_Gas_Siklus_Brayton_1_1_2_Sejarah_Turbin_Gas <https://solarindustri.com/blog/apa-itu-pltgu/>

BAB 6

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

6.1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga nuklir, juga dikenal sebagai PLTN, adalah pembangkit listrik tenaga panas yang menggunakan satu atau lebih reaktor nuklir sebagai sumber panas. Prinsip pengoperasian pembangkit listrik tenaga nuklir mirip dengan pembangkit listrik tenaga uap, dimana turbin diputar oleh uap bertekanan tinggi. Putaran turbin ini diubah menjadi energi listrik. Perbedaannya adalah sumber panas yang digunakan untuk menghasilkan panas. Pembangkit listrik tenaga nuklir menggunakan uranium sebagai sumber panas. Reaksi fisi inti uranium menghasilkan sejumlah besar energi panas. (*Badan Tenaga Nuklir Nasional - Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*, no date)



Gambar diambil dari <http://www.batan.go.id/>

Tenaga nuklir telah diusulkan sebagai sumber energi bersih dibandingkan dengan pembangkit listrik yang menghasilkan karbon dioksida. Namun, energi nuklir belum tentu merupakan sumber energi terbersih, karena pembangkit listrik tenaga nuklir juga menghasilkan sejumlah kecil gas rumah kaca dari kegiatan yang terkait dengan pembangunan dan penggunaan fasilitas tersebut. (Iqbal *et al.*, 2020)

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) juga dipandang sebagai alternatif yang layak untuk meningkatkan produksi listrik dengan cara yang lebih bersih dalam hal emisi karbon. Tenaga nuklir, bersama dengan teknologi energi rendah karbon lainnya, bertujuan untuk menciptakan titik kritis lingkungan yang lebih lembut dan lebih mudah diakses. Kurva Kuznets mengarah pada keberlanjutan (Sugiawan and Managi, 2019)

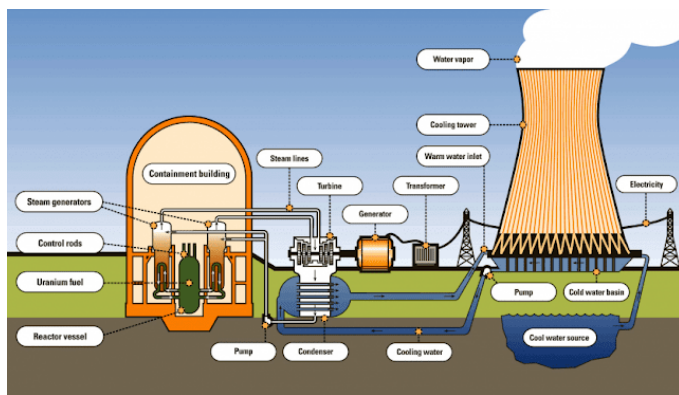
Daya PLTN bervariasi antara 40 MWe hingga 2000 MWe, dan distribusi daya PLTN yang dibangun pada tahun 2005 sebesar 600 hingga 1200 MWe. Pada 2015, terdapat 437 pembangkit listrik tenaga nuklir yang beroperasi di seluruh dunia, yang bersama-sama menghasilkan sekitar 1/6 listrik dunia. Sejauh ini, sekitar 66 PLTN sedang dibangun di berbagai negara, antara lain China 28 unit, Rusia 11 unit, India 7 unit, Uni Emirat Arab 4 unit, Korea Selatan 4 unit, serta Pakistan dan Taiwan masing-masing memiliki 2 unit.



Pembangunan PLTN baru di Uni Emirat Arab

Pembangkit listrik tenaga nuklir diklasifikasikan menurut jenis reaktor yang digunakan. Namun, di banyak pembangkit listrik dengan beberapa blok reaktor terpisah, dimungkinkan untuk menggunakan jenis reaktor berbahan bakar seperti uranium dan plutonium. (*Badan Tenaga Nuklir Nasional - Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*, no date)

6.2 Komponen PLTN



Gambar cara kerja pembangkit tenaga nuklir(*Cara Kerja PLTN atau Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*, no date)

6.2.1 Uranium dan Plutonium

Pembangkit listrik tenaga nuklir atau PLTN biasanya menggunakan dua unsur radioaktif yaitu uranium dan plutonium yang masing-masing memiliki isotop yang berbeda. Dari U-232, U-234, U-235 dan U-238 untuk uranium hingga Pu-238, Pu-239 dan Pu-240 untuk plutonium. Unsur peledak yang digunakan dalam ledakan termonuklir adalah deuterium (D), yaitu hidrogen berat atau dikenal juga dengan "air berat". Untuk setiap 5.000 atom hidrogen, dapat dipastikan terdapat satu isotop dalam bentuk deuterium. Inti deuterium (deuteron) terdiri dari proton (p) dan neutron (n). berpasangan, dua deuteron membentuk inti helium (He-4) yang relatif stabil.

Dalam semua reaksi jenis ini, inti atom berat dibentuk oleh proses fusi. (Susdarwono, 2021)

6.2.2 PLTN yang ada di dunia saat ini

Di dunia ini ada sekitar 454 Reaktor tenaga nuklir yang memasok lebih dari 10% listrik dunia, beroperasi pada faktor kapasitas tinggi 81% (rata-rata dunia 2017). 31 negara mengoperasikan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan 70% listrik nuklir dunia dihasilkan di lima negara – AS, Prancis, Cina, Rusia, dan Korea Selatan. Saat ini, usia rata-rata reaktor daya operasional mencapai 30 tahun dengan lebih dari 60% dari semua PLTN telah beroperasi selama lebih dari 31 tahun. Armada nuklir global didominasi oleh Reaktor Air Bertekanan (PWR) dengan 301 unit yang terdiri dari 66% dari seluruh PLTN yang beroperasi diikuti oleh Reaktor Air Mendidih (BWR) sebesar 16% dengan 72 unit, Reaktor Air Berat Bertekanan sebesar 11% dengan 49 unit, Reaktor Berpendingin Air (RBMK) dengan moderasi Grafit sebesar 3% dengan 15 unit di Rusia, Reaktor Berpendingin Gas (GCR) sebesar 3% dengan 14 unit di Inggris dan dua Reaktor Neutron cepat Sodium (SFR) sebesar 1% beroperasi di Rusia. Saat ini, 54 reaktor daya sedang dibangun, sebagian besar terkonsentrasi di Asia (gambar 1) dan sepertiga dari semua reaktor yang sedang dibangun berada di China. Pembangunan PLTN juga sedang berlangsung di Barat, tetapi dalam jumlah yang lebih sederhana karena industri menghidupkan kembali rantai pasokan nuklirnya yang terbengkalai akibat lambatnya pembangunan selama 20 tahun terakhir. (Ho *et al.*, 2019)

6.3.Keamanan PLTN

Sistem Kontrol adalah lapisan keselamatan pertama di Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, yang kegagalannya melibatkan Sistem Keselamatan. Kegagalan sistem keselamatan

dapat menyebabkan paparan radiasi kepada masyarakat. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan stabilitas sistem tersebut.(Gupta, Singh and Singh, 2020)

Kompleksitas sistem kritis keselamatan PLTN terus meningkat pesat karena peralihannya dari sistem analog ke sistem digital. Oleh karena itu, semakin penting untuk memodelkan sistem ini sebelum penerapannya untuk memenuhi persyaratan kinerja, keselamatan, dan keandalan yang tinggi..(Kumar, Singh and Kumar, 2020)

Reaktor tenaga nuklir memasok lebih dari 10% listrik dunia, beroperasi pada faktor kapasitas tinggi 81% (rata-rata dunia 2017). 31 negara mengoperasikan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan 70% listrik nuklir dunia dihasilkan di lima negara – AS, Prancis, Cina, Rusia, dan Korea Selatan. Saat ini, usia rata-rata reaktor daya operasional mencapai 30 tahun dengan lebih dari 60% dari semua PLTN telah beroperasi selama lebih dari 31 tahun [1]. Armada nuklir global didominasi oleh Reaktor Air Bertekanan (PWR) dengan 301 unit yang terdiri dari 66% dari seluruh PLTN yang beroperasi [2], diikuti oleh Reaktor Air Mendidih (BWR) sebesar 16% dengan 72 unit, Reaktor Air Berat Bertekanan sebesar 11% dengan 49 unit, pekerja komisioning grafit di pembangkit listrik tenaga nuklir telah lama diabaikan dalam penelitian sebelumnya, meskipun kinerja mereka terkait erat dengan keselamatan keseluruhan pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan dan memprediksi tiga jenis perilaku, yaitu kesalahan, pelanggaran, dan partisipasi keselamatan, pekerja komisioning, di bawah kerangka umum teori perilaku terencana (TPB) dan dengan mempertimbangkan faktor organisasi dan perencanaan. Validitas model dievaluasi dengan sampel 167 pekerja komisioning yang menyelesaikan kuesioner yang dilaporkan sendiri. Hasilnya menunjukkan bahwa kontrol perilaku yang dirasakan, bersama dengan organisasi dan perencanaan, secara

signifikan mempengaruhi semua jenis perilaku. Ditemukan juga bahwa pelanggaran dan kesalahan merupakan akibat langsung dari sikap. Selain itu, kesalahan diprediksi oleh norma subyektif; Tanpa diduga, ini terjadi dengan cara yang positif. Temuan ini mengungkapkan mekanisme yang mendasari terjadinya kesalahan, pelanggaran, dan partisipasi keselamatan di antara pekerja komisioning dan memberikan implikasi praktis untuk peningkatan keselamatan di tempat kerja komisioning. (Zhang *et al.*, 2020)

6.4. PLTN di Indonesia

Rendahnya tingkat penerimaan masyarakat membuat pengerahan proyek PLTN di Indonesia mengalami sejumlah penundaan yang cukup berarti. Oposisi publik terhadap PLTN juga telah menjadi perhatian utama di banyak negara, terutama setelah reaksi nuklir di Fukushima Jepang pada tahun 2011. Pada Studi sebelumnya menunjukkan bahwa setidaknya ada dua alasan utama di balik penolakan kuat terhadap energi nuklir. Pertama, bahwa energi nuklir dianggap sebagai teknologi berisiko tinggi yang biasanya dikaitkan dengan potensi bahaya dari radioaktivitas, kecelakaan yang diakibatkan oleh nuklir, atau bahkan senjata nuklir. Kedua, banyak proses pengambilan keputusan nuklir hanya berfokus pada aspek teknologi dan ekonomi, mengabaikan kepentingan publik akan energi. keterlibatan yang pada akhirnya akan menimbulkan ketidakpercayaan publik.

Implementasi kebijakan energi nuklir di Indonesia lebih menantang karena melibatkan otoritas pengelola multilevel, termasuk pemerintah pusat, otoritas energi nuklir, dan pemerintah daerah. Oleh karena itu, konteks kepercayaan harus diperluas tidak hanya kepada otoritas energi nuklir tetapi juga kepada pemerintah pusat dan daerah yang juga memiliki peran

penting dalam proses pengambilan keputusan., tidak ada studi komprehensif yang menyelidiki dampak berbeda dari kepercayaan pada otoritas ini dalam membentuk penerimaan masyarakat terhadap energi nuklir. (Sugiawan and Managi, 2019)

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Tenaga Nuklir Nasiona- Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir* (no date). Available at: <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924-pengenalan-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir> (Accessed: 18 January 2023).
- Cara Kerja PLTN atau Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir* (no date). Available at: <https://www.cara-kerja.com/2021/01/cara-kerja-pltn-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir.html> (Accessed: 5 February 2023).
- Gupta, B., Singh, P. and Singh, L. (2020) 'Stability and steady state analysis of control and safety systems of Nuclear Power Plants', *Annals of Nuclear Energy*, 147. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107676>.
- Ho, M. *et al.* (2019) 'A review on the development of nuclear power reactors', in *Energy Procedia*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.193>.
- Iqbal, J. *et al.* (2020) 'Assessment of radiation pollution from nuclear power plants', *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*, pp. 1027–1053. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809582-9.00020-7>.
- Kumar, P., Singh, L.K. and Kumar, C. (2020) 'Performance evaluation of safety-critical systems of nuclear power plant systems', *Nuclear Engineering and Technology*, 52(3). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.018>.
- Sugriawan, Y. and Managi, S. (2019) 'Public acceptance of nuclear power plants in Indonesia: Portraying the role of a multilevel governance system', *Energy Strategy Reviews*, 26. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100427>.

- Susdarwono, E.T. (2021) 'Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi dalam Mekanisme Bom Atom dan Senjata Termonuklir', *VEKTOR: Jurnal Pendidikan IPA*, 2(1). Available at: <https://doi.org/10.35719/vektor.v2i1.19>.
- Zhang, T. *et al.* (2020) 'Predicting errors, violations, and safety participation behavior at nuclear power plants', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph17155613>.

BAB 7

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI

7.1 Pendahuluan

Energi panas bumi didefinisikan sebagai panas alami dari dalam bumi, ditangkap untuk produksi tenaga listrik, pemanas ruangan atau uap industri. Energi panas bumi, adalah energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung didalamnya.

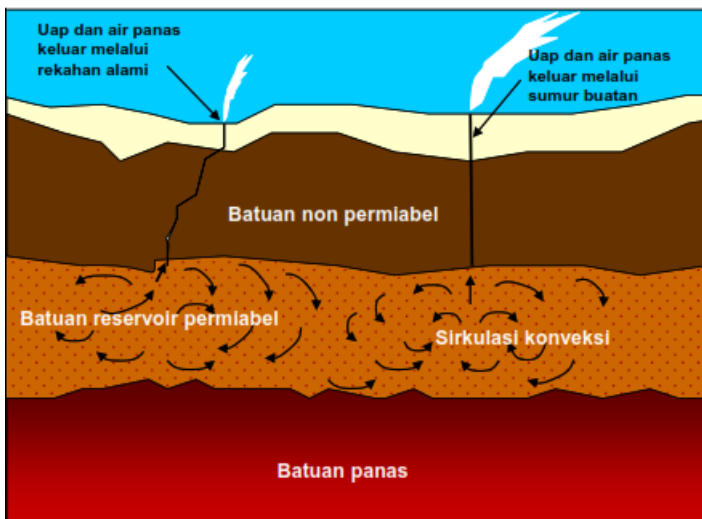
Energi panas bumi, panas alami di dalam bumi, muncul dari panas jaman purba yang tersisa di inti bumi, dari gesekan di mana lempeng benua meluncur di bawah satu sama lain, dan dari peluruhan unsur radioaktif yang terjadi secara alami dalam jumlah kecil di semua batuan. Untuk ribuan tahun, orang mendapat manfaat dari mata air panas dan lubang uap, yang digunakan untuk mandi, memasak, dan pemanasan.

Jumlah energi panas bumi sangat besar. Ilmuwan memperkirakan itu hanya 1 persen dari panas terkandung hanya dalam 10 kilometer paling atas dari kerak bumi setara dengan 500 kali energi yang terkandung dalam semua sumber daya minyak dan gas bumi. Namun, terlepas dari kenyataan bahwa panas ini hadir dalam jumlah yang hampir tidak ada habisnya, namun terdistribusi secara tidak merata, jarang terkonsentrasi dan seringkali pada kedalaman yang terlalu besar untuk dieksploitasi. Energi panas bumi telah diproduksi secara komersial selama 70 tahun untuk kedua pembangkit

listrik. Penggunaannya meningkat pesat selama tiga dekade terakhir dan dari tahun 1975 – 1995 tingkat pertumbuhan pembangkit listrik di seluruh dunia adalah sekitar 9 persen per tahun dan selama pemanfaatan langsung energi panas bumi itu sudah sekitar 6 persen per tahun. (Herzog, Lipman and DM Kammen, 1989)

Dampak lingkungan dari penggunaan panas bumi cukup kecil dan dapat dikendalikan, energi panas bumi menghasilkan emisi udara yang minimal. Emisi nitrous oxide, hidrogen sulfida, sulfur dioksida, amonia, metana, partikulat, dan karbon dioksida sangat rendah, terutama jika dibandingkan dengan emisi bahan bakar fosil.

Gambar 7.1 menunjukkan secara skematis terjadinya sumber air panas, dan uap panas yang biasanya disebut *fomural* atau *geiser*.(S. C. Bhatia, 2018)



Gambar 7.1. Skematis terjadinya sumber air panas
Sumber : (V Nelson, 2011)

7.2 Tinjauan Desain Pembangkit Listrik

Sistem konversi tenaga panas bumi ke tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga sistem dasar, yaitu:

- **Sistem kondensasi uap kering/uap kering;** suhu sumber daya berkisar dari sekitar 320°C hingga sekitar 230°C.
- **Sistem tekanan balik uap berkedip;** suhu sumber daya berkisar dari sekitar 320°C hingga sekitar 200°C.
- **Sistem biner atau twin-fluida**(berdasarkan Kalina atau siklus Rankin Organik); kisaran suhu sumber daya antara 120°C hingga sekitar 190°C.

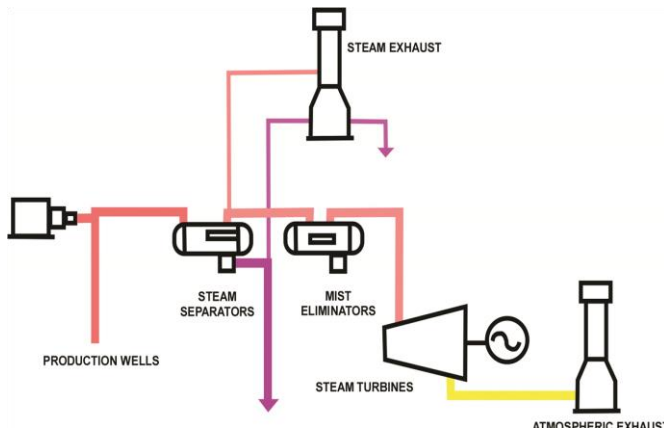
Selain tiga sistem konversi daya dasar di atas, ada yang digunakan, yang disebut sistem hibrid, yang sebenarnya merupakan sistem gabungan yang terdiri dari dua atau lebih tipe dasar di atas secara seri dan/atau paralel.

Turbin panas bumi tipe kondensasi dan tekanan balik pada dasarnya adalah mesin bertekanan rendah yang dirancang untuk beroperasi pada rentang tekanan masuk mulai dari sekitar 20 – 2 bar, dan uap jenuh. Mereka umumnya diproduksi dalam ukuran modul keluaran dengan peringkat daya berikut, yaitu 25 MW, 35 MW, 45 MW, 55 MW dan 105 MW (unit turbin panas bumi terbesar yang diproduksi saat ini adalah 117 MW). Unit suhu rendah/sedang tipe biner, dimana tipe Siklus Kalina atau Siklus Rankin Organik, biasanya diproduksi dalam ukuran modular yang lebih kecil, yaitu berkisar antara 1 MWe dan 10 MWe dalam ukuran. Namun, unit yang lebih besar yang dirancang khusus untuk penggunaan tertentu biasanya tersedia dengan harga yang agak lebih tinggi.(Valdimarsson, 2011)

7.2.1 Sistem tipe tekanan balik

Sistem tipe tekanan balik adalah yang paling sederhana dari yang di atas, paling murah dan memiliki efisiensi termal terendah secara keseluruhan. Saat ini sebagian besar digunakan

dalam aplikasi penggunaan ganda (seperti gabungan produksi listrik dan air panas), untuk menyediakan daya sementara selama pengembangan sumber daya, di industri pertambangan mineral di mana efisiensi energi memiliki prioritas rendah, dan yang paling penting sebagai bagian dari sistem hibrida. Cakupan penerapannya yang berdiri sendiri mencakup seluruh rentang suhu sumber panas bumi yang biasanya berguna, yaitu dari sekitar 320°C hingga sekitar 200°C. (Marci, 2010)

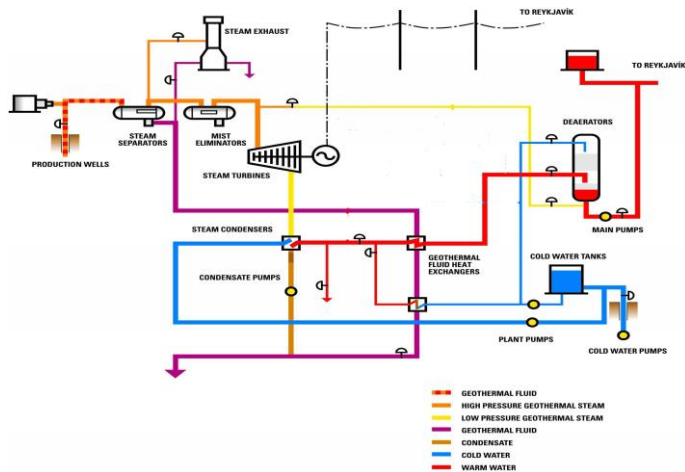


Gambar 7.2. Tipikal sistem konversi tekanan balik
Sumber : (Marci, 2010)

7.2.2 Sistem tipe kondensasi

Sistem tipe kondensasi agak lebih kompleks karena membutuhkan kondensor, dan sistem pembuangan gas. Ini adalah jenis sistem konversi daya yang paling umum digunakan saat ini. Turbin adalah mesin ekspansi dan unit biasanya terdiri dari dua set turbin untuk menghilangkan/meminimalkan dorongan aksial. Untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas termalnya, unit ini juga tersedia dalam konfigurasi tekanan kembar (katakanlah 7 bar/2 bar), di mana uap tekanan rendah (katakanlah 2 bar) diinduksi ke hilir dari tahap ekspansi ketiga. Ketika turbin kondensasi ini digunakan dalam skema

kogenerasi, mereka dapat dilengkapi dengan titik ekstraksi untuk menyediakan uap bertekanan rendah ke sisi pemanas distrik. Keunggulan dari sistem kondensasi adalah layanan yang panjang dan andal dengan efisiensi termal yang masuk akal, dan kemampuan mengikuti beban yang baik. Cakupan aplikasi mereka yang berdiri sendiri mencakup kisaran suhu sumber daya panas bumi tinggi hingga sedang (200–320°C). (Marci, 2010)

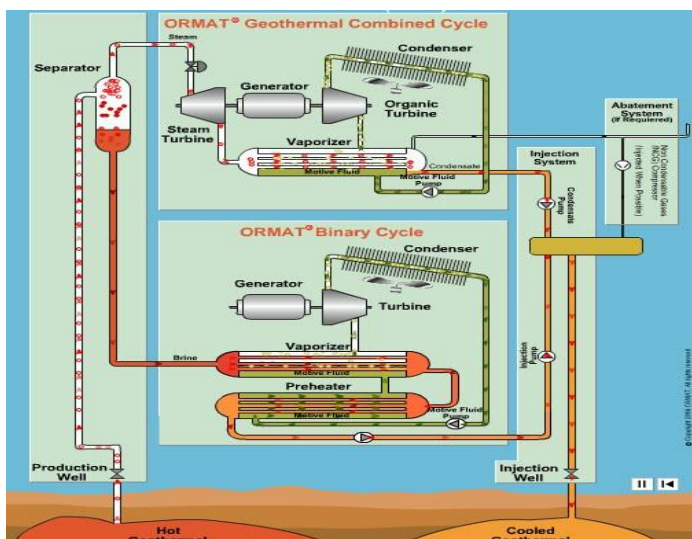


Gambar 7.3. Unit turbin/generator tipe kondensasi
Sumber : (Marci, 2010)

7.2.3 Sistem tipe biner

Sistem tipe biner memiliki konsep yang sangat berbeda. Energi termal fluida panas bumi dari lapangan sumur produksi dipindahkan ke sistem fluida sekunder melalui penukar panas. Fluida panas bumi dengan demikian diisolasi dari fluida sekunder, yang terdiri dari karbohidrat bertitik didih rendah (butana, propana, dll.) atau fluida bertitik didih rendah yang dirancang khusus, yang memenuhi kendala polusi lapisan ozon rendah, dalam kasus Siklus Rankin Organik. . Dalam kasus Siklus Kalina, cairan sekunder atau motif terdiri dari larutan air amonia. Fluida sekunder yang dipanaskan ini kemudian menjadi

fluida penggerak yang menggerakkan unit turbin/generator. Ciri khas dari sistem biner adalah kemampuannya untuk mengubah energi panas bumi bersuhu rendah ($120\text{--}190^{\circ}\text{C}$) menjadi tenaga listrik meskipun dengan efisiensi termal keseluruhan yang relatif rendah, dan untuk mengisolasi masalah penskalaan, gas, dan erosi pada titik awal siklus konversi daya di penukar panas. Sistem biner cukup kompleks dan pemeliharaannya intensif. (Marci, 2010)

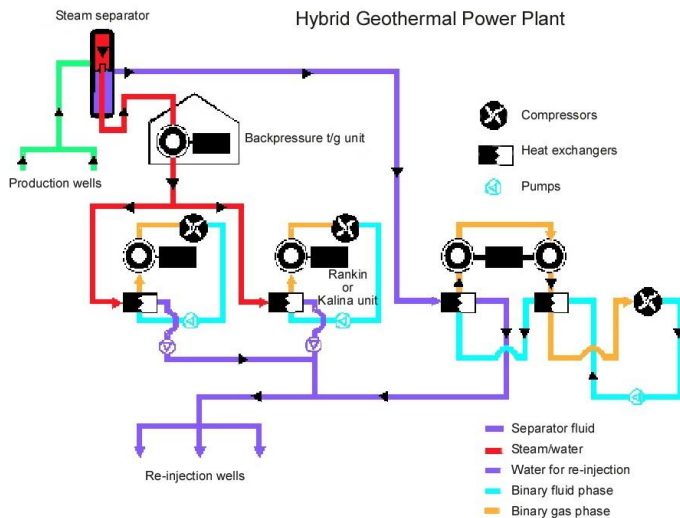


Gambar 7.4. Siklus Rankin Organik tipe Ormat
Sumber : Ormat Technologies Inc.

7.2.3 Sistem konversi hibrid

Sistem konversi hibrid adalah sistem gabungan, seperti yang dikatakan sebelumnya, yang mencakup dua atau lebih tipe dasar secara seri dan/atau paralel. Ciri khas mereka adalah keserbagunaan, peningkatan efisiensi termal secara keseluruhan, peningkatan kemampuan mengikuti beban, dan kemampuan untuk secara efisien menutupi rentang suhu

sumber daya medial (200–260°C) (Tester, 2007). Untuk mengilustrasikan konsep konfigurasi hibrid yang mencakup unit turbin/generator uap bertekanan balik dan tiga unit biner secara seri digambarkan dalam Gambar 7.4. Dua unit biner memanfaatkan uap buangan dari unit tekanan balik, dan t/g biner yang tersisa unit memanfaatkan kandungan energi dari cairan pemisah. Aliran efluen fluida kemudian digabungkan untuk diinjeksi kembali ke reservoir panas bumi, sehingga menjaga keberlanjutan sumber daya dengan cara yang paling elegan. (Kaltschmitt and Streicher, 2007)



Gambar 7.5. Sistem konversi hibrida
Sumber : (Marci, 2010)

7.3 Peralatan rumah pembangkit

7.3.1 Turbin

Masalah yang berpotensi terkait dengan turbin adalah penskalaan katup kontrol aliran dan nosel (terutama pada tahap saluran masuk stator); korosi tegangan pada bilah rotor; erosi bilah turbin (rotor dan stator) dan rumah turbin.

Laju dan keseriusan scaling di turbin berhubungan langsung dengan kebersihan steam, yaitu jumlah dan karakteristik separator “carry-over”. Dengan demikian operasi dan efisiensi separator sangat penting untuk operasi turbin bebas masalah. Pengoperasian titik off-design pembangkit listrik yang berkepanjangan juga memainkan peran penting.

Sebagian besar penskalaan terjadi di katup kontrol aliran dan baris nosel stator pertama. Efek dari penskalaan ini adalah:

- Penurunan kapasitas pembangkitan yang signifikan karena uap yang cukup tidak dapat masuk ke turbin, dan;
- Respon lamban untuk memuat variasi permintaan.

Situasi ini mudah dipantau, karena penumpukan kerak menyebabkan tekanan di peti uap antara katup kontrol dan nosel saluran masuk meningkat seiring waktu.

Penskalaan turbin dan katup kontrol yang signifikan dihindari dengan penerapan praktik pengoperasian instalasi flasher/separator yang hati-hati yang meminimalkan “carry-over”, dan terlebih lagi memilih penghilang kabut efisiensi tinggi oleh pembangkit listrik.

Penskalaan yang signifikan pada turbin dan katup kontrol memerlukan penghentian perawatan terjadwal untuk pemeriksaan dan pembersihan, setiap tahun kedua atau ketiga.

Cara lain untuk mengurangi frekuensi pembersihan turbin, adalah dengan menginjeksikan kondensat ke dalam uap masuk selama pengoperasian pembangkit dan menjalankan turbin pada kebasahan katakanlah 10% untuk waktu yang singkat. Ini menghilangkan kerak nosel, khususnya komponen kalsitnya, dan secara bersamaan melemahkan struktur kerak silika, yang kemudian cenderung putus. Teknik pembersihan ini jika diterapkan dengan benar telah terbukti mengurangi frekuensi perbaikan besar turbin. ((S. C. Bhatia, 2018)

7.3.2 Kondensor

Campuran uap-air yang dipancarkan dari turbin pada outlet mengandung sejumlah besar gas yang tidak dapat terkondensasi terutama terdiri dari CO₂ (yang biasanya 95-98% dari total kandungan gas), CH₄ dan H₂S, dan dengan demikian sangat asam. Karena sebagian besar sumber daya panas bumi bersuhu tinggi terletak di daerah kering atau semi-kering yang jauh dari sumber air tawar (sungai, danau) yang signifikan, pilihan pendinginan kondensor sebagian besar terbatas pada menara pendingin atmosfer atau ventilasi paksa. Penerapan pendinginan evaporatif dari kondensat menghasilkan kondensat yang mengandung oksigen terlarut selain gas yang tidak dapat terkondensasi, yang membuat cairan kondensor menjadi sangat korosif dan mengharuskan kondensor dilapisi di bagian dalam dengan baja tahan karat; pompa kondensat harus terbuat dari stainless steel, dan semua saluran pipa kondensat baik dari baja tahan karat atau plastik yang diperkuat kaca. Penambahan soda kaustik diperlukan untuk mengatur pH di sirkuit menara pendingin. Make-up water dan blow-down juga digunakan untuk menghindari penumpukan garam di dalam air akibat penguapan.

Masalah yang terkadang dihadapi di dalam kondensor adalah pengendapan belerang yang hampir murni pada dinding dan nozel di dalam kondensor. Endapan kerak ini harus dibersihkan secara berkala dengan penyemprotan air bertekanan tinggi dll.(S Uygur, 2018)

7.3.3 Kontrol otomatis dan sistem komunikasi

Pembangkit listrik modern dilengkapi dengan peralatan kontrol otomatis yang kompleks, komputer, dan berbagai bentuk perangkat keras komunikasi. Ini semua memiliki komponen senyawa perak dan tembaga yang sangat sensitif terhadap korosi H₂S. Oleh karena itu, mereka ditempatkan di dalam "kandang bersih", yaitu selungkup kedap udara yang disuplai dengan udara atmosfer di bawah tekanan yang lebih

tinggi daripada atmosfer ambien dan secara khusus dibersihkan dari H₂S. Pintu masuk dan keluar dari selungkup ini melalui ruang depan yang dihembuskan udara bersih untuk mencegah masuknya H₂S melalui yang memasuki selungkup. Desain yang lebih baru adalah membersihkan semua udara di semua ruang kontrol dengan penyaringan khusus dan mempertahankan tekanan berlebih.

Sebagian besar kabel pembawa arus dan batang bus terbuat dari aluminium untuk mencegah korosi H₂S. Di mana kabel tembaga digunakan, lapisan timah panas diterapkan di lapangan diterapkan ke semua ujung yang terbuka. (V Nelson, 2011)

7.3.4 Sistem menara pendingin

Sebagian besar sumber daya panas bumi bersuhu tinggi terletak di daerah kering atau semi-kering yang jauh dari sumber air tawar (sungai, danau) yang signifikan. Ini sebagian besar membatasi pilihan pendinginan kondensor ke menara pendingin atmosfer atau ventilasi paksa. Pendinginan air tawar dari sungai, bagaimanapun, digunakan misalnya di Selandia Baru dan pendinginan air laut dari sumur di Reykjanes, Islandia.

Di pembangkit listrik yang lebih tua, versi atmosferik dan/atau versi barometrik, versi parabola besar dari beton, paling sering dipilih. Paling sering dipilih untuk pembangkit listrik modern adalah jenis ventilasi paksa karena masalah lingkungan dan kerentanan lokal terhadap gempa bumi.

Menara pendingin ventilasi paksa modern biasanya terbuat dari konstruksi kayu/plastik yang terdiri dari beberapa sel pendingin paralel yang didirikan di atas kolam kondensat beton berlapis. Kipas ventilasi biasanya vertikal, jenis aliran reversibel dan air pendingin dipompa ke platform di bagian atas menara yang dilengkapi dengan sejumlah besar nosel, di mana

kondensat panas menetes berlawanan dengan aliran udara ke dan melalui bahan pengisi di menara dan kemudian ke dalam kolam kondensat, dimana kondensat yang didinginkan disedot oleh vakum kondensor kembali ke kondensor. Untuk meminimalkan efek kerak dan korosi, kondensat dinetralkan melalui kontrol pH, terutama melalui penambahan natrium karbonat.

7.3.5 Sistem pemompaan kondensor

Pompa kondensat harus, seperti yang diceritakan sebelumnya, terbuat dari bahan yang sangat tahan korosi, dan memiliki kemampuan kepala hisap yang tinggi. Mereka sebagian besar bebas masalah dalam pengoperasiannya.

Pipa kondensat juga harus terbuat dari bahan yang sangat tahan korosi dan semua sambungan disegel secara efisien untuk meminimalkan masuknya udara atmosfer, mengingat bahwa semua pipa tersebut berada di lingkungan vakum. Kebocoran udara apapun meningkatkan beban pada sistem evakuasi gas dan dengan demikian konsumsi daya tambahan dari pembangkit listrik.(V Nelson, 2011)

7.3.6 Penukar panas

Dalam aplikasi pembangkit listrik suhu tinggi penukar panas umumnya tidak digunakan pada fluida sumur. Penggunaannya umumnya terbatas pada penggunaan tambahan seperti pemanasan, dll. menggunakan uap kering. Di pabrik kogenerasi seperti produksi air panas dan listrik secara bersamaan, penggunaannya bersifat universal. Knalpot dari turbin tekanan balik atau tap-off steam dari turbin proses dialirkan sebagai fluida primer melalui pelat atau penukar panas tipe tabung dan cangkang. Penukar panas tipe pelat sangat disukai di pabrik kogenerasi pada tahun tujuh puluhan hingga

sembilan puluhan karena kekompakan dan efisiensinya yang tinggi.

Di pembangkit listrik biner suhu rendah shell and tube heat exchanger digunakan untuk mentransfer panas dari fluida primer panas bumi ke fluida sekunder (biner). Mereka juga digunakan sebagai kondensor/dan atau regenerator dalam sistem sekunder.(S Uygur, 2018)

7.3.7 Sistem evakuasi gas

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, uap panas bumi mengandung sejumlah besar gas yang tidak dapat terkondensasi (NCG) atau sekitar 0,5% hingga 10% berat uap dalam kasus terburuk. Untuk menyediakan dan mempertahankan kevakuman yang cukup di dalam kondensor, NCG ditambah setiap kebocoran udara atmosfer ke dalam kondensor harus dikosongkan secara paksa. Metode berikut biasanya diadopsi, yaitu:

- Penggunaan steam ejector satu atau dua tahap, ekonomis untuk kandungan NCG kurang dari 1,5% berat steam.
- Penggunaan pompa gas mekanis, seperti pompa vakum cincin cair, yang ekonomis untuk NCG konsentrasi tinggi.
- Penggunaan sistem hybrid menggabungkan metode 1 dan 2 secara seri.

Keuntungan dari sistem ejector adalah pemeliharaan yang rendah, dan keamanan operasional yang tinggi dari sistem tersebut. Kerugiannya adalah konsumsi uap tekanan yang signifikan, yang sebaliknya akan tersedia untuk produksi listrik.

Keuntungan dari pompa vakum adalah tingkat evakuasi yang tinggi. Kerugiannya adalah konsumsi daya tambahan listrik, kepekaan terhadap serpihan partikulat di kondensor, dan persyaratan perawatan yang tinggi. (S Uygur, 2018)

7.3.8 Sistem injeksi ulang

Di sebagian besar wilayah panas bumi, fluida panas bumi dapat dianggap sebagai air asin karena kandungan kloridanya yang tinggi. Mungkin juga mengandung beberapa elemen pelacak yang tidak diinginkan yang menimbulkan bahaya bagi manusia, fauna dan flora.

Dalam mempertimbangkan cara yang paling nyaman untuk membuang limbah cair ini selain ke kolam limbah di permukaan, gagasan untuk menyuntikkan limbah cair kembali ke tanah telah lama menjadi industri tenaga panas bumi (Stefánsson, 1997). Awalnya tujuan injeksi ulang hanya untuk membuang limbah cair dengan cara yang lebih elegan daripada membuangnya ke permukaan, ke danau atau sungai, dan bahkan ke laut. Banyak kelemahan teknis dan ekonomi segera ditemukan. Yang lebih serius adalah penyumbatan sumur injeksi, pipa injeksi dan formasi yang dekat dengan lubang bor; efluen dingin bermigrasi ke zona produksi sehingga mengurangi entalpi output sumur dengan konsekuensi penurunan output pembangkit listrik.

Namun, segera, secara umum dipahami dan diterima bahwa mengembalikan cairan efluen kembali ke reservoir memiliki manfaat tambahan yang lebih besar, yaitu:

- Sangat mengurangi tingkat tekanan reservoir dan penurunan hasil cairan.
- Peningkatan ekstraksi kandungan panas yang terkandung dalam formasi reservoir.
- Mengurangi efek penarikan cairan pada manifestasi permukaan, misalnya kolam panas, lubang uap, dll. (V Nelson, 2011)

DAFTAR PUSTAKA

- Herzog, A., Lipman, T. and DM Kammen (1989) 'Renewable energy sources', *Energy and Resources Group Renewable and Appropriate Energy Laboratory (RAEL)*. doi: 10.1007/978-3-319-77607-1_2.
- Kaltschmitt, M. and Streicher, W. (2007) *Renewable Energy*. Springer.
- Marci, M. (2010) 'Geothermal energy', pp. 21–25.
- V Nelson (2011) *Introduction To Renewable Energy*. CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business.
- S. C. Bhatia, R. K. G. (2018) *Textbook of Renewable Energy*. New Delhi: Woodhead Publishing India PVT LTD.
- S Uygur (2018) *Renewable Energy Systems*. Lecture Notes.
- Valdimarsson, P. (2011) 'Geothermal Power Plants and Main Components', *Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*, p. 24. Available at: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-35.pdf>.

BAB 8

PEMODELAN GENERATOR

8.1 Pendahuluan

Pada 1950-an dan memasuki 1960-an, banyak pembangkit listrik dilengkapi dengan pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulation*) yang bekerja secara kontinu. Banyak pembangkit listrik pada power plant dilengkapi dengan peralatan ini untuk menjaga kualitas tegangan yang stabil. Stabilisator sistem tenaga dikembangkan untuk membantu meredam osilasi daya dapat dilakukan dengan pengaturan sistem eksitasi yang disuplai ke mesin sinkron. Mesin sinkron terhubung pada jaringan untuk menyuplai beban dalam satu kesatuan sistem tenaga listrik. Klasifikasi sistem terdiri dari dua jenis, yaitu Single Machine Infinite Bus (SMIB) dan Multi Machine Infinite Bus (MMIB). SMIB merupakan subsistem tenaga listrik yang memiliki satu atau lebih generator terkoneksi pada bus-bar yang tak terhingga. (Shivinder, 2018), sedangkan MMIB merupakan multi sistem, jaringan interkoneksi yang terhubung dengan jumlah mesin yang besar (Rahmaniar, 2018). Kontinuitas pelayanan energi listrik dapat mengalami gangguan jika pada sistem yang bekerja pada keadaan tidak stabil. Keadaan ini dapat terjadi akibat gangguan yang sifatnya permanen (gangguan tetap) maupun gangguan sementara. Jika terdapat satu atau lebih generator mengalami gangguan yang disebabkan oleh perubahan fundamental tegangan dan frekuensi yang bisa disebabkan oleh pelepasan beban yang besar secara tiba-tiba, akan berdampak terhadap dinamika kinerja generator mengalami osilasi (ayunan), pada

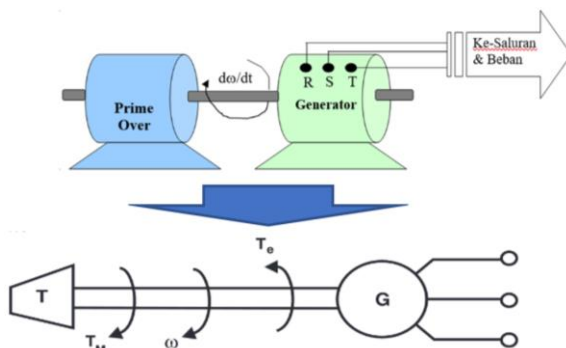
Keandalan sistem pada aspek kestabilan kinerja generator teridentifikasi dari kemampuan generator beroperasi Kembali normal atau steady state setelah mengalami gangguan (Agus, 2018).

Ketidakstabilan sistem tenaga dapat dilihat sebagai hilangnya sinkronisasi (yaitu, beberapa mesin sinkron keluar dari langkah) ketika sistem mengalami gangguan tertentu. Tiga jenis stabilitas yang menjadi perhatian: *Steady state*, *transient* dan *dynamic stability*. Kemampuan dari generator mempertahankan sinkronisasi dan osilasi generator akibat gangguan disebut sebagai kestabilan sistem, dapat dimodelkan dalam persamaan variable keadaan yang mewakili performansi dinamik pada sistem tenaga listrik (Rahmaniar, 2019)

8.2 Pemodelan Sistem Generator Tunggal

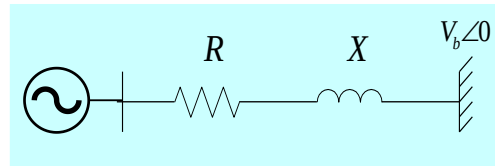
8.2.1 Single Machine Infinite Bus (SMIB)

Pertimbangkan generator sinkron dengan torsi elektromagnetik T_e (dan daya elektromagnetik yang sesuai P_e) saat beroperasi pada kecepatan sinkron ω_m . Jika torsi input sebagai Torsi Mekamik (T_m) yang diberikan oleh penggerak utama pada poros generator adalah T_m , maka dalam kondisi tunak (tanpa gangguan) dapat diilustrasikan seperti gambar 1.



Gambar 8.1. Generator dengan *Primeover*

Hubungan generator yang terhubung mesin tunggal sistem SMIB merupakan sistem mesin tunggal yang terkoneksi dengan bus-bar tak terbatas (gambar 1). Unjuk kerja generator dapat diamati dengan memodelkan SMIB sampai dalam bentuk persamaan variable keadaan (Anderson, 1977; Praba, 1994).



Gambar 8.2. Model SMIB

Gambar 8.2. Menunjukkan diagram SMIB, Persamaan mekanik, jika generator dioperasikan tanpa beban, maka persamaan T_m :

$$T_m = m \cdot a$$

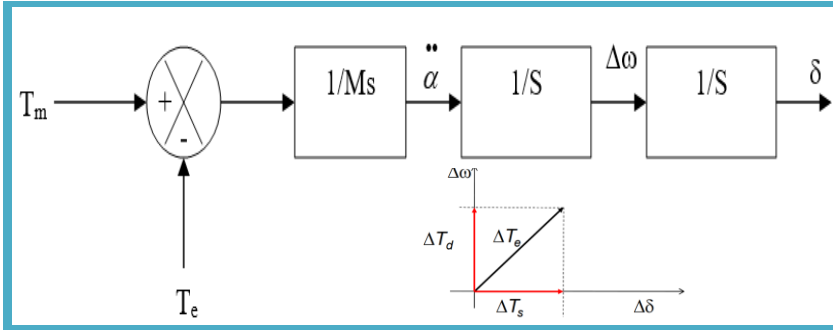
$$T_m = m \, d\omega/dt \text{ (tanpa beban di generator)} \quad (1)$$

Pada generator berbeban (Praba, 1994), T_m akan dipengaruhi oleh Torsi Elektrik (T_e) dengan persamaan T_m yang dipengaruhi T_e seperti ditunjukkan pada persamaan 2.

$$T_m - T_e = m \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2)$$

$$T_m - T_e = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{M} = \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

Dari persamaan (2) diatas dapat disusun blok diagram torsi mekanik akan dipengaruhi oleh torsi elektrik generator berbeban ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 8.3. Model torsi mekanik dipengaruhi oleh torsi elektrik generator berbeban

Pada gambar 8.3, diperlihatkan model torsi mekanik dipengaruhi oleh torsi elektrik generator berbeban. Torsi mekanis dari turbin diubah menjadi torsi listrik, Torsi Elektrik (T_e) memiliki dua komponen, yaitu torsi sinkronisasi (dalam fase dengan sudut daya) dan Torsi redaman T_D (dalam fase dengan kecepatan). Kurangnya torsi membuat sistem akan mengalami ketidakstabilan dan pengontrol sistem daya (stabilisator) digunakan untuk meningkatkan torsi ini . Konstanta redaman D , menstabilkan generator dengan mengatur D bernilai negatif, sefasa dan sebanding dengan variable perubahan rotor ($\Delta\omega$), sehingga akan diperoleh persamaan, sebagai berikut:

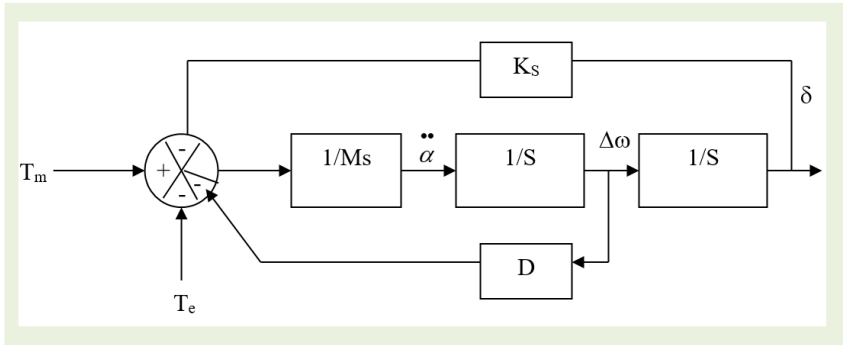
$$T_D = D . \Delta\omega \tag{3}$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms} (\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta\omega) \tag{4}$$

Posisi sudut juga mempengaruhi torsi lawan yaitu torsi sinkronisasi (T_s) dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$T_s = K_s \delta \tag{5}$$

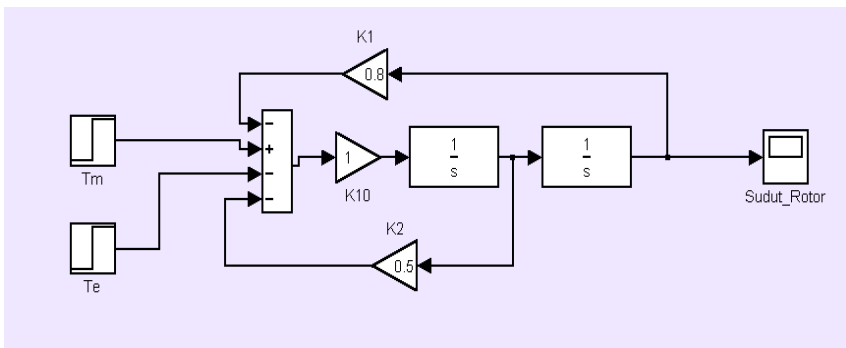
Melalui persamaan $T_D = D . \Delta\omega$ dan $T_s = K_s \delta$, dapat disusun dalam blok diagram gambar 8.4.



Gambar 8.4. Blok T_m, T_e dengan pengaruh T_s dan D

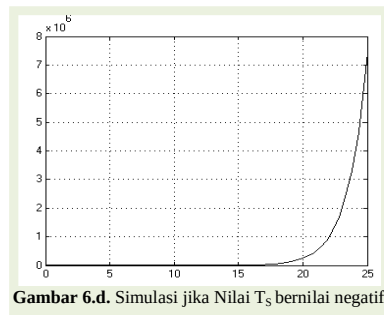
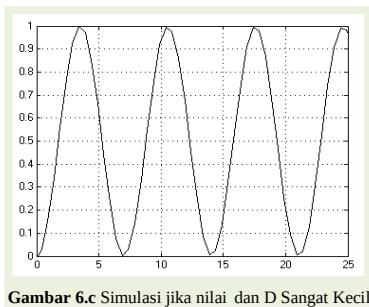
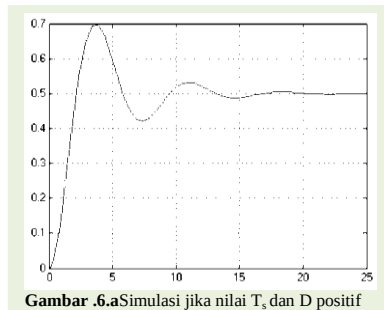
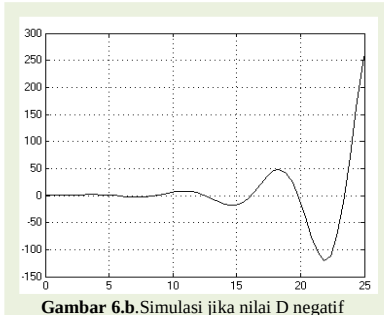
8.2.2. Variasi Koefisien Redaman D terhadap Performansi Generator

Pengaruh koefisien redaman D terhadap unjuk kerja sistem dapat disimulasikan secara sederhana menggunakan Simulink matlab, (gambar 8.5).



Gambar 8.5. Model Simulink dari Model gambar 4

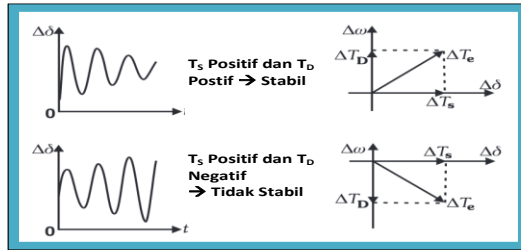
Osilasi generator yang stabil dapat terjadi jika konstanta K_1 bernilai positif, demikian juga dengan redaman D juga bernilai positif. Karena pengaruh nilai K_1 dan D yang negative akan memberikan feedback parameter negative sehingga sistem tidak stabil. Simulasi beberapa variasi kondisi konstanta D dan T_s , ditunjukkan pada gambar 8.6.



Gambar 8.6 Hasil Simulasi beberapa Kondisi Generator Sinkron Berbeban

8.2.3 Efektif

Untuk nilai positif dari koefisien redaman, dan daya input konstan, respon sudut rotor untuk gangguan kecil akan berbentuk sinusoid teredam. Hubungan antara kecepatan rotor dan daya listrik setelah gangguan kecil diilustrasikan sejumlah faktor dapat mempengaruhi koefisien redaman generator sinkron, termasuk desain generator (gambar 8.7.)

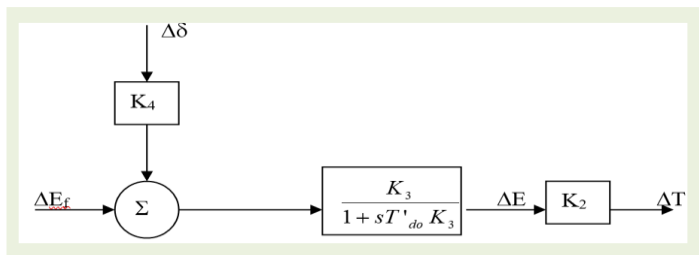


Gambar 8.7. Respons Kecepatan dan Sudut terhadap Gangguan Kecil

Sementara banyak unit memiliki koefisien redaman yang memadai untuk kondisi operasi normal, mereka mungkin mengalami penurunan nilai K_D yang signifikan setelah pemadaman transmisi, yang menyebabkan rasio redaman rendah yang tidak dapat diterima. Pada keadaan ekstrim, koefisien redaman dapat menjadi negatif, menyebabkan osilasi elektromekanis meningkat, dan akhirnya menyebabkan hilangnya sinkronisasi. Bentuk ketidakstabilan ini biasanya disebut sebagai ketidakstabilan dinamis, sinyal kecil, atau osilasi untuk membedakannya dari stabilitas *steady state* dan stabilitas *transient*.

8.2.4 Reaksi Jangkar

Kenaikan sudut rotor yang dipengaruhi oleh konstanta K_4 , ditunjukkan pada gambar 8.8.



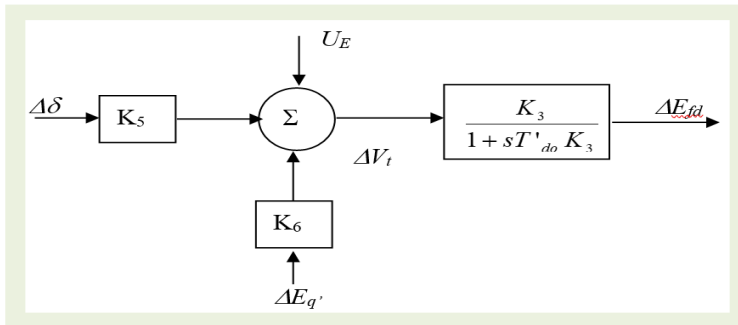
Gambar 8.8. Pengaruh parameter K_4 terhadap kenaikan sudut rotor

Fungsi transfer function yang menggambarkan adanya perubahan torsi dan sudut rotor (Kundur pp. 750), diformulasikan dengan:

$$\left. \frac{\Delta T_E}{\Delta \delta} \right|_{\text{karena } E_{q'}} = - \frac{K_2 K_4 K_3}{1 + s T'_{do} K_3} \quad (6)$$

8.2.5 Pengaruh Pengaturan Tegangan

Pengaruh parameter pengaturan tegangan terhadap T_D dan T_S ditunjukkan pada gambar 8.9.



Gambar 8.9. Pengaruh Pengaturan tegangan terhadap T_D dan T_S

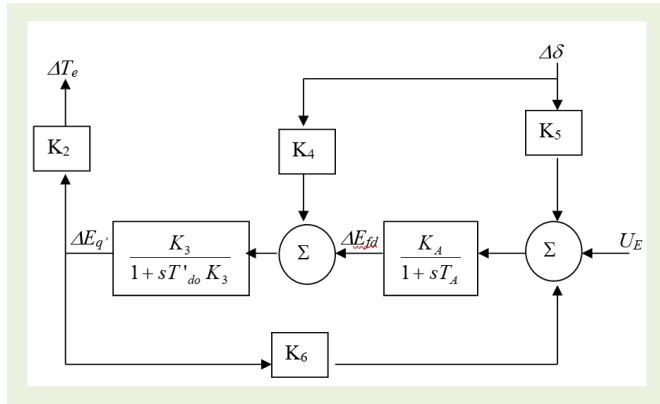
Fungsi alih yang menggambarkan sistem pengaturan tegangan dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{\Delta E_{fd}}{\Delta V_t} = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (7)$$

Tegangan terminal V_t dihubungkan ke $\Delta \delta$ melalui factor K_5 yang nilainya dapat berubah. Perubahan $\Delta E_{q'}$ dihubungkan melalui K_6 dan nilainya selalu positif dan dengan adanya pembenanan nilainya akan berkurang.

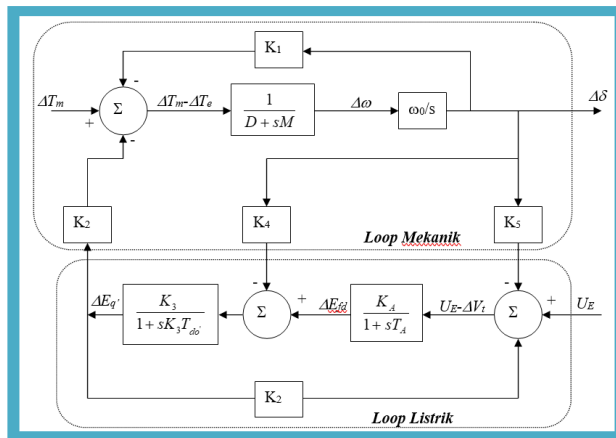
8.2.6 Perubahan Tegangan Terminal

Tegangan terminal mengalami perubahan akibat adanya perubahan beban dinyatakan dalam K_5 ditunjukkan pada gambar 8.10.



Gambar 8.10. Perubahan beban K_5 pada merubah tegangan terminal

Model sistem tenaga listrik secara utuh dengan loop mekanik dan loop listrik dapat ditunjukkan pada gambar 8.11.



Gambar 8.11. Loop Mekanik dan Loop Listrik pada Pemodelan Generator Sinkron

Pada gambar 8.11, Torsi masukan $\Delta T_m - \Delta T_e$ sebagai input dan gambar 8.11. model sistem dapat dinyatakan dalam persamaan *state space* (Padiyar, 2008) untuk sistem SMIB, melalui formulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta \omega}{-\Delta T_e} &= \frac{1}{D + sM} \\
 -\Delta T_e &= D\Delta \omega + sM\Delta \omega \\
 -K_1\Delta \delta - K_2\Delta E'_q &= D\Delta \omega + sM\Delta \omega \\
 sM\Delta \omega &= -K_1\Delta \delta - K_2\Delta E'_q - D\Delta \omega \\
 s\Delta \omega &= -\frac{D}{M}\Delta \omega - \frac{K_1}{M}\Delta \delta - \frac{K_2}{M}\Delta E'_q \\
 \dot{\Delta \omega} &= -\frac{D}{M}\Delta \omega - \frac{K_1}{M}\Delta \delta - \frac{K_2}{M}\Delta E'_q
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta \delta}{\Delta \omega} &= \frac{\omega_b}{s} \\
 s\Delta \delta &= \omega_b \Delta \omega
 \end{aligned}$$

$$\dot{\Delta \delta} = \omega_b \Delta \omega \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta E'_q}{-K_4\Delta \delta + \Delta E_{fd}} &= \frac{K_3}{1 + sT'_{d0}K_3} \\
 \Delta E'_q(1 + sT'_{d0}K_3) &= K_3(-K_4\Delta \delta + \Delta E_{fd}) \\
 \Delta E'_q + sT'_{d0}K_3\Delta E'_q &= -K_3K_4\Delta \delta + K_3\Delta E_{fd} \\
 sT'_{d0}K_3\Delta E'_q &= -K_3K_4\Delta \delta - \Delta E'_q + K_3\Delta E_{fd} \\
 s\Delta E'_q &= -\frac{K_4}{T'_{d0}}\Delta \delta - \frac{1}{T'_{d0}K_3}\Delta E'_q + \frac{1}{T'_{d0}}\Delta E_{fd} \\
 \dot{\Delta E'_q} &= -\frac{K_4}{T'_{d0}}\Delta \delta - \frac{1}{T'_{d0}K_3}\Delta E'_q + \frac{1}{T'_{d0}}\Delta E_{fd}
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta E_{fd}}{u_E - \Delta V_t} &= \frac{K_A}{1 + sT_A} \\
\Delta E_{fd}(1 + sT_A) &= K_A(u_E - \Delta V) \\
\Delta E_{fd} + sT_A \Delta E_{fd} &= K_A(u_E - K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta E'_q) \\
sT_A \Delta E_{fd} &= K_A u_E - K_A K_5 \Delta \delta - K_A K_6 \Delta E'_q - \Delta E_{fd} \\
s \Delta E_{fd} &= \frac{K_A}{T_A} u_E - \frac{K_A}{T_A} K_5 \Delta \delta - \frac{K_A}{T_A} K_6 \Delta E'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} \\
\Delta \dot{E}_{fd} &= -\frac{K_A}{T_A} K_5 \Delta \delta - \frac{K_A}{T_A} K_6 \Delta E'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} u_E
\end{aligned} \tag{13}$$

Persamaan state-space dapat diperoleh dari persamaan (10) sampai persamaan (13) dinyatakan dengan:

$$\dot{X} = Ax + Bu$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ \frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{1}{T'_{d0} K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} [u_E] \tag{14}$$

Dari gambar 9 persamaan keluaran :

$$\dot{Y} = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + [0][u_E] \tag{15}$$

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Junaidi, K Abdul Hamid. 2018. *Design of Simulation Product for Stability of Electric Power System Using Power System Stabilizer and Optimal Control*. Journal of Physics: Conference Series DOI 10.1088/1742-6596/970/1/012013
- Rahmaniar and Maharani Putri. 2018. *The Simulation Computer Based Learning (SCBL) for Short Circuit Multi Machine Power System Analysis*. Journal of Physics: Conference Series.
- Rahmaniar, Agus Junaidi, Ganefri, Abd. Hamid K, Nizwardi Jalinus, Jalius Jama. 2019. Modelling and Simulation: an InjectionModel Approach to Controlling Dynamic Stability Based on Unified Power Flow Controller, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, ISSN: 1992-8645
- Shivinder Mehta. 2018. *Power System Stability for Single Machine Infinite Bus Using Power System Stabilizer Based on Fuzzy Logic Controller*, Conference: International Journal of ResearchVolume: Volume 7, Issue VII, JULY/2018.
- Prabha Kundur, "Power System Stability and Control" Mv. Graw-hill © 1994.
- Padiyar K. R. 2008. POWER SYSTEM DYNAMICS Stability And Control Second Edition Indian Institute of Science, Bangalore ISBN: 81-7800-186-1
- P.M. Anderson, A.A Fouad "Power System Kontrol and stability" The Iowa State university Press, © 1977.

BAB 9

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

9.1 Pendahuluan

Saat ini baik di Indonesia maupun di luar negeri, tenaga listrik menjadi salah satu kebutuhan primer yang sangat dibutuhkan oleh manusia untuk membantu kebutuhan pekerjaan maupun untuk kebutuhan hidup sehari-hari misalnya untuk lampu sebagai sumber penerangan di malam hari. Hingga tahun 2025, kebutuhan listrik di Indonesia diprediksi mencapai 120 GW. Hal ini berkaitan erat dengan pertumbuhan ekonomi yang meningkat secara pesat berkisar antara 7% - 10% setiap tahunnya (Sukmajati and Hafidz, 2015). Oleh karena penggunaan energi fosil (seperti minyak bumi dan batu bara) secara terus menerus serta adanya kebijakan (target 17% energi primer nasional yang digunakan harus berasal dari energi alternatif) disebutkan pada Kepres No. 5 Tahun 2006, maka energi baru dan terbarukan menjadi salah satu alternatif energi pengganti untuk memenuhi kebutuhan energi.

Indonesia, dengan julukan negara tropis dan terletak di wilayah khatulistiwa, mendapatkan cukup sinar matahari sepanjang tahun. Pengaplikasian energi terbarukan yang berasal dari pemanfaatan energi tenaga surya merupakan salah satu pilihan yang sangat perlu dipertimbangkan. Pemanfaatan energi surya ini dapat dikembangkan dengan diubah menjadi energi listrik yaitu menggunakan perangkat panel surya. Pemilihan

penggunaan energi tenaga surya berkaitan dengan sumber energi yang mudah didapatkan, sangat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan pencemaran di lingkungan, pemasangan dan pengoperasian yang sangat mudah saat cukup tersinari oleh matahari serta listrik yang dihasilkan dapat disimpan dalam baterai (Bawalo et al., 2021).

9.2 Energi Tenaga Surya dan Pemanfaatannya

Energi tenaga surya adalah energi yang berasal dari pancaran matahari dalam bentuk sinar dan panas matahari. Potensi energi tenaga surya sebesar $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ atau sekitar 112.000 GWp yang ada di Indonesia. Namun, untuk saat ini hanya sekitar 10 GWp yang sudah dimanfaatkan oleh Indonesia (Sukmajati and Hafidz, 2015). Energi ini juga dapat dikembangkan dengan modifikasi teknologi antara lain listrik panas surya, pemanas tenaga surya, fotovoltaiik surya dan arsitektur surya. Umumnya, pemanfaatan energi surya melalui PLTS ini digunakan di daerah pedesaan dengan skala kecil, dengan metode satu rumah satu pembangkit.

Secara umum, pemanfaatan energi tenaga surya dapat dilakukan dalam 3 metode antara lain:

1. Prinsip pemanasan langsung
Sinar-sinar matahari memanasi secara langsung benda-benda yang dipanaskan, misalnya saat menjemur pakaian.
2. Pemanfaatan sinar matahari dengan menggunakan kolektor surya
Kolektor surya merupakan alat penukar kalor yang berfungsi untuk menyerap sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi berbentuk panas yang berguna melalui suatu medium fluida kerja. Contohnya adalah kolektor surya pemanas air.

3. Konversi sinar atau energi tenaga surya

Sinar atau energi matahari diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan sel surya (*solar cell*) misalnya pemanfaatan sinar matahari untuk penerangan rumah warga di suatu desa terpencil.

9.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Suatu sistem peralatan pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi kemudian diubah ke energi listrik menggunakan sel surya (*solar cell*) dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS ini biasanya sering disebut juga sebagai Solar Energi atau Solar Photovoltaik. PLTS ini masih dapat menghasilkan listrik selama masih ada sinar matahari yang cukup.

Komponen utama dalam sistem PLTS ini dengan menggunakan teknologi fotovoltaik yaitu sel surya. Saat ini banyak pembuatan sel surya secara konvensional maupun teknologi terbaru. Sel surya konvensional saat ini dibuat dengan teknologi wafer silikon kristalin yang proses produksinya sangat rumit dan mahal.

Manfaat PLTS yang dapat ditinjau dari segi ekonomi dan juga lingkungan. Dari segi ekonomi manfaat yang didapat antara lain energi matahari tersedia bebas, sehingga pengguna hanya perlu membutuhkan biaya untuk produksi awal saja. Selain itu manfaat lainnya adalah bebas dari biaya perawatan dan juga energi ini dapat menghasilkan kapasitas listrik sesuai dengan kebutuhan. Dari segi lingkungan, manfaat yang didapat antara lain PLTS merupakan energi alternatif yang ramah lingkungan sehingga tidak memancarkan emisi karbon, serta PLTS ini menggunakan energi dari sinar matahari yang tidak ada batasnya sehingga tidak ada potensi krisis kelangkaan sumber energi (Bawalo et al., 2021).

Di Indonesia, jumlah PLTS dalam skala besar masih sangat terbatas. Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang memiliki skala besar dan sudah tersentralisasi sebagai berikut:

Tabel 9.1 PLTS skala besar di Indonesia

No.	Nama PLTS dan Lokasi	Kapasitas
1.	PLTS Karangasem, Bali	1 MW
2.	PLTS Gili Trawangan (NTB)	600 kWp
3.	PLTS Pulau Medang, Sekotok, Moyo	900 kWp
4.	PLTS Raijua (Kabupaten Sabu Rijua, NTT)	150 kWp
5.	PLTS Nule (Kab. Alor, NTT)	250 kWp
6.	PLTS Solor Barat (Kab. Flores Timur, NTT)	275 kWp
7.	PLTS Oelpuah (Kupang, NTT)	5 MW
8.	PLTS Morotai (Maluku Utara)	600 kWp
9.	PLTS Banda Naira (Maluku)	100 kWp
10.	PLTS Tioor (Maluku)	100 kWp
11.	PLTS Kur (Maluku)	100 kWp
12.	PLTS Kisar (Maluku)	100 kWp
13.	PLTS Wetar (Maluku)	100 kWp
14.	PLTS Kabaena (Sulawesi Tenggara)	200 kWp

Sumber: “Sebaiknya Konsumen Tahu Tentang PLTS & Biodiesel,” 2020

9.3.1 Jenis-jenis PLTS

PLTS umumnya dibagi menjadi beberapa jenis antara lain : (Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020)

a) Berdasarkan Kondisi Pengoperasian

1. PLTS *On-Grid*

Pembangkitan listrik ini memanfaatkan energi dari radiasi matahari sebagai sumbernya kemudian diubah menggunakan sel fotovoltaik. Pada PLTS jenis ini, sistem kelistrikannya terhubung langsung dengan jaringan

listrik dan tidak dilengkapi dengan baterai penyimpanan daya.

2. PLTS *Off-Grid*

Konsep dari PLTS jenis ini sama dengan PLTS *On-Grid*. Namun pada PLTS jenis ini, sistem kelistrikan yang dimiliki tidak terhubung langsung ke jaringan listrik dan dilengkapi dengan baterai sebagai alat penyimpan daya.

b) Berdasarkan Sistem Desain

1. PLTS Terpusat

Modul fotovoltaik pada PLTS jenis ini memiliki desain dalam satu area atau secara terpusat serta dilengkapi dengan adanya penyaluran daya listrik ke beban menggunakan sistem jaringan distribusi tersendiri.

2. PLTS Tersebar/Terdistribusi

Modul fotovoltaik pada PLTS jenis ini memiliki desain dalam secara menyebar. Umumnya, PLTS ini tidak dilengkapi dengan jaringan distribusi, maka pelanggan harus memiliki jaringan PLTS masing-masing.

c) Posisi Pemasangan

1. PLTS Ground Mounted

Posisi pemasangan pembangkit listrik ini berada di atas permukaan tanah.



Gambar 9.1 PLTS Ground Mounted

(Sumber : Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan

2. PLTS Rooftop

Posisi pemasangan pembangkit listrik ini berada di atas atap atau bisa juga terintegrasi dengan atap bangunan.



Gambar 9.2 PLTS Rooftop

(Sumber : Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020)

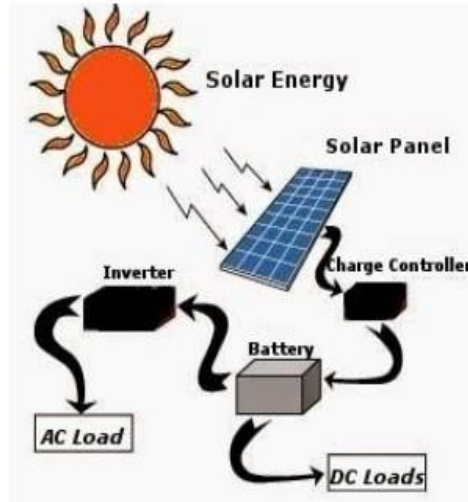
3. PLTS Terapung



Gambar 9.3 PLTS Terapung

(Sumber : Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020)

9.3.2 Cara Kerja PLTS



Gambar 9.4 Sistem Instalasi menggunakan *Solar Cell*

(Sumber : Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020)

Konsep sederhana dari pembangkit listrik tenaga surya adalah adanya perubahan energi yang berasal dari sinar matahari menjadi energi listrik. Komponen utama dari PLTS ini adalah sel surya, fungsi utama dari komponen ini adalah sebagai penghasil energi listrik dengan hasil yang tidak terbatas karena tersedianya sumber energi yang berlimpah juga. Keuntungan yang didapat yaitu sel surya ini bersifat ramah lingkungan (*eco friendly*).

Modul sel surya, kontroler pengisian dan baterai penyimpanan merupakan komponen penyusun sistem sel surya. Beberapa sel surya disusun secara seri maupun paralel disesuaikan dengan kebutuhan ukuran serta kapasitas sehingga membentuk suatu sistem panel sel surya. Cara kerja dari panel surya yaitu ketika penyerapan cahaya oleh bahan semi konduktor yang dimiliki oleh sel surya, maka terjadi adanya

pelepasan elektron. Kemudian jika elektron dapat menembus ke bahan semi-konduktor pada beberapa tingkatan lapisan, maka pada bahan terjadi suatu perubahan gaya-gaya. Aliran medan magnet listrik terjadi akibat adanya suatu gaya tolak pada bahan semi-konduktor dan aliran listrik tersebut dapat digunakan pada perabot listrik.

Rangkain alat pengontrol pengisian baterai yang ada di sistem sel surya merupakan sekumpulan komponen elektronik berfungsi untuk mengatur proses pengisian pada baterai. Alat Kontroler ini dapat mengatur tegangan baterai dalam selang sebesar 12 volt. Bila tegangan turun sampai 10.8 volt berarti sisa tegangan pada baterai sebesar 2.2 volt, maka kontroler melakukan pengisian daya menggunakan panel surya. Proses pengisian daya dapat terjadi ketika siang hari atau dengan adanya sinar matahari. Penurunan tegangan yang terjadi pada malam hari dikarenakan tidak adanya sinar matahari, berakibat pada pemutusan pemasokan energi listrik pada kontroler. Rangkaian alat kontroler menghentikan pengisian daya pada baterai penyimpanan, apabila tegangan daya pada baterai naik dan mencapai 12 Volt.

9.4 Komponen dalam Sistem PLTS

Berikut dijabarkan komponen inti penyusun PLTS yang digunakan agar dapat memberikan fungsi sesuai yang diharapkan.

9.4.1 Sistem Panel Surya

Sistem Panel Surya adalah suatu rangkaian alat yang terdiri dari sel surya yang berfungsi merubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Sel PV memiliki fungsi untuk menyerap energi sinar matahari dari sehingga aliran arus listrik dapat mengalir di antara kedua lapisan yang memiliki muatan

berlawanan. Pemanfaatan sistem panel surya untuk memproduksi energi listrik baik di Indonesia maupun dunia sangat kecil, hal ini berkaitan dengan tingginya biaya produksi yang dikeluarkan per wattnya apabila menggunakan bahan bakar fosil (dapat mencapai lebih tinggi sepuluh kali lipat).

Jenis panel surya dibedakan antara lain:

- a) **Monokristalin.** Adalah suatu panel surya yang efisien terkait dengan penghasil daya listrik persatuan luas yang tinggi. Efisiensi panel surya ini mencapai hingga 24%. Namun, kelemahannya adalah sistem ini tidak dapat berfungsi jika diletakkan di tempat yang kurang memiliki cahaya matahari (teduh), sehingga menyebabkan efisiensi pada sistem mengalami penurunan secara drastis ketika kondisi teduh.
- b) **Polikristalin.** Adalah suatu panel surya dengan susunan komponen kristal yang tersebar acak. Tipe *polycrystalline* membutuhkan tempat dengan luas permukaan yang cukup besar untuk menghasilkan daya listrik. Keuntungan dari tipe jenis ini adalah tetap dapat menghasilkan listrik walaupun dalam kondisi cuaca teduh dan tidak berpengaruh terhadap efisiensinya.

(Wisnugroho et al., 2018) .



(a)

(b)

Gambar 9.5 Tipe sel surya : (a) monokristalin, (b) polikristalin Sumber : Wisnugroho et al., 2018

9.4.2 Kontroler Solar Charge

Kontroler ini merupakan rangkaian peralatan elektronik yang mengatur jalannya aliran arus listrik dari panel surya menuju baterai serta melakukan fungsi kontrol secara keseluruhan. Kontroler ini dapat membatasi arus listrik yang masuk ataupun keluar dari baterai agar tetap terisi penuh tanpa berlebihan (*over charge*) ketika beban sedang menarik daya, serta memungkinkan arus listrik mengalir dari modul sel surya ke baterai. Alat pengontrol ini mencegah adanya aliran arus balik dari baterai ke panel surya ketika proses pengisian berhenti. Apabila baterai penyimpanan telah terisi penuh, maka aliran arus dari panel surya akan diputuskan sehingga tidak terjadi beban berlebih pada baterai (Gunoto, 2019).



Gambar 9.6 Solar Charge Controller

Sumber : Gunoto, 2019

9.4.3 Inverter

Pengertian inverter yaitu suatu rangkaian alat elektronik yang memiliki fungsi sebagai pengubah tegangan aliran DC menjadi tegangan AC. Inverter dan converter merupakan alat yang berbeda. Converter atau disebut adaptor berfungsi untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC.



Gambar 9.7 Inverter DC 12V-AC220V

Sumber : Gunoto, 2019

9.4.4 Baterai

Baterai adalah perangkat yang dapat mengubah energi kimia langsung menjadi energi listrik sebagai tenaga penggerak komponen-komponen listrik terutama yang berarus DC. Baterai untuk *solar cell* sendiri memiliki dua tujuan utama yaitu, pertama adalah untuk mengalirkan daya kepada sistem ketika daya tidak dialirkan oleh panel surya tersebut. Tujuan kedua adalah untuk penyimpanan adanya kelebihan daya yang dihasilkan oleh panel-panel surya saat daya yang dihasilkan melebihi beban baterai tersebut. Apabila baterai telah terisi penuh maka secara otomatis proses pengisian berhenti.



Gambar 9.8 Baterai *lead acid*

Sumber : Gunoto, 2019

Kapasitas baterai yang digunakan tergantung dari besarnya beban yang digunakan dan lamanya penyimpanan energilistrik. Baterai yang sesuai untuk sistem rangkaian PLTS ini yaitu baterai dengan karakteristik Deep Discharge. Baterai jenis ini dapat dihentikan energi listriknya hingga tersisa sekitar 20% dari kapasitas baterai. Selain itu, baterai dengan bahan bebas pemeliharaan bertimbal asam (maintenance-free, lead-acid bateteries) atau yang sering disebut juga dengan baterai recombinant (VRLA). Baterai sendiri terbentuk oleh sekumpulan elemen atau sel yang disusun secara seri maupun parallel.



Gambar 9.9 Baterai jenis VRLA Opzv

Sumber : Wisnugroho et al., 2018

DAFTAR PUSTAKA

- Bawalo, J., Rumbayan, M., Tulung, N.M., 2021. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Rumah Kebun Desa Ammat Kabupaten Kepulauan Talaud.
- Direktorat Jendral Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, D.J.E.B.T. dan K.E., 2020. Panduan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, DKI Jakarta.
- Gunoto, P., 2019. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Untuk Proyektor di Ruang A102 Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan. SGTk 2, 131. <https://doi.org/10.33373/sigma.v2i2.2053>
- Sebaiknya Konsumen Tahu Tentang PLTS & Biodiesel, 2020.
- Sukmajati, S., Hafidz, M., 2015. Perancangan Dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 10 MW ON Grid Di Yogyakarta. Energi & Kelistrikan 7, 49–63. <https://doi.org/10.33322/energi.v7i1.582>
- Wisnugroho, S., Widyanto, S.W., Ma'muri, M., Agus, M., 2018. Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya Untuk Stasiun Radar Pantai Di Bukit Tindoi, Kabupaten Wakatobi. Prosiding Semnastek.

BAB 10

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

10.1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga angin adalah suatu sarana penyedia energi yang menggunakan angin sebagai sumber energi potensial untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik tenaga angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Pembangkit listrik tenaga angin merupakan energi alternatif yang berkembang sangat pesat, sebab angin merupakan salah satu energi potensial yang tidak terbatas di alam ini.

Pembangkit listrik tenaga angin disebut juga dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). PLTB merupakan salah satu pembangkit listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja yang baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik energi terbarukan lainnya. Prinsip kerja PLTB yaitu memanfaatkan energi kinetik angin yang masuk ke dalam area efektif turbin dan memutar baling-baling/kincir angin yang terhubung ke generator untuk membangkitkan energi listrik.

Pada saat ini, sistem pembangkit listrik tenaga angin mendapat perhatian yang cukup besar sebagai sumber energi alternatif yang bersih, aman, serta ramah lingkungan serta kelebihan-kelebihan lain yang telah disebutkan sebelumnya di

atas. Turbin angin skala kecil mempunyai peranan penting terutama bagi daerah-daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Pemanfaatan energi angin merupakan pemanfaatan energi terbaru yang paling berkembang saat ini. Berdasarkan data dari WWEA (World Wind Energi Association), tahun 2021 total energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin mencapai 97,5 GW dan menghasilkan lebih dari 7% dari total kelistrikan secara global. (WWEA, 2022)

Indonesia, negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu $\pm 80.791,42$ Km merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin, namun sayang potensi ini nampaknya belum dilirik oleh pemerintah. Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ditargetkan akan terpasang 1,8 Gigawatt (GW) pada tahun 2025 (ESDM, 2017)

10.2 Potensi sumber daya alam (Angin)

Dalam kehidupan manusia, Perubahan iklim dan pemanasan global menjadi perhatian utama di seluruh dunia, karena akan berdampak pada semua segi kehidupan. Penggunaan energi konvensional, menimbulkan emisi hasil pembakaran yang memicu efek rumah kaca dan menipiskan lapisan ozon, serta menimbulkan perubahan iklim. Padahal aktivitas di suatu negara dalam menggunakan energi konvensional yang menyebabkan emisi, pasti akan berdampak secara global, sehingga banyak negara bersama-sama fokus dalam menghadapi pemanasan global dan perubahan iklim.

Energi baru terbarukan merupakan energi yang ramah lingkungan dibandingkan energi konvensional. Energi angin sebagai salah satu energi baru terbarukan yang memiliki potensi besar dalam mendukung revolusi energi bersih di Indonesia.

Angin merupakan udara yang bergerak, terdapat dimana saja dan kapan saja, telah dimanfaatkan sejak zaman dulu sebagai penggerak kapal ketika berlayar, namun siapa sangka dengan berkembangnya teknologi angin dapat dimanfaatkan oleh manusia sebagai sumber pembangkit tenaga listrik yang ramah lingkungan.

Potensi energi angin di Indonesia telah teridentifikasi di beberapa lokasi terutama di wilayah Jawa, Sulawesi Selatan, Nusa Tenggara dan Maluku. Beberapa pengembang telah mengusulkan pembangunan Pembangkit listrik tenaga angin di beberapa lokasi seperti: Sukabumi, Sidrap, Bantul dan Jeneponto. Pemerintah menargetkan hingga tahun 2025 pengembangan potensi pembangkit listrik tenaga angin sebesar 1,8 GW. Skema pengembangan pembangkit tersebut dapat melalui program Pemerintah melalui skema *feed in* tarif atau negosiasi dengan PLN.

Potensi energi angin cukup melimpah di Indonesia, khususnya di pesisir selatan pulau Jawa, NTT, NTB dan Sulawesi. Pengembangan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia, lebih tepat dengan menggunakan turbin angin, bisa dalam bentuk *wind farm* ataupun *stand alone*, baik yang terhubung ke dalam *grid* maupun tidak.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sangat cocok diterapkan pada lokasi terpencil maupun yang telah mempunyai *grid*. Keberadaan dan kelangsungan suatu PLTB sangat ditentukan oleh pemilihan lokasi (*sitting*) yang tepat berdasarkan data angin yang akurat dan berlaku sepanjang waktu guna (*service life*) mesin turbin angin. Oleh sebab itu studi potensi angin sepanjang tahun, merupakan sesuatu yang mutlak dilakukan sebelum diputuskan untuk membangun PLTB.

Secara keseluruhan potensi energi angin di Indonesia rata-rata tidak besar, tetapi berdasarkan survei dan pengukuran data angin yang telah dilakukan sejak 1979, banyak daerah yang prospektif karena memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan diatas 5 m/detik. Potensi ini sudah dapat dimanfaatkan untuk pengembangan PLTB skala komersial. Sebaran potensi angin di Indonesia yang bisa dimanfaatkan untuk turbin angin komersial diantaranya di selatan Pulau Jawa serta Nusa Tenggara.

PLTB Sidrap terletak di Kecamatan Watang Pulu Kabupaten Sindereng Rappang Provinsi Sulawesi Selatan merupakan PLTB terbesar di Indonesia. PLTB ini memiliki kapasitas 75 megawatt (MW) yang diproyeksikan untuk melayani kebutuhan listrik 80 ribu pelanggan di Sulawesi Selatan dengan daya listrik rata-rata 900 VA. Dengan kata lain, PLTB mampu *mensupply* kebutuhan masyarakat akan energi listrik.

Saat ini kapasitas total pembangkit listrik yang berasal dari tenaga angin untuk Indonesia dengan estimasi kecepatan angin rata-rata sekitar 3 m/s, 12 km/jam atau 6,7 knot/jam. Turbin skala kecil lebih cocok digunakan di daerah pesisir, pegunungan, dan dataran. Perlu diketahui bahwa kecepatan angin bersifat fluktuatif, sehingga pada daerah yang memiliki kecepatan angin rata-rata 3 m/s, akan terdapat pada saat-saat dimana kecepatan anginnya lebih besar dari 3 m/s.

10.2.1 Kecepatan angin

Angin adalah udara yang bergerak. Angin terjadi karena adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi. Angin akan bergerak dari suatu daerah yang memiliki tekanan tinggi ke daerah yang memiliki tekanan yang lebih rendah. Angin yang bertiup di permukaan bumi disebabkan oleh penyinaran matahari, pada siang hari sinar matahari memanaskan permukaan bumi, namun panas yang terserap oleh bumi

tersebut besarnya tidak merata. Akibatnya, aliran udara bergerak dari daerah yang mempunyai tekanan yang lebih tinggi ke daerah yang memiliki tekanan lebih rendah. Udara yang bergerak akan semakin kencang bila perbedaan tekanan daerah tersebut semakin besar.

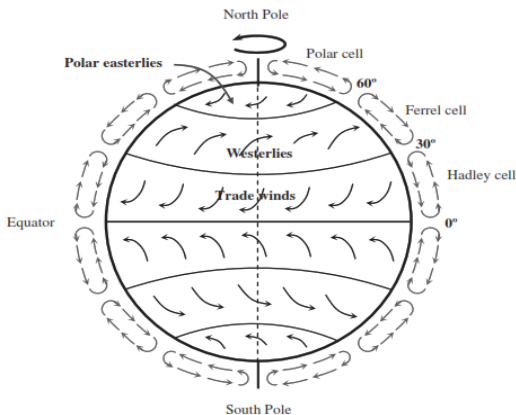
Pada dasarnya angin bertiup di semua daerah di permukaan bumi. Artinya, di mana angin bertiup, tempat tersebut mempunyai potensi untuk memanfaatkan energi angin. Namun, untuk mendapatkan angin dengan kecepatan tinggi perlu dilakukan analisis terlebih dahulu. Secara umum daerah datar lebih menguntungkan dibandingkan daerah bertopografi beragam. Beberapa contoh daerah yang memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi antara lain seperti daerah pantai, lepas pantai, padang pasir, padang rumput dan lain-lain. Namun terdapat juga tempat-tempat yang bisa meningkatkan kecepatan angin seperti di puncak bukit, atau di celah antara pegunungan juga di tepi pantai.

Kecepatan angin sangat dipengaruhi oleh ketinggian permukaan tanah. Semakin mendekati permukaan tanah, kecepatan angin semakin rendah karena adanya gaya gesek antara permukaan tanah dan angin. Maka, pembangkit listrik tenaga angin biasanya dibangun dengan menggunakan *tower* yang tinggi atau dipasang diatas bangunan. Berikut adalah rumus mengukur kecepatan angin berdasarkan ketinggian dan jenis permukaan tanah sekitarnya.

10.2.2 Jenis-jenis angin

Angin timbul akibat sirkulasi di atmosfer yang dipengaruhi oleh aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi. Dengan demikian, daerah khatulistiwa akan menerima energi radiasi matahari lebih banyak daripada di daerah kutub, atau dengan kata lain, udara di daerah khatulistiwa akan lebih tinggi dibandingkan dengan udara di daerah kutub. Perbedaan berat

jenis dan tekanan udara inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara. Pergerakan udara inilah yang didefinisikan sebagai angin. Gambar 10.1 merupakan pola sirkulasi pergerakan udara akibat aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi.



Gambar 10.1. Pola Sirkulasi Udara Akibat Rotasi Bumi
(Sumber: Wei Tong, 2010)

a. Angin Laut dan Angin darat

Angin laut adalah angin yang timbul akibat adanya perbedaan suhu antara daratan dan lautan. Perbedaan suhu tersebut terjadi karena sifat air dalam melepaskan panas dari radiasi sinar matahari lebih lambat daripada daratan, sehingga suhu laut pada malam hari akan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di daratan. Semakin tinggi suhu, tekanan udara akan semakin rendah. Akibat adanya perbedaan suhu ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan udara di atas daratan dan lautan. Hal inilah yang menyebabkan angin akan bertiup dari arah darat ke arah laut. Sebaliknya, pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00 angin akan berhembus dari laut ke darat akibat sifat air yang lebih lambat menyerap panas matahari.

b. Angin lembah

Angin lembah adalah angin yang bertiup dari arah lembah ke arah puncak gunung yang biasa terjadi pada siang hari. Prinsip terjadinya hampir sama dengan terjadinya angin darat dan angin laut yaitu akibat adanya perbedaan suhu antara lembah dan puncak gunung.

c. Angin musim

Angin musim dibedakan menjadi 2, yaitu angin musim barat dan angin musim timur. Angin musim barat/angin muson barat adalah angin yang mengalir dari Benua Asia (musim dingin) ke Benua Australia (musim panas). Apabila angin melewati tempat yang luas, seperti perairan dan samudra, maka angin ini akan mengandung curah hujan yang tinggi. Angin musim barat menyebabkan Indonesia mengalami musim hujan. Angin ini terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari, dan maksimal pada bulan Januari dengan kecepatan minimum 3 m/s.

Angin musim timur/angin muson timur adalah angin yang mengalir dari Benua Australia (musim dingin) ke Benua Asia (musim panas). Angin ini menyebabkan Indonesia mengalami musim kemarau, karena angin melewati celah-celah sempit dan berbagai gurun (Gibson, Australia Besar, dan Victoria). Musim kemarau di Indonesia terjadi pada bulan Juni, Juli dan Agustus, dan maksimal pada bulan Juli.

d. Angin permukaan

Kecepatan dan arah angin ini dipengaruhi oleh perbedaan yang diakibatkan oleh material permukaan bumi dan ketinggiannya. Secara umum, suatu tempat dengan perbedaan tekanan udara yang tinggi akan memiliki potensi

angin yang kuat. Ketinggian permukaan bumi mengakibatkan pusat tekanan menjadi lebih intensif.

Selain perbedaan tekanan udara, material permukaan bumi juga mempengaruhi kuat lemahnya kekuatan angin. Hal tersebut karena adanya gaya gesek antara angin dan material permukaan bumi. Selain itu, material permukaan bumi juga mempengaruhi kemampuannya dalam menyerap dan melepaskan panas yang diterima dari sinar matahari. Sebagai contoh, belahan bumi utara didominasi oleh daratan, sedangkan belahan bumi selatan lebih di dominasi oleh lautan. Hal ini mengakibatkan angin di belahan bumi utara dan selatan menjadi tidak seragam.

e. Angin topan

Angin topan adalah pusaran angin kencang dengan kecepatan angin 120 km/jam atau lebih yang sering terjadi pada wilayah tropis di antara garis balik utara dan selatan. Angin topan disebabkan oleh perbedaan tekanan dalam suatu sistem cuaca. Indonesia dan negara lain, yang berdekatan dengan khatulistiwa, jarang sekali dilewati oleh angin topan. Angin topan umumnya berpusar dengan radius ratusan kilometer di sekitar daerah sistem tekanan rendah yang ekstrim dengan kecepatan sekitar 20 km/jam.

10.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit ini dapat mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Sistem pembangkitan listrik menggunakan angin sebagai sumber energi merupakan sistem alternatif yang sangat berkembang pesat,

mengingat angin merupakan salah satu energi yang tidak terbatas di alam.

Energi angin memutar turbin angin. Turbin angin bekerja menggunakan angin untuk menghasilkan listrik. Kemudian angin akan memutar sudut turbin, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*alternating current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal. Energi Listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

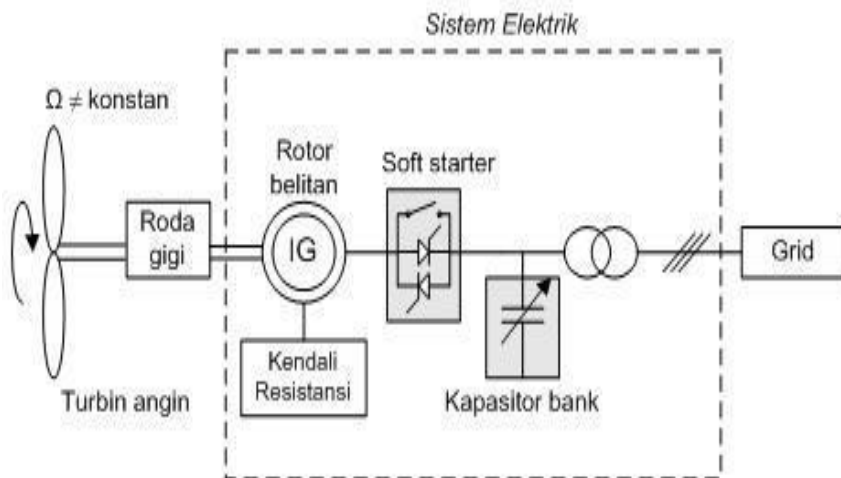
Sistem Mekanik PLTB



Gambar 10.2. Diagram skematik dari turbin angin
(Sumber: Burton, Tony, 2001)

Sistem Elektrik PLTB

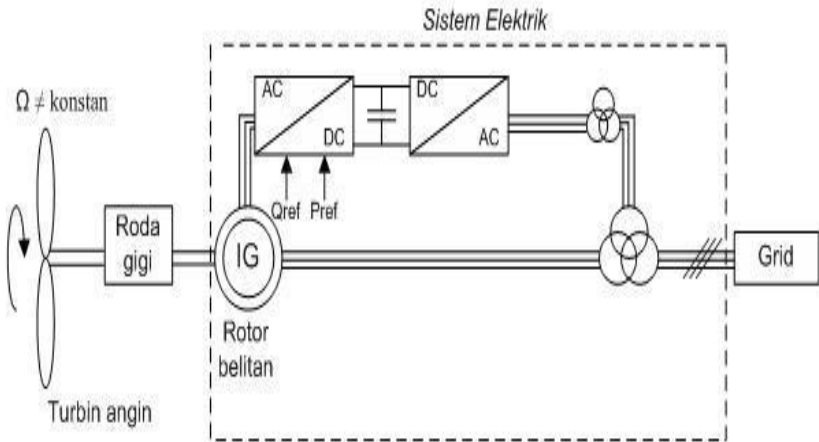
Secara umum sistem kelistrikan dari PLTB dapat dibagi menjadi 2 yaitu (i) kecepatan konstan (ii) kecepatan berubah. Keuntungan dari sistem kecepatan konstan (*fixed-speed*) adalah murah, sistemnya sederhana dan kokoh (*robust*). Sistem ini beroperasi pada kecepatan putar turbin yang konstan dan menghasilkan daya maksimum pada satu nilai kecepatan angin. Sistem ini biasanya menggunakan generator tak-serempak (*unsynchronous generator*), dan cocok diterapkan pada daerah yang memiliki potensi kecepatan angin yang besar. Gambar 10.3 menunjukkan diagram skematik dari sistem ini.



Gambar 10.3. Sistem PLTB kecepatan konstan (*fixed-speed*).
(Sumber: <https://konversi.wordpress.com/2008/07/22/generat-or-listrik-untuk-sistem-pltb-atau-mikrohidro/>)

Selain kecepatan konstan, ada juga sistem turbin angin yang menggunakan sistem kecepatan berubah (*variable speed*), artinya sistem didesain agar dapat mengekstrak daya maksimum pada berbagai macam kecepatan. Sistem *variable speed* dapat menghilangkan *pulsating torque* yang umumnya timbul pada sistem *fixed speed*. Secara umum sistem *variable*

speed mengaplikasikan elektronika daya untuk mengkondisikan daya, seperti penyearah (*rectifier*), Konverter DC-DC, ataupun Inverter.

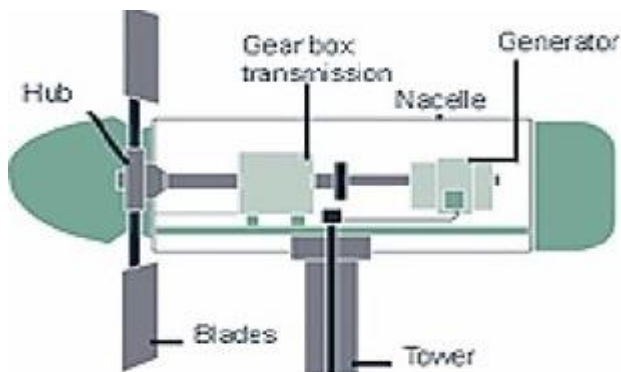


Gambar 10.4. Sistem PLTB kecepatan berubah (variable-speed) (rotor belitan).

(Sumber: [https://konversi.wordpress.com/2008/07/22/generat or-listrik-untuk-sistem-pltb-atau-mikrohidro/](https://konversi.wordpress.com/2008/07/22/generat-or-listrik-untuk-sistem-pltb-atau-mikrohidro/))

10.3.1 Turbin

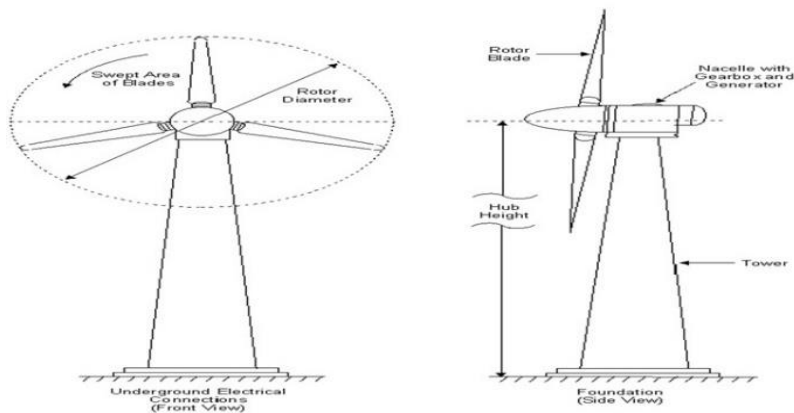
Sistem pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) umumnya terdapat mesin pembangkit listrik yang mempunyai bagian penting seperti Gambar 10.5 berikut, diantaranya turbin angin dengan bagian-bagian komponen utama baling-baling kipas (*blades*), penghubung baling-baling kipas dengan poros mesin (*hub*), transmisi pemercepat putaran poros (*gearbox*), suatu pengarah penyimpangan untuk memutar menara (*Nacelle*), mesin pembangkit listrik (*generator*), dan menara (*tower*).



Gambar 10.5. Bagian-bagian Turbin PLTB.

(Sumber:<http://www.klikaruslistrik.com/2018/06/pembang-kit-listrik-tenaga-angin.html>)

Adapun detail gambar area dan arah putaran sudu baling-baling kipas untuk menera angin adalah seperti gambar berikut.



Gambar 10.6. Arah Putaran Kipas Baling-Baling PLTB.

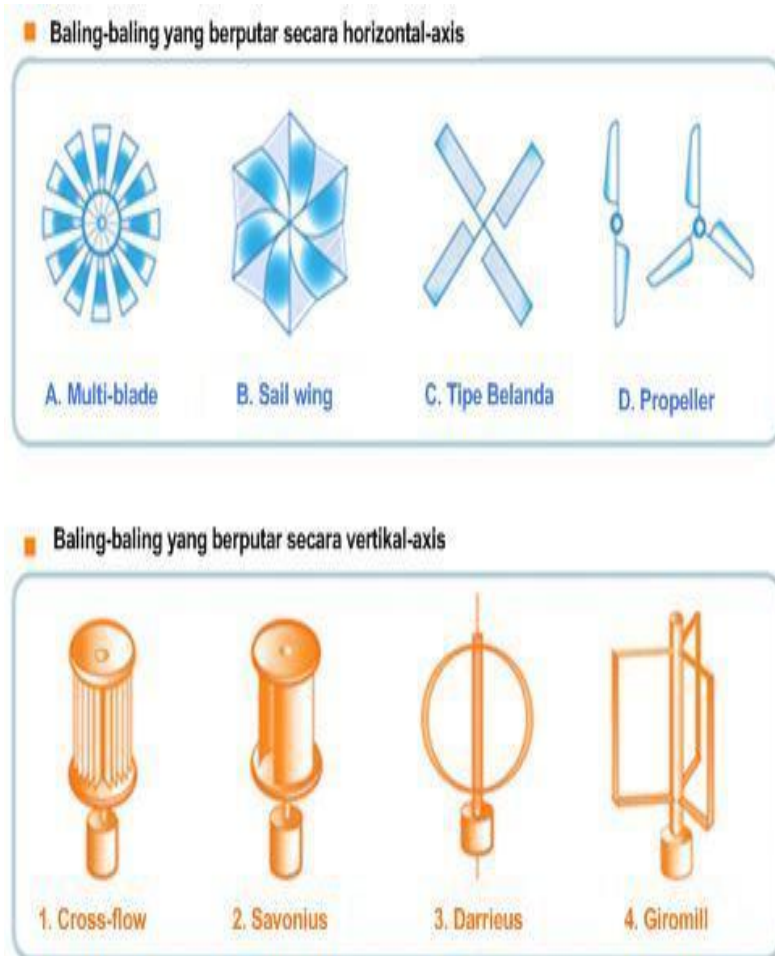
(Sumber:<http://www.klikaruslistrik.com/2018/06/pembang-kit-listrik-tenaga-angin.html>)

Turbin angin mengambil energi angin dengan menurunkan kecepatannya. Untuk bisa mencapai 100% efisien, maka sebuah turbin angin harus menahan 100% kecepatan angin yang ada, dan rotor harus terbuat dari piringan solid dan tidak berputar sama sekali, yang artinya tidak ada energi kinetik yang akan dikonversi. Energi angin bisa ditangkap dengan dua atau tiga buah bilah sudu yang didesain seperti sayap pesawat terbang. Untuk mendapatkan kecepatan angin yang cukup tinggi, konstan, dan tidak terlalu banyak turbulensi biasanya turbin angin dipasang di atas sebuah menara pada ketinggian 30 meter atau lebih.

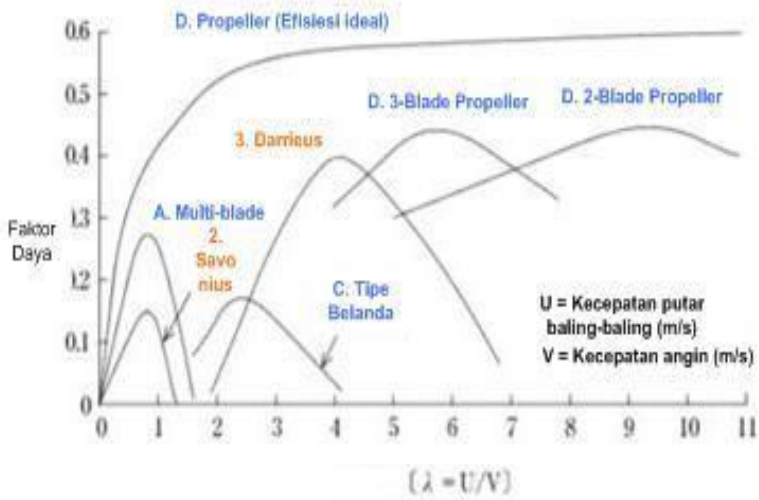
Bilah sudu yang digunakan berfungsi seperti sayap pesawat udara. Ketika angin bertiup melalui bilah tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah di bagian bawah dari sudu, Tekanan udara yang rendah akan menarik sudu bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat biasanya lebih kuat dari tekanan pada sisi depan bilah, atau yang biasa disebut tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan tarik menyebabkan rotor berputar seperti *propeler* dan memutar generator. Turbin angin bisa digunakan secara *stand-alone*, atau bisa dihubungkan ke jaringan transmisi atau bisa dikombinasikan dengan sistem panel surya.

Secara umum kincir angin dapat di bagi menjadi 2, yaitu kincir angin yang berputar dengan sumbu horizontal, dan yang berputar dengan sumbu vertikal. Gambar 10.7 menunjukkan jenis-jenis kincir angin berdasarkan bentuknya. Sedangkan gambar 8 menunjukkan karakteristik setiap kincir angin sebagai fungsi dari kemampuannya untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi putar turbin untuk setiap kondisi kecepatan angin. Dari gambar 10.7 dapat disimpulkan bahwa kincir angin jenis *multi-blade* dan *Savonius* cocok digunakan untuk aplikasi PLTB kecepatan rendah. Sedangkan kincir angin

tipe Propeller, paling umum digunakan karena dapat bekerja dengan lingkup kecepatan angin yang luas.



Gambar 10.7. Jenis – Jenis Kincir Angin.
(Sumber: <https://ee.itk.ac.id/berita/detail/pengetahuan-teknik-elektro-bayu-si-penghasil-listrik>)



Gambar 10.8. Karakteristik Kincir Angin.
(Sumber: <https://ee.itk.ac.id/berita/detail/pengertian-teknik-elektro-bayu-si-penghasil-listrik>)

Komponen – Komponen dalam turbin angin, diantaranya:

1) Anemometer

Mengukur kecepatan angin dan mengirimkan data kecepatan angin ke pengontrol.

2) Blades

Angin bertiup menyebabkan baling-baling berputar.

3) Brake

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox*, agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya.

4) Controller

Pengontrol mesin mulai dengan kecepatan angin sekitar 8-16 mil per jam (mph) dan menutup mesin turbin sekitar 55 mph. tidak beroperasi pada kecepatan angin sekitar 55

mph di atas, karena dapat rusak karena angin yang kencang

5) *Gear box*

Gears menghubungkan poros kecepatan tinggi di poros kecepatan rendah dan meningkatkan kecepatan sekitar 30-60 rotasi per menit (rpm), sekitar 1000-1800 rpm, kecepatan rotasi yang diperlukan oleh sebagian besar generator untuk menghasilkan listrik.

6) *Generator*

Biasanya standar induksi generator yang menghasilkan listrik dari 60 siklus listrik AC.

7) *High-speed shaft*

Drive generator.

8) *Low-speed shaft*

Mengubah poros rotor kecepatan rendah sekitar 30-60 rotasi per menit.

9) *Nacelle*

Nacelle berada di atas menara dan berisi *gear box*, poros kecepatan rendah dan tinggi, generator, kontrol, dan rem.

10) *Pitch*

Blades yang berbalik, atau nada, dari angin untuk mengontrol kecepatan rotor dan menjaga rotor berputar dalam angin yang terlalu tinggi atau terlalu rendah untuk menghasilkan listrik.

11) *Rotor*

Baling-baling yang tergabung menjadi satu dengan As

12) *Tower*

Menara yang terbuat dari baja tabung (yang ditampilkan di sini), beton atau kisi baja. Karena kecepatan angin meningkat dengan tinggi, menara tinggi memungkinkan turbin untuk menangkap lebih banyak energi dan menghasilkan listrik lebih banyak.

13) *Wind direction*

turbin yang beroperasi melawan angin.

14) Wind vane

Alat untuk berkomunikasi dengan *yaw drive* untuk menggerakkan turbin dengan koneksi yang benar dengan arah angin.

15) Yaw drive

Yaw drive yang digunakan untuk menjaga rotor menghadap ke arah angin sebagai perubahan arah angin.

16) Yaw motor

Merupakan penggerak utama dari *drive yaw*.

17) Penyimpan energi (Battery)

Alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi.

10.3.2 Gearbox

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya Gearbox yang digunakan sekitar 1:60. Mengkonversi putaran kecepatan rendah dari poros masukan baling-baling kecepatan tinggi ke poros generator yang merupakan poros kecepatan tinggi. Gear box pada turbin angin menggunakan suatu roda gigi dengan sistem perplanetan. Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya Gearbox yang digunakan mempunyai rasio sekitar 1:60.

10.3.3 Brake System

Alat ini diperlukan saat angin berhembus terlalu kencang yang dapat menimbulkan putaran berlebih pada generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya: *overheat*, *rotor breakdown*, terjadi arus lebih pada generator. Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat

ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya: *overheat*, *rotor breakdown*, kawat pada generator putus, karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

10.3.4 Generator

Ada berbagai jenis generator yang dapat digunakan dalam sistem turbin angin, antara lain generator serempak (*synchronous generator*), generator tak-serempak (*unsynchronous generator*), rotor sangkar maupun rotor belitan ataupun generator magnet permanen. Penggunaan generator serempak memudahkan kita untuk mengatur tegangan dan frekuensi keluaran generator dengan cara mengatur-atur arus medan dari generator. Sayangnya penggunaan generator serempak jarang diaplikasikan karena biayanya yang mahal, membutuhkan arus penguat dan membutuhkan sistem kontrol yang rumit. Generator tak-serempak sering digunakan untuk sistem turbin angin dan sistem mikrohidro, baik untuk sistem *fixed-speed* maupun sistem *variable speed*.

10.3.5 Penyimpan energi

Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12 volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt. Kendala dalam menggunakan alat ini adalah alat ini memerlukan catu daya DC (*Direct Current*) untuk meng-

charge/mengisi energi, sedangkan dari generator dihasilkan catu daya AC (*Alternating Current*).

10.3.6 Rectifier-inverter

Rectifier berarti penyearah. Rectifier dapat menyearahkan gelombang sinusodal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. Inverter berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energi (aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka diperlukan inverter untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

10.3.7 Tower

Tower PLTB dapat dibedakan menjadi 3 jenis seperti gambar 10.9. Setiap jenis tower memiliki karakteristik masing-masing dalam hal biaya, perawatan, efisiensinya, ataupun dari segi kesusahan dalam pembuatannya.



Gambar 10.9. Tower PLTB (kiri) *Guyed* (Tengah) *Lattice* (kanan) *Mono-structure*

(Sumber: <https://ee.itk.ac.id/berita/detail/pengetahuan-teknik-elektro-bayu-si-penghasil-listrik>)

10. 4 Kelebihan dan kekurangan

Keuntungan utama dari penggunaan pembangkit listrik tenaga angin secara prinsipnya adalah disebabkan karena sifatnya yang terbarukan. Hal ini berarti eksploitasi sumber energi ini tidak akan membuat sumber daya angin yang berkurang seperti halnya penggunaan bahan bakar fosil. Oleh karenanya tenaga angin dapat berkontribusi dalam ketahanan energi dunia di masa depan. Tenaga angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, dimana penggunaannya tidak mengakibatkan emisi gas buang atau polusi yang berarti ke lingkungan.

Disamping karbon dioksida, pembangkit listrik tenaga angin menghasilkan sulfur dioksida, nitrogen oksida, polutan atmosfer yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan pembangkit listrik dengan menggunakan batubara ataupun gas. Namun, pembangkit listrik tenaga angin ini tidak sepenuhnya ramah lingkungan, terdapat beberapa masalah yang terjadi akibat penggunaan sumber energi angin sebagai pembangkit listrik, diantaranya adalah dampak visual, derau suara, beberapa masalah ekologi, dan keindahan.

Selain mengganggu pandangan akibat pemasangan barisan pembangkit angin, penggunaan lahan untuk pembangkit angin dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Hal ini yang membuat pembangkitan tenaga angin di daratan menjadi terbatas. Beberapa aturan mengenai tinggi bangunan juga telah membuat pembangunan pembangkit listrik tenaga angin dapat terhambat. Penggunaan tiang yang tinggi untuk turbin angin juga dapat menyebabkan terganggunya cahaya matahari yang masuk ke rumah-rumah penduduk. Perputaran sudu-sudu menyebabkan cahaya matahari yang berkelap-kelip dan dapat mengganggu pandangan penduduk setempat.

Efek lain akibat penggunaan turbin angin adalah terjadinya derau frekuensi rendah. Putaran dari sudu-sudu turbin angin dengan frekuensi konstan lebih mengganggu daripada suara angin pada ranting pohon. Selain derau dari sudu-sudu turbin, penggunaan *gearbox* serta generator dapat menyebabkan derau suara mekanis dan juga derau suara listrik.

Derau mekanik yang terjadi disebabkan oleh operasi mekanis elemen-elemen yang berada dalam rumah pembangkit listrik tenaga angin. Dalam keadaan tertentu turbin angin dapat juga menyebabkan interferensi elektromagnetik, mengganggu penerimaan sinyal televisi atau transmisi gelombang mikro untuk perkomunikasian.

DAFTAR PUSTAKA

- Hau, E. (2006). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition*. New York: Springer.
- Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Southamptin: WIT Press.
- Vaughn, N. (2009). *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment*. Florida: CRC Press.
- Burton, Tony, et al. *Wind Energy Handbook*. England : John Wiley & Sons, Ltd. 2001.
- WWEA, (2022). <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>
- ESDM, (2017). <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/2025-pemerintah-targetkan-18-gw-pembangkit-tenaga-bayu-terbangun-di-indonesia>
- Syah, M A R. (2021). Pengetahuan Teknik Elektro. <https://ee.itk.ac.id/berita/detail/pengetahuan-teknik-elektro-bayu-si-penghasil-listrik>
-, (2018). Pengenalan Komponen dan Prinsip Kerja Sistem pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (Pltb). <http://www.klik-aruslistrik.com/2018/06/pembangkit-listrik-tenaga-angin.html>
- Sutrisna, K. F. (2008). Generator Listrik untuk system PLTB/Mikrohidro. <https://konversi.wordpress.com/2008/07/22/generator-listrik-untuk-sistem-pltb-atau-mikrohidro/>

BIODATA PENULIS



Aldi Cahya Muhammad, B.Sc.Engg., M.Sc.Engg.
Engineer di PT. Radiant Group Jakarta

Lulus dari SMAN 1 Genteng Banyuwangi tahun 2013. Penulis melanjutkan studi dan lulus program Bachelors dan Masters of Science in Electrical and Electronic Engineering di salah satu universitas Organisasi Kerjasama Islam (OKI), Islamic University of Technology (IUT), Dhaka, Bangladesh lulus tahun 2019.

Karir pertama dimulai sebagai Bangladesh Business Manager di salah satu perusahaan Jepang, A-Wing Group. Setelah itu melanjutkan karir di perusahaan Radiant Group, Jakarta.

Beberapa research interest penulis antara lain Artificial Intelligence and Renewable energy. Penulis pernah mendapat penghargaan sebagai Best Paper di The 7th Indonesia International Geothermal Convention and Exhibition (IIGCE) 2019. Buku lain yang pernah ditulis diantaranya *Riset Operasi* dan *Dasar-Dasar Pembelajaran Mesin*.

Email Penulis: aldicahyamu@gmail.com

BIODATA PENULIS



Nita Nurdiana, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang

Penulis lahir di Palembangg tanggal 25 Februari 1978. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya pada tahun 1999 dan menyelesaikan program S2 pada Jurusan Teknik Elektro ISTN Jakarta pada tahun 2013.

BIODATA PENULIS



Dr. Rahmaniar, ST., MT.

Dosen Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Pembangunan Panca Budi

Penulis lahir di Banda Aceh pada tanggal 26 Juni 1976. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Pembangunan Panca Budi. Tahun 2021 menyelesaikan studi pada program pendidikan S-1 Prodi Teknik Elektro di Institut Teknologi Medan Tahun 1996-2001. Pendidikan tingkat S-2 diselesaikan pada tahun 2011 pada Prodi Teknik Elektro di Institut Sains dan Teknologi Nasional (ISTN) Jakarta dan Pendidikan S-3 bidang Pendidikan Teknologi dan Kejuruan di Universitas Negeri Padang (UNP) tahun 2015-2019. Selain Aktif dalam melaksanakan kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi sejak, sampai saat ini penulis aktif dalam organisasi profesi dan kemasyarakatan seperti, anggota Forum Teknik Elektro Indonesia, Anggota Asosiasi Dosen Republik Indonesia, Anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII) Wilayah Medan-Sumatera Utara tahun 2020-2024, Pengurus Masyarakat Ketenagalistrikan Indonesia (MKI) Wilayah Sumatera Utara.

BIODATA PENULIS



Habibi Santoso, S.T., M.T.

Dosen Program Studi DIII Pemeliharaan Mesin
Politeknik Negeri Media Kreatif Jakarta

Penulis lahir di Jakarta, pada tanggal 28 Juli 1985. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi DIII Pemeliharaan Mesin Politeknik Negeri Media Kreatif Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Budi Utomo dan pada tahun 2010, dan menyelesaikan S2 pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila pada tahun 2015. Pengalaman di industri dan konsultan *Mechanical & Electrical* selama lebih dari 10 tahun.

BIODATA PENULIS



Normansyah, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknologi Listrik Jurusan Perawatan dan Perbaikan Mesin Politeknik Negeri Ketapang

Normansyah, ST., MT. Lahir di Ketapang, 21 September 1976 sejak menamatkan pendidikan Sekolah Menengah Atas pada Jurusan IPA, memilih untuk masuk pada Pendidikan Diploma 3 Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak lulus tahun 2000, kemudian melanjutkan pada jenjang S1 Teknik Mesin pada Universitas Muhammadiyah Malang lulus tahun 2004. Pada Tahun 2007 lulus sebagai Tenaga Dosen Pada perguruan tinggi baru Politeknik Yayasan Pangeran Iranata kerjasama Pemerintah Daerah Kab. Ketapang. Kemudian mengikuti Metodologi Pembelajaran sebagai Tenaga Pengajar pada Politeknik Negeri Bandung "POLBAN" selama lebih kurang 3 (tiga) bulan. Pada tahun 2008 diamanahkan tugas sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin hingga tahun 2010, sebagai ketua jurusan merangkap sebagai kepala Laboratorium dan Bengkel selama 1 ½ semester, di tahun 2010 diamanahkan menduduki jabatan sebagai Wakil Direktur II hingga masa jabatan medio tahun 2019. Penulis menyelesaikan S2 pada jurusan Teknik Elektro, Program Studi Manajemen Energi Universitas Tanjungpura Pontianak pada tahun 2017. sejak menjadi dosen, mengampu beberapa mata kuliah pada jurusan Teknik Mesin, Gambar Teknik, Proses Produksi, Mesin Konversi Energi. Pada tahun 2015 pindah homebase ke Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ketapang dan mengampu beberapa mata kuliah,

Technopreneuership, Manajemen Pemeliharaan Perbaikan (Buku Ajar 2020), Manajemen Energi, Distribusi Tenaga Listrik, dan Instalasi Tegangan Menengah. Selama menjabat sebagai Wakil Direktur II, sejak 2012 Penulis berperan aktif dalam menyiapkan proses perubahan alih status Politeknik Ketapang menjadi salah satu Perguruan Tinggi Negeri Baru PTNB hingga di resmikan secara simbolik oleh Bapak Presiden Susilo Bambang Yudhoyono di Istana Negara pada tahun 2014.

BIODATA PENULIS



Ir. Marina Artiyasa, S.T., MT.IPM.

Dosen Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik dan Desain Universitas Nusa Putra Sukabumi
Jawa Barat Indonesia

Penulis lahir di Bandung tanggal 3 Desember 1973 dari seorang ibu cantik dan baik serta sabar bernama Etty Kusmayati dan bapak (alm) Kasrifin yang baik dan selalu mengajarkan banyak hal. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Elektro, Universitas Nusa Putra Sukabumi. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Telekomunikasi dan melanjutkan S2 Manajemen Telekomunikasi pada kelas karyawan. Penulis mempunyai hobi menulis dan juga membaca, juga memasak, dan jalan-jalan dan bersepeda, penulis sekarang sedang menyukai sesuai yang berbau kendaraan listrik seperti motor listrik dan mobil listrik, dan berharap kelak warga Indonesia banyak memakai kendaraan mobil listrik dan motor listrik untuk mengurangi polusi udara dan mengantisipasi bahwa kelak energi fosil akan habis kurang lebih 20 th lagi.

BIODATA PENULIS



Ir. Bambang Winardi, M.Kom.

Dosen Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Penulis lahir di Banyuwangi tanggal 16 Juni 1961. Penulis adalah dosen tetap pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro dan melanjutkan S2 pada Jurusan Sistem Informasi. Penulis menekuni bidang Menulis.

Berperan serta aktif dalam international conference yang didukung oleh IEEE, ICITACEE - International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (diselenggarakan tiap tahun, dipublikasikan di IEEE Explore dan terindex Scopus).

Penulis dapat dihubungi di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Jl. Prof. Soedarto, S.H., Kampus Tembalang, Semarang, Telepon/Fax (024) 7460057.

Alamat e-mail: bambang.winardi@elektro.undip.ac.id

BIODATA PENULIS



Dr. Agus Junaidi, ST., MT., IPM.

Dosen Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan

Penulis, anak ke dua dari lima bersaudara lahir di Tebing Tinggi tanggal 17 Juni 1977. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan. Melaksanakan Pendidikan S-1 Teknik Elektro di Institut Teknologi Medan Tahun 1996-2001, Pendidikan S-2 Dua (S2) Prodi Teknik Elektro Tahun 2002-2004 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), dan Pendidikan S-3 bidang Pendidikan Teknologi dan Kejuruan di Universitas Negeri Padang (UNP) tahun 2015-2019. Selain Aktif dalam melaksanakan kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi sejak tahun 2005 sampai saat ini, juga aktif dalam organisasi profesi dan kemasyarakatan seperti, anggota Forum Teknik Elektro Indonesia, Anggota Asosiasi Dosen Republik Indonesia, Penasehat Persatuan Insinyur Indonesia (PII) Wilayah Medan-Sumatera Utara tahun 2020-2024, Dewan Pakar Masyarakat Ketenagalistrikan Indonesia (MKI) Wilayah Sumatera Utara. Asesor Muda bidang Pembangkit Energi Listrik Kementerian ESDM Tahun 2021-2023.

BIODATA PENULIS



Atika Nandini, S.T., M.S.

Dosen Program Studi Teknik Kimia

Fakultas Teknik

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 06 Oktober 1993. Penulis adalah dosen tetap di Program Studi Teknik Kimia Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur. Pada tahun 2011, penulis menempuh pendidikan sarjana (S-1) di Program Studi Teknik Kimia Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur. Setelah lulus program sarjana pada tahun 2015, penulis melanjutkan studi program pascasarjana (S-2) dengan mendapatkan beasiswa pada Chemical Engineering Department-National Cheng Kung University (NCKU) di Taiwan. Kini penulis aktif dalam melakukan publikasi baik pada Jurnal nasional maupun Prosiding seminar. Bidang keahlian dari penulis yang saat ini digeluti adalah Bioteknologi, Biomass dan Energi serta Fermentasi.

BIODATA PENULIS



Dwi Feriyanto. S.T., M.Pd.

Dosen Program Studi DIII Teknik Elektronika
Fakultas Teknologi dan Informatika
Universitas Aisyah Pringsewu, Lampung

Penulis lahir di Jatibaru tanggal 26 Februari 1983. Penulis merupakan Dosen pada Program Studi DIII Teknik Elektronika Fakultas Teknologi dan Informatika Universitas Aisyah Pringsewu, Lampung. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro.