



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA
2024**

TEKNIK ENERGI SURYA, HIDRO, DAN ANGIN

**Zainul M. Pulungan
Feviana Idarrani
Amin Wahyono**

SMK/MAK Kelas XI

Hak Cipta pada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia
Dilindungi Undang-Undang

Penafian: Buku ini disiapkan oleh Pemerintah dalam rangka pemenuhan kebutuhan buku pendidikan yang bermutu, murah, dan merata sesuai dengan amanat dalam UU No. 3 Tahun 2017. Buku ini disusun dan ditelaah oleh berbagai pihak di bawah koordinasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Buku ini merupakan dokumen hidup yang senantiasa diperbaiki, diperbarui, dan dimutakhirkan sesuai dengan dinamika kebutuhan dan perubahan zaman. Masukan dari berbagai kalangan yang dialamatkan kepada penulis atau melalui alamat surel buku@kemdikbud.go.id diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini.

Teknik Energi, Surya, Hidro, dan Angin

untuk SMK/MAK Kelas XI

Penulis

Zainul M. Pulungan
Feviana Idarrani
Amin Wahyono

Penelaah

Eka Cahya Prima
Tatyantoro Andrasto

Penyelia/Penyelaras

Supriyatno
Wijanarko Adi Nugroho
Wuri Prihantini
Ria Triyanti

Kontributor

Ahmad
Chudhori
Didik Harjogi

Ilustrator

Rizki Arif Maulana

Editor

Christina Tulalessy
Wuri Prihantini

Editor Visual

Maya Lestari

Desainer

Erwin

Penerbit

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi

Dikeluarkan oleh

Pusat Perbukuan
Kompleks Kemdikbudristek Jalan RS. Fatmawati, Cipete, Jakarta Selatan
<https://buku.kemdikbud.go.id>

Cetakan Pertama, 2024

ISBN 978-634-00-0045-0 (no.jil.lengkap)
ISBN 978-634-00-0046-7 (jil.1 PDF)

Isi buku ini menggunakan huruf Noto Serif 10/18 pt., SIL Open Font License & Apache License.
xviii, 318 hlm.: 21 × 27 cm.

Kata Pengantar

Pusat Perbukuan, Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi memiliki tugas mengembangkan buku pendidikan di tingkat Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah. Penyusunan Buku Teks Utama ini mengacu pada Kurikulum Merdeka. Kurikulum tersebut memberikan keleluasaan kepada satuan pendidikan dalam melaksanakan pembelajaran sesuai dengan prinsip diversifikasi, memperhatikan kondisi masing-masing satuan pendidikan, potensi daerah, dan kebutuhan peserta didik.

Dalam mendukung implementasi Kurikulum Merdeka, pemerintah, melalui Pusat Perbukuan, mengembangkan buku siswa dan buku panduan guru sebagai sumber bahan pembelajaran. Buku-buku ini dapat dijadikan referensi atau inspirasi yang dapat dimodifikasi atau digunakan sebagai contoh, maupun rujukan dalam merancang dan mengembangkan pembelajaran yang sesuai dengan karakteristik, potensi, dan kebutuhan peserta didik. Buku ini disusun untuk mendukung siswa SMK agar memiliki pengetahuan, keterampilan, dan karakter yang relevan dan siap menghadapi tantangan dunia kerja. Buku ini berisi muatan/materi yang sesuai dengan kurikulum dan kebutuhan industri, sehingga peserta didik tidak hanya mendapatkan pengetahuan teori, tetapi juga mampu mengaplikasikan keterampilan secara langsung dalam kehidupan.

Sebagai dokumen yang terus berkembang, buku ini dapat diperbaiki dan disesuaikan dengan perkembangan keilmuan dan teknologi. Oleh karena itu, saran dan masukan dari guru, peserta didik, orang tua, dan masyarakat sangat diharapkan untuk pengembangan buku ini di masa mendatang. Buku ini diharapkan dapat memberikan inspirasi dan motivasi bagi seluruh pembaca untuk bersama-sama membangun pendidikan kejuruan yang berkualitas dan relevan dengan kebutuhan zaman. Pusat Perbukuan mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini, dan semoga buku ini bermanfaat, khususnya bagi peserta didik dan guru, dalam meningkatkan mutu pembelajaran.

Jakarta, Agustus 2024

Kepala Pusat,

Supriyatno

NIP 196804051988121001

Prakata

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin merupakan bagian dari ilmu Teknik Energi Terbarukan. Ilmu ini mengaplikasikan berbagai konsep ilmiah untuk memanfaatkan potensi alam menjadi energi listrik yang ramah lingkungan. Pada kelas XI, mata pelajaran Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin bertujuan untuk mengembangkan kompetensimu dalam memahami prinsip-prinsip dasar, komponen utama, serta metode perancangan dan pemasangan sistem pembangkit listrik tenaga surya, hidro, dan angin.

Ruang lingkup pembelajaran meliputi berbagai topik, seperti pengenalan prinsip kerja konversi energi surya, hidro, dan angin, perhitungan efisiensi dan performa sistem, serta langkah-langkah teknis dalam pemasangan sistem pembangkit tersebut. Dengan mempelajari topik-topik ini, kamu diharapkan mampu mengembangkan keahlian dalam teknik energi terbarukan, yang sangat dibutuhkan untuk mendukung transisi energi global menuju penggunaan energi bersih dan berkelanjutan.

Penyusunan buku ini mengacu pada Kurikulum Merdeka yang telah disesuaikan dengan kebutuhan industri dan dunia kerja (*Iduka*). Buku ini dilengkapi dengan penjelasan teoretis yang mendalam, studi kasus, dan aktivitas pembelajaran yang bertujuan untuk mendorong kamu bereksplorasi dan mengaplikasikan ilmu yang telah dipelajari. Dengan adanya pembahasan dan latihan praktis, diharapkan kamu dapat berperan aktif dalam menemukan solusi energi terbarukan yang inovatif dan relevan dengan kebutuhan lokal maupun global.

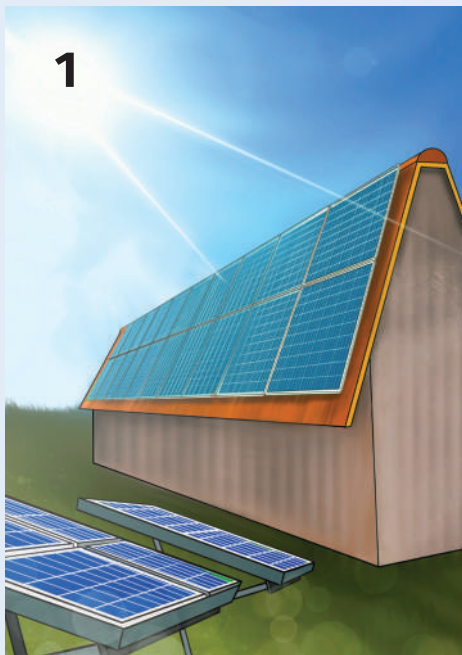
Harapan kami, buku ini dapat memotivasi kamu untuk lebih kreatif dan inovatif dalam menerapkan teknologi energi terbarukan, serta mampu menghadapi tantangan praktis yang ada di lapangan. Semoga buku ini dapat berkontribusi dalam peningkatan kualitas pembelajaran, serta mendorong kesadaran akan pentingnya menjaga keberlanjutan sumber daya energi di Indonesia.

___, Agustus 2024

Penyusun

Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Prakata	iv
Daftar Isi	v
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	xvi
Petunjuk Penggunaan Buku	xvii



Bab 1

Teknik Energi Surya	1
A. Konsep Dasar dan Komponen PLTS	4
B. Perencanaan dan Perancangan PLTS	38
C. Pemasangan PLTS	48



Bab 2

Teknik Energi Hidro	79
A. Energi Hidro	81
B. Perencanaan PLTMH	107
C. Pembangunan dan Pemasangan PLTMH	120



Bab 3

Teknik Energi Angin	143
A. Energi Angin	146
B. Komponen PLTB	163
C. Sistem dan Keselamatan Kerja	173
D. Perancangan PLTB Skala Kecil	175
E. Pembangunan dan Pemasangan PLTB Skala Kecil	205



Bab 4

Teknik Energi Hibrida	223
A. Konsep Dasar dan Komponen Energi Hibrida	226
B. Perancangan Energi Hibrida	246
C. Pemasangan Energi Hibrida	268

Glosarium	294
Daftar Pustaka	300
Daftar Sumber Gambar	304
Indeks	306
Pelaku Perbukuan	309

Daftar Gambar

Gambar 1.1	PLTS	3
Gambar 1.2	Peta Potensi Energi Surya di Indonesia	5
Gambar 1.3	Ilustrasi Proses Terjadinya Arus Listrik pada Sel Surya	6
Gambar 1.4	Blok Diagram PLTS	10
Gambar 1.5	Modul Surya	10
Gambar 1.6	Modul Surya Monokristalin	11
Gambar 1.7	Modul Surya Polikristalin	11
Gambar 1.8	Modul Surya Film Tipis	12
Gambar 1.9	Rangkaian Seri Panel Surya	13
Gambar 1.10	Rangkaian Paralel Panel Surya	14
Gambar 1.11	<i>Solar Charge Controller</i>	17
Gambar 1.12	SCC PWM	18
Gambar 1.13	SCC MPPT	18
Gambar 1.14	Inverter	19
Gambar 1.15	Inverter <i>Built-in</i> SCC	19
Gambar 1.16	Inverter tanpa <i>Built-in</i> SCC	20
Gambar 1.17	Baterai Asam Timbal	21
Gambar 1.18	Media Penyimpanan Listrik Jenis Baterai Aliran	22
Gambar 1.19	Baterai Lithium-ion	22
Gambar 1.20	Baterai Zinc-Air	23
Gambar 1.21	Rangkaian Baterai Seri dan Paralel	23
Gambar 1.22	<i>Combiner Box</i>	26
Gambar 1.23	Komponen <i>Combiner Box</i>	26
Gambar 1.24	Panel Distribusi DC	28
Gambar 1.25	Panel Distribusi AC	30
Gambar 1.26	Sistem PLTS	32
Gambar 1.27	Sistem PLTS <i>On-Grid</i>	33

Gambar 1.28	Sistem PLTS <i>Off-Grid</i>	34
Gambar 1.29	Konfigurasi Sistem DC <i>Coupling</i>	35
Gambar 1.30	Konfigurasi Sistem AC <i>Coupling</i>	35
Gambar 1.31	Sistem PLTS Hibrida	36
Gambar 1.32	<i>Rail</i>	51
Gambar 1.33	<i>Jointing Rail</i>	51
Gambar 1.34	<i>End Clamp</i>	51
Gambar 1.35	<i>Mid Clamp</i>	51
Gambar 1.36	<i>Grounding Lug</i>	51
Gambar 1.37	<i>Grounding Clip</i>	52
Gambar 1.38	<i>Cable Clip</i>	52
Gambar 1.39	<i>L Hook/L Feet</i>	52
Gambar 1.40	<i>Tile Hook</i>	52
Gambar 1.41	Klip Lok	52
Gambar 1.42	<i>Adjustable Tilt</i>	53
Gambar 1.43	Diagram Alir Pemasangan Dudukan dan Modul Surya pada PLTS di Atas Atap	54
Gambar 1.44	Pemasangan PLTS di Atas Atap	55
Gambar 1.45	PLTS di Atas Tanah	57
Gambar 1.46	Fondasi	58
Gambar 1.47	Pelat Dasar	58
Gambar 1.48	Tiang Penopang	58
Gambar 1.49	Penopang Modul Surya	59
Gambar 1.50	Pemasangan Pelat Dasar	60
Gambar 1.51	Pemasangan Tiang Penopang	61
Gambar 1.52	Pemasangan Penopang Modul Surya	61
Gambar 1.53	PJUTS	63
Gambar 1.54	Diagram Alir Pemasangan PJUTS	63
Gambar 1.55	Blok Diagram PLTS <i>Off-Grid</i>	65

Gambar 1.56	Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS <i>Off-Grid</i>	68
Gambar 1.57	Blok Diagram PLTS <i>On-Grid</i>	69
Gambar 1.58	Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS <i>On-Grid</i>	70
Gambar 1.59	Blok Diagram PLTS Hibrida	72
Gambar 1.60	Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS Hibrida	73
Gambar 2.1	Air Terjun	81
Gambar 2.2	Proses Kerja Bendungan/Waduk	83
Gambar 2.3	Proses Kerja <i>Pump Storage</i>	83
Gambar 2.4	Proses Kerja <i>Run of River</i>	84
Gambar 2.5	Bendung	86
Gambar 2.6	<i>Intake</i>	86
Gambar 2.7	Saluran Pelimpah	86
Gambar 2.8	Pipa Pesat	87
Gambar 2.9	Rumah Pembangkit	88
Gambar 2.10	Ilustrasi di dalam Rumah Pembangkit PLTMH	88
Gambar 2.11	Saluran Pembuang	89
Gambar 2.12	Elemen Turbin	89
Gambar 2.13	Sistem Transmisi Langsung antara Turbin dan Generator	91
Gambar 2.14	Transmisi Daya Tidak Langsung antara Turbin dan Generator	92
Gambar 2.15	Jenis Generator PLTMH	93
Gambar 2.16	Sistem Kerja <i>Ballast Load</i>	98
Gambar 2.17	Ilustrasi Sistem Kerja Beban dan <i>Ballast Load</i>	98
Gambar 2.18	<i>Ballast Load</i>	98
Gambar 2.19	Sistem Monitoring pada PLTMH	99
Gambar 2.20	Sistem Proteksi pada PLTMH	99
Gambar 2.21	<i>Layout</i> PLTMH	101
Gambar 2.22	Aliran Air pada Sistem Kerja PLTMH	102
Gambar 2.23	Perubahan Energi pada PLTMH	102
Gambar 2.24	Proses Kerja dari Sistem Mekanik ke Sistem Elektrik	103

Gambar 2.25	<i>Single Line Diagram (SLD)</i> PLTMH	103
Gambar 2.26	Komponen Utama Sistem Mekanik dan Elektrik	104
Gambar 2.27	Alur Kerja Sistem Kelistrikan pada PLTMH	104
Gambar 2.28	Perhitungan <i>Head</i> Menggunakan Turbin Reaksi	109
Gambar 2.29	Rugi-Rugi Daya pada PLTMH G.Fisher (2007)	111
Gambar 2.30	Aplikasi Jenis Turbin Berdasarkan Ukuran <i>Head</i> dan Debit Air	116
Gambar 2.31	Multimeter	121
Gambar 2.32	<i>Tank Ampere</i>	122
Gambar 2.33	<i>Vibration Meter</i>	122
Gambar 2.34	Termometer	122
Gambar 2.35	<i>Tachometer</i>	122
Gambar 2.36	Komponen Utama dan Pendukung Bendung dan <i>Intake</i>	123
Gambar 2.37	Sketsa 3D Dimensi Bendung dan <i>Intake</i>	124
Gambar 2.38	Sistem Kerja Bak Penenang	126
Gambar 2.39	3D Bak Penenang	126
Gambar 2.40	Saluran Pelimpah pada Bak Penenang	128
Gambar 2.41	Rancangan Pipa Pesat	130
Gambar 2.42	Rumah Pembangkit PLTMH	132
Gambar 3.1	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Besar di Inggris	145
Gambar 3.2	PLTB Sidrap Indonesia	145
Gambar 3.3	Pemasangan PLTB di Pulau Mandangin Madura Jawa Timur	146
Gambar 3.4	Potensi PLTB di Indonesia	147
Gambar 3.5	Anemometer Berbasis Android	148
Gambar 3.6	Proses Konversi Energi Angin	150
Gambar 3.7	Gaya Aerodinamis Bilah Turbin	150
Gambar 3.8	Nama Bagian <i>Airfoil</i>	151
Gambar 3.9	Pembagian Area <i>Airfoil</i> pada Sebuah Bilah Turbin	152
Gambar 3.10	Pembagian Posisi <i>Airfoil</i> pada Bilah Turbin PLTB	152
Gambar 3.11	PLTB Menggunakan Sumbu Horizontal (HAWT)	153

Gambar 3.12	Arah Panah Gerakan <i>Pitch</i> dan <i>Yaw</i> Turbin HAWT	153
Gambar 3.13	PLTB Model VAWT	154
Gambar 3.14	(a) Savonius; (b) Darrieus (c) Bilah Berbentuk H; (d) Bilah Berbentuk Heliks	154
Gambar 3.15	Gambaran Limitasi Betz	156
Gambar 3.16	Bagian Generator Low rpm	157
Gambar 3.17	Gaya Gerak Listrik dan Gaya Gerak Magnet	158
Gambar 3.18	Proses Konversi Energi Listrik AC-DC-AC	158
Gambar 3.19	Bagan Komponen PLTB Skala Kecil	159
Gambar 3.20	Sistem Jaringan Distribusi <i>On-Grid</i>	160
Gambar 3.21	Posisi Peralatan PLTB Sumbu Horizontal	163
Gambar 3.22	Posisi Komponen PLTB Sumbu Vertikal	165
Gambar 3.23	Bagian Generator PMSG	166
Gambar 3.24	Bagian Dalam <i>Gearbox</i>	167
Gambar 3.25	Posisi <i>Gearbox</i> pada PLTB Sumbu Horizontal	168
Gambar 3.26	Diagram <i>Control System</i> Pengaman Cuaca	169
Gambar 3.27	Accu dan Baterai Penyimpanan Energi Listrik	170
Gambar 3.28	Beberapa Model Inverter	171
Gambar 3.29	Peralatan Sistem Pengaman Personel	173
Gambar 3.30	Langkah Membangun PLTB	175
Gambar 3.31	Model Fondasi Bawah Laut (<i>Offshore</i>)	178
Gambar 3.32	Rancangan Fondasi PLTB 1.500 Watt	180
Gambar 3.33	Pembautan Penyangga dan Permukaan Fondasi	180
Gambar 3.34	Fondasi Jangkar dengan Tempat Pengait Tali Baja	181
Gambar 3.35	Posisi Fondasi Utama dan Fondasi Jangkar	182
Gambar 3.36	Penyangga Dilengkapi Tempat Span Skrup	183
Gambar 3.37	Penyangga dan Fondasi Truss	185
Gambar 3.38	Pembagian Posisi <i>Airfoil</i> pada Bilah Turbin	186
Gambar 3.39	Gambar Model <i>Airfoil</i>	186

Gambar 3.40	Desain Turbin dengan Mode NACA	187
Gambar 3.41	Persentase Pembagian Posisi Model <i>Airfoil</i>	187
Gambar 3.42	Bagian <i>Airfoil</i>	187
Gambar 3.43	Rencana Penulangan untuk Memperkuat Bilah Baling-Baling	189
Gambar 3.44	Posisi Pemasangan Turbin	189
Gambar 3.45	<i>Hub</i> Menghubungkan Bilah Baling-Baling	190
Gambar 3.46	<i>Chord Line</i> Saat Posisi Sejajar, Turbin Belum Bekerja	190
Gambar 3.47	<i>Cordline</i> Tidak Sejajar	191
Gambar 3.48	Kerangka Rumah Turbin	191
Gambar 3.49	<i>Main Shaft</i> dan <i>Bearing</i>	192
Gambar 3.50	<i>Output Gearbox</i> Terhubung dengan Generator	192
Gambar 3.51	Beberapa Model Pengarah Angin <i>Wind Tail</i>	193
Gambar 3.52	Sistem Pengereman Menggunakan <i>Wind Tail</i>	193
Gambar 3.53	Sistem Kunci Pengereman <i>Wind Tail</i> Tampak Belakang	194
Gambar 3.54	Diagram Blok Pengkabelan Generator PMSG	196
Gambar 3.55	Spesifikasi Generator PMSG	196
Gambar 3.56	Bagan Langkah Perancangan Sistem Kelistrikan	197
Gambar 3.57	Transformator dengan Berbagai Model	197
Gambar 3.58	Peralatan <i>Control Charging System</i> Pengisian Baterai	198
Gambar 3.59	Komponen Penyearah Tegangan <i>Rectifier</i>	198
Gambar 3.60	Sistem Pengisian Baterai yang Terintegrasi dan <i>Dumload</i>	199
Gambar 3.61	Peralatan Tester Baterai	200
Gambar 3.62	Baterai 12 Volt 100 Ah	201
Gambar 3.63	Peralatan Panel Kontrol dan Monitoring	201
Gambar 3.64	Warna Kabel Tegangan DC	202
Gambar 3.65	Standar Kabel AWG	203
Gambar 3.66	Posisi Fondasi Utama dan Fondasi Jangkar	205
Gambar 3.67	Pemasangan Tulangan Baja pada Fondasi Utama	206
Gambar 3.68	Pemasangan Tulangan Baja Fondasi Jangkar dengan Lubang <i>Spand</i> Skrup	206

Gambar 3.69	Penggunaan Waterpas untuk Pengujian Level Horizontal	207
Gambar 3.70	Penggunaan Waterpas untuk Pengujian Vertikal	207
Gambar 3.71	Fondasi Utama Model Penyangga Silinder	207
Gambar 3.72	Fondasi Model Truss	208
Gambar 3.73	Kotak Peralatan Perkakas	209
Gambar 3.74	Pemasangan Penyangga Model Silinder	210
Gambar 3.75	Pemasangan Baut Span dengan <i>Leveler</i> Horizontal dan Vertikal	210
Gambar 3.76	Pemasangan Penyangga Model Truss	211
Gambar 3.77	Perkakas dan Alat Ukur	213
Gambar 3.78	Kabel <i>Duck</i> , Baut <i>Dynabolt</i> , <i>Fisher</i> , dan Panel Pengaman dan Monitoring	213
Gambar 3.79	Bagan Kelistrikan Sistem PLTB	214
Gambar 3.80	Sistem Pengkabelan PLTB 1.500 Watt	214
Gambar 3.81	Logo dan Tanda <i>Grounding</i>	215
Gambar 3.82	Bagian Sistem <i>Grounding</i> dan Pemasangannya	216
Gambar 3.83	Simbol Komponen <i>Arester</i>	216
Gambar 3.84	Pengkabelan <i>Arester</i> , ELCB dan <i>Grounding</i> pada Sistem Kelistrikan PLTB	217
Gambar 4.1	Energi Hibrida PLN dan PLTS untuk Rumah Tangga	226
Gambar 4.2	<i>Off-Grid Hybrid PV-Wind-Diesel</i> untuk Persediaan Listrik pada Sebuah <i>Base Station</i>	227
Gambar 4.3	Konfigurasi Sistem Penyimpanan Listrik Hibrida PLTS-PLTD	228
Gambar 4.4	Beban Harian Penggunaan Energi Hibrida PLTS-PLTB-PLTD	229
Gambar 4.5	Grafik Konsumsi Energi Hibrida Setiap Bulan	229
Gambar 4.6	Energi Hibrida PLTS-PLTB dengan Sistem Penyimpanan <i>Fuel Cell</i>	230
Gambar 4.7	Sumber Energi Hibrida PLTS dan PLTD	231
Gambar 4.8	Model ATS yang Dapat Diprogram	232
Gambar 4.9	Diagram Energi Hibrida Blok PLTS-PLTB dan PLTMH	233
Gambar 4.10	Peta Pembangunan Rendah Karbon Indonesia	234
Gambar 4.11	PLTS <i>Off-Grid</i> sebagai Sumber Utama	236
Gambar 4.12	Hibrida PLTS Utama Ditambah Diesel sebagai Cadangan	238

Gambar 4.13	EMS (<i>Energy Manajemen System</i>) EBT (Energi Baru Terbarukan)	239
Gambar 4.14	Bagan IoT Meteran Listrik	240
Gambar 4.15	Memonitor Penggunaan Listrik dengan <i>Smartphone</i>	241
Gambar 4.16	DC Couple PLTS-PLTD Sinkronisasi	241
Gambar 4.17	Sinkronisasi Menggunakan PLC	242
Gambar 4.18	<i>Generator Synchronization Controller</i>	243
Gambar 4.19	ATS sebagai Pemindah Sumber Energi PLTS-PLTD	244
Gambar 4.20	Generator Set dengan Frame Base/Dudukan Mesin	247
Gambar 4.21	<i>Name Plate Generator Set</i>	247
Gambar 4.22	Saluran Udara Masuk dan Udara Buang Genset	248
Gambar 4.23	Informasi Peringatan dan Pencegahan	249
Gambar 4.24	<i>Hybrid Solar PV and wind</i> di Eropa	249
Gambar 4.25	Posisi Ladang Turbin Angin	250
Gambar 4.26	Bagian Alternator	252
Gambar 4.27	Bagian Penstabil Tegangan Alternator	254
Gambar 4.28	Bagian <i>Control Output Generator Set</i>	255
Gambar 4.29	Bagian Mesin Generator Set	255
Gambar 4.30	Bagan Sistem <i>Microgrid DC (Direct Current Microgrid)</i>	257
Gambar 4.31	Bagan Sistem <i>Microgrid AC</i>	258
Gambar 4.32	Desain Alat Pengering Menggunakan Energi Hibrida	259
Gambar 4.33	Wiring diagram untuk konversi energi tenaga surya ke tenaga listrik penggerak Motor.	260
Gambar 4.34	Hibrida PLTD dan PLTS	262
Gambar 4.35	Perencanaan Hibrida PLTB dan PLTS	263
Gambar 4.36	Kombinasi Energi Hibrida	268
Gambar 4.37	<i>Crane Mini</i> yang Dapat Berpindah	269
Gambar 4.38	Jarak Aman Penempatan Peralatan Generator Set	270
Gambar 4.39	Penempatan Genset dengan <i>Crane Mobile</i>	270
Gambar 4.40	Penempatan Koneksi Penyangga dan Fondasi	271

Gambar 4.41	Pemasangan Bilah Turbin	271
Gambar 4.42	Pemasangan Bagian Mekanik Turbin Angin	271
Gambar 4.43	Alat Pelindung Diri Kelistrikan	272
Gambar 4.44	Peralatan Pemasangan Energi Hibrida	273
Gambar 4.45	Generator Set Berbahan Bakar Biogas dan Biosolar	278
Gambar 4.46	<i>Solar Panel Monocrystalline</i>	279
Gambar 4.47	Inverter dengan Model Integrasi	280
Gambar 4.48	Bagian Inverter Integrasi	281
Gambar 4.49	Tampilan Layar LCD Mengukur Beberapa Titik Peralatan	282
Gambar 4.50	Sistem Pengkabelan Inverter Paralel Satu <i>Phase</i>	282
Gambar 4.51	Sistem Pengkabelan Inverter Paralel 3 <i>Phase</i>	283
Gambar 4.52	Diagram Sistem Kelistrikan Energi Hibrida	284
Gambar 4.53	SONOFF POW Ring Smart Power Meter	289
Gambar 4.54	Diagram Pengkabelan Power Meter	289
Gambar 4.55	Steker Cerdas dengan Koneksi Wireless Fidelity (Wifi)	290
Gambar 4.56	<i>Bridge</i>	291
Gambar 4.57	Logo Peralatan yang Bisa Saling Terhubung	291
Gambar 4.58	Topologi Jaringan Rumah Cerdas (<i>Smart Home</i>)	292

Daftar Tabel

Tabel 1.1	Parameter Pemasangan Modul Surya pada Atap	53
Tabel 2.1	Jenis Pembangkit Berdasarkan Kapasitas	84
Tabel 2.2	Jenis Turbin	90
Tabel 2.3	Daftar Ceklis Alat Pelindung Diri (APD)	120
Tabel 3.1	Perbedaan Fitur HAWT dan VAWT	155
Tabel 3.2	Daftar Kebutuhan Komponen PLTB Sumbu Horizontal	164
Tabel 3.3	Karakteristik Generator PLTB	166
Tabel 3.4	Contoh Hasil Studi Lapangan	175
Tabel 3.5	Spesifikasi Tali Baja Penguat	182
Tabel 3.6	Ukuran Bahan Penyangga Truss	184
Tabel 3.7	Warna Kabel Standar pada Instalasi Listrik	202
Tabel 4.1	Identifikasi Beban Listrik	264
Tabel 4.2	Contoh Formulir JSA Pemasangan Energi <i>Hybrid</i>	274
Tabel 4.3	Analisis Kebutuhan Listrik	278

Petunjuk Penggunaan Buku

Buku ini dirancang untuk membantu kamu dalam memahami materi secara sistematis dan interaktif. Setiap bab diatur untuk memudahkan pembelajaran dan mengajak kamu aktif berpartisipasi melalui berbagai kegiatan. Berikut ini panduan untuk memanfaatkan buku ini secara efektif.

Kata Kunci

Kata-kata penting yang berhubungan dengan materi di bab ini akan membantu kamu memahami konsep utama. Pelajari kata-kata ini untuk memudahkan pemahaman dan penguasaan materi.

Tujuan Pembelajaran

Setiap bab dimulai dengan tujuan pembelajaran. Bagian ini berfungsi untuk memberikan gambaran tentang keterampilan dan pengetahuan yang harus dicapai setelah mempelajari materi tersebut. Fokus pada tujuan ini agar kamu dapat memahami hasil yang diharapkan.



Peta Materi

Peta materi memberikan gambaran keseluruhan tentang alur dan struktur pembelajaran. Dengan melihat peta ini, kamu akan lebih mudah memahami hubungan antartopik yang dibahas dalam bab tersebut.

Apersepsi

Bagian ini dirancang untuk membantu kamu mengaitkan pengetahuan yang sudah dimiliki dengan materi yang akan dipelajari. Apersepsi bertujuan memudahkan kamu dalam menghubungkan konsep yang dikenal dengan informasi baru.

Materi dan Aktivitas Pembelajaran

Materi disajikan secara terstruktur bersama dengan aktivitas pembelajaran. Kamu akan diajak untuk aktif melalui berbagai kegiatan seperti diskusi, proyek, tugas individu, dan praktik. Aktivitas ini bertujuan membekali kamu dengan kompetensi sesuai program keahlian.

Uji Kompetensi

Di akhir bab, kamu akan menemukan uji kompetensi berupa soal-soal yang dirancang untuk mengukur pemahaman terhadap materi. Soal-soal ini bervariasi dari pilihan ganda, esai, hingga studi kasus, guna memastikan penguasaan materi.



Pengayaan

Bagi kamu yang ingin memperdalam materi, bagian pengayaan menyediakan informasi tambahan yang lebih mendalam. Ini dirancang untuk membantu kamu mengembangkan pengetahuan dan keterampilan yang lebih tinggi.

Refleksi

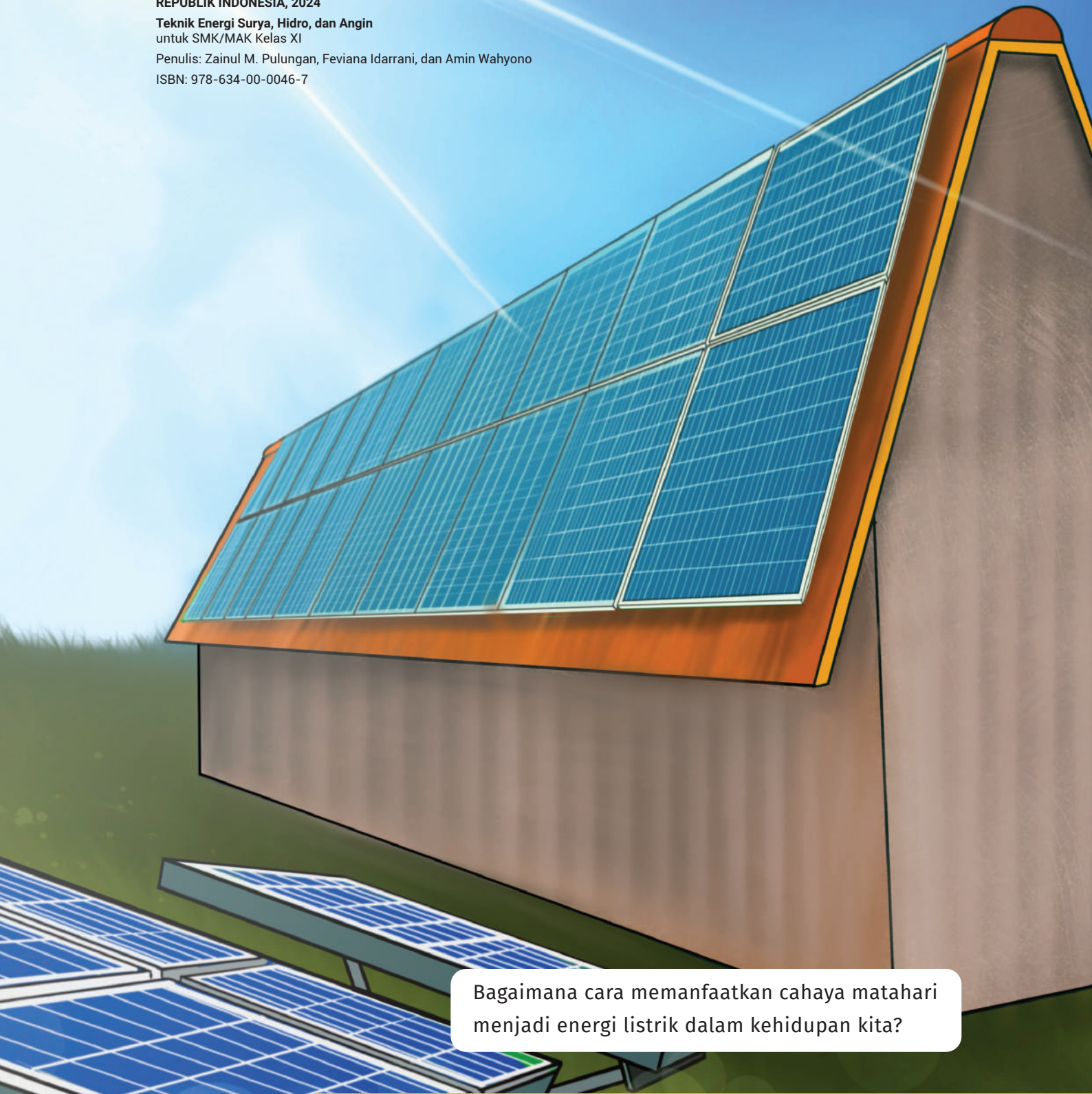
Bagian refleksi memberikan kamu kesempatan untuk menilai dan memberikan umpan balik terhadap proses pembelajaran yang telah dilalui. Ini akan membantu kamu mengidentifikasi kekuatan dan area yang perlu ditingkatkan, serta merencanakan langkah perbaikan ke depan.

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2024

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin
untuk SMK/MAK Kelas XI

Penulis: Zainul M. Pulungan, Feviana Idarrani, dan Amin Wahyono

ISBN: 978-634-00-0046-7



Bagaimana cara memanfaatkan cahaya matahari menjadi energi listrik dalam kehidupan kita?

Bab

**1
Teknik Energi Surya**

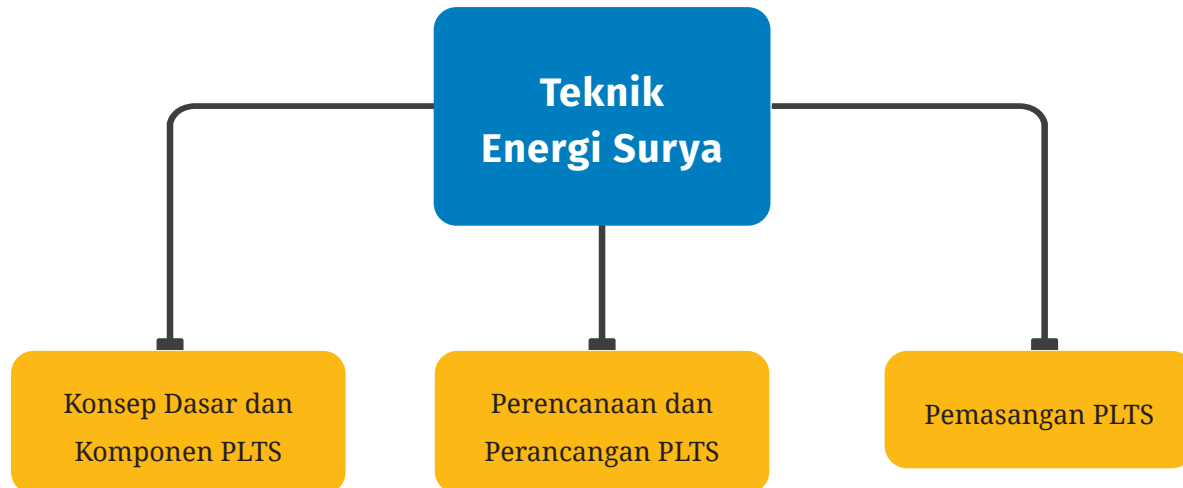
Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu memasang pembangkit listrik tenaga surya secara bergotong royong dan kreatif.

Kata Kunci

- modul surya
- inverter
- baterai
- sistem *on-grid*
- sistem *off-grid*

Peta Materi





Krisis energi merupakan salah satu isu global. Krisis energi di Indonesia makin mendesak karena kebergantungan pada bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil, seperti batu bara dan minyak bumi, menyumbang sebagian besar kebutuhan energi nasional. Namun, penggunaannya menyebabkan dampak lingkungan yang signifikan, termasuk pemanasan global dan kualitas udara yang buruk. Sebagai solusi, energi surya menawarkan potensi besar yang belum dimanfaatkan secara optimal. Dari Sabang hingga Merauke, Indonesia memiliki sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun. Hal ini menjadikannya kandidat ideal untuk pengembangan energi surya. Penggunaan panel surya dapat mengurangi kebergantungan pada bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta menyediakan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan bagi masyarakat.

Sebelum membahas lebih lanjut mengenai Teknik Energi Surya, amati video dari tautan di samping. Jelaskan apa saja isi video yang kamu amati. Jenis-jenis PLTS apa saja yang sudah dikembangkan di Indonesia?

Gambar 1.1 PLTS

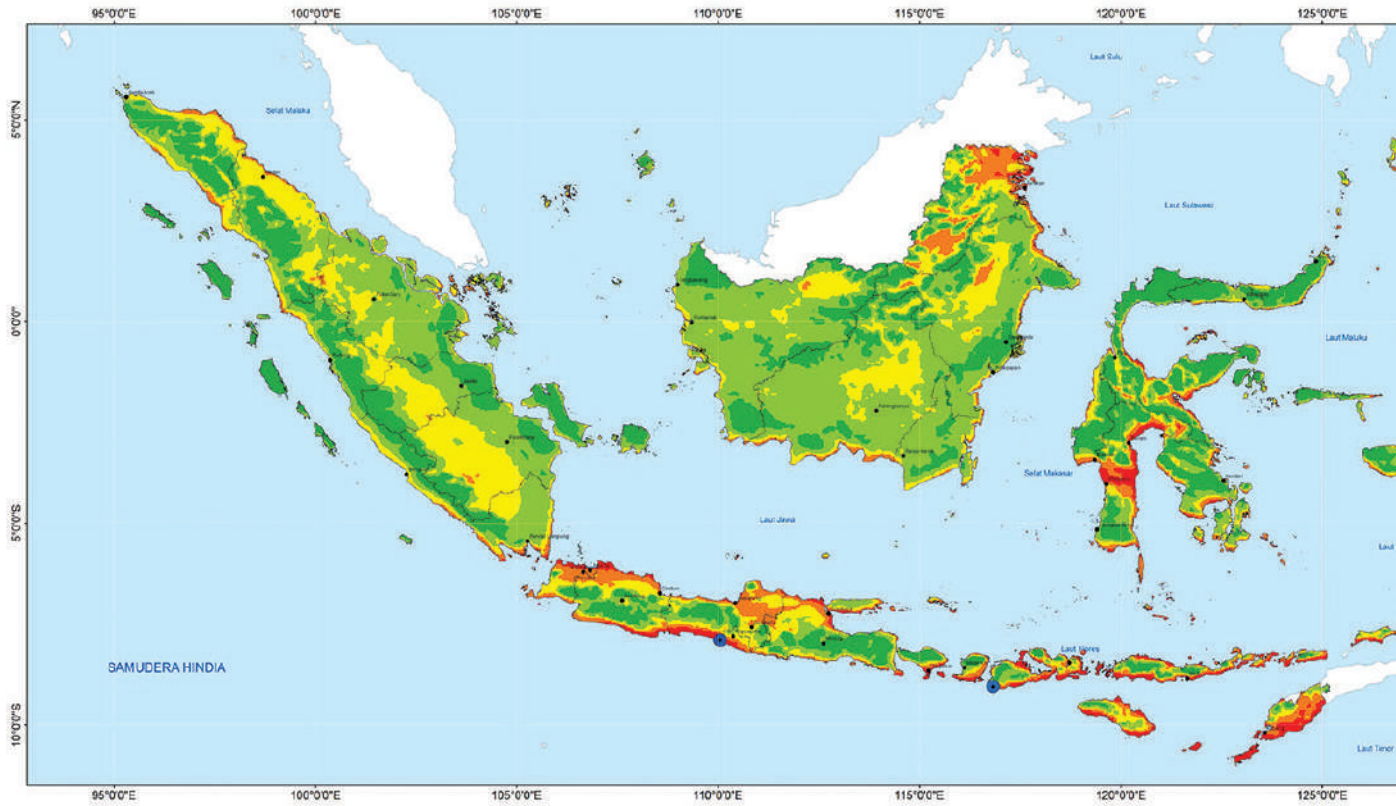
Sumber: [chandlervid85/freepik](https://www.youtube.com/@DitjenEBTKE)



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/s7xhiy>

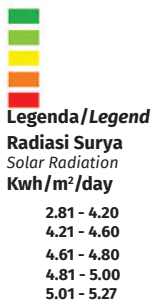
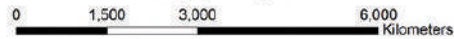
Sumber: <https://www.youtube.com/@DitjenEBTKE>

A. Konsep Dasar dan Komponen PLTS



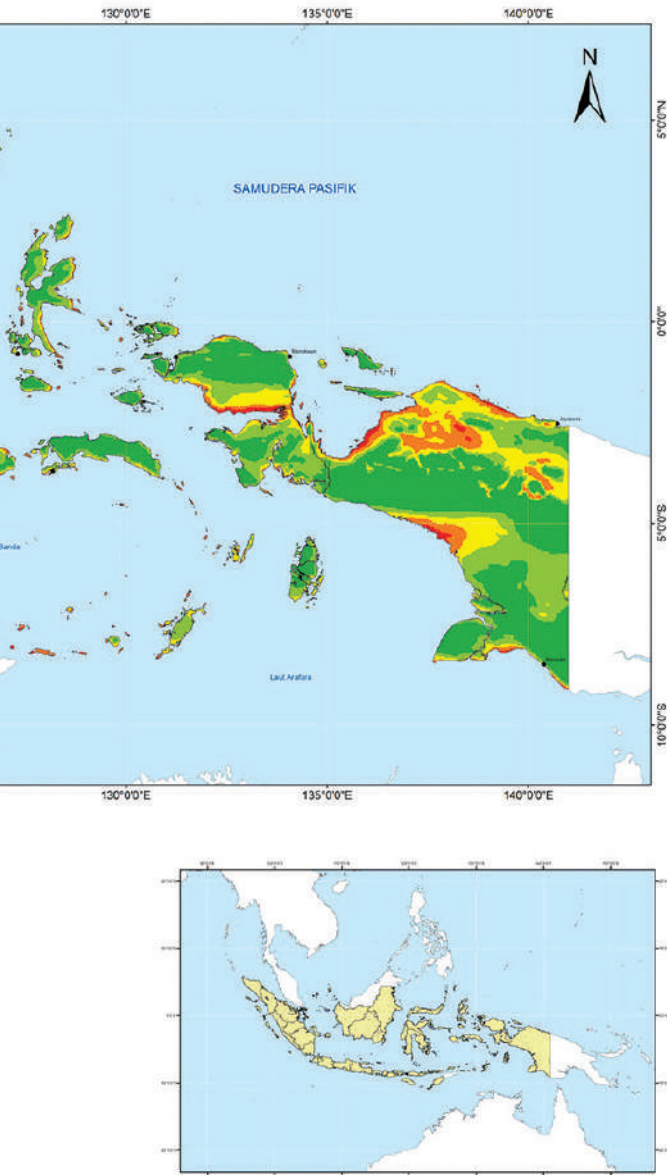
SKALA (SCALE) 1:5.000.000

Proyeksi Geographic
Geographic Projection



Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar. Hal ini didukung oleh data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Menurut Kementerian ESDM, Indonesia mendapatkan sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun. Hal itu menjadikan Indonesia tempat yang ideal untuk mengembangkan energi surya. Hampir seluruh wilayah Indonesia, mulai dari Sabang di ujung barat hingga Merauke di ujung timur, menerima radiasi matahari yang cukup tinggi. Artinya, kita memiliki peluang besar untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik. Perubahan tersebut dapat dilakukan melalui penggunaan panel surya, yang dapat dipasang di rumah, sekolah, atau tempat lainnya.

Selain memberikan sumber listrik yang bersih dan terbarukan, memanfaatkan energi surya juga membantu mengurangi polusi udara dan emisi gas rumah kaca. Kementerian ESDM juga mencatat bahwa penggunaan energi surya masih sangat minim di Indonesia, padahal potensinya sangat besar. Dengan memasang panel surya, kita tidak hanya menghemat biaya listrik, tetapi juga turut serta dalam menjaga lingkungan kita. Jadi, dengan dukungan data dari Kementerian ESDM, kita dapat melihat bahwa memanfaatkan energi surya ialah langkah penting untuk masa depan yang lebih hijau dan berkelanjutan di Indonesia. Mari, kita manfaatkan potensi besar ini dan berkontribusi untuk menjaga bumi kita tetap sehat!

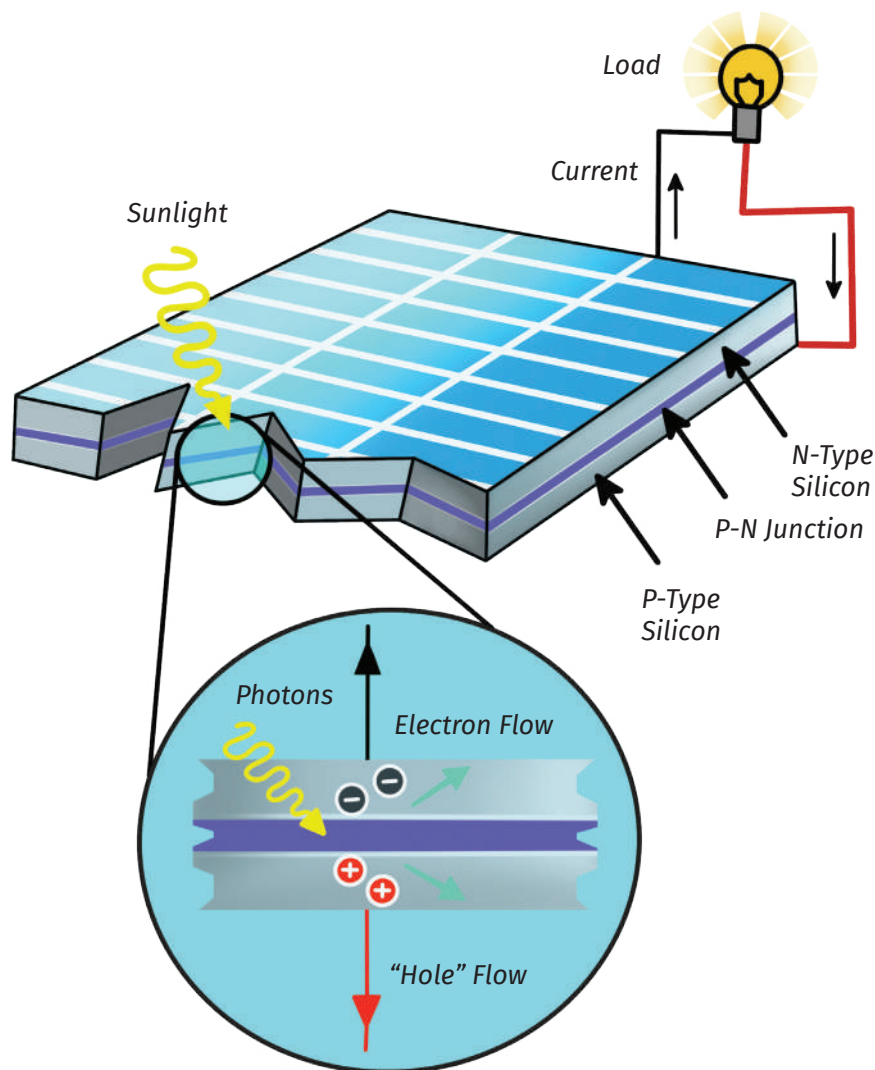


Gambar 1.2 Peta Potensi Energi Surya di Indonesia

Sumber: @P3TKEBTKE

1. Konsep Dasar PLTS

Prinsip kerja sel surya merupakan salah satu contoh bagaimana ilmu pengetahuan dapat mengubah sinar matahari menjadi energi yang berguna. Sel surya terbuat dari bahan yang disebut semikonduktor. Silikon ialah bahan semikonduktor yang paling umum digunakan. Di dalam sel surya, silikon diproses menjadi dua lapisan yang berbeda, yaitu lapisan tipe-P dan tipe-N. Lapisan tipe-P memiliki banyak “lubang” yang berfungsi sebagai tempat kosong bagi elektron. Lapisan tipe-N memiliki banyak elektron bebas. Ketika kedua lapisan ini bertemu, terbentuklah area khusus yang disebut *P-N Junction*.



Gambar 1.3 Ilustrasi Proses Terjadinya Arus Listrik pada Sel Surya

P-N Junction merupakan tempat magis di mana semua aksi terjadi. Ketika sinar matahari mengenai sel surya, partikel cahaya yang disebut *foton* menabrak permukaan sel. Tabrakan ini memberikan energi kepada elektron dalam lapisan tipe-N. Energi ini membuat elektron lepas dan bergerak ke lapisan tipe-P melalui P-N Junction. Gerakan elektron ini menciptakan arus listrik, yang dikenal sebagai *efek fotovoltaiik*. Efek ini pertama kali ditemukan oleh fisikawan Prancis, Alexandre Edmond Becquerel, pada tahun 1839. Becquerel menemukan bahwa arus listrik mulai mengalir ketika sinar matahari mengenai elektrode dalam larutan sensitif cahaya. Temuan Becquerel menjadi dasar teknologi sel surya.

Untuk menghasilkan listrik dalam jumlah besar, sel surya tidak bekerja sendirian. Mereka diintegrasikan menjadi sistem yang disebut Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dalam PLTS, banyak sel surya digabungkan menjadi *modul surya* yang disusun secara seri dan paralel. Penyusunan itu untuk meningkatkan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan. Bayangkan, ini seperti membangun sebuah tim *superhero* di mana setiap sel surya memiliki perannya masing-masing untuk menghasilkan listrik yang cukup besar.

Selain modul surya, ada komponen penting lainnya dalam PLTS, yaitu inverter. Inverter adalah perangkat yang mengubah

arus searah (DC) yang dihasilkan oleh sel surya menjadi arus bolak-balik (AC). Arus bolak-balik ini yang dapat digunakan oleh peralatan listrik di rumah dan disalurkan ke jaringan listrik. Tanpa inverter, listrik dari sel surya tidak dapat digunakan untuk menyalakan lampu atau perangkat elektronik kita.

PLTS juga sering dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi, seperti baterai. Baterai menyimpan listrik yang dihasilkan selama siang hari sehingga dapat digunakan saat malam hari atau saat cuaca mendung. Selain itu, ada sistem pengendali dan monitoring yang memantau kinerja seluruh sistem agar semuanya berfungsi dengan baik. Dengan semua komponen ini, PLTS dapat menyediakan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan, membantu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, dan mendukung upaya kita dalam menjaga lingkungan.

Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai konstruksi PLTS, silakan pindai QR Code berikut ini.



Aktivitas 1.1 Prinsip Kerja Sel Surya

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan prinsip kerja sel surya secara mandiri serta beriman, bertakwa kepada Tuhan YME dan berakhlak mulia.

Langkah-Langkah:

1. Perhatikan video melalui tautan di samping.
2. Dari penjelasan tautan video tersebut, bagaimana cara sel surya mengubah cahaya matahari menjadi listrik? Jelaskan.
3. Faktor-faktor apa yang memengaruhi efisiensi sel surya? Bagaimana kita dapat mengoptimalkan sel surya dalam kondisi cuaca yang berbeda?
4. Kerjakan latihan aktivitas ini di buku tugasmu, kemudian laporkan ke gurumu!



Sumber: <https://www.youtube.com/@LesicsIndo>

Aktivitas 1.2 Tipe Konstruksi PLTS

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan tipe konstruksi PLTS secara gotong royong dan kreatif.

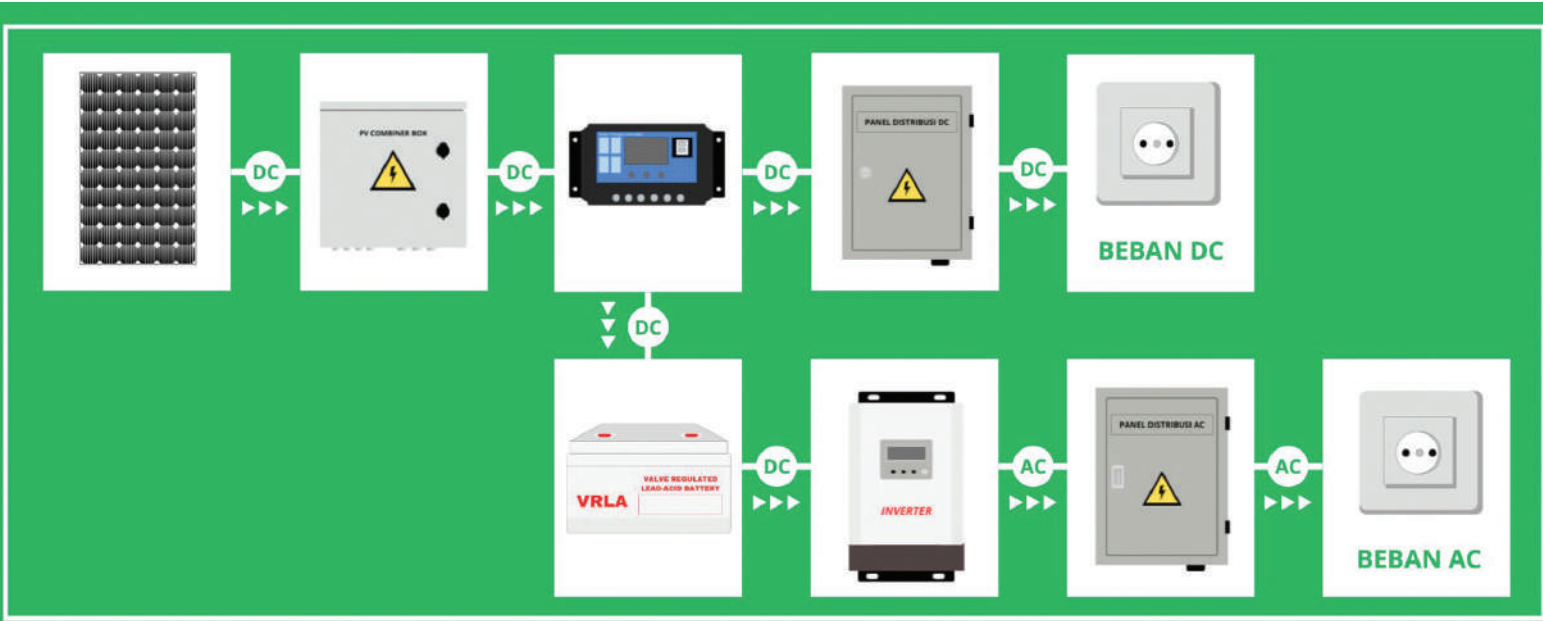
Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa.
2. Setiap kelompok diberi satu tipe konstruksi PLTS untuk didiskusikan secara mendalam: *rooftop*, *ground-mounted*, atau *floating*.
3. Setiap kelompok mendiskusikan tipe konstruksi PLTS yang ditugaskan, dengan fokus pada hal-hal berikut.
 - a. *Keunggulan dan Tantangan*: Mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan dari tipe konstruksi yang dibahas.

- b. *Aplikasi Industri*: Membahas di sektor industri mana tipe konstruksi tersebut paling efektif digunakan.
 - c. *Studi Kasus*: Mencari contoh proyek nyata yang menggunakan tipe konstruksi tersebut dan menganalisis keberhasilannya.
4. Kelompok membuat catatan dari hasil diskusi.
 5. Setiap kelompok menyusun presentasi berdasarkan hasil diskusi.
 6. Presentasi harus mencakup deskripsi tipe konstruksi PLTS, analisis keunggulan dan tantangan, serta aplikasi industri beserta contoh proyek nyata.
 7. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.

2. Komponen PLTS

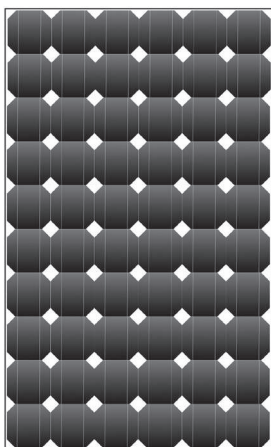
Diagram blok PLTS menggambarkan alur dan komponen utama dalam sistem tenaga surya. Sistem dimulai dari modul surya, yang mengonversi cahaya matahari menjadi listrik DC. Listrik DC dari modul surya kemudian mengalir ke *combiner box*, yang menggabungkan *output* dari beberapa *string* modul surya dan melindungi sistem dari arus balik. Dari *combiner box*, listrik diteruskan ke *Solar Charge Controller (SCC)*, yang mengatur pengisian baterai dan mencegah *overcharging*. Baterai menyimpan energi listrik untuk digunakan saat tidak ada sinar matahari. Listrik DC dari baterai kemudian dikirim ke inverter, yang mengubah listrik DC menjadi listrik AC. Listrik AC ini disalurkan ke panel distribusi AC untuk didistribusikan ke beban listrik rumah tangga atau industri. Panel distribusi DC juga tersedia untuk mendistribusikan listrik DC ke peralatan yang memerlukan. Sistem proteksi, termasuk pemutus sirkuit dan perangkat pengaman lainnya, dipasang untuk melindungi seluruh sistem dari kerusakan akibat lonjakan tegangan atau arus berlebih. Pengkabelan menghubungkan semua komponen ini, memastikan aliran listrik yang efisien dan aman di seluruh sistem PLTS.



Gambar 1.4 Blok Diagram PLTS

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

a. Modul Surya



Gambar 1.5 Modul Surya

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

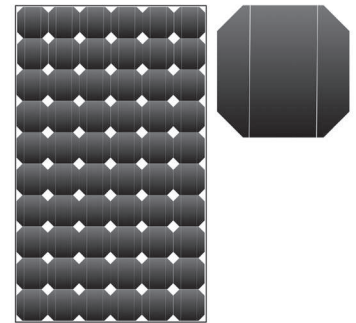
Modul surya adalah perangkat yang mengubah energi matahari menjadi listrik melalui sel-sel fotovoltaik yang terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon. Modul ini bekerja dengan menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi arus listrik searah (DC) yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan listrik. Modul surya digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari perumahan hingga industri. Modul surya tersedia dalam beberapa jenis seperti *monocrystalline*, *polycrystalline*, dan *thin-film*, yang masing-masing memiliki keunggulan tersendiri dalam hal efisiensi dan biaya. Sebagai solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan, modul surya membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi karbon, sekaligus menyediakan alternatif energi yang berkelanjutan.

1) Jenis Modul Surya

Ada tiga modul surya, yaitu modul surya monokristalin (*monocrystalline solar panels*), polikristalin (*polycrystalline solar panels*), dan modul surya film tipis (*thin-film solar panels*). Ayo, kita cermati masing-masing.

a) Modul Surya Monokristalin

Modul surya monokristalin (*monocrystalline solar panels*) terbuat dari silikon yang dibentuk menjadi kristal tunggal, menjadikannya lebih efisien dalam mengubah cahaya matahari menjadi listrik. Modul ini dikenal karena efisiensinya yang tinggi, biasanya berkisar antara 18-22%. Karena tingkat efisiensinya yang tinggi, modul monokristalin sering digunakan di lokasi dengan ruang terbatas, seperti atap rumah. Warna modul ini biasanya hitam dengan sudut sel yang melengkung. Meskipun harganya lebih mahal dibandingkan dengan jenis modul lain, daya tahan dan performanya yang unggul menjadikannya pilihan favorit untuk banyak proyek surya.

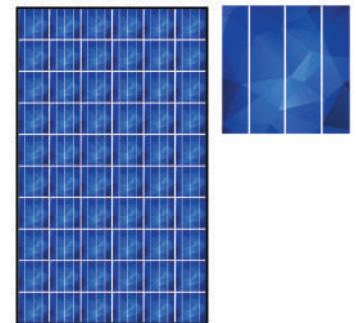


Gambar 1.6 Modul Surya Monokristalin

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

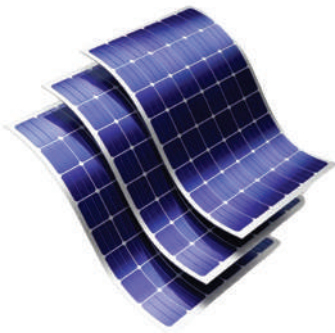
b) Modul Surya Polikristalin

Modul surya polikristalin (*polycrystalline solar panels*) terbuat dari potongan-potongan kristal silikon yang dilebur menjadi satu. Proses pembuatan ini lebih sederhana dan lebih murah dibandingkan dengan modul surya monokristalin, yang membuat modul polikristalin lebih ekonomis. Efisiensinya sedikit lebih rendah, sekitar 15-18%. Namun, modul ini tetap menjadi pilihan yang populer, terutama untuk proyek-proyek besar dengan ruang pemasangan yang luas. Modul ini biasanya berwarna biru dan memiliki bentuk sel yang lebih persegi dibandingkan dengan modul monokristalin. Meskipun efisiensinya lebih rendah, modul polikristalin masih memberikan solusi yang efektif dari segi biaya untuk instalasi skala besar.



Gambar 1.7 Modul Surya Polikristalin

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.8 Modul Surya Film Tipis

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

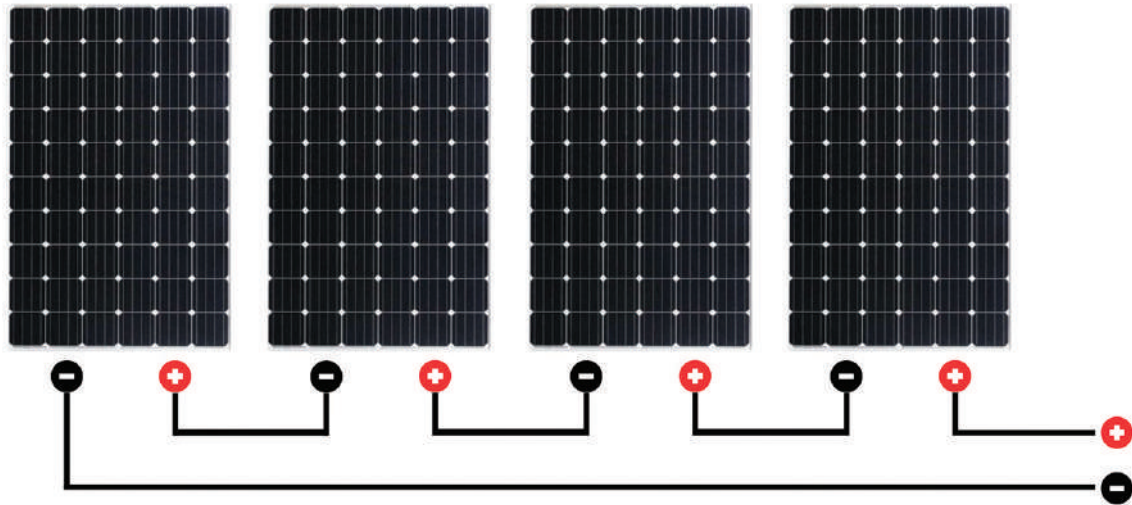
c) Modul Surya Film Tipis

Modul surya film tipis (*thin-film solar panels*) menggunakan lapisan tipis material fotovoltaik, seperti cadmium teluride (CdTe) atau silikon amorf (a-Si), yang diaplikasikan ke substrat seperti kaca atau plastik. Jenis modul ini lebih ringan, fleksibel, dan mudah diproduksi dalam jumlah besar, menjadikannya solusi yang hemat biaya. Namun, efisiensi modul film tipis lebih rendah, biasanya sekitar 10-12%. Akibatnya, membutuhkan lebih banyak ruang untuk menghasilkan daya yang sama seperti modul kristalin. Modul film tipis sering digunakan dalam aplikasi khusus seperti atap atau dinding bangunan, serta proyek-proyek besar yang memerlukan fleksibilitas material.

2) Rangkaian Modul Surya

Rangkaian modul surya dinamakan panel surya. Ada dua cara utama untuk menghubungkan modul surya: secara seri dan paralel. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada tegangan dan arus yang dihasilkan. Dalam pengkabelan seri, tegangan keluaran dari modul surya dijumlahkan, tetapi arus keluaran tetap sama. Sebaliknya, dalam pengkabelan paralel, arus keluaran ditambahkan, sementara tegangan keluaran tetap sama. Jadi, jika modul surya dihubungkan secara seri, tegangan akan bertambah, sedangkan dalam pengkabelan paralel, arus listrik yang akan meningkat.

Setiap modul surya memiliki dua terminal, yaitu positif dan negatif. Menghubungkan modul surya secara seri berarti menyambungkan terminal positif satu modul ke terminal negatif modul lainnya. Dalam konfigurasi ini, arus listrik tetap sama, tetapi tegangan bertambah. Misalnya, jika dua modul surya dengan tegangan 20 V dan arus 5 A dihubungkan secara seri, keluaran akhirnya akan menjadi 40 V dengan arus tetap 5 A. Ini cocok untuk sistem yang membutuhkan arus rendah dan dapat menghemat biaya kabel karena hanya memerlukan kabel pengukur kecil.

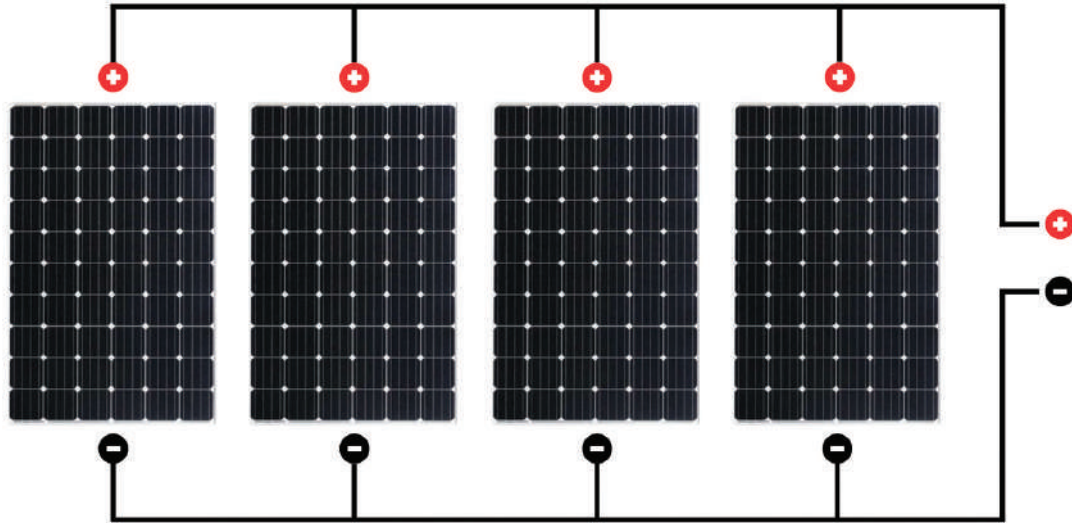


Gambar 1.9 Rangkaian Seri Panel Surya

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Menggunakan arus listrik rendah berarti kabel yang digunakan dapat lebih sedikit dan lebih murah. Selain itu, penting untuk menggunakan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) untuk pengontrolan muatan, terutama dalam sistem *off-grid*. MPPT mampu menerima input tegangan yang lebih tinggi dan mengoptimalkan pengisian baterai 12 V atau lebih. Pengkabelan seri direkomendasikan untuk kondisi tanpa naungan atau jika memerlukan sistem dengan arus rendah.

Menghubungkan modul surya secara paralel berarti menyambungkan semua terminal positif satu sama lain dan semua terminal negatif satu sama lain. Dalam konfigurasi ini, arus listrik akan meningkat, sementara tegangan tetap sama. Misalnya, jika dua modul dengan arus 10 A dihubungkan secara paralel, arus totalnya akan menjadi 20 A dengan tegangan tetap 20 V. Pengkabelan paralel cocok untuk kondisi minim cahaya matahari atau mendung karena sistem tetap bekerja optimal meskipun ada panel yang tertutup bayangan.



Gambar 1.10 Rangkaian Paralel Panel Surya

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek (2024)*

Keuntungan pengkabelan seri ialah lebih mudah dilakukan dan tidak memerlukan peralatan tambahan. Selain itu, arus yang rendah berarti kabel yang digunakan dapat lebih kecil dan murah, serta *output* optimal dari pagi hingga sore. Namun, kekurangannya ialah jika satu modul terhalang bayangan, keluaran daya sistem akan menurun. Sebaliknya, pengkabelan paralel bekerja dengan baik dalam kondisi minim cahaya dan tetap optimal meski ada modul yang tertutup bayangan, serta mengisi daya baterai lebih cepat. Namun, kekurangan pengkabelan paralel ialah memerlukan komponen tambahan dan kabel yang lebih tebal, yang berarti biaya lebih tinggi, serta hasil energi tidak optimal di awal dan akhir hari.

ISTILAH MODUL SURYA

Pada modul surya, ada beberapa istilah yang perlu dipahami, yakni sel surya, modul surya, panel surya, rangkaian string, dan rangkaian array. Secara teknis, kelima istilah tersebut memiliki perbedaan makna meskipun jika ada yang menyebutkan salah satu istilah tersebut, akan memahami apa yang dibahas. Berikut perbedaan makna dari kelima istilah tersebut.



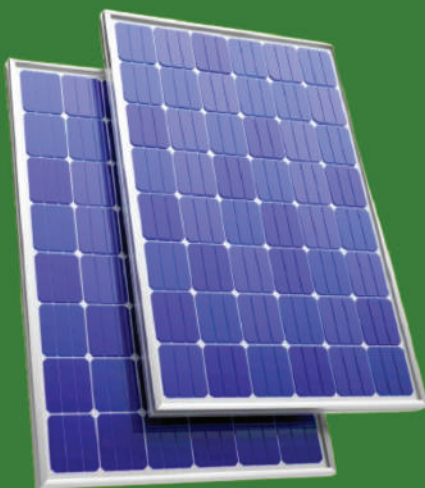
SEL SURYA

Unit dasar yang berfungsi untuk mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Sel ini terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon, yang menghasilkan arus listrik saat terkena cahaya.



MODUL SURYA

Modul surya, atau sering disebut juga sebagai panel surya, adalah kumpulan beberapa sel surya yang dihubungkan dan dikemas bersama dalam satu unit. Modul ini dirancang untuk menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik yang dapat digunakan.



PANEL SURYA



Sering digunakan secara bergantian dengan modul surya, tetapi kadang-kadang juga merujuk pada satu atau lebih modul surya yang dipasang bersama sebagai bagian dari sistem tenaga surya. Panel surya dapat terdiri atas satu atau beberapa modul surya yang dihubungkan untuk meningkatkan produksi listrik.

RANGKAIAN STRING



Rangkaian string adalah susunan modul surya yang dihubungkan secara seri. Dalam konfigurasi ini, arus listrik mengalir melalui setiap modul secara berurutan, yang meningkatkan tegangan total sistem.

RANGKAIAN ARRAY



Rangkaian array adalah kumpulan dari beberapa rangkaian string, modul surya atau panel surya yang dihubungkan bersama. Dalam rangkaian array, string-string ini dapat dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan kapasitas daya dan tegangan sistem sesuai kebutuhan. Rangkaian array biasanya digunakan dalam instalasi tenaga surya skala besar untuk menghasilkan energi yang lebih besar.

Berikut aktivitas latihan soal mengenai rangkaian seri dan paralel modul surya.

Contoh Soal:

1. Rahman memiliki tiga panel surya, masing-masing dengan tegangan keluaran 20 V dan arus 4 A. Berapa tegangan dan arus keluaran total jika panel-panel ini dihubungkan secara seri?

Jawaban:

Dalam rangkaian seri, tegangan total ialah jumlah dari tegangan setiap panel, sedangkan arus total tetap sama.

☞ Tegangan total: $20\text{ V} + 20\text{ V} + 20\text{ V} = 60\text{ V}$

☞ Arus total: 4 A

Jadi, tegangan keluaran total ialah 60 V dan arus keluaran total ialah 4 A.

2. Ari memiliki dua panel surya, masing-masing dengan tegangan keluaran 18 V dan arus 5 A. Berapa tegangan dan arus keluaran total jika panel-panel ini dihubungkan secara paralel?

Jawaban:

Dalam rangkaian paralel, tegangan total tetap sama, sedangkan arus total ialah jumlah dari arus setiap panel.

☞ Tegangan total: 18 V

☞ Arus total: $5\text{ A} + 5\text{ A} = 10\text{ A}$

Jadi, tegangan keluaran total ialah 18 V dan arus keluaran total ialah 10 A.

3. Fandi memiliki empat panel surya, masing-masing dengan tegangan keluaran 24 V dan arus 5 A. Jika kamu menghubungkan dua panel secara seri dan kemudian menghubungkan dua rangkaian seri ini secara paralel, berapa tegangan dan arus keluarannya?

Jawaban:

Pertama, hitung tegangan dan arus dari dua panel yang dihubungkan secara seri:

☞ Tegangan seri: $24\text{ V} + 24\text{ V} = 48\text{ V}$

☞ Arus seri: 5 A

Kemudian, hubungkan dua rangkaian seri ini secara paralel:

- Tegangan paralel: tetap 48 V
- Arus paralel: $5\text{ A} + 5\text{ A} = 10\text{ A}$

Jadi, tegangan keluaran total ialah 48 V dan arus keluaran total ialah 10 A.

Aktivitas 1.3 Modul Surya

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan modul surya pada PLTS secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Perhatikan kasus di bawah ini.

Sekolah kamu sedang merancang sistem energi surya untuk laboratorium sains. Kamu diberi tugas untuk menentukan konfigurasi terbaik dari panel surya yang akan digunakan. Setiap modul surya memiliki spesifikasi sebagai berikut:

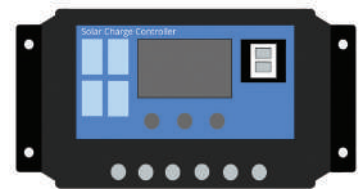
- Tegangan keluaran: 24 V
- Arus keluaran: 5 A

Laboratorium membutuhkan daya keluaran sebesar 1.440 W dengan tegangan sistem 48 V. Kamu perlu menentukan konfigurasi terbaik, baik itu rangkaian seri, paralel, atau kombinasi keduanya, yang dapat memenuhi kebutuhan daya laboratorium. Jelaskan langkah-langkah kamu dalam menentukan konfigurasi tersebut. Kemudian, hitung jumlah modul yang dibutuhkan dan bagaimana mereka akan dihubungkan.

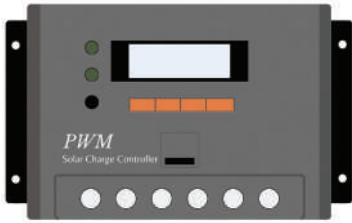
2. Kerjakan latihan aktivitas ini di buku tugasmu!
3. Presentasikan hasilnya di depan kelas.

b. Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) ialah perangkat yang mengatur aliran daya dari modul surya ke baterai dalam sistem PLTS. Fungsi utama SCC ialah memastikan bahwa baterai diisi dengan efisien dan aman. SCC juga berfungsi melindungi baterai dari pengisian berlebih (*overcharging*) atau pengosongan berlebih (*overdischarging*). Kedua hal ini dapat merusak baterai dan mengurangi masa pakainya.



Gambar 1.11 Solar Charge Controller
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.12 SCC PWM

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.13 SCC MPPT

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Berikut ini beberapa jenis SCC.

1) PWM (*Pulse Width Modulation*)

SCC jenis ini bekerja dengan menghubungkan langsung modul surya ke baterai dan mengurangi tegangan *output* dari modul surya untuk mencocokkan tegangan baterai saat pengisian.

2) MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

SCC MPPT lebih canggih karena dapat mengatur tegangan dan arus dari modul surya untuk selalu bekerja pada titik daya maksimum (*maximum power point*) yang optimal. Ini memungkinkan efisiensi pengisian daya yang lebih tinggi, terutama ketika kondisi cuaca berubah-ubah, seperti saat hari mendung.

Aktivitas 1.4 SCC

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu mampu menerapkan *Solar Charge Controller* (SCC) pada sistem PLTS dengan cara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Setiap kelompok diberikan tugas untuk menerapkan konsep pemasangan dan konfigurasi SCC pada sistem PLTS.
3. Tentukan jenis SCC yang paling sesuai dengan sistem PLTS yang dirancang. Pertimbangkan faktor seperti jenis baterai, kapasitas SCC, serta kebutuhan tegangan dan arus yang sesuai.
4. Tentukan juga lokasi optimal untuk pemasangan SCC, dengan memperhatikan aspek keamanan, jarak dari baterai, dan kemudahan akses untuk pemeliharaan.

5. Setelah itu, rancang diagram instalasi secara manual di papan tulis atau kertas besar. Diagram ini harus mencakup alur energi dari modul surya melalui SCC hingga ke baterai dan beban listrik, serta menunjukkan bagaimana SCC terhubung dengan komponen lain dalam sistem PLTS.
6. Setiap kelompok mempresentasikan hasil desain dan diagram instalasi mereka di depan kelas.

c. Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh sumber energi, seperti modul surya atau baterai, menjadi arus bolak-balik (AC). Arus bolak-balik ini yang dapat digunakan untuk mengoperasikan peralatan listrik rumah tangga, industri, atau dikirimkan ke jaringan listrik umum. Arus searah (DC) merupakan jenis arus yang dihasilkan oleh modul surya atau disimpan di dalam baterai. Arus bolak-balik (AC) merupakan jenis arus yang umum digunakan di sebagian besar sistem listrik komersial dan peralatan rumah tangga.

Inverter dapat dibagi menjadi dua jenis utama berdasarkan apakah mereka memiliki SCC yang terintegrasi atau tidak. Berikut penjelasannya.

1) Inverter dengan *Built-in* SCC

Inverter jenis ini memiliki SCC yang sudah terintegrasi di dalam perangkat. SCC berfungsi mengatur aliran daya dari modul surya ke baterai, memastikan bahwa baterai diisi dengan cara yang optimal dan mencegah *overcharging*. Dengan SCC yang terintegrasi, inverter ini dapat langsung terhubung ke modul surya dan baterai tanpa memerlukan perangkat tambahan. Inverter ini biasanya digunakan dalam sistem *off-grid* atau hibrida, di mana daya yang dihasilkan oleh panel surya digunakan untuk mengisi baterai sebelum digunakan oleh beban listrik atau dikirim ke *grid*. Kelebihan dari inverter jenis ini ialah kemudahan instalasi dan pengelolaan karena semua komponen utama sudah terdapat dalam satu unit.



Gambar 1.14 Inverter

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.15 Inverter Built-in SCC

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

2) Inverter tanpa Built-in SCC

Inverter jenis ini tidak memiliki SCC terintegrasi sehingga memerlukan SCC eksternal untuk mengatur pengisian daya dari modul surya ke baterai. Inverter ini hanya bertugas mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC) untuk digunakan oleh peralatan listrik atau diumpankan ke jaringan listrik. Jenis inverter ini sering digunakan dalam sistem *grid-tied* (terhubung ke jaringan listrik) yang tidak memerlukan baterai atau pada sistem *off-grid* yang menggunakan SCC terpisah. Keuntungan dari inverter tanpa SCC *built-in* ialah fleksibilitas dalam memilih dan mengonfigurasi SCC yang sesuai dengan kebutuhan sistem.



Gambar 1.16 Inverter tanpa Built-in SCC

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Aktivitas 1.5 Inverter

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu mampu menerapkan konsep pemasangan dan konfigurasi inverter pada PLTS secara bergotong royong dan kreatif.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Setiap kelompok akan menerapkan konsep pemasangan dan konfigurasi inverter pada sistem PLTS.
3. Tentukan jenis inverter yang paling sesuai dengan sistem PLTS yang akan dirancang. Pertimbangkan kapasitas inverter, jenis arus listrik (DC ke AC), serta efisiensi yang diinginkan.
4. Tentukan juga lokasi optimal untuk pemasangan inverter, dengan memperhatikan faktor-faktor seperti keamanan, ventilasi, dan aksesibilitas.
5. Setelah itu, rancang diagram instalasi. Diagram ini harus mencakup alur energi dari modul surya ke inverter hingga ke beban listrik, serta menunjukkan bagaimana inverter terhubung dengan komponen lain dalam sistem PLTS.
6. Setiap kelompok mempresentasikan hasil desain dan diagram instalasi mereka di depan kelas.

d. Baterai

Baterai adalah perangkat penyimpanan energi yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia. Dalam konteks sistem energi terbarukan seperti PLTS, baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya selama siang hari. Dengan demikian, energi tersebut dapat digunakan pada saat tidak ada sinar matahari, seperti pada malam hari atau ketika cuaca mendung.

Baterai yang sering digunakan dalam sistem PLTS memiliki karakteristik khusus yang memungkinkan mereka menyimpan dan melepaskan energi secara efisien untuk penggunaan jangka panjang. Berikut ini jenis baterai yang paling umum digunakan dalam PLTS.

1) Baterai Asam Timbal

Baterai asam timbal (*lead-acid battery*), khususnya *Deep Cycle Lead-Acid*, ialah jenis baterai yang paling umum digunakan dalam sistem PLTS *Off-Grid*. Baterai ini dirancang untuk menyediakan daya yang stabil dan mendalam, yang ideal untuk penyimpanan energi surya. Varian Flooded Lead-Acid (FLA) memerlukan perawatan rutin seperti pengisian air. Adapun varian Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA), termasuk Absorbed Glass Mat (AGM) dan Gel tidak memerlukan perawatan sehingga lebih populer untuk aplikasi di lokasi yang sulit dijangkau. Meskipun lebih murah, baterai asam timbal memiliki siklus hidup yang lebih pendek dan kapasitas penyimpanan yang lebih rendah dibandingkan dengan baterai jenis lain.

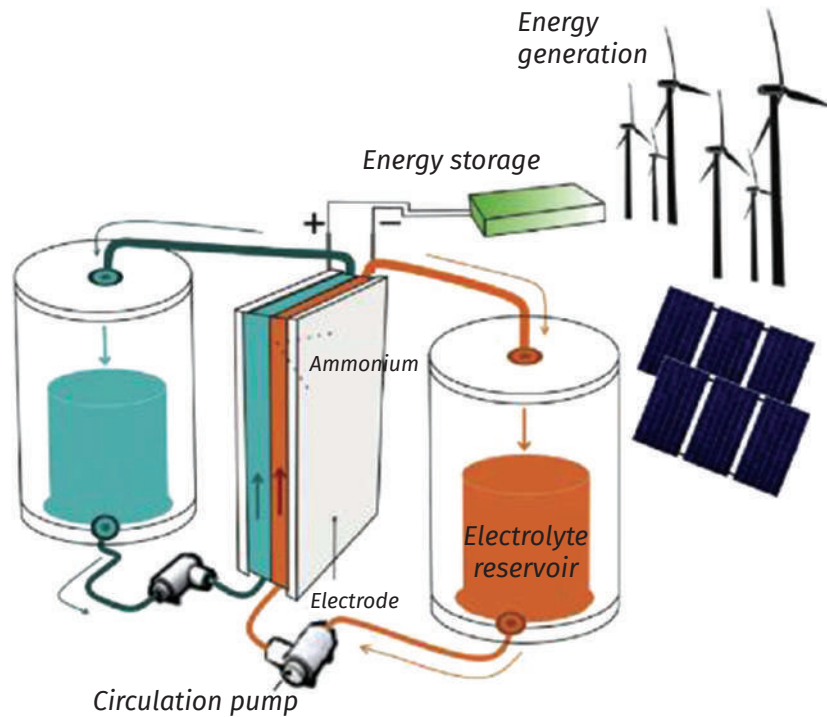
2) Baterai Aliran

Baterai aliran (*flow battery*) seperti tampak pada Gambar 4.17. Baterai aliran ialah tipe baterai di mana elektrolit yang mengandung satu atau lebih spesies elektroaktif yang larut mengalir melalui sel atau reaktor tempat energi kimia diubah menjadi energi listrik. Elektrolit tambahan disimpan di luar sistem, dalam tangki, dan dipompa melalui sel reaktor. Reaksi yang terjadi dapat dibalik, memungkinkan baterai untuk diisi ulang setelah digunakan. Baterai ini memiliki



Gambar 1.17 Baterai Asam Timbal
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

keistimewaan memiliki umur siklus yang sangat panjang dengan ribuan siklus tanpa penurunan kapasitas yang signifikan. Kapasitas penyimpanan energi yang fleksibel karena bergantung pada volume elektrolit. Cocok untuk penyimpanan energi skala besar dan aplikasi *grid-tied* energi terbarukan. (Chen dkk, 2016)



Gambar 1.18 Media Penyimpanan Listrik Jenis Baterai Aliran
 Sumber: Chen dkk. (2016)

3) Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion (li-ion) ini memiliki kelebihan di antaranya: kepadatan energi yang sangat tinggi. Efisiensi pengisian dan pelepasan energi yang tinggi (sekitar 95%). Ukuran yang relatif kecil dan ringan dan umur siklus panjang (500-2000 siklus bergantung pada jenisnya). Baterai ini diaplikasikan atau digunakan dalam kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel, dan sistem penyimpanan energi rumah tangga (seperti Tesla Powerwall).



Gambar 1.19 Baterai Lithium-ion
 Sumber: Feviana-Arifin,
 Kemdikbudristek (2024)

4) Baterai Lithium Iron Phosphate

Baterai Lithium Iron Phosphate (Li Fe PO₄ PO₄) memiliki stabilitas termal yang sangat baik, membuatnya lebih aman daripada baterai lithium-ion biasa. Umur siklus yang sangat panjang (dapat mencapai lebih dari 2.000 siklus) dan memiliki kinerja yang stabil di berbagai suhu. Aplikasi pada sistem penyimpanan energi rumah tangga, kendaraan listrik, dan aplikasi industri yang memerlukan daya tahan dan keamanan tinggi.

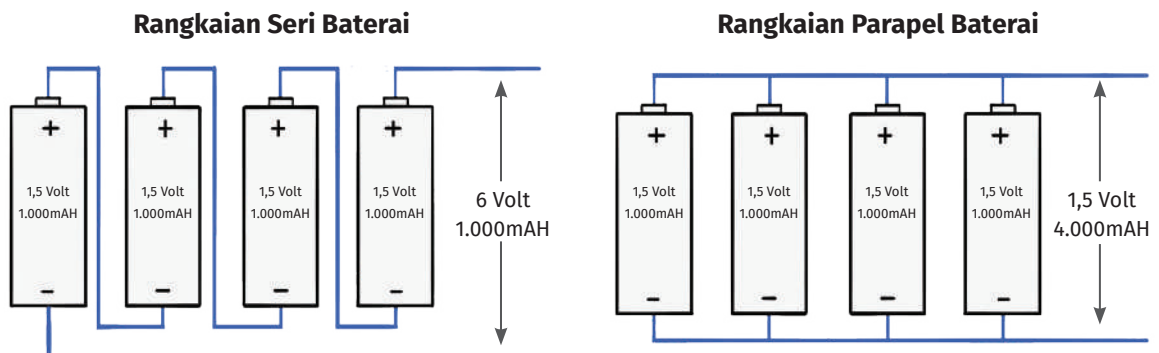
5) Baterai Zinc-Air

Baterai ini memiliki kelebihan dari segi biaya produksi yang relatif rendah karena menggunakan material yang melimpah dan tidak mahal. Kepadatan energi tinggi dan ramah lingkungan karena tidak menggunakan material beracun. Saat ini banyak digunakan untuk perangkat medis. Namun, ada penelitian untuk aplikasi penyimpanan energi skala besar.



Gambar 1.20 Baterai Zinc-Air
Sumber: Micelle Lewis/Elektrek (2023)

Rangkaian baterai adalah metode penghubungan baterai untuk mencapai spesifikasi tegangan dan kapasitas yang dibutuhkan dalam sistem penyimpanan energi. Terdapat dua cara utama untuk menghubungkan baterai: secara seri dan paralel. Kedua metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, bergantung pada kebutuhan aplikasi.



Gambar 1.21 Rangkaian Baterai Seri dan Paralel
Sumber: mangvapor (2024)

1) Rangkaian Seri

Ada kelebihan pada pemasangan baterai secara seri di antaranya: (1) meningkatkan tegangan *output* tanpa meningkatkan arus; (2) cocok untuk aplikasi yang memerlukan tegangan tinggi, seperti motor listrik atau inverter dengan input tegangan tinggi. Kekurangannya ialah: (1) jika salah satu baterai mengalami kerusakan atau lemah, kinerja keseluruhan sistem dapat terganggu; (2) semua baterai harus memiliki spesifikasi yang sama (kapasitas, tegangan, dan umur yang setara) untuk mencegah ketidakseimbangan.

2) Rangkaian Paralel

Sistem pemasangan paralel dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kapasitas (Ah) sehingga menyediakan lebih banyak energi total dan waktu operasi lebih lama pada tegangan yang sama. Jika satu baterai gagal, sistem masih dapat bekerja, meskipun dengan kapasitas berkurang. Kelemahannya ialah arus total meningkat sehingga membutuhkan kabel dan konektor yang mampu menangani arus yang lebih besar. Kelemahan lainnya ialah lebih rentan terhadap ketidakseimbangan arus jika kapasitas atau kondisi baterai tidak seragam.

Aktivitas 1.6 Konfigurasi Baterai

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan konfigurasi baterai pada PLTS secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Perhatikan kasus di bawah ini.

Kamu memiliki sebuah rumah yang ingin dipasang PLTS untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 2.400 Wh. Rumah ini terletak di daerah yang mendapatkan paparan sinar matahari yang cukup konsisten. Untuk sistem penyimpanan, kamu memiliki pilihan baterai dengan spesifikasi sebagai berikut.

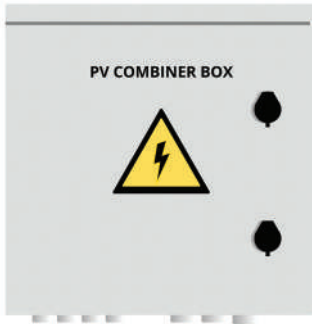
Kapasitas baterai: 200 Ah

Tegangan baterai: 12 V

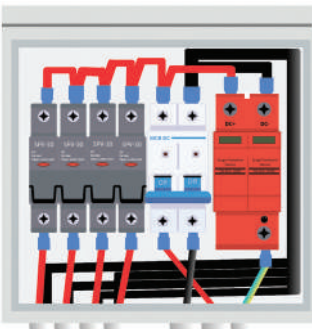
Tugas:

- Hitung jumlah baterai yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 2.400 Wh. Pertimbangkan dua skenario konfigurasi baterai: satu dalam rangkaian seri untuk mencapai tegangan yang diperlukan dan satu dalam rangkaian paralel untuk mencapai kapasitas penyimpanan yang memadai.
- Dalam konfigurasi seri, tentukan berapa banyak baterai yang diperlukan untuk mencapai tegangan yang sesuai dengan sistem PLTS (misalnya, 24 V atau 48 V).
- Dalam konfigurasi paralel, tentukan berapa banyak baterai yang diperlukan untuk memenuhi kapasitas penyimpanan energi yang dibutuhkan.
- Berdasarkan perhitungan, rancang dua konfigurasi baterai.
 - o *Rangkaian Seri*: Buatlah diagram yang menunjukkan bagaimana baterai-baterai dihubungkan dalam rangkaian seri untuk mencapai tegangan yang diinginkan.
 - o *Rangkaian Paralel*: Buatlah diagram yang menunjukkan bagaimana baterai-baterai dihubungkan dalam rangkaian paralel untuk mencapai kapasitas penyimpanan yang memadai.
- Gambarlah diagram dari kedua konfigurasi baterai (seri dan paralel) di papan tulis atau kertas besar. Diagram harus menunjukkan sambungan baterai, alur energi dari baterai ke sistem, dan bagaimana konfigurasi masing-masing memengaruhi kapasitas dan tegangan sistem.
- Jelaskan dalam tulisan bagaimana setiap konfigurasi (seri dan paralel) memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem penyimpanan energi. Diskusikan kelebihan dan kekurangan dari setiap konfigurasi dalam konteks kebutuhan energi harian rumah tersebut.
- Tulis penjelasan tentang dampak setiap konfigurasi baterai pada kinerja sistem PLTS. Perjelas bagaimana pilihan konfigurasi memengaruhi efisiensi dan daya tahan sistem penyimpanan energi.

2. Kerjakan latihan aktivitas ini di buku tugas kamu!



Gambar 1.22 *Combiner Box*
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.23 *Komponen Combiner Box*
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

e. *Combiner Box*

Combiner box ialah komponen yang menggabungkan *output* dari beberapa *string* modul surya menjadi satu aliran listrik sebelum menuju SCC atau inverter. Selain itu, *combiner box* melindungi sistem dengan sekering atau pemutus arus untuk mencegah kerusakan akibat arus berlebih, serta sering dilengkapi fitur monitoring untuk memantau kinerja setiap *string*.

Komponen- komponen yang terdapat pada *combiner box* seperti berikut.

1) *Miniature Circuit Breaker DC*

Miniature Circuit Breaker DC (MCB DC) adalah perangkat pemutus arus yang dirancang untuk melindungi sirkuit listrik arus searah (DC) dari kerusakan akibat arus berlebih atau korsleting.

2) *Fuse Holder*

Fuse holder ialah komponen yang digunakan untuk menempatkan dan memegang *fuse* dengan aman di dalam sirkuit listrik.

3) *Surge Protective Device*

Surge Protective Device (SPD) merupakan perangkat yang dirancang untuk melindungi peralatan listrik dari lonjakan tegangan mendadak atau “*surge*” yang dapat terjadi akibat petir, gangguan jaringan listrik, atau penyebab lainnya.

Aktivitas 1.7 Penggunaan *Combiner Box*

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan konsep penggunaan *combiner box* pada sistem PLTS secara bergotong royong dan berkebinekaan global.

Langkah-Langkah:

1. Buat beberapa kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Studi kasus

Kamu merupakan bagian dari tim yang ditugaskan untuk merancang sistem *combiner box* untuk sebuah PLTS di sebuah pabrik kecil. Pabrik ini menggunakan

panel surya untuk menghasilkan energi yang akan digunakan dalam proses produksi mereka. Sistem PLTS yang dirancang harus dapat menangani beberapa rangkaian modul surya yang mengumpulkan energi dari berbagai lokasi di atap pabrik dan mengirimkan energi tersebut ke inverter utama.

a. Jumlah Modul Surya:

Pabrik memiliki 24 modul surya yang dipasang di atap dengan distribusi sebagai berikut:

6 *string* modul, masing-masing terdiri atas 4 modul yang dihubungkan secara seri dalam setiap *string*.

b. Spesifikasi Modul Surya:

- o Tegangan Operasional: 36 V per modul
- o Arus Operasional: 8 A per modul

c. Kebutuhan Sistem:

- o Setiap *string* menghasilkan tegangan total 144 V ($36\text{ V} \times 4$ modul) dan arus 8 A.
- o Sistem harus menghubungkan *output* dari 6 *string* ke satu input ke inverter utama.
- o Diperlukan proteksi dari arus lebih dan hubung singkat untuk setiap *string*.

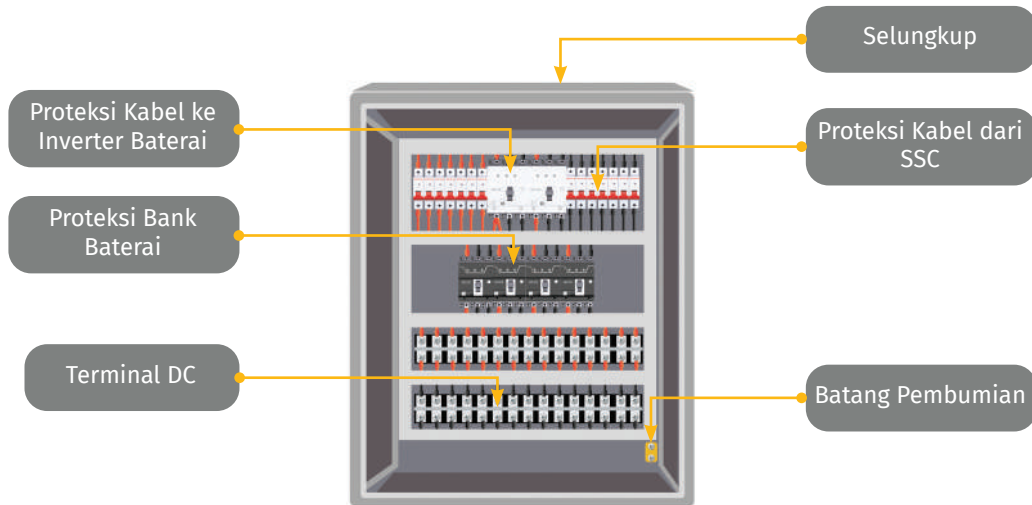
3. Tugas kelompok

- a. Tentukan jumlah dan jenis *fuse* atau pemutus sirkuit yang diperlukan untuk setiap *string*. Setiap *string* harus memiliki proteksi yang memadai untuk mencegah kerusakan akibat arus lebih atau hubung singkat.
- b. Desain sistem pengumpulan kabel dari setiap *string* ke satu *output* utama ke inverter. Pastikan bahwa pengaturan kabel dilakukan dengan aman dan efisien.
- c. Buat diagram sistem *combiner box* yang mencakup hal berikut.
 - o Jumlah *string* yang dihubungkan.
 - o Tipe dan *rating fuse* atau pemutus sirkuit yang digunakan.
 - o Konfigurasi kabel dari *string* ke *combiner box* dan dari *combiner box* ke inverter.
 - o Alur energi dari modul surya melalui *combiner box* hingga inverter.

4. Presentasikan diagram dan desain sistem *combiner box* di depan kelas. Jelaskan pilihan *fuse* atau pemutus sirkuit yang dipilih, serta bagaimana sistem mengumpulkan dan menghubungkan energi dari beberapa *string* modul surya ke sistem *output*.

f. Panel Distribusi DC

Panel distribusi DC merupakan perangkat yang digunakan untuk mendistribusikan dan mengelola aliran arus searah (DC) dalam sistem listrik, seperti dalam sistem PLTS. Panel ini memainkan peran penting dalam memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel surya didistribusikan dengan aman dan efisien ke berbagai beban atau komponen dalam sistem.



Gambar 1.24 Panel Distribusi DC

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

1) Proteksi kabel keluar ke inverter baterai melindungi kabel keluar menuju inverter baterai terhadap arus berlebih dan hubungan arus pendek.

4) Proteksi bank baterai digunakan untuk melindungi setiap *string* baterai dalam bank baterai terhadap hubungan arus pendek. MCB atau sekering biasanya digunakan untuk tujuan ini.

5) Selungkup (*enclosure*) tempat dipasangnya perangkat proteksi dan *busbar*.

2) Terminal DC atau *busbar* ialah titik interkoneksi antara bank baterai, SCC, dan inverter baterai. Perangkat ini bertujuan untuk menghubungkan beberapa perangkat ke dalam sebuah konduktor yang sama. Perangkat ini terbuat dari konduktor tembaga padat dan berlapis timah untuk proteksi korosi.

3) Proteksi kabel masuk dari SCC berfungsi untuk memberikan perlindungan tambahan terhadap arus berlebih (*overcurrent*) atau hubungan arus pendek pada SCC dan kabel dari SCC.

6) Batang penumaian (*grounding bar*) menyediakan koneksi penumaian untuk selungkup jika selungkup terbuat dari bahan yang dapat menghantarkan listrik.

Aktivitas 1.8 Panel Distribusi DC

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

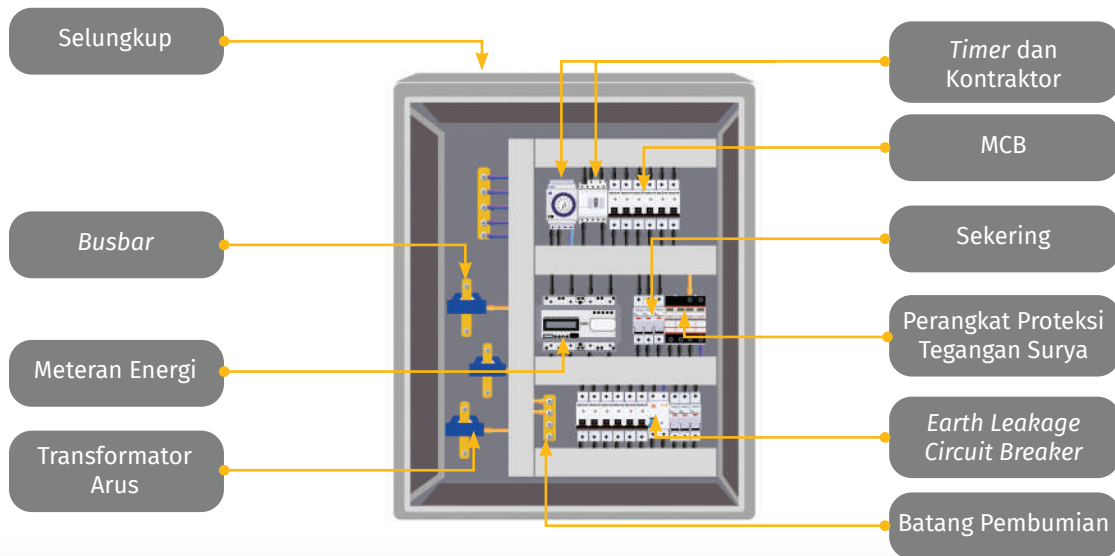
Setelah mengerjakan aktivitas ini, kamu mampu merancang dan menerapkan panel distribusi DC untuk PLTS secara bergotong royong dan berkebinekaan global.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa. Setiap kelompok akan bekerja sama dalam merancang panel distribusi DC untuk sistem PLTS.
2. Studi Kasus:
 - a. Bayangkan sebuah sistem PLTS di sebuah gedung yang membutuhkan distribusi energi untuk beberapa peralatan DC. Sistem ini terdiri atas 6 *string* modul surya, masing-masing dengan tegangan 48 V dan arus 8 A. Ada 3 jalur beban DC yang harus didistribusikan: satu untuk pencahayaan, satu untuk ventilasi, dan satu untuk peralatan lainnya.
 - b. Distribusi DC harus menyediakan proteksi untuk setiap jalur dari arus lebih dengan *fuse* atau pemutus sirkuit, serta mengatur penghubungan kabel dari modul surya ke beban DC secara efisien dan aman.
3. Tugas Kelompok:
 - a. Rancang panel distribusi DC dengan mempertimbangkan input dari 6 *string* modul surya dan *output* ke 3 jalur beban DC. Tentukan lokasi *fuse* atau pemutus sirkuit dan atur koneksi kabel dari modul surya ke beban.
 - b. Buat diagram manual dari panel distribusi DC yang menunjukkan bagaimana input dari *string* modul surya dihubungkan ke panel distribusi dan bagaimana energi didistribusikan ke setiap jalur beban. Diagram harus mencakup lokasi *fuse*, koneksi kabel, dan alur distribusi energi.
4. Presentasikan desain dan diagram panel distribusi DC di depan kelas. Presentasi harus mencakup penjelasan tentang bagaimana panel distribusi mengatur dan melindungi aliran energi dari modul surya ke beban DC, serta bagaimana desain mereka menangani proteksi arus lebih dan memastikan distribusi energi yang efisien.

g. Panel Distribusi AC

Panel distribusi AC merupakan perangkat yang digunakan untuk mendistribusikan dan mengelola arus bolak-balik (AC) dalam sistem listrik, seperti dalam sistem PLTS yang terhubung ke jaringan listrik atau dalam sistem rumah tangga dan industri. Panel ini berfungsi untuk memastikan aliran energi AC yang stabil dan aman ke berbagai beban atau perangkat yang memerlukan listrik.



Gambar 1.25 Panel Distribusi AC

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

1. Selungkup (*enclosure*) sebagai rumah perangkat proteksi dan *busbar*.
2. *Busbar* merupakan titik interkoneksi antara inverter baterai, inverter jaringan, dan *feeder* keluar. Umumnya, empat *busbar* yang terdiri atas tiga kabel dan satu netral digunakan untuk konfigurasi tiga-fasa, sedangkan dua *busbar* yang terdiri atas satu lin dan satu netral digunakan untuk konfigurasi satu-fasa.
3. Meteran energi untuk mengukur total energi yang sudah diproduksi oleh PLTS dan telah digunakan oleh beban.
4. *Current transformer* (CT) atau transformator arus digunakan sebagai pengukur arus untuk meteran energi. Alat ini mengukur arus dari tiap fasa dan mengonversinya menjadi arus yang lebih rendah sehingga terbaca oleh meteran energi.
5. *Timer* dan kontaktor mengatur waktu operasional lampu jalan. Biasanya, lampu jalan hanya beroperasi selama lima jam waktu malam hari.
6. *Miniature circuit breaker* (MCB) melindungi kabel masuk dari inverter baterai dan *feeder* keluar menuju jaringan distribusi.

7. Sekering untuk memutus pengukuran tegangan dari *busbar* apabila ada hubungan arus pendek tiba-tiba atau kerusakan pada meteran energi.
8. Perangkat proteksi tegangan lonjakan (*surge protection device* (SPD)) atau *lightning arrester* digunakan untuk melindungi perangkat AC dari tegangan lonjakan atau sambaran petir.
9. *Earth-leakage circuit breaker* (ELCB) atau gawai pemutus arus sisa mencegah orang terkena sengatan listrik akibat kontak langsung pada komponen konduktif. ELCB akan memutuskan aliran listrik seandainya aliran arus total semua fasa tidak sama dengan aliran arus yang kembali lewat netral atau terdapat arus sisa yang lebih besar dari rating ELCB (biasanya 30 mA untuk proteksi terhadap manusia). *Residual current device* (RCD) juga sering digunakan untuk tujuan ini.
10. Batang pembumian (*grounding bar*) memberikan pembumian pada selungkup, perangkat proteksi surya, serta transformator arus.

Aktivitas 1.9 Panel Distribusi AC

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu mampu merancang dan menerapkan panel distribusi AC untuk PLTS secara bergotong royong dan berkebinekaan global.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok kecil yang terdiri atas 4-5 orang siswa. Setiap kelompok akan bekerja sama dalam merancang panel distribusi AC untuk sistem PLTS.
2. Studi Kasus:
 - a. Bayangkan sebuah sistem PLTS yang mengubah energi dari panel surya menjadi arus AC melalui inverter untuk sebuah gedung dengan kebutuhan listrik untuk beberapa peralatan AC, seperti lampu, AC, dan peralatan dapur. Sistem ini menggunakan inverter 5 kW untuk mengubah daya dari panel surya. Panel distribusi AC harus mengatur distribusi daya dari inverter ke berbagai beban dengan mempertimbangkan proteksi arus lebih dan pemisahan sirkuit.

- b. Panel distribusi AC harus menyediakan proteksi dengan pemutus sirkuit untuk setiap jalur beban dan mengatur penghubungan kabel dari inverter ke beban. Juga, kelompok harus mempertimbangkan pengaturan sistem pemutus arus lebih dan proteksi terhadap lonjakan tegangan.
3. Tugas Kelompok:
 - a. Rancang panel distribusi AC yang akan menerima daya dari inverter dan mendistribusikan energi ke berbagai jalur beban. Tentukan lokasi pemutus sirkuit, sistem proteksi, dan pengaturan koneksi kabel dari inverter ke beban.
 - b. Buat diagram manual dari panel distribusi AC yang menunjukkan bagaimana *output* dari inverter dihubungkan ke panel distribusi dan bagaimana energi didistribusikan ke setiap jalur beban AC. Diagram harus mencakup lokasi pemutus sirkuit, pengaturan kabel, dan sistem proteksi.
4. Presentasikan desain dan diagram panel distribusi AC di depan kelas. Presentasi harus mencakup penjelasan tentang bagaimana panel distribusi mengatur dan melindungi aliran energi dari inverter ke beban AC. Presentasi juga mencakup bagaimana desain mereka menangani proteksi arus lebih, lonjakan tegangan, dan memastikan distribusi energi yang efisien.

3. Sistem PLTS

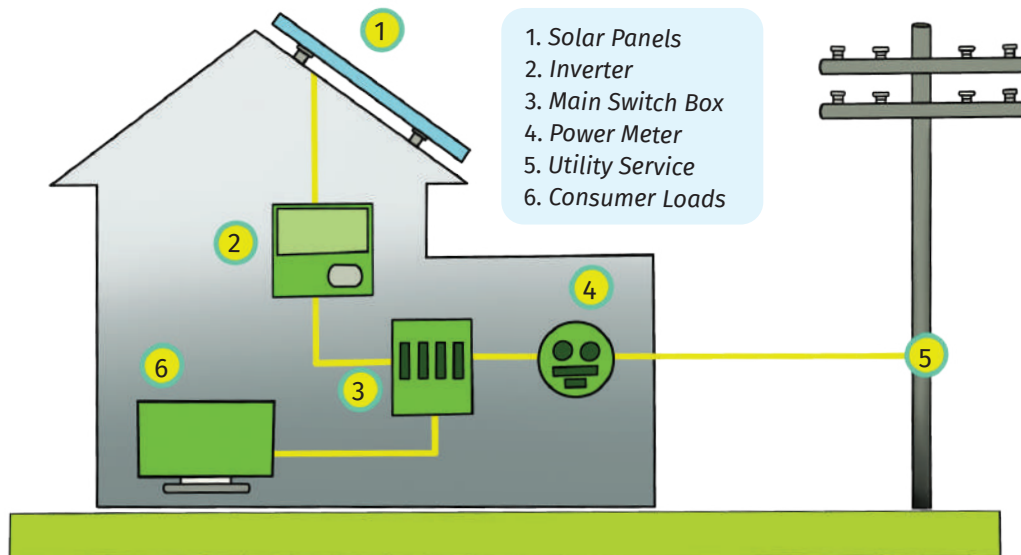
Sistem PLTS diklasifikasikan menjadi beberapa jenis sambungan menggunakan jaringan, yakni PLTS *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida.



Gambar 1.26 Sistem PLTS

a. Sistem PLTS On-Grid

Sistem *on-grid* memanfaatkan panel surya untuk memproduksi listrik dengan sifat yang ramah lingkungan, bebas emisi, dan efisien dari segi biaya. Sistem ini diintegrasikan dengan jaringan PLN. Manfaat dari pemanfaatan sinar matahari yang ditransformasikan oleh modul surya ini ialah untuk mengoptimalkan produksi energi listrik. Kelebihan energi dari modul surya, jika melebihi kebutuhan konsumsi, akan dialirkan kembali ke jaringan PLN. Namun, ketika ada pemadaman dari pihak PLN, sistem ini tidak dapat berfungsi sebagai sumber energi cadangan karena absennya baterai dan kebergantungan langsung pada jaringan PLN.



Gambar 1.27 Sistem PLTS On-Grid

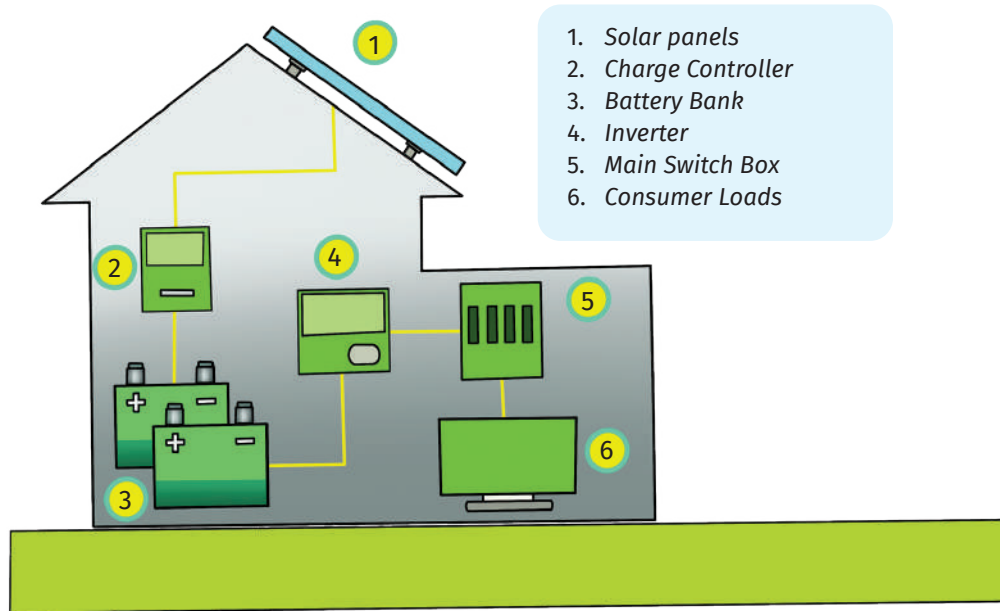
Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai Jenis PLTS *On-Grid* silakan pindai QR Code di samping.

b. Sistem PLTS Off-Grid

PLTS *Off-Grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem



ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari.



Gambar 1.28 Sistem PLTS Off-Grid



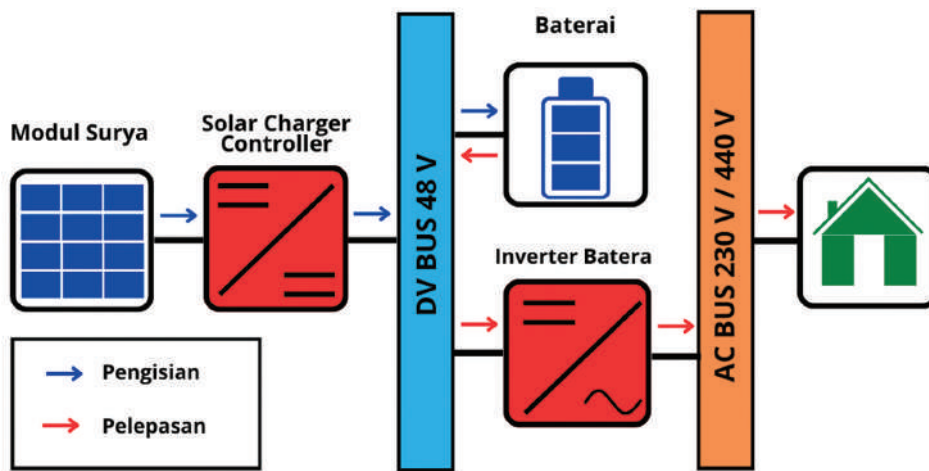
Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai jenis PLTS *Off-Grid*, silakan pindai QR Code di samping.

Konfigurasi PLTS *Off-Grid*

Konfigurasi kerja yang umum diimplementasikan dalam PLTS *Off-Grid* ada 2 (dua) sistem, yaitu berbasis *DC coupling* dan *AC coupling*. Istilah *coupling* berdasarkan hubungan titik ke titik koneksinya. Umumnya, sistem PLTS *Off-Grid* terdiri atas dua bagian kelistrikan yang berbeda, yaitu sisi arus bolak-balik atau disebut juga arus AC dan sisi arus searah yang disebut juga arus DC. Ketika sistem PLTS *Off-Grid* menerapkan penggunaan fungsi cadangan baterai, ada dua titik koneksi yang dapat dibuat dari keluaran *array* modul surya. *Array* dapat terkoneksi ke sisi AC atau sisi DC dari sistem kelistrikan PLTS.

a) Sistem DC Coupling

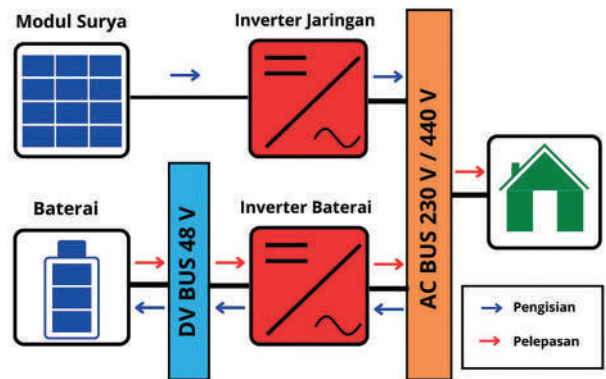
Sistem dianggap memiliki konfigurasi penyambungan sistem DC (*DC-coupling*) jika komponen utamanya terhubung di bus DC. Daya listrik dibangkitkan oleh modul fotovoltaik dan digunakan untuk mengisi baterai melalui *solar charge controller*. SCC ialah pengonversi DC-DC untuk menurunkan tegangan modul fotovoltaik ke level tegangan baterai yang juga dilengkapi dengan *maximum power point tracker* (MPPT) untuk mengoptimalkan penangkapan energi. Di siang hari, dengan radiasi sinar matahari yang cukup, baterai diisi untuk mencapai kondisi pengisian *state of charge* (SoC) yang maksimal. Seiring dengan meningkatnya permintaan listrik hingga beban melebihi daya larik fotovoltaik yang terhubung, inverter baterai akan menyalurkan energi dari baterai ke beban dan akan berhenti beroperasi ketika SoC baterai mencapai batas minimum.



Gambar 1.29 Konfigurasi Sistem DC Coupling
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

b) Sistem AC Coupling

Komponen utama yang membedakan sistem *AC-coupling* dan *DC-coupling* ialah inverter jaringan. Dalam konfigurasi *AC-coupling*, modul fotovoltaik dan baterai dihubungkan di bus AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Modul fotovoltaik terhubung ke inverter jaringan dimana tegangan diubah dari DC ke AC. Serupa dengan *charge controller*, inverter jaringan juga dilengkapi dengan perangkat



Gambar 1.30 Konfigurasi Sistem AC Coupling
Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

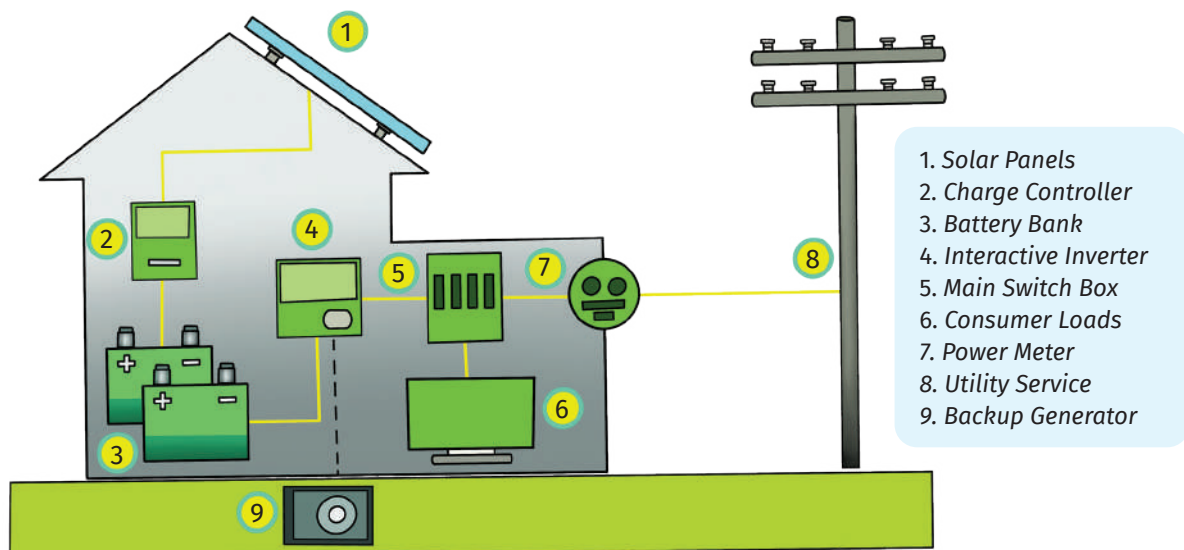
MPPT untuk mengoptimalkan penangkapan energi. Daya dari rangkaian modul fotovoltaik dapat langsung digunakan oleh beban di siang hari dan kelebihannya digunakan untuk mengisi baterai melalui inverter baterai pada saat yang sama.

Berbeda dengan sistem *DC-coupling*, inverter baterai dalam sistem *AC-coupling* bekerja secara dua arah (*bidirectional*). Alat ini berfungsi sebagai pengatur pengisian baterai (*charger*) ketika radiasi sinar matahari cukup, beban terpenuhi, dan baterai belum terisi penuh (SoC rendah). Ketika beban melampaui jumlah daya masukan modul fotovoltaik, biasanya, pada malam hari atau saat hari sedang berawan, inverter baterai akan beralih menjadi inverter mengubah arus DC-AC sehingga energi dari baterai dapat digunakan untuk memenuhi permintaan beban.

Sistem konversi di sistem *AC-coupling* bekerja dalam dua cara. Hal ini menyebabkan kerugian konversi yang lebih besar dibandingkan dengan sistem *DC-coupling*. Namun demikian, sistem *AC-coupling* lebih menguntungkan jika kemungkinan beban pada siang hari lebih besar karena dalam hal ini kerugian konversi hanya akan terjadi di inverter jaringan. Di sisi lain, konfigurasi AC memberi lebih banyak fleksibilitas untuk dengan mudah diperluas. Caranya dengan tambahan rangkaian modul fotovoltaik atau dijalankan secara hibrida bersama dengan pembangkit listrik lainnya.

c. PLTS Hibrida

Sistem hibrida (*hybrid*) mengintegrasikan dua atau lebih jenis pembangkit listrik dengan sumber energi beragam untuk mendapatkan efisiensi dan keandalan yang lebih baik. Tujuannya ialah untuk memanfaatkan kelebihan setiap sumber energi guna meningkatkan keandalan dan efisiensi ekonomi. Contoh kombinasi dalam Sistem PLTS Hibrida meliputi PLTS-Genset, PLTS-Mikrohidro, dan PLTS-Tenaga Angin. Di Indonesia, banyak aplikasi yang memadukan beberapa teknologi pembangkit tersebut, dengan PLTS-Genset menjadi yang paling dominan, terutama pada genset *standalone* yang tidak terinterkoneksi.



Gambar 1.31 Sistem PLTS Hibrida

Aktivitas 1.10 Menerapkan Sistem PLTS

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Pada aktivitas ini, kamu secara mandiri akan menerapkan sistem PLTS.

Langkah-Langkah:

1. Pelajarilah fungsi dan koneksi dasar dari komponen utama dalam sistem PLTS, seperti panel surya, inverter, *solar charge controller*, baterai, dan panel distribusi.
2. Tentukan spesifikasi dasar sistem PLTS yang akan dirancang, termasuk jumlah panel surya, kapasitas baterai, dan jenis inverter yang sesuai dengan kebutuhan energi tertentu.
3. Berdasarkan komponen yang telah diidentifikasi, rencanakan bagaimana komponen-komponen tersebut akan dihubungkan dalam sistem PLTS. Pertimbangkan bagaimana energi akan mengalir dari panel surya ke inverter, lalu ke baterai, dan akhirnya ke beban listrik.
4. Gambar wiring diagram yang menunjukkan semua koneksi listrik antara komponen-komponen dalam sistem PLTS. Diagram ini harus mencakup hal-hal berikut.
 - Jalur koneksi dari panel surya ke SCC.
 - Koneksi dari *solar charge controller* ke baterai untuk pengisian daya.
 - Jalur dari baterai ke inverter untuk konversi DC ke AC.
 - Koneksi dari inverter ke panel distribusi dan beban listrik.
5. Wiring diagram harus mencakup semua konektor, pemutus sirkuit, dan pengaman yang digunakan dalam sistem.
6. Tulis penjelasan yang mendetail mengenai wiring diagram yang telah dibuat, menjelaskan alur energi dan fungsi dari setiap koneksi dalam diagram. Identifikasi area kritis yang membutuhkan perhatian khusus, seperti pemutus sirkuit dan pengaman.
7. Susun wiring diagram dan penjelasannya dalam format laporan tertulis. Laporan ini harus disusun secara sistematis dan rapi, dengan diagram yang jelas dan mudah dibaca.

B. Perencanaan dan Perancangan PLTS

Perencanaan dan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan proses yang esensial untuk memastikan sistem dapat beroperasi dengan efisien dan memenuhi kebutuhan energi secara optimal. Pada tahap perencanaan, faktor-faktor seperti pemilihan lokasi yang tepat, analisis beban, dan pemilihan jenis PLTS menjadi kunci utama untuk merancang sistem yang sesuai dengan kebutuhan spesifik setiap proyek. Sementara itu, perancangan PLTS melibatkan perhitungan teknis terkait kebutuhan energi harian, iradiasi matahari, kapasitas panel surya, serta pemilihan inverter dan komponen pendukung lainnya untuk menjamin performa dan keandalan sistem dalam jangka panjang.

1. Perencanaan Instalasi PLTS

Perencanaan PLTS merupakan langkah awal yang sangat penting untuk memastikan sistem PLTS dapat beroperasi secara efisien dan optimal. Tahapan ini melibatkan berbagai aspek teknis dan lingkungan yang harus dipertimbangkan agar instalasi PLTS sesuai dengan kebutuhan energi dan kondisi lokasi. Berikut ini beberapa aspek utama yang perlu diperhatikan dalam perencanaan PLTS.

a. Pemilihan Lokasi

Pemilihan lokasi merupakan faktor yang sangat krusial karena secara langsung memengaruhi jumlah energi matahari yang dapat ditangkap dan dikonversi menjadi energi listrik. Berikut beberapa kriteria penting dalam pemilihan lokasi.

Intensitas Radiasi Matahari

1) Tingkat radiasi matahari di lokasi instalasi harus diperhatikan. Makin tinggi intensitas radiasi matahari, makin besar energi yang dapat dihasilkan oleh PLTS. Pengukuran data cuaca jangka panjang dan peta iradiasi surya lokal sering kali digunakan sebagai acuan untuk mengetahui intensitas radiasi di suatu area.

Kemiringan dan Orientasi Atap/Tanah

2)

Untuk instalasi PLTS di atap, kemiringan optimal panel surya biasanya berada di rentang 15-30 derajat. Kemiringan ini disesuaikan dengan lintang geografis untuk menangkap energi matahari maksimal sepanjang tahun. Orientasi panel surya juga sangat penting. Di belahan bumi selatan, orientasi panel terbaik ialah ke arah utara, sementara di belahan bumi utara, panel sebaiknya menghadap ke selatan.

Penghalang (*Shading*)

3)

Penghalang seperti pepohonan, bangunan, atau objek lain yang menutupi panel surya akan mengurangi efisiensi produksi energi. Oleh karena itu, analisis bayangan (*shading analysis*) perlu dilakukan untuk memastikan panel surya menerima cahaya matahari secara maksimal sepanjang hari.

b. Analisis Beban

Analisis beban merupakan langkah penting untuk mengetahui kebutuhan daya listrik yang harus dipenuhi oleh PLTS. Langkah-langkah dalam analisis beban meliputi hal-hal berikut.

Pengukuran Beban Harian

1)

Melakukan pengukuran konsumsi listrik harian sangat penting. Ini termasuk menghitung peralatan listrik yang digunakan serta lama penggunaannya setiap hari. Data konsumsi ini biasanya dicatat dalam satuan *watt-hour* (Wh).

Profil Beban

2)

Dengan data dari pengukuran beban harian, profil beban dapat dibangun. Profil ini menunjukkan pola konsumsi energi harian, termasuk beban puncak dan rata-rata. Beban puncak menggambarkan saat konsumsi energi mencapai titik tertinggi dalam satu hari, sementara beban rata-rata menggambarkan penggunaan energi normal selama 24 jam.

Kebutuhan Cadangan Daya

3)

Sistem PLTS harus mempertimbangkan adanya cadangan daya, terutama untuk menghadapi situasi ketika sinar matahari tidak mencukupi, seperti pada cuaca mendung atau malam hari. Cadangan daya ini dapat dipenuhi oleh baterai atau sistem hibrida yang terhubung ke jaringan listrik umum (*on-grid*) atau sumber daya tambahan seperti genset.

c. Pertimbangan Keamanan dan Izin

Faktor keamanan sangat penting dalam perencanaan PLTS, baik dari segi instalasi listrik maupun integrasi dengan sistem kelistrikan publik. Instalasi PLTS harus memenuhi standar keamanan listrik agar tidak menimbulkan risiko bagi pengguna dan properti. Selain itu, instalasi PLTS biasanya memerlukan izin dari pihak berwenang, seperti pemerintah daerah atau instansi terkait. Beberapa pertimbangan keamanan dan regulasi yang perlu diperhatikan meliputi hal-hal berikut.

Perlindungan terhadap *Overcurrent* dan *Overvoltage*

1)

Instalasi harus dilengkapi dengan perangkat perlindungan seperti MCB (*Miniature Circuit Breaker*) dan SPD (*Surge Protection Device*).

Sertifikasi Komponen

2)

Semua komponen seperti panel surya, inverter, dan baterai harus memiliki sertifikasi sesuai standar nasional dan internasional.

d. Pemilihan Jenis PLTS

Setelah menganalisis lokasi dan beban, langkah selanjutnya ialah menentukan jenis PLTS yang akan diinstal.

e. Rencana Keberlanjutan

Selain faktor teknis, perencanaan PLTS juga harus memperhatikan keberlanjutan lingkungan dan dampaknya terhadap masyarakat sekitar. Berikut beberapa hal yang perlu dipertimbangkan.

Dampak Lingkungan

1)

Analisis dampak lingkungan harus dilakukan untuk memastikan bahwa pembangunan PLTS tidak merusak ekosistem sekitar. Penggunaan lahan, konservasi air, dan penanganan limbah komponen seperti panel surya yang sudah tidak terpakai perlu diperhatikan.

Pengelolaan Sistem Jangka Panjang

2)

Sistem PLTS memerlukan pemeliharaan rutin agar tetap beroperasi dengan baik. Rencana pengelolaan dan pemeliharaan harus disusun, termasuk inspeksi panel, inverter, dan baterai secara berkala.

Dengan mempertimbangkan semua aspek tersebut, perencanaan PLTS dapat dilakukan dengan baik. Hal itu untuk memastikan bahwa sistem ini dapat memberikan energi yang stabil, efisien, dan ramah lingkungan.

Aktivitas 1.11 Lokasi Pemasangan PLTS

Aktivitas Individu

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu secara mandiri dan beriman, bertakwa kepada Tuhan YME, dan berakhlak mulia mampu menerapkan konsep perencanaan pada pemilihan lokasi penempatan pemasangan PLTS.

Langkah-Langkah:

1. Survey Lokasi:

Lakukan survei sederhana di lingkungan rumah atau di area tertentu yang kamu kenal, seperti halaman, atap, atau area terbuka lainnya. Catatlah beberapa lokasi

potensial untuk pemasangan panel surya, memperhatikan faktor-faktor seperti ketersediaan sinar matahari sepanjang hari, bayangan dari pohon, bangunan, atau objek lain, serta orientasi permukaan terhadap arah matahari.

2. Penilaian Faktor Lingkungan:

Setelah mengidentifikasi lokasi-lokasi potensial, lakukan analisis sederhana terhadap setiap lokasi, mempertimbangkan elemen-elemen seperti berikut.

- 🕒 *Akses sinar matahari langsung*: Berapa lama lokasi tersebut mendapatkan sinar matahari langsung tanpa terhalang bayangan?
- 📍 *Orientasi permukaan*: Apakah permukaan tempat panel akan dipasang menghadap ke arah yang optimal (umumnya ke arah utara atau selatan bergantung pada lokasi geografis)?
- 📐 *Kemiringan permukaan*: Apakah sudut kemiringan permukaan mendukung penyerapan sinar matahari yang maksimal?

3. Pembuatan Laporan dan Rekomendasi:

Susunlah laporan tertulis yang mencakup deskripsi setiap lokasi yang disurvei, penilaian faktor-faktor lingkungan, serta kesimpulan tentang lokasi yang paling optimal untuk pemasangan panel surya. Laporan juga harus mencakup alasan pemilihan lokasi terbaik dan rekomendasi untuk optimasi lebih lanjut, seperti kemungkinan penyesuaian sudut panel atau pemangkasan pohon yang menghalangi sinar matahari.

4. Refleksi Akhir:

Sebagai bagian dari laporan, renungkan pentingnya pemilihan lokasi dalam perencanaan PLTS dan bagaimana faktor lingkungan dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem surya. Tulislah hasil refleksimu terhadap hal itu.

2. Perancangan PLTS

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan proses teknis untuk merancang sistem yang efisien, andal, dan sesuai dengan kebutuhan energi. Langkah-langkah dalam perancangan PLTS melibatkan berbagai komponen utama yang memastikan performa optimal sistem. Berikut ini langkah-langkah detail dalam perancangan PLTS.

a. Perhitungan Energi Harian

Untuk menentukan kapasitas PLTS yang dibutuhkan, perhitungan energi harian merupakan langkah awal. Berikut ini langkah-langkah menghitung energi harian.

1) Estimasi Konsumsi Listrik Harian

Hitung total energi yang dikonsumsi oleh semua peralatan listrik dalam sehari. Konsumsi listrik peralatan dapat dihitung dengan mengalikan daya peralatan (dalam watt) dengan waktu penggunaan (dalam jam). Total konsumsi listrik diukur dalam satuan kWh (kilowatt-jam).

Contoh:

- Kulkas $100 \text{ W} \times 24 \text{ jam} = 2.4 \text{ kWh}$
- Lampu $10 \text{ W} \times 5 \text{ jam} = 0.05 \text{ kWh}$
- Total = 2.45 kWh/hari

2) Menyesuaikan dengan Efisiensi Sistem

Energi yang dihasilkan oleh panel surya perlu disesuaikan dengan efisiensi sistem karena ada rugi-rugi di inverter, kabel, dan komponen lainnya. Efisiensi sistem biasanya berada di kisaran 80%–90%.

b. Menentukan Iradiasi Matahari

Iradiasi matahari adalah energi matahari yang diterima per meter persegi setiap hari, dinyatakan dalam kWh/m²/hari. Iradiasi ini sangat bergantung pada lokasi geografis, cuaca, kemiringan panel, dan orientasi.

1) Iradiasi Harian

Diperoleh dari data cuaca lokal atau menggunakan peta iradiasi global. Lokasi dengan iradiasi tinggi akan menghasilkan lebih banyak energi.

2) Faktor yang Memengaruhi Iradiasi

Sudut kemiringan panel, orientasi ke arah matahari (utara di belahan bumi selatan, selatan di belahan bumi utara), serta bayangan dari objek sekitar seperti bangunan atau pohon.

c. Menghitung Daya Optimal Panel Surya

Setelah mengetahui kebutuhan energi harian dan iradiasi matahari di lokasi, langkah selanjutnya ialah menghitung berapa daya yang harus dihasilkan oleh panel surya.

Rumus yang digunakan untuk menghitung daya optimal ialah:

$$\text{Daya Panel (kWp)} = \frac{\text{Energi Harian (kWh)}}{\text{Iradiasi Harian (kWh/m}^2\text{)}} \times \text{Efisiensi Panel}$$

- ➊ Energi Harian: Jumlah energi yang diperlukan oleh pengguna dalam satu hari.
- ➋ Iradiasi Harian: Jumlah energi matahari yang diterima per meter persegi dalam sehari.
- ➌ Efisiensi Panel: Efisiensi panel surya dalam mengubah energi matahari menjadi listrik. Efisiensi ini bergantung pada tipe panel yang digunakan.

Contoh perhitungan:

- ➊ Energi harian yang dibutuhkan: 5 kWh
- ➋ Iradiasi harian: 4,5 kWh/m²
- ➌ Efisiensi panel: 18%

$$\text{Daya Panel (kWp)} = \frac{5}{4,5} \times 0,18 = 1,11 \text{ kWp}$$

d. Penentuan Jumlah dan Spesifikasi Panel Surya

Setelah mengetahui daya optimal yang dibutuhkan, jumlah panel dapat dihitung berdasarkan daya per panel. Jika daya per panel surya ialah 400 W (0,4 kWp), jumlah panel yang dibutuhkan ialah:

$$\text{Jumlah Panel} = \frac{\text{Daya Optimal (kWp)}}{\text{Daya Per Panel (kWp)}}$$

Jika kebutuhan daya optimal ialah 1,11 kWp dan daya panel ialah 400 W, jumlah panel yang dibutuhkan ialah 3 panel (1,11 kWp / 0,4 kWp = 2.775, dibulatkan menjadi 3 panel).

e. Pemilihan Inverter

Inverter ialah komponen penting yang mengubah listrik DC yang dihasilkan panel surya menjadi listrik AC yang digunakan untuk peralatan rumah tangga. Pemilihan inverter harus sesuai dengan jenis PLTS dan kapasitas sistem.

- 1) Inverter *Grid-Tie*: Untuk sistem PLTS yang terhubung ke jaringan listrik publik.
- 2) Inverter *Off-Grid*: Untuk sistem PLTS yang mandiri, biasanya dilengkapi dengan baterai untuk menyimpan daya.
- 3) Inverter Hibrida: Untuk sistem yang menggabungkan jaringan listrik, panel surya, dan baterai.

Inverter juga harus dipilih dengan kapasitas yang sesuai. Misalnya, jika sistem PLTS menghasilkan daya 1,11 kWp, inverter dengan kapasitas setidaknya 1,5 kW harus dipilih untuk menghindari *overloading*.

f. Pemilihan Baterai (Jika Diperlukan)

Jika sistem PLTS akan bekerja tanpa jaringan listrik (*off-grid*) atau dalam mode hibrida, baterai dibutuhkan untuk menyimpan energi.

- 1) Kapasitas Baterai: Ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada saat tidak ada sinar matahari. Baterai harus mampu menyuplai daya selama beberapa hari untuk mengantisipasi cuaca mendung atau malam hari.
- 2) Jenis Baterai: Baterai lithium-ion lebih sering digunakan karena efisiensi dan umur pakai yang lebih lama, meskipun baterai asam timbal dapat menjadi alternatif yang lebih murah.

g. Pemilihan Komponen Tambahan

Selain panel surya dan inverter, beberapa komponen lain diperlukan untuk memastikan keamanan dan kinerja optimal.

- 1) *Combiner Box*: Menggabungkan beberapa rangkaian panel surya (*string*) menjadi satu *output*.
- 2) *Solar Charge Controller*: Mengatur aliran listrik dari panel surya ke baterai, mencegah *overcharge* dan kerusakan baterai.
- 3) Sistem Proteksi: Mencakup proteksi terhadap arus berlebih, lonjakan listrik, dan kebocoran arus.
- 4) Sistem Pemantauan: Alat untuk memantau performa sistem secara *real-time*, memberikan data tentang produksi energi, konsumsi energi, dan status baterai (jika ada).

Dengan perancangan yang matang, PLTS dapat beroperasi dengan optimal, menghasilkan energi terbarukan yang andal, dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional.

Aktivitas 1.12 Menerapkan Konsep PLTS *Off-Grid*

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan konsep perancangan sistem PLTS *Off-Grid* secara bergotong royong dan kreatif.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang. Tiap orang dapat ditetapkan peran seperti perancangan sistem, pengukur kebutuhan energi, dan penyusun anggaran.
2. Studi Kasus:

Kamu merupakan tim perancangan sistem energi untuk sebuah rumah tangga yang terletak di sebuah desa terpencil. Desa ini tidak memiliki akses ke jaringan listrik dari PLN dan mengandalkan sumber energi terbarukan untuk kebutuhan listrik mereka. Rumah tersebut memiliki kebutuhan listrik sebagai berikut.

Informasi Rumah Tangga:

- Jumlah Penghuni: 5 orang
- Kebutuhan Energi Harian: 6 kWh
- Peralatan Elektronik yang Digunakan:
 - o Lampu LED (5 watt × 10 lampu) – 5 jam/hari
 - o Kulkas (200 liter) – 1 unit
 - o TV LED (50 inch) – 4 jam/hari
 - o Komputer (200 watt) – 2 unit, 4 jam/hari
 - o Pompa air (500 watt) – 1 unit, 1 jam/hari

Kriteria Sistem:

- a. Kebutuhan Energi: Sistem harus mampu memenuhi kebutuhan energi harian 6 kWh dengan mempertimbangkan variasi musiman dan potensi gangguan pada sistem.
- b. Penempatan Modul Surya: Modul surya akan dipasang di atap rumah dengan sudut kemiringan optimal dan paparan sinar matahari penuh sepanjang hari.

- c. Baterai: Baterai harus mampu menyimpan energi yang cukup untuk menyediakan daya selama periode malam hari dan cuaca buruk.

Hal yang Harus Dilakukan:

- a. Penghitungan Kebutuhan Energi:
 - 1) Hitung total konsumsi energi peralatan elektronik berdasarkan daya dan waktu penggunaan.
 - 2) Tentukan kapasitas baterai yang diperlukan untuk menyimpan energi cadangan.
 - b. Perencanaan Modul Surya:
 - 1) Hitung jumlah modul surya yang diperlukan berdasarkan kebutuhan energi harian dan potensi radiasi matahari di lokasi.
 - 2) Tentukan ukuran modul surya dan jumlah unit yang diperlukan.
 - c. Perencanaan Baterai:
 - 1) Hitung kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk menyimpan energi yang cukup.
 - 2) Pilih jenis baterai yang sesuai (misalnya, baterai asam timbal, lithium-ion).
 - d. Estimasi Biaya:
 - 1) Rencanakan anggaran untuk membeli modul surya, baterai, inverter, dan peralatan tambahan.
 - 2) Pertimbangkan biaya instalasi dan pemeliharaan sistem.
3. Tugas Kelompok:
- a. Rancangan Sistem: Hitung total kebutuhan energi dan kapasitas modul surya dan baterai yang diperlukan.
 - b. Pengukur Kebutuhan Energi: Kumpulkan data konsumsi energi dari peralatan yang terdaftar dan menganalisis penggunaan energi.
 - c. Penyusun Anggaran: Estimasi biaya keseluruhan sistem, termasuk pembelian komponen dan biaya instalasi.
4. Hasil yang Diharapkan:
- a. Diagram sistem PLTS *Off-Grid* yang lengkap, termasuk jumlah dan tipe modul surya, kapasitas baterai, dan komponen tambahan.
 - b. Presentasi yang mencakup justifikasi teknis untuk pilihan komponen, estimasi biaya, dan cara sistem akan memenuhi kebutuhan energi harian dengan efisien.

C. Pemasangan PLTS

Proses Pemasangan PLTS melibatkan beberapa langkah utama, mulai dari penempatan dudukan modul surya, instalasi sistem kelistrikan yang sesuai dengan kebutuhan energi, hingga instalasi komponen-komponen seperti modul surya, inverter, dan baterai. Setiap tahap harus dilakukan dengan presisi dan mengikuti standar teknis yang berlaku, untuk memastikan kinerja optimal dari PLTS serta keamanannya dalam jangka panjang.

1. Persiapan Pemasangan PLTS

Persiapan pemasangan PLTS memerlukan langkah-langkah yang terperinci untuk memastikan efisiensi dan keberhasilan proyek. Langkah pertama ialah melakukan survei lokasi untuk menentukan tempat terbaik bagi pemasangan panel surya. Penentuan lokasi itu dilakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti paparan sinar matahari, kemiringan atap, dan potensi bayangan dari bangunan atau pepohonan di sekitar. Setelah itu, rencanakan tata letak panel surya, inverter, dan komponen lain dengan detail yang sesuai dengan kebutuhan energi yang telah dihitung sebelumnya.

Selanjutnya, siapkan semua peralatan dan bahan yang diperlukan, termasuk panel surya, inverter, rak penyangga, kabel, dan sistem pengaman. Pastikan juga semua peralatan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) siap dan sesuai standar untuk melindungi pekerja selama proses pemasangan. Periksa dan uji semua peralatan pengukuran dan pengujian untuk memastikan mereka berfungsi dengan baik. Koordinasikan dengan tim instalasi mengenai tugas dan tanggung jawab masing-masing, serta tentukan jadwal pemasangan yang efisien. Dengan persiapan yang matang, pemasangan PLTS dapat dilakukan dengan lebih cepat dan aman, memastikan sistem beroperasi secara optimal dan andal.

a. Persiapan Peralatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Persiapan peralatan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) sangat penting dalam pemasangan PLTS. Sebelum memulai pekerjaan, pastikan semua tim dilengkapi dengan alat pelindung diri (APD) yang sesuai, seperti helm, kacamata pelindung, sarung tangan, sepatu keselamatan, dan *harness* untuk bekerja di ketinggian. Pastikan juga alat-alat tersebut dalam kondisi baik dan telah diperiksa sebelum digunakan. Selain itu, sediakan alat pemadam kebakaran di

lokasi pemasangan untuk mengantisipasi kemungkinan kebakaran listrik. Pelatihan mengenai prosedur K3, termasuk cara menangani dan merespons situasi darurat, harus diberikan kepada semua anggota tim. Pastikan juga adanya tanda peringatan dan pembatas area kerja untuk mencegah akses orang yang tidak berkepentingan. Dengan mematuhi standar K3, risiko kecelakaan dapat diminimalisir sehingga pekerjaan pemasangan PLTS dapat berjalan dengan aman dan efisien.

b. Persiapan Perkakas Tangan dan Peralatan Pengukuran Pengujian

Persiapan perkakas tangan dan peralatan pengukuran serta pengujian sangat krusial dalam pemasangan PLTS. Sebelum memulai pekerjaan, pastikan semua alat yang diperlukan tersedia dan dalam kondisi baik. Perkakas tangan yang harus disiapkan meliputi obeng, tang, kunci pas, kunci inggris, dan bor listrik. Selain itu, sediakan juga peralatan pengukuran seperti multimeter untuk mengukur tegangan dan arus listrik, *clamp* meter untuk mengukur arus pada kabel, serta *insolation tester* untuk memeriksa ketahanan isolasi pada kabel dan komponen listrik. Peralatan pengujian lainnya termasuk *solar power* meter untuk mengukur intensitas cahaya matahari dan memastikan panel surya mendapatkan paparan optimal, serta alat uji inverter untuk memastikan konversi energi berjalan dengan efisien. Pastikan juga ada alat untuk melakukan pengujian sistem secara keseluruhan setelah pemasangan, seperti alat ukur kWh untuk memastikan kinerja sistem sesuai dengan perhitungan. Dengan persiapan perkakas dan peralatan yang lengkap serta teruji, proses pemasangan PLTS dapat dilakukan dengan lebih akurat dan efisien, memastikan sistem berfungsi optimal setelah diinstal.

2. Pemasangan Dudukan dan Modul Surya PLTS

Dudukan yang kokoh dan terpasang dengan benar memastikan modul surya dapat menerima paparan sinar matahari secara optimal sepanjang hari. Proses pemasangan ini melibatkan pemilihan dudukan yang sesuai

dengan struktur atap atau lahan, penentuan sudut kemiringan yang tepat, serta penyesuaian orientasi modul surya untuk menghindari bayangan dan kehilangan energi. Dengan instalasi yang tepat, pemasanganudukan dan modul surya tidak hanya meningkatkan efisiensi sistem, tetapi juga memastikan kestabilan dan keamanan.

a. Pemasangan Dudukan dan Modul Surya PLTS Atap (Rooftop)

Pemasangan dudukan dan modul surya pada PLTS atap merupakan langkah krusial dalam optimalisasi penggunaan energi terbarukan di lingkungan perkotaan maupun pedesaan. Proses ini tidak hanya melibatkan penempatan modul surya yang tepat untuk menangkap sinar matahari secara maksimal, tetapi juga memastikan bahwa struktur dudukan mampu menahan beban dan kondisi cuaca yang beragam. Keberhasilan instalasi ini sangat bergantung pada perencanaan yang cermat, pemilihan material yang sesuai, serta pemahaman tentang karakteristik atap dan kebutuhan energi dari bangunan yang bersangkutan.

1) Persiapan Pemasangan

Untuk memasang PLTS Atap, perlu dilakukan persiapan yang matang. Berikut ini persiapan yang dilakukan sebelum pemasangan PLTS Atap.

a) Menyiapkan Komponen Dudukan

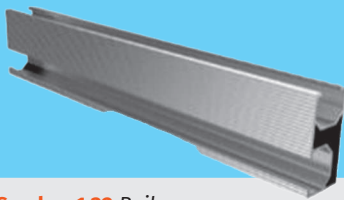
Komponen dudukan modul surya pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di atas atap (*rooftop*) berperan penting dalam memastikan kestabilan, keamanan, dan efisiensi sistem tenaga surya. Setiap komponen dirancang untuk mendukung modul surya dalam menghadapi berbagai kondisi cuaca sekaligus mempertahankan orientasi dan kemiringan yang optimal untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari. Struktur dudukan ini terdiri dari berbagai elemen, seperti rel, *bracket*, dan klip, yang bekerja bersama untuk mengamankan panel di atap, baik itu atap genteng, metal, atau dak beton. Selain itu, komponen *grounding* dan pengatur kabel turut berperan dalam menjaga keamanan listrik dan kerapihan instalasi.

(1) Komponen *Mounting Modul Surya*

Berikut ini beberapa komponen *mounting* modul surya.

(a) *Rail*

Rail merupakan komponen utama yang digunakan sebagai tempat duduk panel surya. Komponen ini dipasang di atas *bracket* dan berfungsi sebagai fondasi untuk mengamankan panel surya.

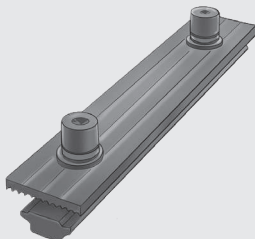


Gambar 1.32 *Rail*

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

(b) *Jointing Rail*

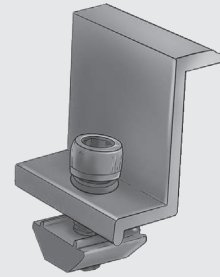
Digunakan untuk menyambungkan dua *rail* agar lebih panjang, memungkinkan instalasi yang lebih fleksibel sesuai kebutuhan panjang panel surya.



Gambar 1.33 *Jointing Rail*

(c) *End Clamp*

End clamp dipasang di ujung-ujung panel surya untuk menahan panel pada posisinya. Fungsinya ialah sebagai pengunci yang menjaga panel tetap aman di tempatnya.



Gambar 1.34 *End Clamp*

(d) *Mid Clamp*

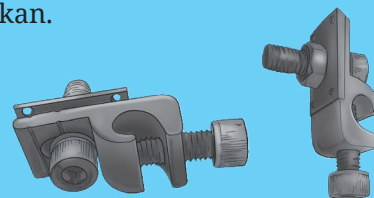
Mid clamp memiliki fungsi yang sama dengan *end clamp*, tetapi dipasang di antara dua panel surya yang berdampingan. Ini membantu menyatukan panel-panel dalam susunan yang lebih besar.



Gambar 1.35 *Mid Clamp*

(e) *Grounding Lug*

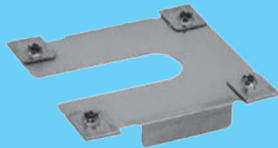
Terminal untuk kabel *grounding*, digunakan untuk menghubungkan sistem *grounding* dengan komponen panel surya, guna meningkatkan keamanan sistem dari risiko kelistrikan.



Gambar 1.36 *Grounding Lug*

(f) Grounding Clip

Klip yang digunakan untuk menyatukan sistem *grounding* antara *rail* dan panel surya. Klip ini dipasang di bawah *mid clamp* untuk menghubungkan komponen *grounding* dengan lebih baik.

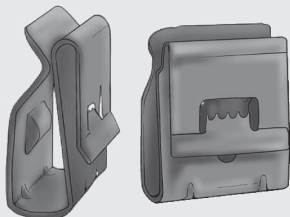


Gambar 1.37 Grounding Clip

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

(g) Cable Clip

Klip ini digunakan untuk merapikan kabel di bawah panel surya. Dengan menjepit kabel, *cable clip* menjaga agar kabel tidak berantakan dan terorganisir dengan baik.



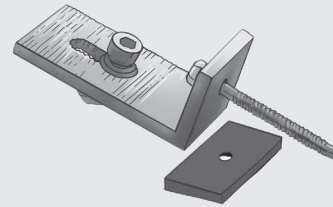
Gambar 1.38 Cable Clip

(2) Komponen Pengikat Panel Surya (Bracket)

Komponen ini terdiri atas *L hook/L feet*, *tile hook*, klip lok, dan *adjustable tilt*.

(a) L Hook/L Feet

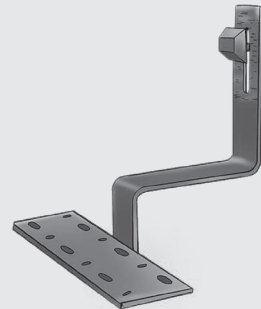
Bracket ini digunakan pada atap berbahan metal, *galvalume*, spandek, dan material sejenisnya. Bentuknya menyerupai huruf “L” dan berfungsi untuk mengaitkan panel surya pada atap tersebut.



Gambar 1.39 L Hook/L Feet

(b) Tile Hook

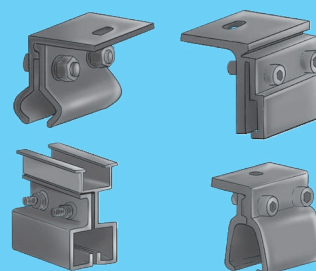
Bracket ini dirancang untuk atap genteng. Pemasangannya menggunakan *clamp* yang dibaut langsung ke *purlin* (rangka atap). *Tile hook* memungkinkan modul surya dipasang tanpa merusak genteng.



Gambar 1.40 Tile Hook

(c) Klip Lok

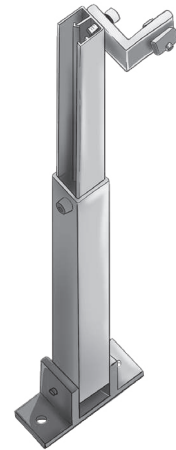
Jenis *bracket* ini digunakan untuk atap metal Klip Lok yang memiliki profil bergelombang. Pemasangannya dilakukan dengan menjepit bagian atap yang menonjol, memastikan panel surya terpasang dengan kokoh.



Gambar 1.41 Klip Lok

(d) Adjustable Tilt

Bracket ini dilengkapi dengan kaki depan (*front leg*) dan kaki belakang (*rear leg*) yang dapat disesuaikan kemiringannya. Biasanya, alat ini digunakan pada atap datar atau dak beton, memberikan fleksibilitas sudut pemasangan panel.



Gambar 1.42 Adjustable Tilt

b) Menyiapkan Atap

Atap ialah bagian atas dari sebuah bangunan yang berfungsi sebagai penutup atau pelindung dari cuaca seperti hujan, panas matahari, angin, dan salju. Atap juga berperan penting dalam menjaga stabilitas struktur bangunan dan kenyamanan penghuninya. Terdapat berbagai jenis dan bahan atap yang digunakan, bergantung pada desain, fungsi, dan lokasi geografis bangunan.

Tidak semua area atap tersedia untuk dipasang modul surya, bergantung pada integritas struktural, *shading*, dan dalam beberapa kasus bahkan estetika. Modul surya harus dipasang di atap untuk menghindari bayangan (*shading*) dan dapat menerima matahari paling banyak.

Tabel 1.1 Parameter Pemasangan Modul Surya pada Atap

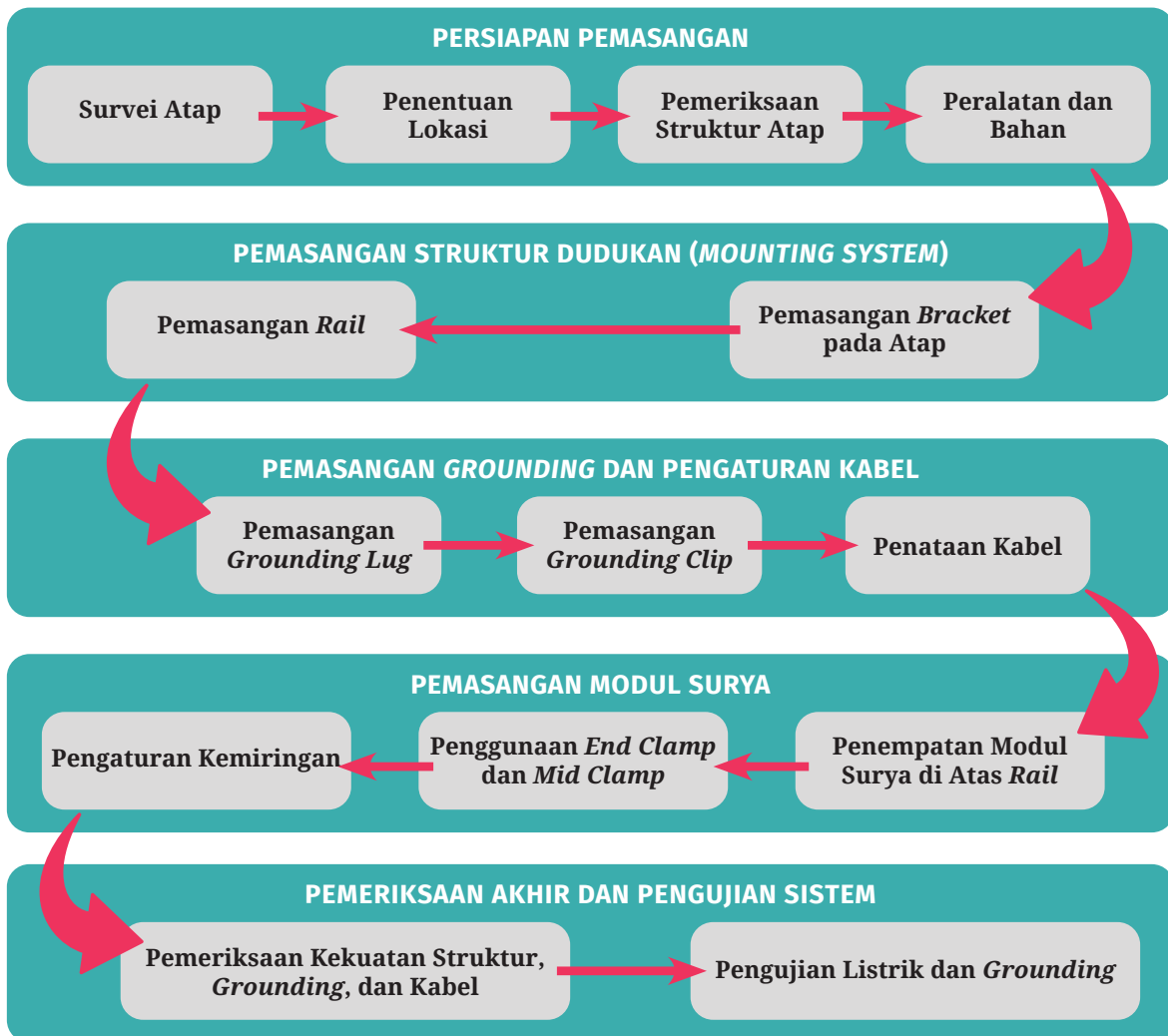
Parameter	Penjelasan
Bentuk Atap	Menyesuaikan dengan bentuk atap, atap datar (<i>flat roof</i>) atau atap miring (<i>pitched roof</i>).
Material Atap	Menyesuaikan dengan material atap, apakah dapat menggunakan metode penetrasi atau non-penetrasi.
Struktur Beban Atap	Sistem pemasangan harus mendukung beban dengan uji bersertifikat.
Material <i>Mounting</i>	Material <i>mounting</i> harus terlindungi dari korosi, memiliki kekuatan mekanis dan <i>lifetime</i> sesuai desain.

Untuk mengetahui jenis atap yang dapat digunakan pada saat pemasangan PLTS, silakan pindai QR Code di samping.



2) Proses Pemasangan

Pemasanganudukan modul surya pada PLTS atap (*rooftop*) melibatkan serangkaian langkah teknis. Hal ini untuk memastikan bahwa modul surya terpasang dengan aman, stabil, dan efisien.



Gambar 1.43 Diagram Alir Pemasangan Dudukan dan Modul Surya pada PLTS di Atas Atap

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

Pada Gambar 1.43, proses pemasangan PLTS diawali dengan persiapan pemasangan, yaitu melakukan survei atap untuk memastikan paparan sinar matahari optimal, menentukan lokasi pemasangan modul surya, dan memeriksa kekuatan struktur atap. Setelah itu, semua peralatan dan bahan, seperti *bracket*, *rail*, modul surya, *grounding clip*, dan kabel, disiapkan. Tahap berikutnya adalah pemasangan struktur dukungan, yang meliputi pemasangan *bracket* pada atap sebagai dasar penopang dan pemasangan rail untuk menopang modul surya dengan kokoh dan sejajar.

Setelah struktur dukungan terpasang, dilakukan pemasangan *grounding* dan pengaturan kabel. *Grounding clip* dan *grounding lug* dipasang untuk memastikan sistem listrik aman, dan kabel-kabel ditata rapi untuk menghindari gangguan. Kemudian, tahap pemasangan modul surya dilakukan dengan menempatkan modul surya di atas *rail*, mengencangkan dengan *end clamp* dan *mid clamp*, serta mengatur sudut kemiringan untuk efisiensi maksimal. Proses diakhiri dengan pemeriksaan akhir dan pengujian sistem, termasuk memeriksa kekuatan struktur, koneksi *grounding*, dan pengujian kelistrikan untuk memastikan sistem PLTS berfungsi optimal.

Gambar 1.44 Pemasangan PLTS di Atas Atap.

Sumber: MariaGodfrida/pixabay (2015)



Untuk lebih jelas tentang proses pemasangan PLTS di atas atap, kamu dapat menyaksikan video dari beberapa tautan berikut ini.



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/6cc8yn>
Sumber: <https://www.youtube.com/@K2SystemsUSMX>



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/ohjj0s>
Sumber: <https://www.youtube.com/@rooftechinc>



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/ewiyar>
Sumber: <https://www.xmkseng.com>

Aktivitas 1.13 Pemasangan PLTS di Atas Atap

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah mengerjakan aktivitas ini, kamu mampu menyusun rencana pemasangan dudukan dan modul surya pada lokasi pemasangan PLTS di atas atap secara bergotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok mendapat area atap tertentu untuk perencanaan pemasangan dudukan dan modul surya.
2. Kelompok bersama-sama melakukan survei pada area atap yang telah diberikan, dengan memperhatikan aspek seperti kekuatan struktur atap, sudut kemiringan, dan arah sinar matahari.
3. Diskusikan potensi tantangan seperti bayangan dari pohon atau bangunan lain.
4. Setelah survei, kelompok merancang struktur dudukan modul surya yang akan dipasang. Diskusikan material yang akan digunakan, desain dudukan, dan teknik pemasangan yang sesuai. Rencana tersebut kemudian disusun dalam bentuk sketsa atau diagram sederhana. Buat dalam bentuk laporan kelompok.

b. Pemasangan Dudukan dan Modul Surya PLTS di Atas Tanah

Pada sistem pemasangan di atas tanah (*ground-mount*), modul surya ditempatkan ke tanah dengan satu atau lebih penyangga dengan kombinasi beberapa tiang. Keuntungan utama dari pemasangan di tanah ialah modul tidak menempati ruang atap dan tidak perlu biaya tambahan untuk mengganti atap dan kemiringan serta posisi susunan yang ideal dapat dipilih. Kekurangannya ialah susunan modul dapat menghabiskan ruang di tanah dan akan lebih terlihat, tetapi pemasangan di tanah dapat berfungsi ganda sebagai area penyimpanan atau gudang. Susunan modul surya yang dipasang di tiang biasanya terpasang pada baja, tiang dipasang jauh ke tanah, dan ditambahkan beton. Kedalaman setiap lubang, jumlah beton, dan ukuran dari setiap tiang baja ditentukan oleh luas persegi dari *array* dan tingginya di atas tanah.

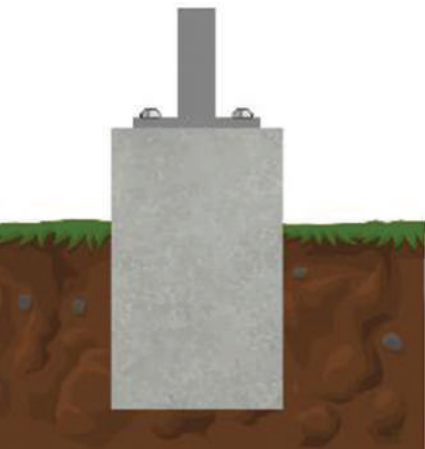
1) Komponen Pemasangan Dudukan Modul Surya PLTS di Atas Tanah

Pemilihan struktur penopang dan fondasi sangatlah penting untuk menentukan keandalan rangkaian modul surya. Identifikasi lokasi yang tepat penting dilakukan ketika studi kelayakan untuk memperoleh informasi rinci mengenai jenis tanah, topografi tanah, luas lahan, kondisi iklim setempat, dan sudut kemiringan yang dibutuhkan. Struktur penopang modul surya harus dirancang untuk dapat menopang modul surya dan menyalurkan beban mekanis ke fondasi dengan baik.

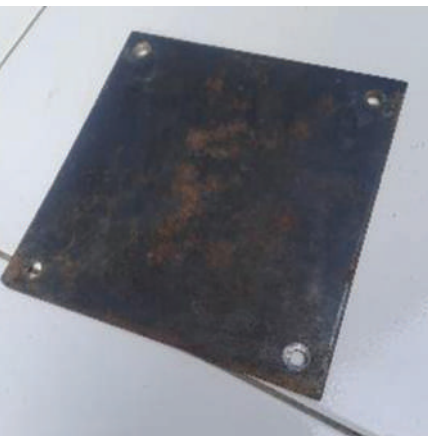


Gambar 1.45 PLTS di Atas Tanah

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.46 Fondasi
Sumber: Feviana,
Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.47 Pelat Dasar
Sumber: Feviana,
Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.48 Tiang
Penopang
Sumber: Feviana,
Kemdikbudristek (2024)

Struktur rangkaian modul fotovoltaik terdiri atas fondasi, tiang penopang, dan penopang. Berikut ini komponen pada pemasangan dudukan modul surya PLTS di atas tanah.

a) Fondasi

Fondasi merupakan komponen dasar yang berfungsi untuk memberikan stabilitas dan kekuatan bagi struktur dudukan modul surya. Fondasi biasanya terbuat dari beton dan dirancang untuk menahan beban yang ditimbulkan oleh modul surya, serta faktor eksternal seperti angin dan gempa. Fondasi yang baik dapat mencegah pergeseran atau keruntuhan sistem.

b) Pelat Dasar

Pelat dasar merupakan bagian yang menghubungkan fondasi dan tiang penopang. Pelat ini biasanya terbuat dari material yang kuat seperti baja atau beton bertulang. Pelat dasar berfungsi untuk mendistribusikan beban dari tiang penopang ke fondasi secara merata dan memberikan titik tumpu yang kokoh untuk pemasangan tiang.

c) Tiang Penopang

Tiang penopang ialah struktur vertikal yang menopang penopang modul surya. Tiang ini biasanya terbuat dari bahan baja atau pipa galvanis yang kuat dan tahan korosi. Tiang penopang dirancang untuk menahan beban modul surya serta tekanan angin dan faktor lingkungan lainnya. Pemasangan tiang penopang yang tepat sangat penting untuk stabilitas keseluruhan sistem.

d) Penopang Modul Surya

Penopang modul surya ialah komponen yang langsung menghubungkan modul surya dengan tiang penopang. Penopang ini dapat berupa *bracket* atau struktur rangka yang memungkinkan penyesuaian sudut kemiringan modul surya agar dapat memak-

simalkan penyerapan cahaya matahari. Penopang juga harus dirancang agar dapat mengamankan modul surya dengan baik dan mencegah pergerakan atau getaran yang tidak diinginkan.



Gambar 1.49 Penopang Modul Surya

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

2) Proses Pemasangan Komponen Dudukan Modul Surya PLTS di Atas Tanah

Proses pemasangan komponen dudukan modul surya pada PLTS di atas tanah melibatkan beberapa langkah penting untuk memastikan pemasangan yang aman dan optimal. Berikut ini langkah-langkah umum yang harus dilakukan.

a) Persiapan dan Perencanaan

Sebelum memulai pemasangan, lakukan survei lokasi untuk memastikan area tersebut sesuai untuk instalasi PLTS. Pertimbangkan faktor seperti pencahayaan matahari, kemiringan tanah, dan kemungkinan bayangan dari objek di sekitar. Pastikan juga semua alat dan bahan yang diperlukan sudah tersedia, termasuk semen, besi beton, dan komponen pemasangan.

b) Pemasangan Fondasi

Fondasi merupakan komponen dasar yang berfungsi untuk menahan seluruh struktur dudukan modul surya. Langkah-langkahnya sebagai berikut.

(1) Pengukuran dan Penandaan

Tandai area di mana fondasi akan dipasang sesuai dengan ukuran dan jarak yang telah direncanakan.

(2) Penggalian

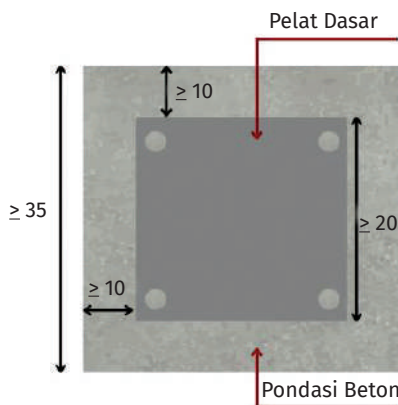
Gali lubang dengan kedalaman dan ukuran sesuai spesifikasi desain fondasi. Pastikan lubang cukup dalam untuk mendapatkan kekuatan tambahan.

(3) Pembuatan Fondasi

Campurkan semen dengan bahan pengikat dan pasir, lalu tuangkan ke dalam lubang yang telah digali. Pastikan fondasi rata dan biarkan mengering selama beberapa hari untuk mendapatkan kekuatan optimal.

c) Pemasangan Pelat Dasar

Setelah fondasi kering, langkah berikutnya ialah pemasangan pelat dasar yang akan menjadi fondasi bagi tiang penopang.



Gambar 1.50 Pemasangan Pelat Dasar

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek (2024)*

(1) Penempatan Pelat Dasar

Letakkan pelat dasar di atas fondasi yang telah dibuat, pastikan posisinya tepat dan rata.

(2) Pengikatan

Gunakan baut atau pengikat lainnya untuk memastikan pelat dasar terhubung dengan kuat ke fondasi sehingga dapat menahan beban tiang penopang yang akan dipasang.

d) Pemasangan Tiang Penopang

Tiang penopang berfungsi untuk menopang struktur dudukan modul surya.

(1) Penempatan Tiang Penopang

Pasang tiang penopang di atas pelat dasar dengan menggunakan pengikat yang kuat. Pastikan tiang terpasang vertikal dan sejajar dengan tiang lainnya.

(2) Pengikatan

Gunakan baut atau las untuk mengamankan tiang penopang. Pastikan bahwa semua tiang terpasang kokoh dan tidak goyah.

e) Pemasangan Penopang Modul Surya

Penopang modul surya merupakan komponen yang langsung terhubung dengan panel surya.

(1) Pemasangan Penopang

Pasang penopang modul surya di bagian atas tiang penopang. Pastikan penopang tersebut dirancang untuk memungkinkan penyesuaian sudut kemiringan modul surya agar dapat mengoptimalkan penyerapan sinar matahari.

(2) Pengikatan Modul Surya

Setelah penopang terpasang, modul surya dipasang dengan menggunakan *clamp* atau pengikat lainnya. Pastikan panel terpasang dengan aman dan tidak ada bagian yang longgar.

f) Pemeriksaan Akhir

Setelah semua komponen terpasang, lakukan pemeriksaan akhir untuk memastikan bahwa semua strukturudukan modul surya telah terpasang dengan baik. Periksa kekuatan setiap sambungan, pastikan semua baut dan pengikat terpasang dengan benar, serta pastikan bahwa modul surya berada pada posisi yang tepat untuk penyerapan sinar matahari yang maksimal.



Gambar 1.51 Pemasangan Tiang Penopang

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 1.52 Pemasangan Penopang Modul Surya

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

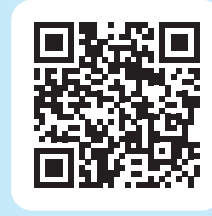
Untuk lebih jelas proses pemasangan PLTS di atas tanah, kamu dapat menyaksikan video dari beberapa tautan berikut ini.



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/vp5vop>
Sumber: <https://www.youtube.com/@shirleykong9062>



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/3o2nun>
Sumber: <https://www.youtube.com/@solarenergyvideo>



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/lyfgkl>
Sumber: <https://www.youtube.com/@serveenergy5854>

Aktivitas 1.14 Pemasangan PLTS di Atas Tanah

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu membuat rencana pemasangan dudukan dan modul surya pada perencanaan lokasi dan struktur pemasangan PLTS di atas tanah secara bergotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Pembagian Kelompok dan Area:

Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok mendapat area tertentu di lapangan sekolah atau lokasi lain yang sesuai untuk merencanakan pemasangan dudukan modul surya.

2. Penentuan Lokasi:

Lakukan survei dan pilih lokasi yang tepat di area yang diberikan. Pertimbangkan faktor seperti akses sinar matahari, topografi tanah, dan kemungkinan gangguan (misalnya, bayangan dari pohon atau bangunan).

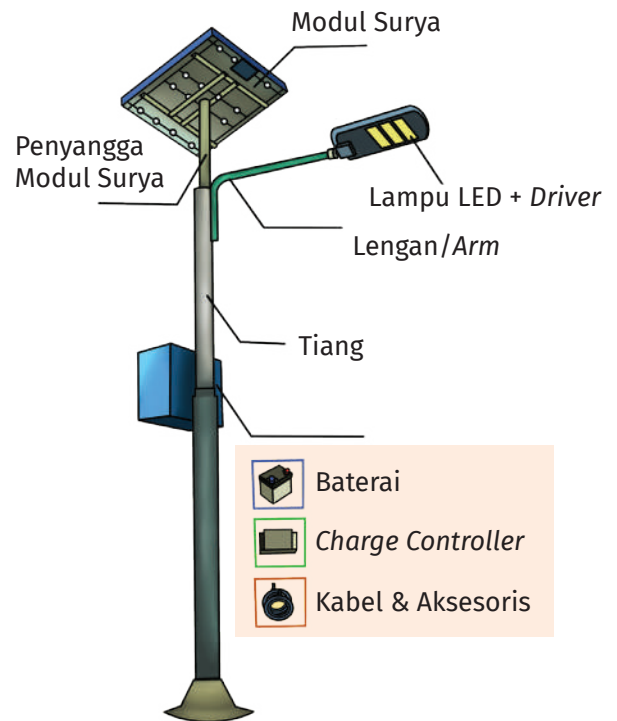
3. Perencanaan Struktur Dudukan:

Setelah lokasi ditentukan, rancang struktur dudukan modul surya yang akan dipasang. Diskusikan jenis material yang akan digunakan, desain dudukan, dan teknik pemasangan yang akan diterapkan. Rencana ini kemudian dituangkan dalam bentuk sketsa atau diagram sederhana.

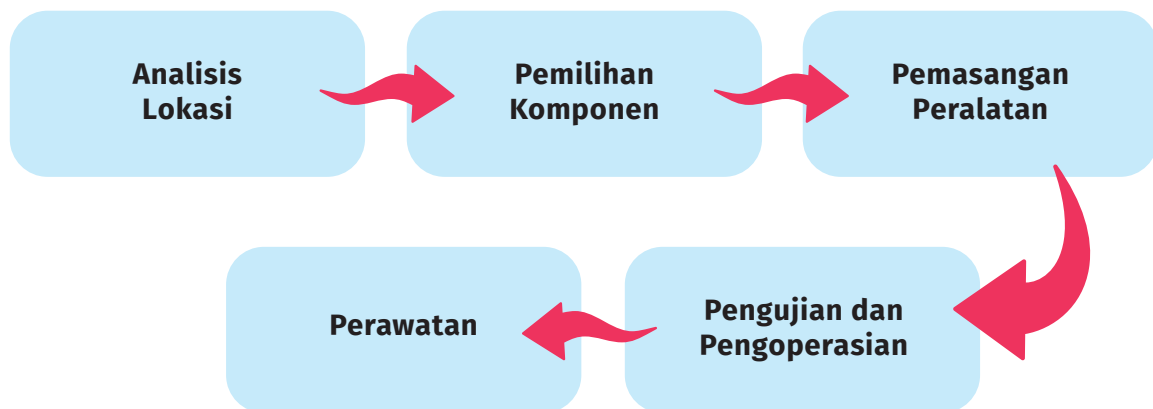
3. Pemasangan Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJUTS)

Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJUTS) adalah penerangan jalan umum dimana daya listrik untuk lampu disuplai oleh sistem mandiri yang diperoleh dari energi matahari, dan dapat dipasang di mana saja dengan instalasi relatif mudah dan cepat. PJUTS merupakan solusi penerangan untuk jalan dan kawasan yang tidak berada dalam area jaringan PLN atau untuk efisiensi biaya penerangan. Menggunakan lampu LED hemat energi dengan listrik yang disuplai dari baterai yang sebelumnya di-charge dengan sinar matahari

Pemasangan PJUTS membutuhkan beberapa langkah yang teliti untuk memastikan bahwa sistem bekerja dengan efisien dan tahan lama.



Gambar 1.53 PJUTS



Gambar 1.54 Diagram Alir Pemasangan PJUTS

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Pada Gambar 1.54, untuk pemasangan PJUTS, pertama-tama lakukan analisis lokasi dengan survei untuk menentukan area yang menerima sinar matahari maksimal dan bebas dari bayangan pohon atau bangunan. Pilih komponen yang tepat seperti panel surya dengan efisiensi tinggi, lampu LED hemat energi, baterai yang memiliki kapasitas cukup untuk pemakaian malam, kontroler pengisian untuk mengatur pengisian daya, tiang lampu yang kokoh, *mounting bracket*, serta kabel dan konektor berkualitas. Selanjutnya, pasang tiang lampu di lokasi yang telah ditentukan, kemudian pasang panel surya, baterai, kontroler, dan lampu LED sesuai instruksi. Pastikan semua koneksi kabel terpasang dengan benar dan uji sistem untuk memastikan semua komponen bekerja optimal. Lakukan perawatan rutin, termasuk pembersihan panel surya, pengecekan baterai, konektor, kabel, dan lampu LED untuk menjaga kinerja sistem tetap efisien.

Aktivitas 1.15 Menentukan Lokasi Pemasangan PJUTS

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu bekerja sama untuk merencanakan dan menentukan lokasi strategis pemasangan PJUTS di lingkungan sekolah atau area yang ditentukan, dengan mempertimbangkan efisiensi penerangan dan estetika lingkungan.

Langkah-Langkah:

1. Pembagian Kelompok dan Tugas:

Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok bertugas merencanakan pemasangan PJUTS di area tertentu, misalnya sepanjang jalan masuk sekolah atau area parkir.

2. Survei Lokasi dan Penentuan Posisi:

Lakukan survei di area yang telah ditentukan, periksa kebutuhan penerangan di malam hari, perhatikan faktor seperti jarak antartiang lampu, akses sinar matahari, dan pengaruh terhadap lingkungan sekitarnya. Pertimbangkan juga ketinggian tiang lampu yang akan digunakan.

3. Penyusunan Rencana Pemasangan:

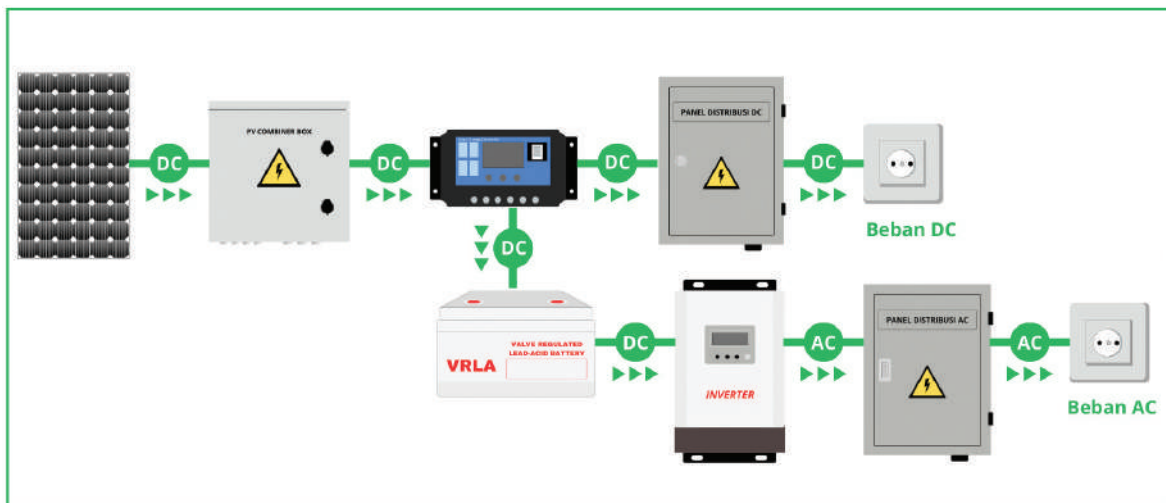
Berdasarkan hasil survei, buatlah rencana pemasangan yang mencakup penentuan posisi setiap tiang lampu, jenis modul surya yang akan digunakan, dan orientasi panel surya untuk mendapatkan sinar matahari maksimal. Presentasikan rencana tersebut untuk mendapatkan masukan dan persetujuan.

4. Pemasangan Instalasi Kelistrikan PLTS

Pemasangan kelistrikan PLTS adalah proses yang melibatkan pemasangan dan penyambungan berbagai komponen sistem surya untuk memastikan aliran energi yang efisien dan aman dari panel surya hingga pengguna akhir. Langkah pertama dalam instalasi ini ialah pemasangan panel surya di atap atau lokasi yang mendapatkan paparan sinar matahari optimal. Panel surya dihubungkan secara seri dan/atau paralel untuk mencapai konfigurasi tegangan dan arus yang diinginkan. Kabel dari panel-panel ini kemudian dihubungkan ke *combiner box*, yang menggabungkan *output* beberapa rangkaian menjadi satu aliran arus DC yang lebih besar. Arus DC dari *combiner box* disalurkan ke inverter, yang mengubahnya menjadi arus AC yang kompatibel dengan jaringan listrik rumah atau komersial.

Selain itu, sistem proteksi seperti pemutus sirkuit, *grounding*, dan perangkat pemantauan dipasang untuk memastikan keamanan dan kinerja optimal sistem. Terakhir, arus AC yang dihasilkan dialirkan melalui panel distribusi listrik untuk digunakan langsung atau dikirim ke jaringan listrik umum. Keseluruhan proses ini harus dilakukan sesuai dengan standar dan regulasi kelistrikan yang berlaku untuk menjamin efisiensi, keamanan, dan keandalan sistem PLTS.

a. Pemasangan Kelistrikan PLTS Off-Grid



Gambar 1.55 Blok Diagram PLTS Off-Grid

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Berikut langkah-langkah pemasangan kelistrikan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid*.



7)

Pemasangan Panel Distribusi DC

- Pasang panel distribusi DC: tempatkan panel distribusi DC di lokasi yang sesuai.
- Koneksi DC dari baterai: hubungkan *output* dari *charge controller* ke panel distribusi DC, dan pastikan semua sambungan aman.

8)

Pemasangan Panel Distribusi AC

- Pasang panel distribusi AC: tempatkan panel distribusi AC di lokasi yang sesuai.
- Koneksi AC dari inverter: sambungkan *output* inverter ke panel distribusi AC.

9)

Pemasangan Sistem Proteksi

- Pasang sistem proteksi: instal sistem proteksi seperti *fuse* atau *circuit breaker* pada jalur DC dan AC untuk melindungi komponen dari arus lebih dan korsleting.
- Koneksi proteksi: hubungkan sistem proteksi di antara komponen yang relevan, seperti antara baterai dan *charge controller*, serta inverter dan panel distribusi.

10)

Koneksi Beban

- Koneksi beban AC: sambungkan peralatan yang menggunakan daya AC ke panel distribusi AC.
- Koneksi beban DC: sambungkan peralatan yang menggunakan daya DC ke panel distribusi DC.

11)

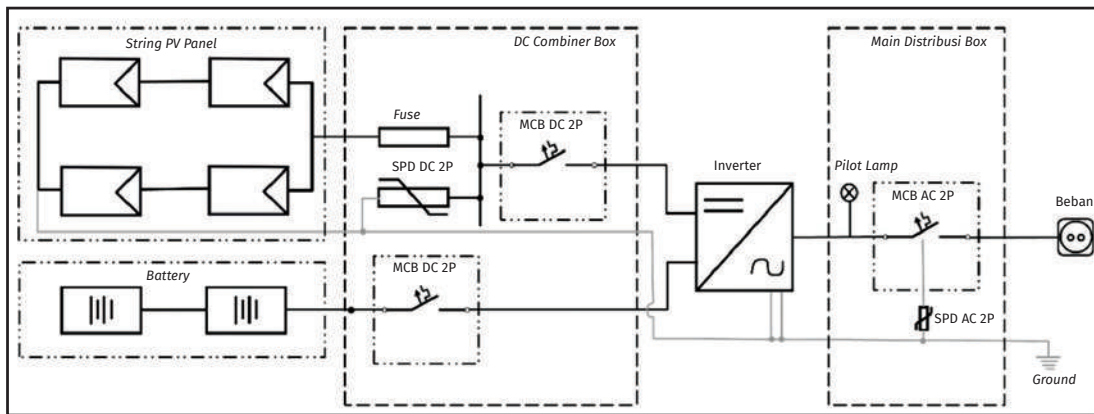
Pengujian dan Verifikasi

- Nyalakan sistem: aktifkan sistem dan periksa semua komponen.
- Uji tegangan dan arus: gunakan multimeter untuk memeriksa tegangan dan arus di berbagai titik sistem.
- Periksa koneksi: pastikan semua koneksi aman dan sesuai.

12)

Penutupan dan Pengamanan

- Tutup semua komponen: pasang kembali penutup pada *combiner box*, *charge controller*, inverter, dan panel distribusi untuk melindungi komponen.
- Amankan kabel: ikat dan amankan semua kabel untuk mencegah kerusakan dan menjaga keamanan.



Gambar 1.56 Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS *Off-Grid*

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Aktivitas 1.16 Pemasangan Instalasi

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pemasangan instalasi kelistrikan PLTS *Off-Grid* secara bergotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Pembagian Kelompok:

Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok diberi tanggung jawab untuk memasang semua komponen utama dari sistem PLTS *Off-Grid*, termasuk panel surya, baterai, inverter, dan sistem distribusi listrik.

2. Perencanaan Skema Instalasi:

Diskusikan skema instalasi, mulai dari penempatan panel surya, pengkabelan ke baterai dan inverter, hingga koneksi ke sistem distribusi listrik yang digunakan dalam PLTS *Off-Grid*. Tetapkan peran setiap anggota untuk memastikan tugas terbagi secara efektif dan efisien.

3. Pelaksanaan Pemasangan:

Pasang panel surya di lokasi yang telah ditentukan, kemudian hubungkan panel tersebut ke baterai melalui *charge controller*. Lanjutkan dengan menghubungkan inverter ke baterai serta ke sistem distribusi listrik yang akan digunakan. Pastikan setiap langkah pemasangan dilakukan dengan cermat, aman, dan sesuai dengan standar yang berlaku.

4. Pengujian Sistem:

Setelah pemasangan selesai, lakukan uji coba sistem untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat disimpan dengan baik di baterai, diubah oleh inverter, dan digunakan untuk menjalankan beban listrik. Pengujian ini juga mencakup pemeriksaan keamanan dan keandalan sistem.

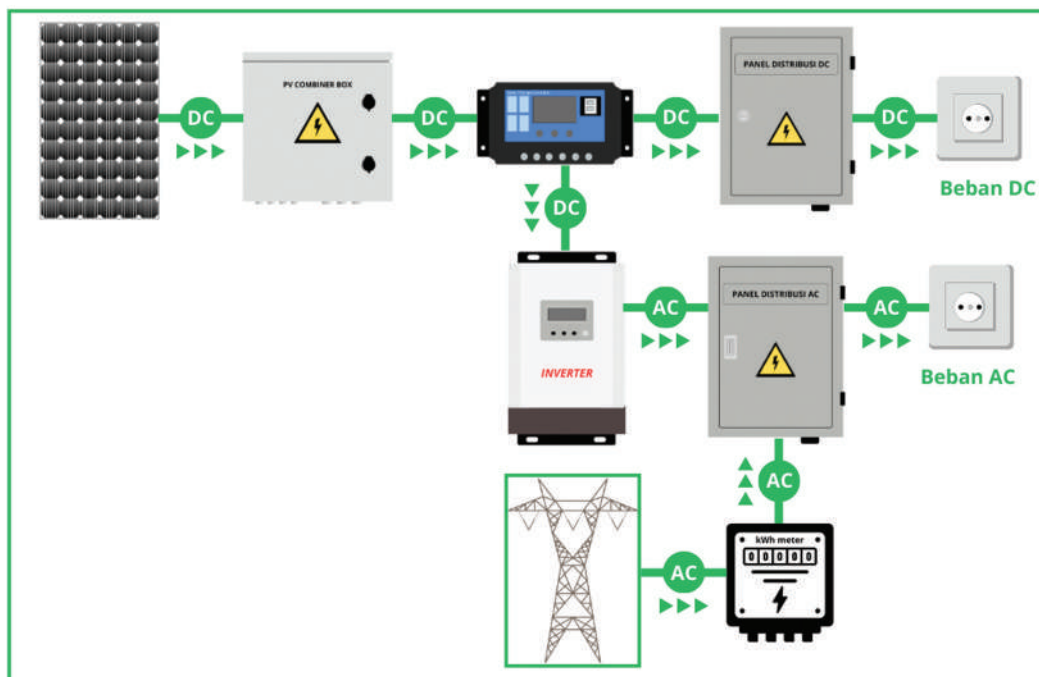
5. Penyusunan Laporan:

Kelompok menyusun laporan yang merinci semua proses pemasangan, hasil pengujian, serta refleksi tentang bagaimana kerja sama dan gotong royong diterapkan selama aktivitas berlangsung. Laporan ini juga harus mencakup solusi yang ditemukan untuk tantangan yang dihadapi.

6. Presentasi dan Diskusi:

Presentasikan hasil pemasangan dan laporan di depan kelas. Setelah presentasi, diskusikan evaluasi hasil kerja kelompok, memberikan umpan balik, dan memperkuat pemahaman tentang pentingnya gotong royong dalam proses pemasangan PLTS *Off-Grid*.

b. Pemasangan Kelistrikan PLTS *On-Grid*

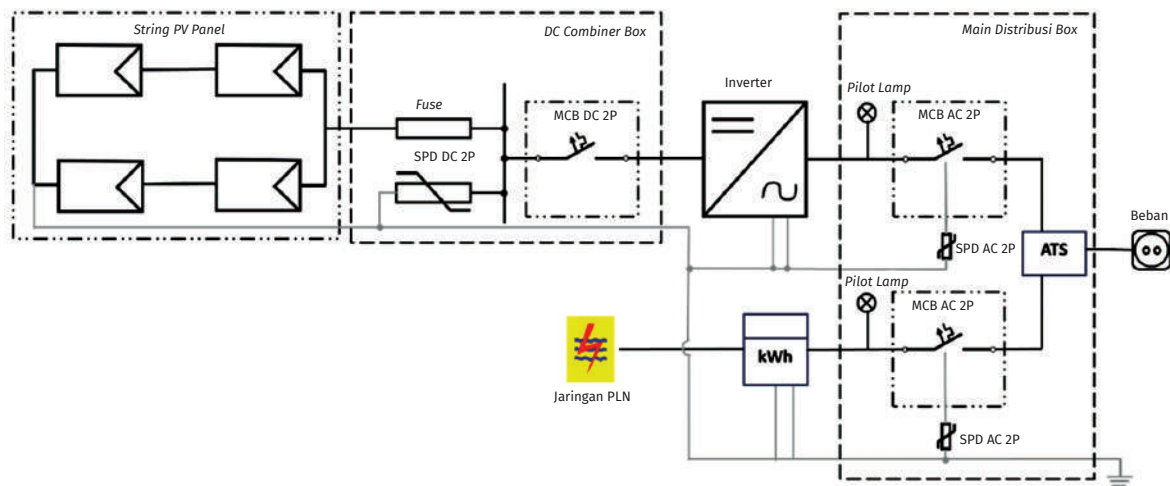


Gambar 1.57 Blok Diagram PLTS *On-Grid*

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Pada Gambar 1.57 Blok Diagram PLTS *On-Grid* dan Gambar 1.58 Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS *On-Grid* untuk langkah-langkah pemasangan instalasi kelistrikan PLTS *On-Grid* dimulai dengan persiapan dan perencanaan, mencakup analisis kebutuhan energi harian dan perancangan sistem untuk menentukan spesifikasi komponen seperti modul surya, SCC, inverter, *combiner box*, serta panel distribusi AC dan DC. Pemasangan dimulai dari modul surya, yang dipasang pada rangka penopang dengan koneksi kabel menggunakan konektor MC4 sesuai desain (seri atau paralel). *Combiner box* dipasang untuk menghubungkan kabel dari modul surya ke SCC, yang mengatur aliran energi menuju inverter atau baterai. Inverter kemudian dipasang di lokasi yang aman dan dihubungkan ke panel distribusi AC untuk menyalurkan daya ke beban atau jaringan listrik PLN.

Tahapan selanjutnya meliputi pemasangan panel distribusi DC/AC, sistem proteksi seperti fuse dan *circuit breaker* untuk mencegah arus lebih, serta kWh meter untuk memantau energi yang dihasilkan. Sambungan ke jaringan PLN dilakukan dengan memastikan sinkronisasi sistem, sementara peralatan AC dan DC dihubungkan ke panel distribusi masing-masing. Setelah sistem dinyalakan, pengujian dilakukan untuk memeriksa tegangan, arus, dan koneksi. Penutupan komponen dan pengamanan kabel menjadi langkah akhir untuk memastikan keamanan dan kerapihan sistem sebelum dioperasikan.



Gambar 1.58 Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS *On-Grid*

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek* (2024)

Aktivitas 1.17 Pemasangan Instalasi Kelistrikan PLTS *On-Grid*

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pemasangan instalasi kelistrikan PLTS *On-Grid* secara bergotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Pembagian Kelompok:

Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok diberikan tugas untuk memasang semua komponen utama dari sistem PLTS *On-Grid*, termasuk panel surya, inverter, dan sistem distribusi listrik.

2. Perencanaan Skema Instalasi:

Diskusikan skema instalasi, termasuk penempatan panel surya, pengkabelan ke inverter, dan koneksi ke sistem distribusi listrik rumah atau bangunan. Tetapkan peran setiap anggota untuk memastikan pembagian tugas yang jelas dan efektif.

3. Pelaksanaan Pemasangan:

Lakukan pemasangan panel surya di lokasi yang telah ditentukan, menghubungkan panel tersebut ke inverter *on-grid*, dan kemudian sambungkan inverter ke panel distribusi listrik utama. Selama pemasangan, semua anggota kelompok bekerja sama, saling membantu, dan memastikan setiap langkah dilakukan dengan cermat dan aman.

4. Pengujian Sistem:

Setelah pemasangan selesai, lakukan uji coba sistem untuk memastikan bahwa listrik dari panel surya dapat disalurkan ke jaringan listrik dengan baik. Pengujian ini juga mencakup pemeriksaan keamanan dan efisiensi sistem.

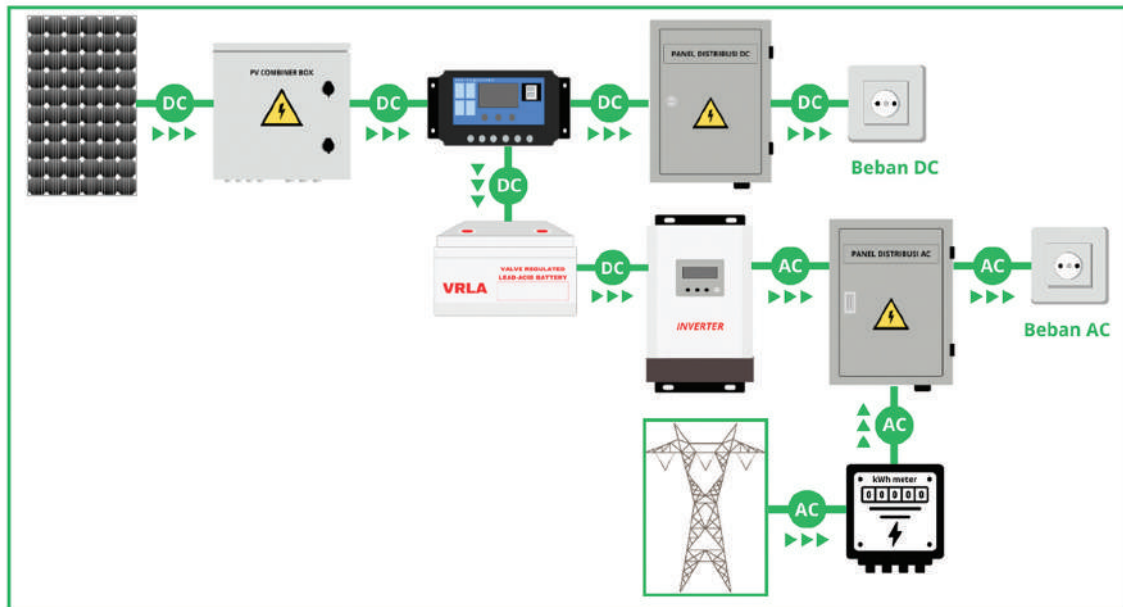
5. Penyusunan Laporan:

Susun laporan yang mencakup detail proses pemasangan, hasil pengujian, dan refleksi tentang kerja sama tim. Laporan ini harus menggambarkan bagaimana nilai gotong royong diterapkan selama aktivitas berlangsung.

6. Presentasi dan Diskusi:

Presentasikan hasil pemasangan dan laporan di depan kelas. Diskusi dilakukan untuk mengevaluasi hasil kerja, memberikan umpan balik, dan memperkuat pemahaman mengenai pentingnya kerja sama dalam pemasangan sistem PLTS *On-Grid*.

c. Pemasangan Kelistrikan PLTS Hibrida



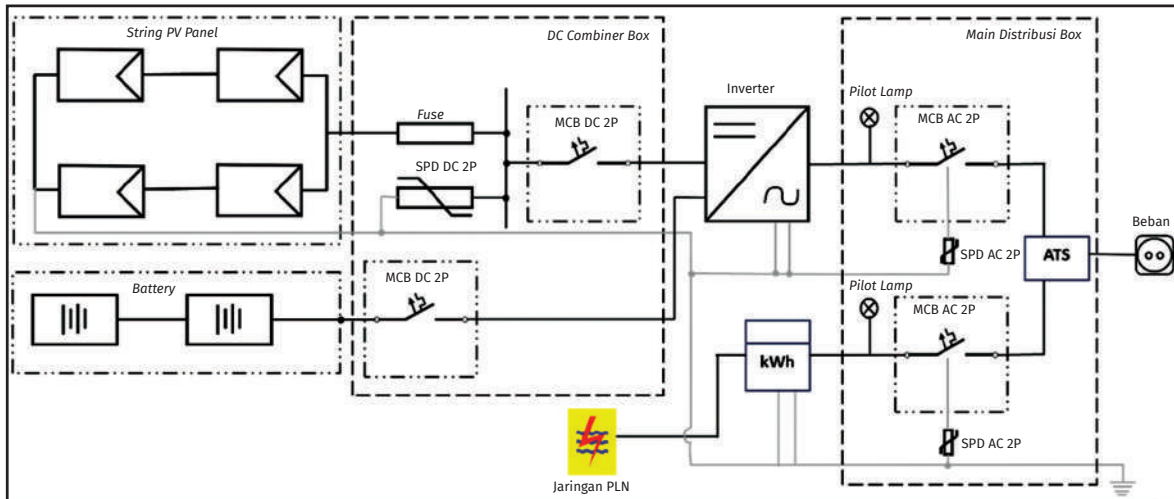
Gambar 1.59 Blok Diagram PLTS Hibrida

Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

Seperti yang kita lihat dari Gambar 1.59 Blok Diagram PLTS Hibrida dan Gambar 1.61 Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS Hibrida. Proses instalasi kelistrikan PLTS Hibrida diawali dengan tahap persiapan dan perencanaan, yang meliputi penghitungan kebutuhan energi harian serta perancangan sistem untuk menentukan spesifikasi komponen seperti modul surya, *combiner box*, SCC, inverter hibrida, baterai, panel distribusi AC/DC, dan perangkat proteksi. Pemasangan dimulai dari modul surya, yang dipasang pada rangka penopang di lokasi dengan paparan sinar matahari maksimal, kemudian dihubungkan menggunakan konektor MC4 sesuai desain (seri atau paralel). *Combiner box* dipasang untuk menghubungkan kabel dari modul surya ke SCC, yang berfungsi mengelola aliran energi ke baterai atau inverter hibrida. Baterai dipasang di lokasi aman dan ventilatif, lalu dihubungkan ke SCC untuk menyimpan energi. Inverter hibrida dipasang di tempat dengan ventilasi baik dan *output*-nya disalurkan ke panel distribusi AC.

Langkah selanjutnya ialah pemasangan panel distribusi DC untuk peralatan yang membutuhkan daya DC dan panel distribusi AC untuk perangkat berbasis AC. Sistem proteksi, seperti *fuse* dan *circuit breaker*, diinstal untuk melindungi perangkat dari kerusakan akibat arus berlebih. KWh meter dipasang untuk mengukur energi yang dihasilkan dan digunakan. Koneksi ke jaringan PLN dilakukan dengan memastikan sinkronisasi antara inverter hibrida

dan jaringan listrik. Setelah instalasi selesai, pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan, arus, dan koneksi berjalan sesuai spesifikasi. Tahap akhir ialah menutup kembali komponen, mengamankan kabel, dan memastikan semua sistem siap digunakan secara aman dan efisien.



Gambar 1.60 Diagram Pengkabelan Sederhana PLTS Hibrida

Sumber: Feviana, *Kemdikbudristek (2024)*

Aktivitas 1.18 Pemasangan Instalasi Kelistrikan PLTS Hibrida

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pemasangan instalasi kelistrikan PLTS hibrida secara bergotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Pembagian Kelompok:

Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok diberi tanggung jawab untuk memasang semua komponen utama dari sistem PLTS hibrida, termasuk panel surya, baterai, inverter hibrida, dan koneksi ke jaringan listrik utama.

2. Perencanaan Skema Instalasi:

Diskusikan skema instalasi, mulai dari penempatan panel surya, pengkabelan ke baterai dan inverter hibrida, hingga koneksi ke jaringan listrik utama. Tetapkan peran setiap anggota untuk memastikan pembagian tugas yang jelas dan efektif.

3. Pelaksanaan Pemasangan:

Pasang panel surya di lokasi yang telah ditentukan, hubungkan panel tersebut ke baterai melalui *charge controller*. Kemudian, hubungkan inverter hibrida ke baterai dan ke sistem distribusi listrik. Semua anggota kelompok bekerja sama untuk memastikan pemasangan dilakukan dengan cermat, aman, dan sesuai dengan standar.

4. Pengujian Sistem:

Setelah pemasangan selesai, lakukan uji coba sistem untuk memastikan bahwa energi dari panel surya dapat disimpan di baterai, diubah oleh inverter hibrida, dan didistribusikan ke beban listrik serta ke jaringan listrik utama. Pengujian juga dilakukan untuk memastikan keamanan dan efisiensi sistem.

5. Penyusunan Laporan:

Susun laporan yang merinci semua proses pemasangan, hasil pengujian, serta refleksi tentang penerapan gotong royong selama aktivitas. Laporan ini juga harus mencakup solusi terhadap tantangan yang dihadapi selama pemasangan.

6. Presentasi dan Diskusi:

Presentasikan hasil pemasangan dan laporan di depan kelas. Diskusi dilakukan untuk mengevaluasi hasil kerja kelompok, memberikan umpan balik, dan memperkuat pemahaman tentang pentingnya gotong royong dalam pemasangan sistem PLTS hibrida.

Uji Kompetensi

Jawablah pertanyaan berikut dengan tepat!

1. Sebuah desa di daerah pegunungan memutuskan untuk memasang panel surya sebagai sumber energi listrik utama. Meskipun matahari bersinar sepanjang tahun, mereka menghadapi masalah saat musim hujan. Pada musim ini, produksi listrik dari panel surya mengalami penurunan signifikan, bahkan ketika langit tidak sepenuhnya tertutup awan.

Jelaskan bagaimana prinsip kerja sel surya menyebabkan penurunan produksi listrik selama musim hujan. Apa saja faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sel surya dalam kondisi cuaca seperti ini? Bagaimana solusi yang dapat diimplementasikan untuk memaksimalkan efisiensi sistem pada saat musim hujan?

2. Sebuah sekolah di daerah terpencil menggunakan sistem PLTS *Off-Grid* untuk menyediakan listrik bagi kegiatan belajar-mengajar. Sistem tersebut menggunakan inverter untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan dari panel surya dan baterai menjadi listrik AC yang digunakan untuk berbagai peralatan listrik di sekolah. Namun, sekolah tersebut mengalami masalah di mana beberapa perangkat listrik mati secara tiba-tiba saat digunakan, meskipun sistem menunjukkan bahwa baterai masih memiliki cukup energi.

Analisislah kemungkinan penyebab perangkat listrik mati secara tiba-tiba tersebut, meskipun baterai masih memiliki cukup daya. Jelaskan bagaimana inverter berperan dalam masalah ini dan berikan solusi teknis yang dapat diterapkan untuk memastikan perangkat listrik dapat bekerja dengan stabil.

3. Sebuah perusahaan ingin memasang PLTS di sebuah kawasan industri. Kawasan ini memiliki beberapa bangunan tinggi, area terbuka, dan beberapa pohon besar. Setelah melakukan survei, mereka mempertimbangkan dua lokasi potensial: satu di atap bangunan tertinggi dan satu lagi di area terbuka yang dekat dengan pohon-pohon besar.

Analisislah faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan lokasi pemasangan PLTS di kawasan industri tersebut. Berdasarkan prinsip perencanaan lokasi PLTS, pilih lokasi yang paling optimal antara atap bangunan tinggi dan area terbuka dekat pohon, serta jelaskan alasan di balik keputusan tersebut.

4. Sebuah pemerintah daerah berencana untuk memasang Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJUTS) di sepanjang jalan utama yang menghubungkan beberapa desa terpencil. Namun, setelah pemasangan, beberapa lampu PJUTS tidak menyala secara konsisten, terutama di malam hari yang mendung atau berawan. Pemerintah daerah ingin memahami masalah ini sebelum melanjutkan proyek pemasangan di lokasi lain.

Analisislah penyebab lampu PJUTS tidak menyala secara konsisten meskipun pemasangan telah dilakukan sesuai dengan spesifikasi teknis. Jelaskan faktor-faktor yang harus diperhatikan saat memilih lokasi dan spesifikasi teknis untuk pemasangan PJUTS agar masalah serupa tidak terjadi di masa depan.

5. Sebuah perusahaan menengah memutuskan untuk menginstal sistem PLTS hibrida di pabriknya. Sistem ini akan menggabungkan sumber energi dari panel surya, generator diesel, dan jaringan listrik PLN. Setelah beberapa bulan beroperasi, mereka mengamati bahwa biaya operasional terkait penggunaan generator diesel masih cukup tinggi, meskipun sistem PLTS hibrida seharusnya mengurangi ketergantungan pada generator tersebut.

Analisislah penyebab biaya operasional generator diesel yang masih tinggi pada sistem PLTS hibrida ini. Bagaimana konfigurasi sistem dan strategi pengelolaan energi dapat dioptimalkan untuk meminimalkan penggunaan generator diesel dan memaksimalkan pemanfaatan energi dari panel surya dan jaringan PLN?

Pengayaan

1. Carilah lebih banyak lagi informasi tentang konsep dasar dan komponen PLTS melalui buku, link website, youtube, atau media lainnya agar memiliki pengetahuan yang lebih mendalam tentang topik pembelajaran tersebut.
2. Rencanakan pemasangan PLTS dengan menggunakan aplikasi, Salah satunya menggunakan aplikasi helioscope. Berikut tautan video penggunaan aplikasi helioscope.



Sumber: <https://www.youtube.com/@scienceandrun3746>



Sumber: <https://www.youtube.com/@scienceandrun3746>

- Carilah proses pemasangan PLTS terapung melalui buku, link website, youtube, atau media lainnya agar memiliki pengetahuan yang lebih mendalam tentang topik pembelajaran tersebut.

Refleksi

- Setelah mempelajari materi Teknik Energi Surya, bagaimanakah penguasaan kamu terhadap materi-materi berikut?

Beri tanda ceklis (✓) pada materi yang telah kamu kuasai.

Materi	Bobot			
	1	2	3	4
Prinsip Kerja Sel Surya				
Modul Surya				
<i>Solar Charge Controller</i>				
Inverter				
Baterai				
Sistem PLTS				
Perencanaan PLTS				
Perancangan PLTS				

Materi	Bobot			
	1	2	3	4
Pemasangan Dudukan dan Modul Surya PLTS				
Pemasangan Instalasi Kelistrikan PLTS				

Keterangan Bobot	1. Kurang
	2. Cukup
	3. Baik
	4. Sangat Baik

- Berdasarkan materi-materi tersebut, bagian manakah yang paling kamu sukai? Mengapa?
- Apa manfaat yang kamu dapatkan setelah mempelajari mater ini untuk kehidupan sehari-hari?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2024

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin
untuk SMK/MAK Kelas XI

Penulis: Zainul M. Pulungan, Feviana Idarrani, dan Amin Wahyono

ISBN: 978-634-00-0046-7



Bagaimana prinsip kerja pembangkit listrik tenaga mikrohidro?

Bab 2 Teknik Energi Hidro

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu menerapkan prinsip kerja hidro, perancangan, pembangunan dan pemasangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

Kata Kunci

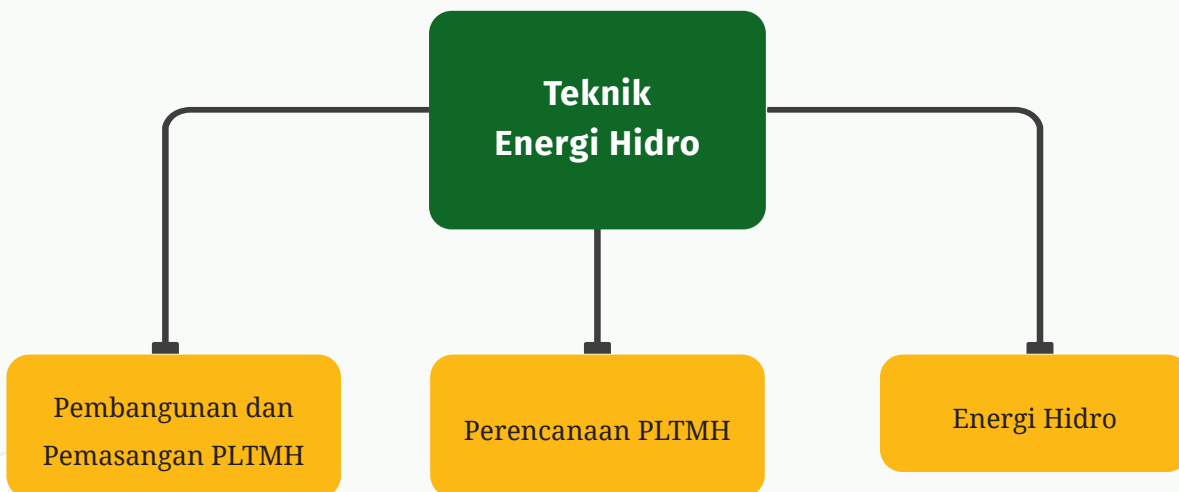
hidro

sipil

mekanik

elektrik

Peta Materi





Pernahkah kamu melihat air terjun jatuh dari ketinggian tertentu? Mengapa air tersebut dapat jatuh dari atas ke bawah dengan debit tertentu? Apa saja faktor yang memengaruhi? Energi apa yang dihasilkan? Bagaimana proses energi yang jatuh pada air dapat dikoversi menjadi energi listrik? Nah, jika sudah menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, mari, kita pelajari dalam materi berikut.

Gambar 2.1 Air Terjun
Sumber: Ramadhan (2024)

A. Energi Hidro

Kita berkenalan dulu dengan energi hidro. Kita akan berkenalan dengan energi hidro, komponen pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH), sistem kerja PLTMH. Kita juga akan belajar keselamatan ketenagalistrikan (K2) serta kesehatan dan keselamatan kerja (K3).

1. Pengenalan Energi Hidro

Teknologi dalam pemanfaatan energi air memiliki sejarah panjang. Selama abad pertengahan, kincir air menjadi sumber energi utama. Pada abad ke-19, mesin uap menggantikan kincir air sebagai sumber energi utama di beberapa negara. Saat ini, turbin air menggantikan kincir air. Turbin air pertama kali dipasang di Indonesia oleh Belanda



[https://buku.kemdikbud.
go.id/s/bnqfaj](https://buku.kemdikbud.go.id/s/bnqfaj)

Pembangkit Listrik Tenaga
Mikrohidro (Dandi; Ayu 2021)

pada akhir 1800-an. Pembangkit listrik tenaga air dipasang hampir di seluruh negara untuk memberikan listrik kepada fasilitas pengolahan perkebunan, pertambangan mineral, dan permukiman kolonial. Turbin air pertama dipasang di Jawa Barat, salah satu daerah utama perkebunan teh Indonesia, antara tahun 1880 dan 1890. Pada saat itu, turbin dipasang dengan mesin *roller* teh dan mesin pengolah lainnya di pabrik, tetapi tidak langsung menggerakkan generator listrik. Setelah teknologi turbin dan generator makin maju, pembangkit tenaga air untuk menghasilkan listrik mulai dibangun.

Energi hidro ialah jenis energi terbarukan yang memanfaatkan air untuk dapat menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga hidro ialah pembangkit yang memanfaatkan energi potensial melalui jatuhnya air dalam menggerakkan turbin, kemudian dihubungkan ke generator dengan cara langsung atau tidak langsung untuk menghasilkan energi listrik. Indonesia memiliki potensi pembangkit hidro sebesar 94 GW, tetapi total pemanfaatannya hanya 6,3 GW (6,69%).

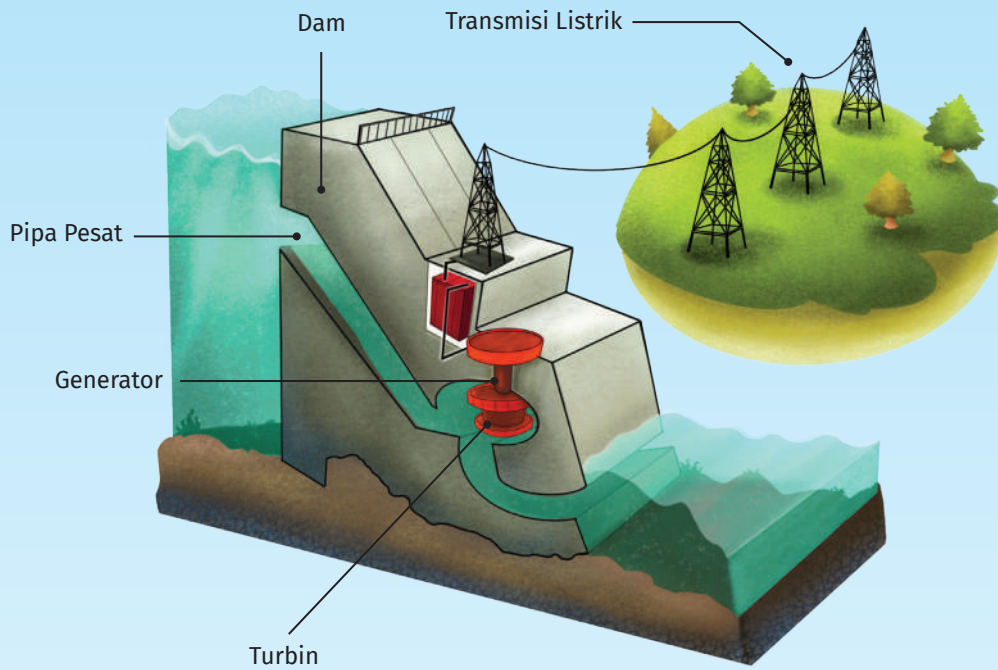
Untuk mengenal pembangkit listrik mikrohidro silakan pindai QR Code berikut ini.



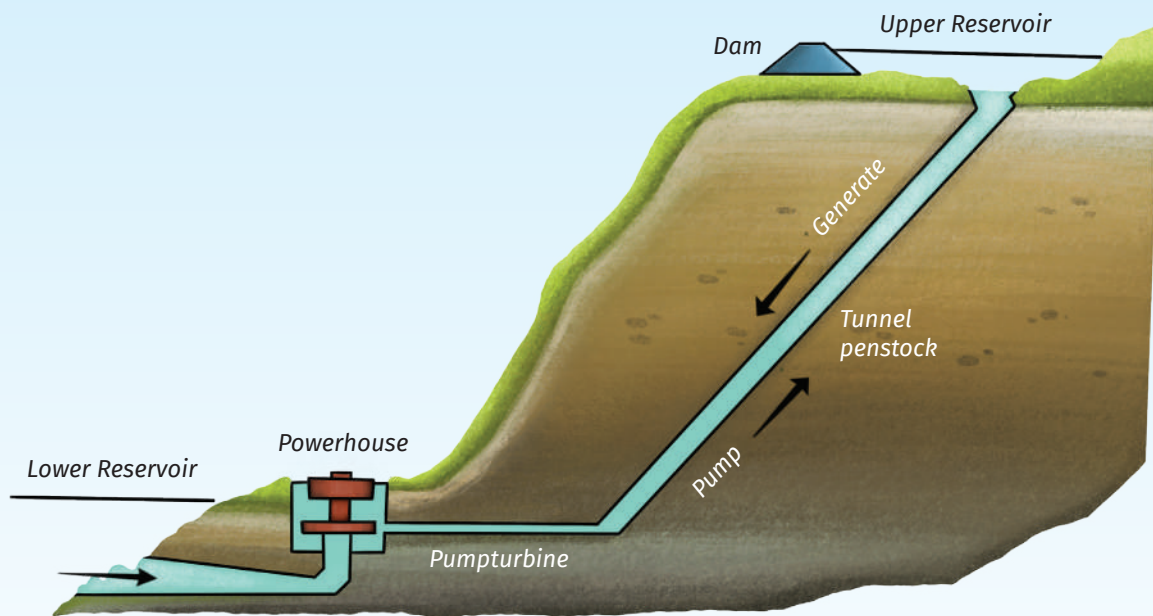
Energi hidro merupakan sumber energi yang memenuhi aspek berkelanjutan dari sisi ekonomi, dukungan lingkungan, dan dampak sosial. Menurut Hadiyanto (2016), keunggulan pembangkit listrik tenaga hidro antara lain seperti berikut:

- (1) konstruksi dan perawatan yang cukup sederhana,
- (2) suku cadang mudah didapatkan,
- (3) biaya operasi dan pemeliharaan cukup murah,
- (4) menciptakan lapangan kerja untuk masyarakat desa,
- (5) dapat digunakan sebagai/pembangkit dasar (*baseload*),
- (6) efisiensi energi yang cukup tinggi, dan
- (7) rendah dampak lingkungan khususnya emisi gas rumah kaca.

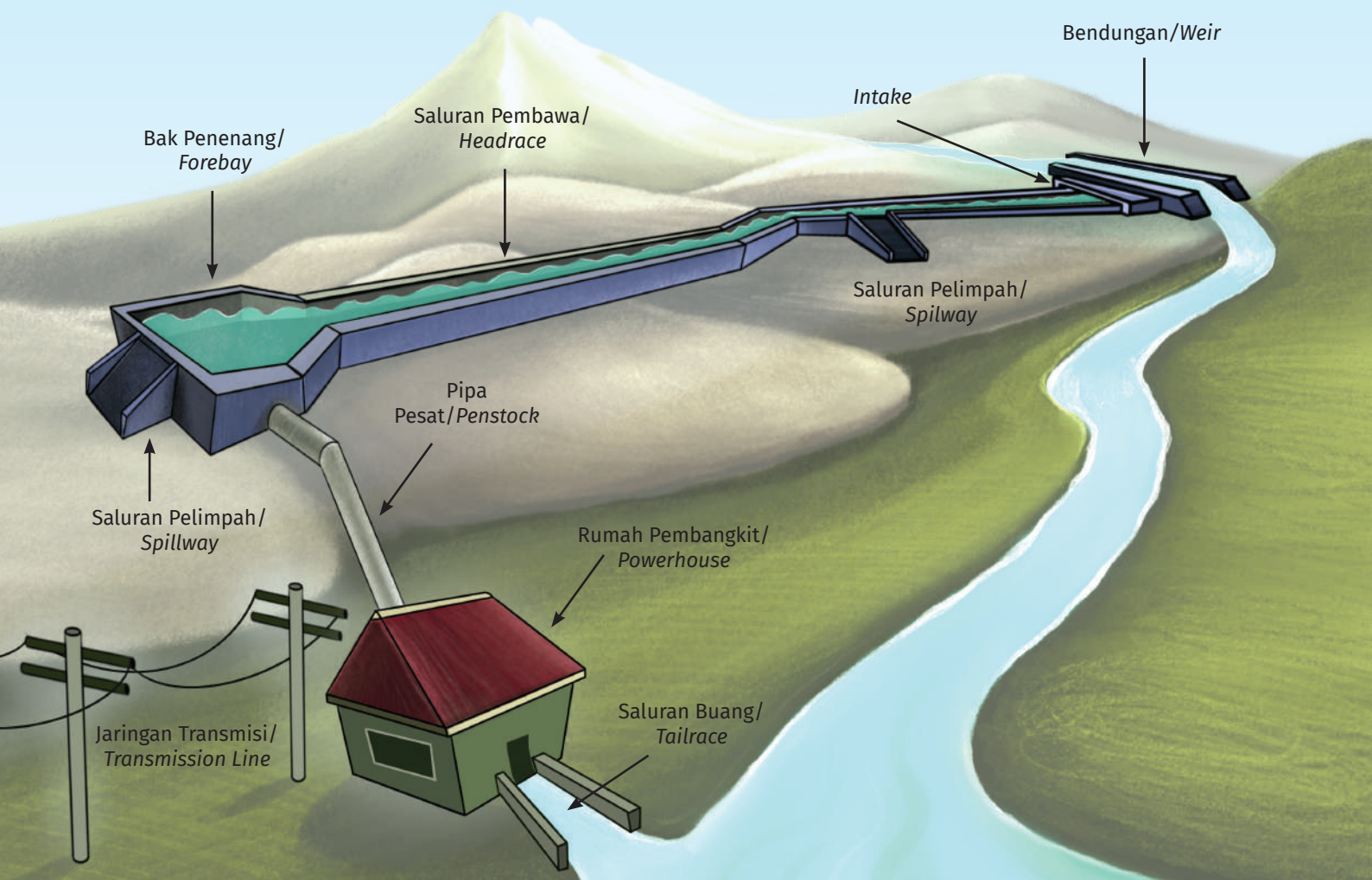
Skema pemanfaatan tenaga air dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu: menggunakan bendungan/waduk, *pump storage*, dan *run of river*.



Gambar 2.2 Proses Kerja Bendungan/Waduk



Gambar 2.3 Proses Kerja Pump Storage



Gambar 2.4 Proses Kerja Run of River

Klasifikasi pembangkit listrik tenaga air dapat dikelompokkan berdasarkan ukuran kapasitasnya menurut SNI 8396:2019 seperti pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Jenis Pembangkit Berdasarkan Kapasitas

Tipe		Kapasitas	Judul
PLTA Skala Kecil			$\leq 10 \text{ mW}$
a	Pikohidro	$< 5 \text{ kW}$	
b	Mikrohidro	$\geq 5 \text{ kW} - 1 \text{ mW}$	
	PLTMH kategori A	$5 \text{ kW} - 100 \text{ kW}$	
	PLTMH kategori B	$> 100 \text{ kW} - 200 \text{ kW}$	

Tipe		Kapasitas	Judul
	PLTMH Kategori C	> 200 kW - 600 kW	
	PLTMH Kategori D	> 600 kW - 1 mW	
c	Minihidro	> 1 MW - ≤ 10 mW	
PLTA Skala Menengah			> 10 mW - 50 mW
PLTA Skala Besar			> 50 mW

Pada materi ini, kita akan fokus pada pembangkit dengan kapasitas mikrohidro, yaitu 5 kW s.d. 1 mW atau sering dikenal dengan pembangkit Listrik tenaga mikrohidro (PLTMH). PLTMH biasanya menggunakan skema *run of river*. Besarnya energi yang dihasilkan oleh PLTMH ditentukan oleh jumlah aliran air/debit dalam satuan m³/detik dan tinggi jatuh (*head*) air. *Head* diukur dari *intake* pipa pesat sampai dengan turbin.

Desain turbin pada PLTMH ditentukan dari hasil analisis debit tahunan selama musim hujan dan musim kering. Desain turbin biasanya ditetapkan sedikit di atas batas minimum untuk menjaga kinerja dan efisiensi peralatan pembangkit. Turbin berkualitas tinggi dapat mencapai efisiensi hidrolis 80–90%, lebih tinggi daripada semua penggerak utama. Namun, efisiensi keseluruhan berkisar di antara 50–70%.

Aktivitas 2.1 Pengenalan Energi Hidro

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu secara kritis mampu menjelaskan kekurangan pembangkit tenaga listrik tenaga hidro dari aspek teknis, sosial, lingkungan, dan ekonomi.

Langkah-Langkah:

1. Diskusikan dalam kelompok kecil bagaimana solusi untuk mengatasi setiap kekurangan yang ditemukan dari aspek teknis, sosial, lingkungan, dan ekonomi.
2. Kembangkan satu solusi kreatif yang paling relevan dan inovatif untuk mengatasi tantangan yang ditemukan.
3. Presentasikan hasil analisis dan solusi kepada kelompok lain.

2. Komponen PLTMH

Komponen PLTMH terdiri atas bangunan sipil, komponen mekanik, dan komponen elektrik.

a. Bangunan Sipil

Adapun bangunan sipil terdiri atas: bendung, *intake*, saluran pelimpah, bak pengendap, saluran pembawa, bak penenang, pipa pesat, rumah pembangkit, dan saluran pembuang.

1) Bendung dan *Intake*

Bendung (*weir*) berperan untuk mengalihkan aliran air dari sungai ke saluran *intake*. Sementara itu, *intake* ialah lubang atau pintu masuk ke saluran pembawa.



Gambar 2.5 Bendung

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.6 Intake

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.7 Saluran Pelimpah

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

2) Saluran Pelimpah

Saluran pelimpah (*spillway*) berperan untuk membantu mengembalikan air tumpah ke sungai serta mencegah erosi dan tanah longsor pada sistem saluran air.

3) Bak Pengendap Pasir

Bak pengendap pasir (*desilting chamber/sandtrap*) adalah saluran yang diperbesar yang digunakan untuk mengurangi kecepatan air. Fungsinya ialah untuk mencegah masuknya

pasir, sedimen, dan kerikil ke dalam pipa pesat. Biasanya, bak pengendap ini dirancang bersamaan dengan bak penenang untuk menghemat biaya.

4) Saluran Pembawa

Saluran pembawa (*headrace*) berperan menghubungkan air pada *intake* ke bak penenang.

Aktivitas 2.2 Bangunan Sipil

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan bangunan sipil pada PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

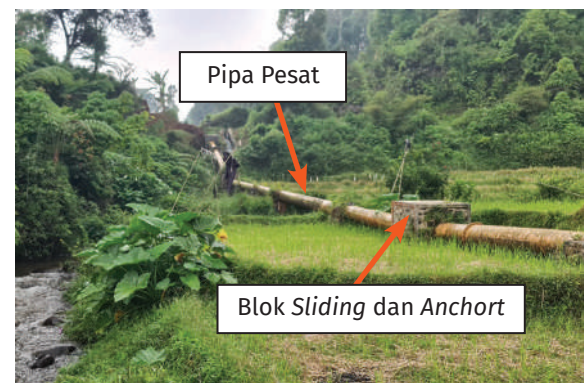
1. Identifikasilah tantangan teknis atau lingkungan yang terjadi pada bangunan sipil.
2. Bagaimana setiap tantangan tersebut dapat memengaruhi efisiensi dan keberlanjutan PLTMH?
3. Presentasikan hasil desain kepada kelompok lain. Kelompok lain memberikan masukan konstruktif dari hasil identifikasi tantangan yang ditemukan.

5) Bak Penenang

Bak penenang (*forebay*) adalah bak yang menghubungkan saluran pembawa dan pipa pesat. Ukuran bak biasanya diperbesar untuk menampung air lebih banyak. Selain itu, bak penenang memiliki saringan yang dipasang secara vertikal untuk mencegah benda-benda yang tidak diinginkan seperti daun dan ranting masuk ke pipa pesat. Biasanya, bak penenang juga difungsikan sebagai bak pengendap dan terdapat saluran pelimpah untuk menghemat biaya konstruksi sipil.

6) Pipa Pesat

Di rumah pembangkit, pipa pesat/pipa tekanan (*penstock*) menghubungkan bak penenang dengan turbin. Blok *sliding* dan *anchor* mendukung pipa pesat. Pipa pesat biasanya terbuat dari pipa baja yang dilas dan dirol untuk menyambungkannya.



Gambar 2.8 Pipa Pesat

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

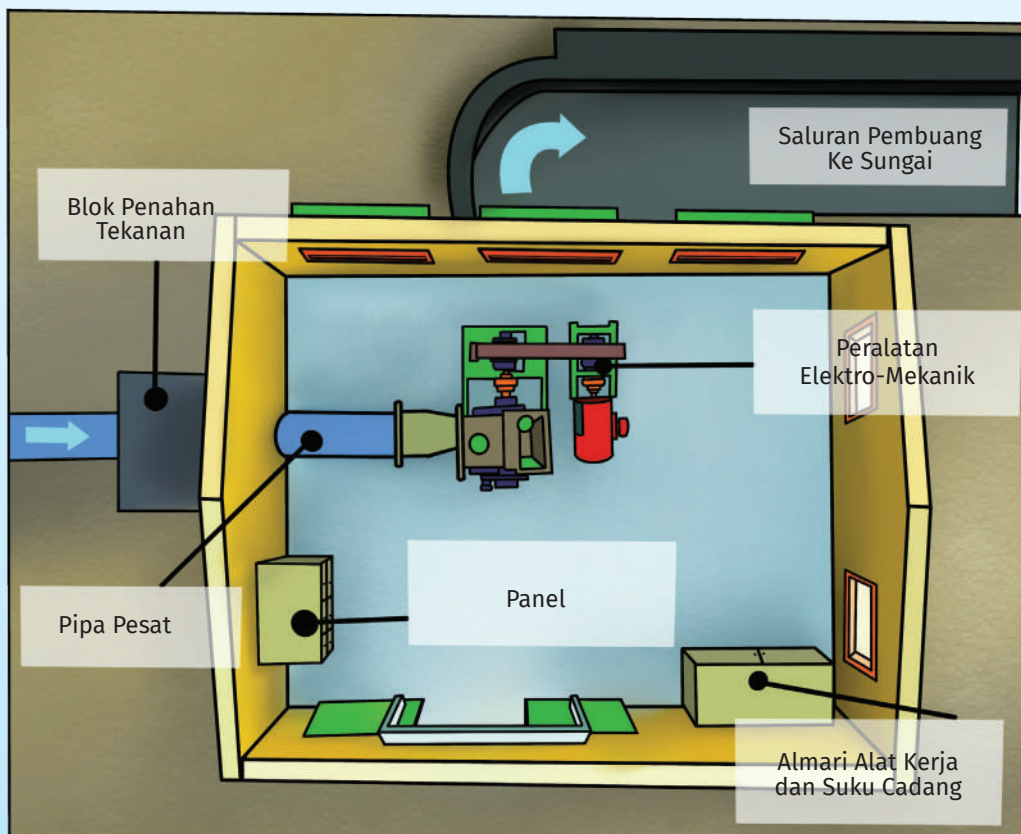


7) Rumah Pembangkit

Rumah pembangkit (*power house*) merupakan bangunan khusus untuk menyimpan sistem mekanik dan sistem kelistrikan agar tidak terkena hujan dan mencegah orang yang tidak berkepentingan untuk masuk. Menurut kamu, di manakah posisi rumah pembangkit cocok ditempatkan? Di pinggir sungai atau di badan sungai? Apabila volume air meningkat karena hujan, apa yang terjadi dengan rumah pembangkit tersebut?

Gambar 2.9 Rumah Pembangkit

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.10 Ilustrasi di dalam Rumah Pembangkit PLTMH

8) Saluran Pembuang

Saluran pembuang (*tailrace*) adalah saluran pengalihan yang menghubungkan air di turbin ke aliran sungai.

Aktivitas 2.3 Bangunan Sipil

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan bangunan sipil pada PLTMH secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Kasus: PLTMH di daerah terpencil mengalami kerusakan saluran pembawa akibat longsor. Efisiensi turbin menurun karena desain kolam penenang yang kurang optimal.
2. Identifikasi penyebab masalah. Analisis dampaknya pada sistem PLTMH secara keseluruhan. Evaluasi solusi alternatif yang mungkin diterapkan.



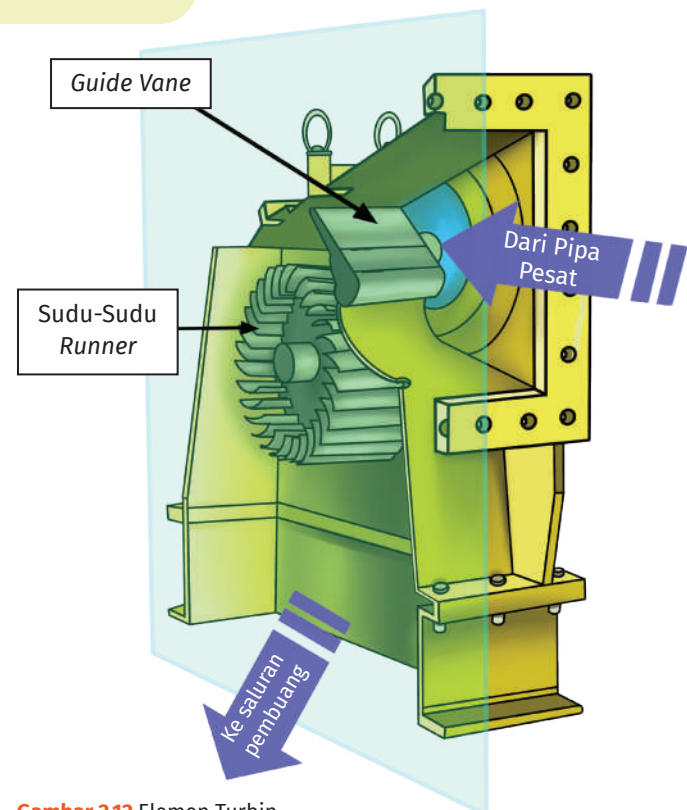
Gambar 2.11 Saluran Pembuang
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

b. Komponen Mekanikal

Komponen mekanikal terdiri atas turbin dan transmisi mekanik. Ayo, kita cermati penjelasan berikut.

1) Turbin

Turbin terdiri atas *runner* yang terhubung ke *shaft* yang mengubah energi potensial/kinetik dalam air yang jatuh menjadi daya mekanikal atau daya *shaft*. Turbin disambungkan secara langsung ke generator atau disambungkan tidak langsung melalui roda gigi (*belt*) dan *pulley*, bergantung pada kecepatan yang dibutuhkan oleh generator.



Gambar 2.12 Elemen Turbin

Jenis turbin yang digunakan bergantung pada tinggi jatuh dan debit. Turbin PLTMH dapat dibedakan menjadi dua, seperti berikut.

1. *Turbin impuls* adalah turbin yang hanya menggunakan energi kinetik dalam menggerakkan *runner* turbin. Termasuk jenis turbin ini ialah pelton, turgo, dan *crossflow*.
2. *Turbin reaksi* adalah turbin yang menggunakan energi kinetik dan tekanan dalam menggerakkan *runner* turbin. Termasuk jenis turbin ini ialah turbin propeller, turbin Kaplan, turbin Francis, turbin Deriaz.



Jenis Turbin PLTMH
(Aprialdi (2022))

Tabel 2.2 Jenis Turbin

Roda Turbin	Tekanan Jatuh Air		
	Tinggi	Menengah	Rendah
Impulse	<ul style="list-style-type: none"> 🔹 Pelton 🔹 Turgo 🔹 Multi-jet Pelton  <p>Pelton</p>	<ul style="list-style-type: none"> 🔹 Crossflow (Michel/Banki) 🔹 Turbo 🔹 Multi-jet Pelton  <p>Crossflow</p>	<ul style="list-style-type: none"> 🔹 Crossflow (Michel/Banki)
Reaction	 <p>Turgo</p>	<ul style="list-style-type: none"> 🔹 Francis 🔹 Pump as Turbine (PAT)  <p>Francis Turbine</p>	<ul style="list-style-type: none"> 🔹 Propeller 🔹 Kaplan  <p>Kaplan</p>

Sumber: G.Fisher (2007)

Aktivitas 2.4 Bangunan Sipil

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan fungsi turbin pada PLTMH secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Diskusikan hal berikut di dalam kelompokmu.
 - a. Fungsi dan prinsip kerja turbin.
 - b. Jenis-jenis turbin, karakteristik, dan contoh gambar dari turbin tersebut.
2. Presentasikan hasilnya di depan kelas.

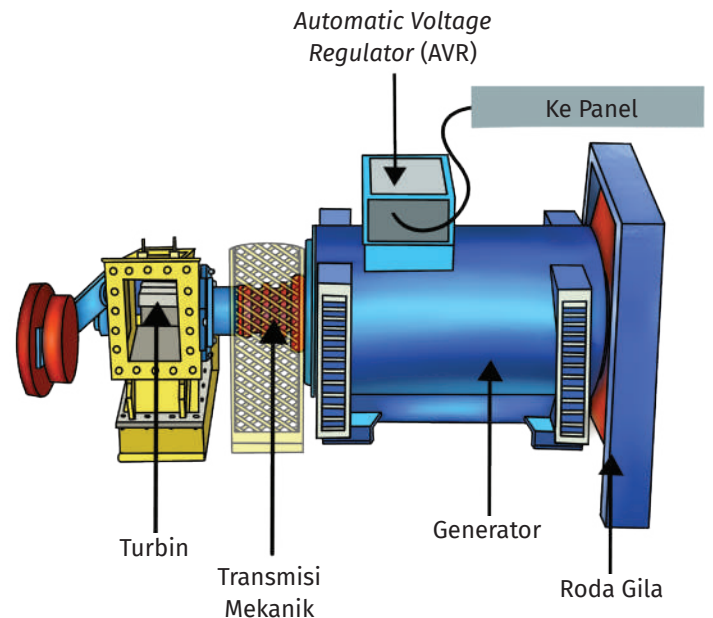
2) Transmisi Mekanik

Transmisi mekanik mentransfer daya putaran dari turbin ke generator. Sistem transmisi harus mentransmisikan daya dari turbin ke *shaft* generator dalam arah dan kecepatan yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi yang stabil.

Sistem transmisi daya PLTMH dibagi menjadi dua, yaitu seperti berikut.

a) Sistem Transmisi Daya Langsung

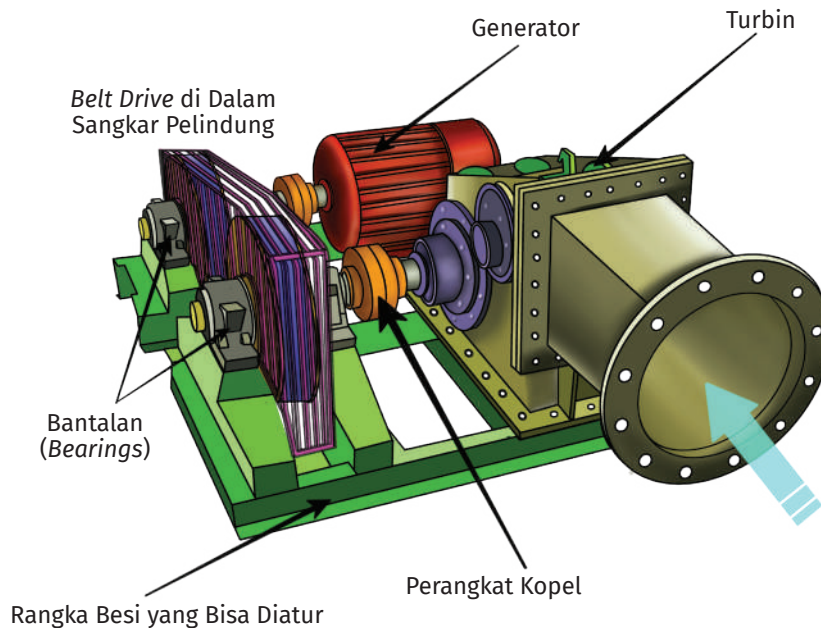
Jenis transmisi daya langsung (*direct drives*) contohnya kopling. Kopling berfungsi sebagai penerus daya dan pengaman *shaft*. Ukuran kopling dihitung dari daya dan putaran. Komponen kopling yang sering diganti ialah karet kopling. Keunggulan dari sistem ini ialah lebih kompak, mudah dirawat, dan efisiensi tinggi.



Gambar 2.13 Sistem Transmisi Langsung antara Turbin dan Generator

b) Sistem Transmisi Daya Tidak Langsung

Transmisi daya tidak langsung (*indirect drives*) di antaranya *belt drive* (dengan *flat belt* atau *V-belts*) atau *gearbox*. *Flat belt* digunakan untuk kapasitas > 20 kW, *V belt* untuk kapasitas < 20 kW. *Belt* berfungsi untuk menyalurkan daya dari poros turbin ke poros generator. *Belt* harus memiliki kekencangan tertentu sesuai ukuran dan jenisnya.



Gambar 2.14 Transmisi Daya Tidak Langsung antara Turbin dan Generator

Aktivitas 2.5 Transmisi Mekanik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan transmisi mekanik pada PLTMH secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Diskusikan di dalam kelompokmu tentang jenis transmisi pada PLTMH mekanik beserta fungsinya!
2. Presentasikan hasilnya di depan kelas.

c. Komponen Elektrik

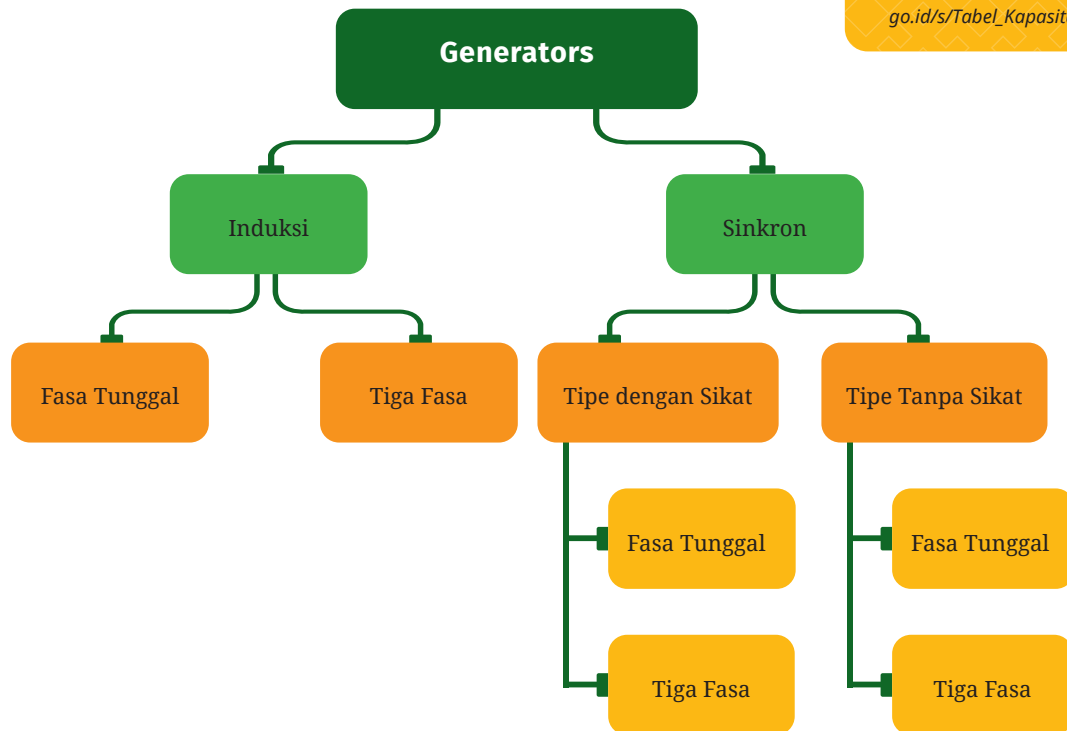
Adapun komponen elektrik terdiri atas generator, sistem kontrol, sistem monitoring, sistem proteksi, serta transmisi dan distribusi.

1) Generator

Generator menghasilkan energi listrik dari energi mekanik. Jenis generator arus bolak-balik (AC) yang digunakan biasanya memiliki frekuensi 50 Hz dan putaran 1.500 rpm. Energi listrik dapat dihasilkan dengan tegangan 220/380 melalui 1 fasa (2 kabel) atau 3 fasa (4 kabel). Pada praktiknya, pilihan antara sistem satu fasa atau tiga fasa didasarkan pada biaya yang tersedia dan kemudahan mendapatkan peralatan listrik yang diperlukan untuk instalasi. Secara umum, sistem satu fasa digunakan untuk kapasitas di bawah 5 kilowatt-jam, dan sistem tiga fasa digunakan untuk kapasitas di atas 5 kilowatt-jam.

Jenis generator yang digunakan dalam PLTMH ialah generator sinkron dan generator motor induksi. Putaran generatornya ialah 1.500 rpm, dapat menghasilkan frekuensi 50 Hz, 3 fasa, dan keluaran 230 V/400 V.

Untuk mengenal generator silakan pindai QR Code berikut ini.



Gambar 2.15 Jenis Generator PLTMH

a) Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron ialah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan dialirkan oleh kawat yang terhubung. Arus searah (DC) yang mengalir pada kumparan rotor (bagian yang berputar) akan menciptakan medan magnet homogen. Jika rotor yang dihubungkan dengan as turbin diputar dengan kecepatan konstan, pada kumparan stator (bagian yang tidak berputar), akan dibangkitkan tegangan AC. Pada generator dengan eksitasi sendiri, arus DC untuk menyuplai rotor dibangkitkan melalui *exciter*. *Exciter* sendiri pada dasarnya merupakan generator kecil yang menyatu dengan generator utama. Dengan mempertimbangkan rugi-rugi generator, kapasitas generator dinaikan 125% dari beban maksimum. Misalnya, beban sebesar 100 kVA, generator yang digunakan ialah 125 kVA.

Berdasarkan jenis turbin yang digunakan, penentuan generator harus dapat menyesuaikan antara kecepatan turbin dan generator sinkron dengan rumus:

$$N_s = 120.f / P$$

N = kecepatan putar rpm

f = frekuensi tegangan Hz

P = jumlah kutub

Kecepatan generator sinkron menggunakan rumus

$N_t = N_s (1-s)$

$S = (N_s - N_t)/N_s$

di mana

N_s = kecepatan sinkron (rpm)

N_t = kecepatan rotor sebagai generator

S = slip

Kecepatan generator sinkron dipengaruhi frekuensi dan jumlah kutub.

b) Generator Induksi/Asinkron

Mesin induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berdasarkan pada kenyataan bahwa arus pada rotor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, melainkan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif

antara putaran rotor dan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus *stator*. Generator induksi (asinkron) merupakan motor induksi yang digunakan sebagai generator dengan bantuan eksitasi dari luar, baik dengan menggunakan kapasitor (*isolated system*) maupun terhubung dengan jala-jala PLN. Dari karakteristik kopel kecepatan, motor induksi dapat dijadikan sebagai generator jika berada pada putaran lebih besar dari putaran sinkron ($n_r > n_s$) di mana slip bernilai negatif.

PLTMH dapat disebut efisien jika nilai efisiensinya berkisar antara 70–90%. Efisiensi daya PLTMH dapat dihitung sebagai berikut:

$$Eff = \frac{P \text{ output Maks}}{P \text{ input yang dibangkitkan}} \times 100\%$$

Eff = Efisiensi PLTMH

P *output* maksimal = daya generator

P input yang dibangkitkan = *data sheet* generator

Contoh Soal:

Desa Mekarsari memiliki PLTMH dengan daya input terbangkit, yaitu 22 kW, daya *output* terbangkit yang diukur selama 5 hari berturut-turut adalah 16 kW, 14 kW, 13 kW, 14 kW, 12 kW. Hitunglah besar efisiensi PLTMH tersebut. Tentukan apakah PLTMH tersebut termasuk efisien atau tidak.

Jawaban:

$$Eff \text{ hari ke-1} = 16/22 = 72\%$$

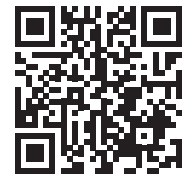
$$Eff \text{ hari ke-2} = 14/22 = 64\%$$

$$Eff \text{ hari ke-3} = 13/22 = 59\%$$

$$Eff \text{ hari ke-4} = 14/22 = 64\%$$

$$Eff \text{ hari ke-5} = 12/22 = 55\%$$

PLTMH tersebut kurang efisien karena bekerja di bawah kinerja optimum PLTMH, yaitu antara 70–90%.



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/guvjsj>

Komponen dan Cara Kerja
PLTMH (Teknik 2019)

Aktivitas 2.6 Generator

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan spesifikasi generator pada PLTMH secara mandiri.

Langkah-Langkah:

1. Identifikasilah generator PLTMH yang ada di sekolahmu, dengan mengisi tabel berikut.

Uraian	Speksifikasi	Aktual
Jenis generator PLTMH		
Merek generator PLTMH		
Kapasitas (KVA) generator		
Putaran (rpm) generator		
Frekuensi (Hz) generator		
Voltase generator		
Jumlah fasa generator		

Jika tidak ada, identifikasilah gambar di bawah ini dengan hanya mengisi tabel spesifikasi PLTMH.

AC GENERATOR		SERIAL N°			
TYPE	MUL 160 MA4	MCM18682			
CODE	MUL1632G000M0	WEIGHT Kg	152		
		IP	23		
		INS. Cl.			
		P.F.	0.8		
CONTINUOUS DUTY		Hz	RPM	V ex. A ex.	Δt cl.
KVA	28	40	50	1500 55	2.5 H
	400 Y	40	50	1500 55	2.5 H
KVA	28	73	50	1500 55	2.5 H
	220 YY	73	50	1500 55	2.5 H
KVA	33.6	40	60	1800 55	2.5 H
	480 Y	40	60	1800 55	2.5 H
KVA	33.6	81	60	1800 55	2.5 H
	240 YY	81	60	1800 55	2.5 H
STAND BY DUTY		Hz	RPM	V ex. A ex.	Δt cl.
KVA	30.5	44	50	1500 55	2.5 H
	400 Y	44	50	1500 55	2.5 H
KVA	37	45	60	1800 55	2.5 H
	480 Y	45	60	1800 55	2.5 H

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

2. Presentasikan hasilnya di depan kelas.

2) Sistem Kontrol

Sistem kontrol pada PLTMH ada dua jenis, yaitu sistem kontrol aliran (*flow control*) dan sistem kontrol beban (*load control*).

a) Kontrol Aliran

Kontrol aliran (*flow control*) adalah sistem pengendali aliran yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan turbin untuk mendapatkan tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan. Apabila PLTMH beroperasi dengan frekuensi dan kecepatan berbeda, hal itu dapat mengakibatkan peralatan listrik rusak. Misalnya, jika 90% rumah mematikan lampu di siang hari, beban PLTMH akan menurun. Ini menyebabkan roda berputar lebih cepat (*runaway speed*). Akibatnya, frekuensi meningkat, yang dapat merusak peralatan listrik.

Ada tiga cara berbeda untuk mengatur sistem kontrol: manual, semi-otomatis, atau otomatis. Kontrol manual mengatur katup bukaan (*guide vane*) secara manual sehingga debit air yang menuju turbin dapat disesuaikan dengan beban konsumen. Kontrol semi-otomatis mengatur beban generator secara otomatis. Bukaan katup (*guide vane*) diatur secara manual. Sistem kontrol semi-otomatis juga dikenal sebagai sistem pengatur beban (*load controller*). Terakhir, pada sistem kontrol otomatis, ketika frekuensi dan kecepatan generator berubah, bukaan katup (*guide vane*) sistem otomatis akan bekerja otomatis. Sistem kontrol manual memiliki karakteristik: frekuensi generator tidak stabil (40 – 70 Hz), tegangan tidak stabil (110 – 400 Volt), generator sering terbakar, peralatan listrik konsumen sering terbakar, lampu-lampu sering putus, peralatan elektronik sering terbakar.

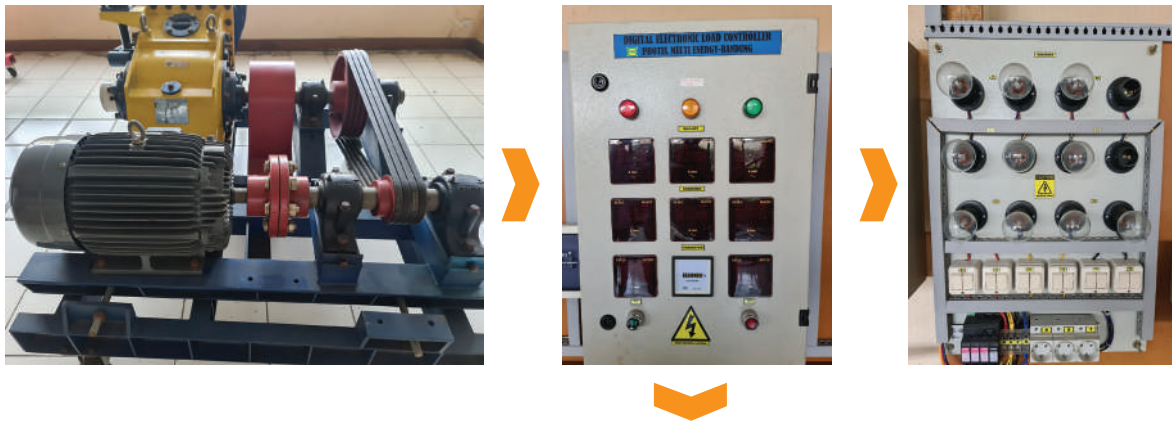
Menurut kamu, mana sistem kontrol yang banyak dipakai?

Sistem kontrol yang banyak digunakan ialah semi otomatis karena biayanya relatif murah. Prinsip pengaturannya ialah untuk menyeimbangi daya yang dihasilkan generator dengan beban daya yang dibutuhkan konsumen. Jika beban konsumen berkurang, kelebihan daya generator akan ditransfer ke *ballast load* sehingga beban total generator tidak berubah.

b) Kontrol Beban

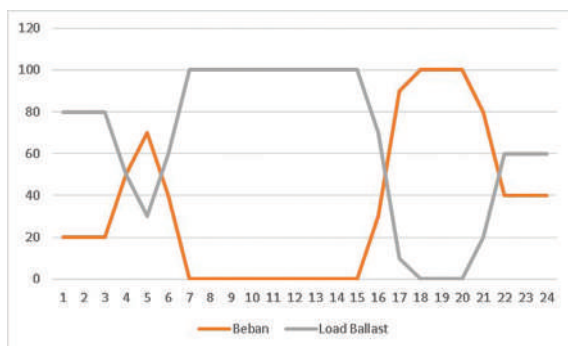
Kontrol beban (*load control*) adalah sistem kontrol untuk mengatur kelebihan daya ke *ballast load*. Beban *ballast* digunakan pada PLMTH dengan *system control* ELC atau IGC, sedangkan PLTMH tanpa kontrol tidak menggunakan beban *ballast*. *Ballast load* digunakan untuk membuang energi listrik yang dihasilkan generator, tetapi tidak digunakan oleh konsumen. Energi listrik tersebut diubah menjadi energi panas. Control beban mengatur beban ke konsumen dan *ballast load* sebagai berikut:

Daya input = daya konsumen + daya *ballast load*.



Gambar 2.16 Sistem Kerja Ballast Load

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.17 Ilustrasi Sistem Kerja Beban dan Ballast Load

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.18 Ballast Load

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

3) Sistem Monitoring

Sebagai seorang pengendara motor, apa saja sistem monitoring yang dapat dimonitor oleh pengemudi? Mengapa sistem tersebut perlu dimonitor? Kaitannya dengan PLTMH, apa saja menurut kamu yang perlu dimonitor dari listrik yang dihasilkan PLTMH agar mendapatkan daya yang stabil?

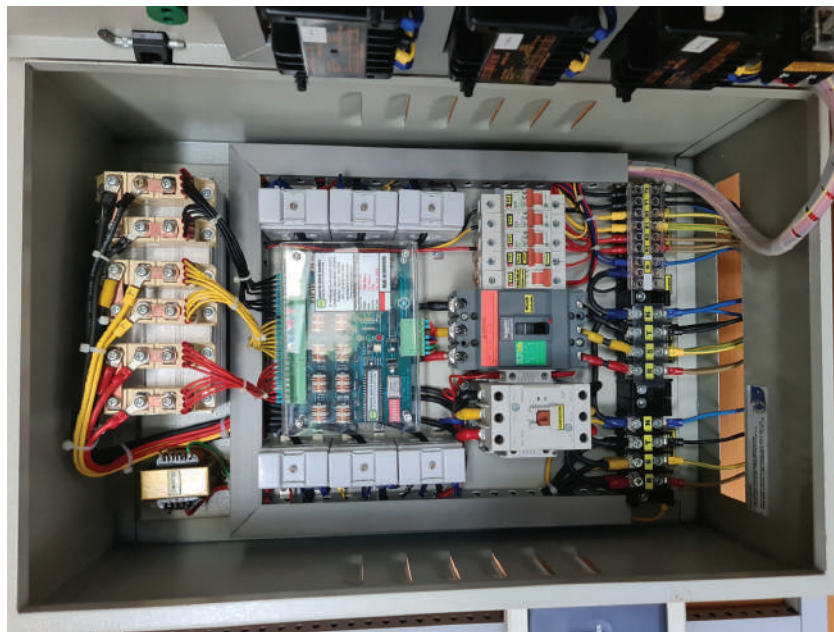
Sistem monitoring berfungsi untuk memonitor parameter dan besaran listrik yang dibutuhkan seperti tegangan generator, arus beban, frekuensi, indikator lampu agar sesuai dengan standar yang dibutuhkan. Menurut kamu, apabila PLTMH tidak dilengkapi dengan sistem monitoring, apa yang terjadi?

4) Sistem Proteksi

Sistem proteksi berfungsi sebagai pengaman generator dan peralatan listrik apabila terjadi tegangan lebih/kurang (*under/over voltage*), frekuensi lebih/kurang (*over/under voltage*), hubung singkat, dan arus beban lebih.



Gambar 2.19 Sistem Monitoring pada PLTMH
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.20 Sistem Proteksi pada PLTMH
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

5) Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik

Listrik yang dibangkitkan dapat disalurkan melalui saluran distribusi untuk tegangan rendah. Jika untuk jarak yang lebih jauh, tegangan listrik perlu dinaikkan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Komponen sistem distribusi di antaranya: konduktor, tiang, isolator, dan transformator.

Aktivitas 2.7 Sistem Kontrol, Monitoring, dan Proteksi serta Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik

Aktivitas Kelompok

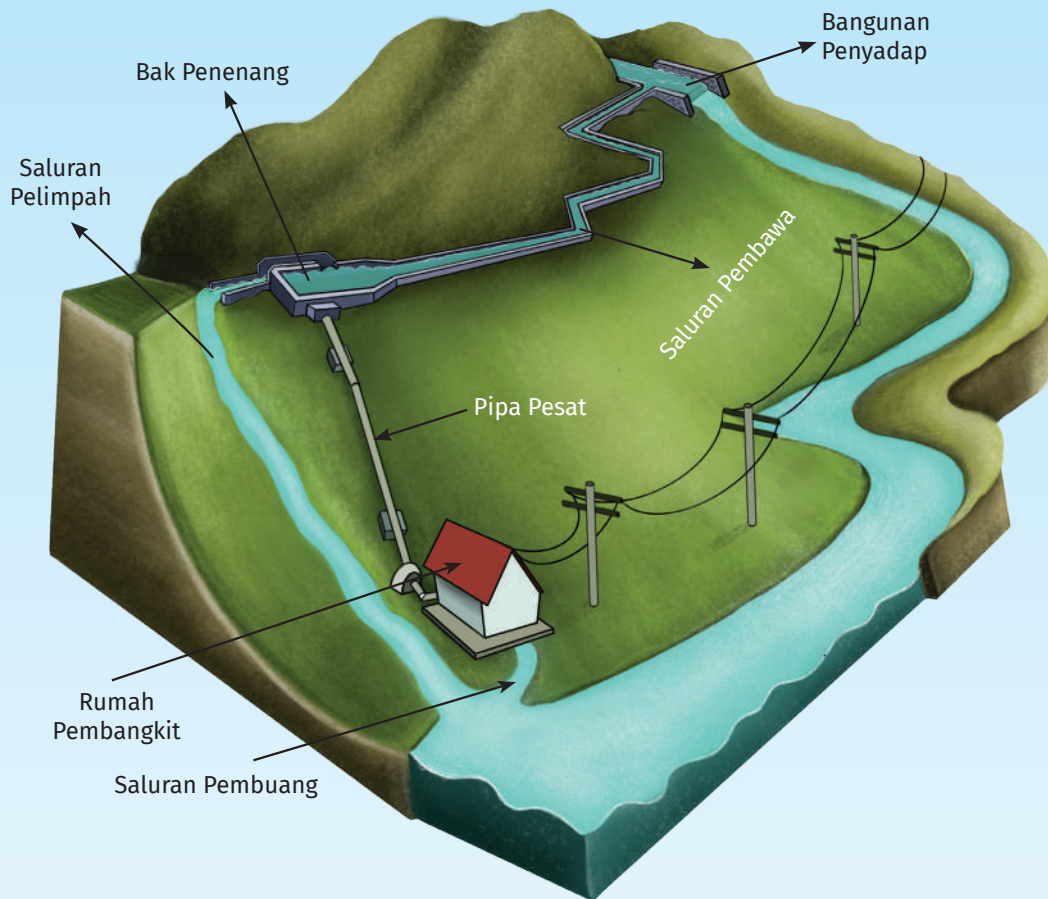
Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan tentang sistem kontrol, sistem monitoring, sistem proteksi, transmisi dan distribusi tenaga listrik secara mandiri.

Langkah-Langkah:

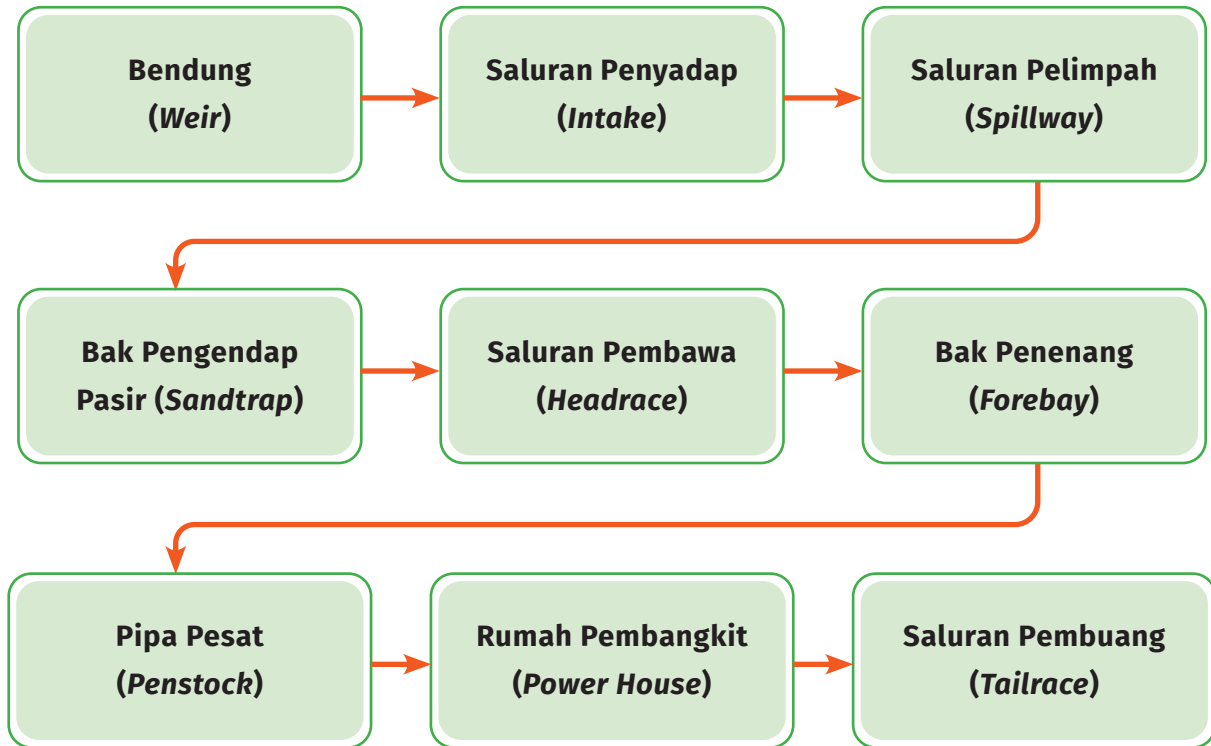
1. Buatlah kelompok beranggotakan 4 orang. Kelompok ini dinamakan Kelompok Asal.
2. Setiap anggota Kelompok Asal memperhatikan penjelasan guru dan membaca materi di Buku Siswa atau mencari dari sumber lainnya.
3. Setiap anggota kelompok mendapat satu topik: (a) sistem kontrol, (b) sistem monitoring, (c) sistem proteksi, serta (d) transmisi dan distribusi tenaga listrik.
4. Setiap siswa yang mendapat topik yang sama kemudian membentuk kelompok baru. Kelompok ini dinamakan Kelompok Ahli. Jadi, ada 4 kelompok ahli.
5. Di Kelompok Ahli, semua anggota kelompok membahas tuntas tentang topik keahliannya.
6. Setelah diskusi di dalam Kelompok Ahli, setiap anggota kelompok kembali ke Kelompok Asalnya.
7. Di Kelompok Asal, setiap anggota menjelaskan tentang topik yang menjadi keahliannya sampai setiap anggota lain dalam kelompok itu memahami topik tersebut.
8. Setelah diskusi di Kelompok Asal selesai, semua siswa mengerjakan soal yang diberikan guru.
9. Kelompok dengan skor tertinggi yang keluar sebagai juara.

3. Sistem Kerja PLTMH



Gambar 2.21 Layout PLTMH

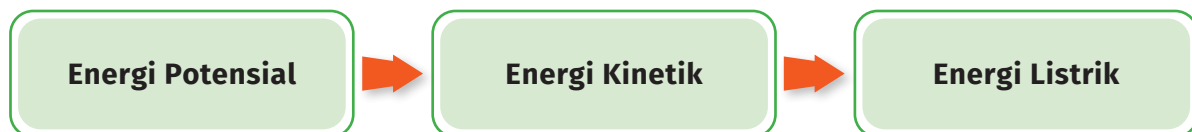
PLTMH bekerja ketika air dalam jumlah tertentu melalui pipa pesat (*penstock*) dan menggerakkan turbin yang dipasang di ujung bawah pipa. Dengan menghubungkan putaran turbin ke generator, generator berputar dan menghasilkan energi listrik. Produksi listrik didistribusikan ke konsumen melalui saluran transmisi dan distribusi listrik. Oleh karena itu, PLTMH menghasilkan energi listrik dari air.



Gambar 2.22 Aliran Air pada Sistem Kerja PLTMH

Gambar di atas ialah proses aliran air yang dimanfaatkan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro dari mulai bendung sampai dengan saluran pembuang. Setiap PLTMH memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Pada umumnya, saluran pelimpah dan bak pengendap pasir digabungkan dengan bak penenang untuk menghemat biaya konstruksi. Proses perubahan energi terjadi dari air mengalir pada pipa pesat dan masuk ke dalam rumah pembangkit yang di dalamnya terdapat sistem mekanik dan elektrik.

Persamaan dasar sistem hidrolis dari mulai pipa pesat sampai ke turbin menggunakan persamaan Bernoulli, yaitu keseimbangan energi dari fluida yang mengalir melalui sistem. Persamaan ini digunakan untuk mengetahui *head* dengan menghitung kecepatan fluida yang keluar.



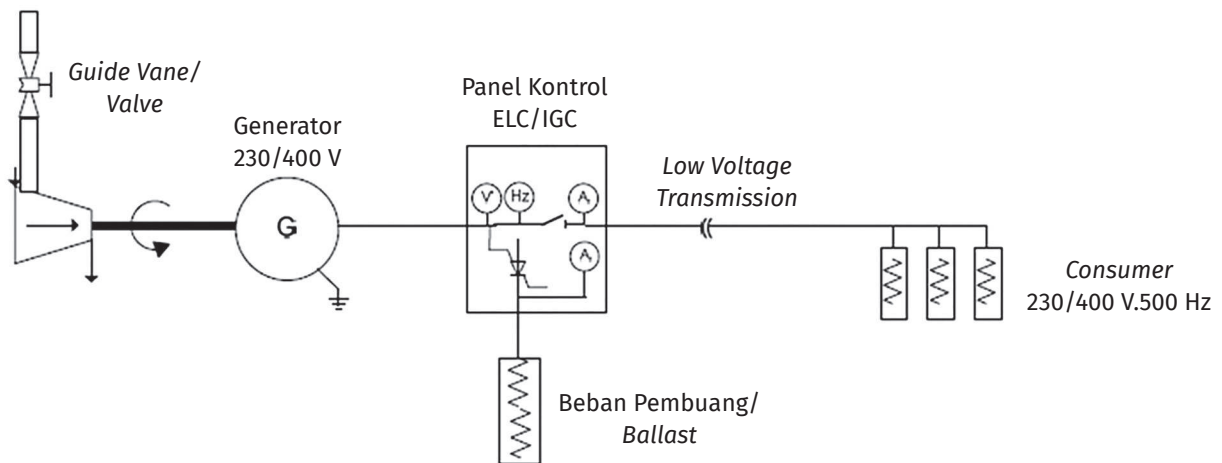
Gambar 2.23 Perubahan Energi pada PLTMH

Ketika air jatuh dan mengalir pada pipa pesat yang memiliki ketinggian (*head*) dan debit tertentu, peristiwa itu akan menghasilkan energi potensial. Air tersebut kemudian mengenai roda pada turbin mengakibatkan roda turbin berputar menghasilkan energi kinetik. Perhatikan gambar berikut.



Gambar 2.24 Proses Kerja dari Sistem Mekanik ke Sistem Elektrik

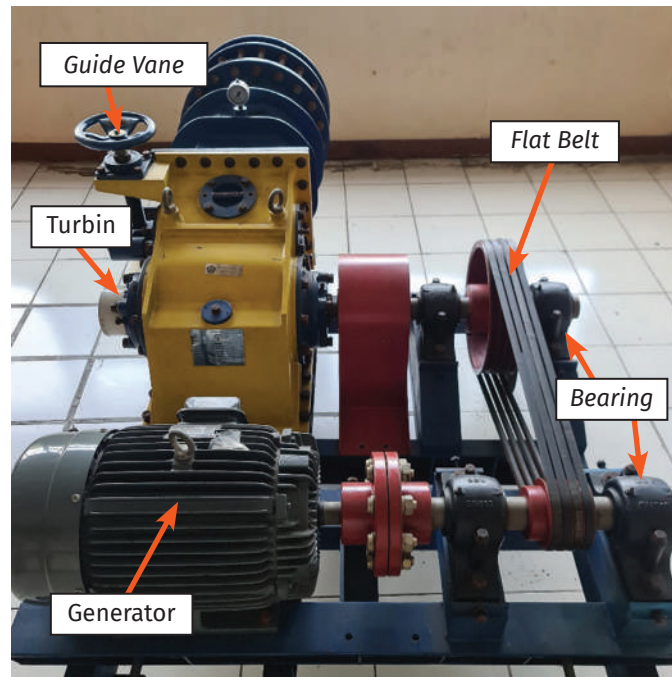
Roda yang berputar pada turbin tersebut dihubungkan dengan cara langsung atau tidak langsung dengan generator yang dapat menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) dari putaran tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.25 Single Line Diagram (SLD) PLTMH

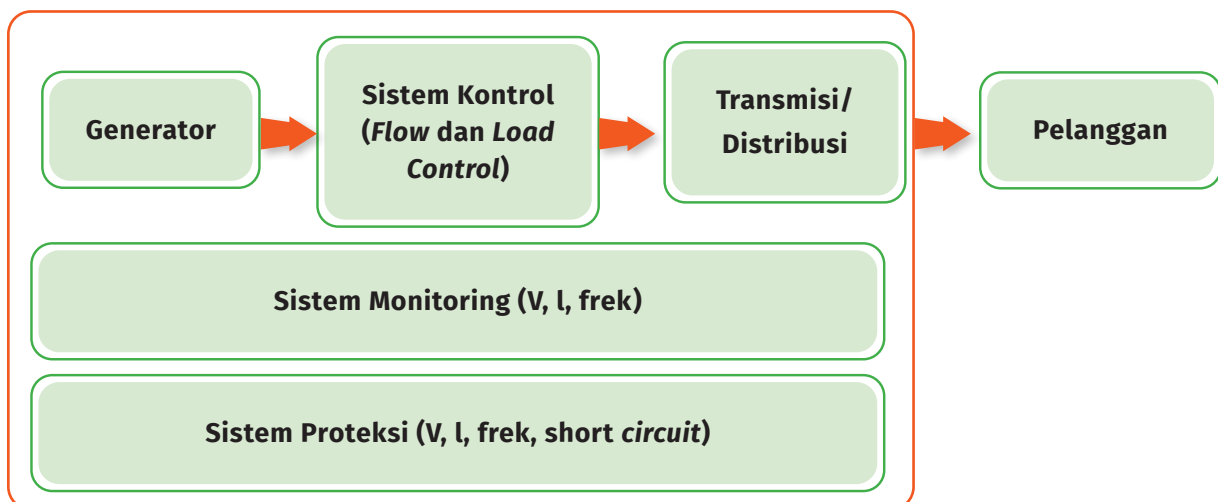
Gambar 2.25 menunjukkan *single line* diagram PLTMH. *Guide vane* digunakan untuk mengontrol debit air yang masuk ke turbin. Kontrol debit tersebut dapat dilakukan secara manual oleh operator atau secara otomatis oleh *Electronic Load Control* (ELC). Kontrol dilakukan untuk mendapatkan putaran yang diinginkan sehingga menghasilkan frekuensi listrik 50 HZ pada generator. Turbin yang berputar dihubungkan ke generator untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi yang diinginkan. Selanjutnya, besaran listrik yang dihasilkan dihubungkan ke ELC/IGC untuk mengatur pembagian beban ke konsumen atau

beban pembuang (*ballast load*). Pada *panel control*, juga terdapat sistem monitoring besaran listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.26 Komponen Utama Sistem Mekanik dan Elektrik
Sumber: Zainul, *Kemdikbudristek* (2024)

Energi listrik yang telah dihasilkan generator disalurkan ke dalam sistem elektrik. Sistem elektrik terdiri atas sistem kontrol, sistem monitoring, sistem proteksi, sistem transmisi/distribusi, dan pelanggan.



Gambar 2.27 Alur Kerja Sistem Kelistrikan pada PLTMH

Aktivitas 2.8 Sistem Kerja PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan sistem kerja PLTMH secara berkelompok.

Langkah-Langkah:

1. Buat beberapa kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa.
2. Setiap kelompok mendiskusikan dan membuat digram alur PLTMH dari *intake* sampai saluran pembuang beserta proses perubahan energi yang terjadi.
3. Kelompok membuat catatan dari hasil diskusi.
4. Setiap kelompok menyusun presentasi berdasarkan hasil diskusi.
5. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.

4. Keselamatan Ketenagalistrikan (K2) serta Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3)

Keselamatan ketenagalistrikan adalah segala upaya atau langkah-langkah yang diambil untuk menjaga instalasi penyediaan tenaga listrik dan pemanfaatan tenaga listrik agar menjadi tempat yang andal dan aman untuk manusia dan makhluk hidup lainnya, serta ramah lingkungan.

Penyebab kecelakaan disebabkan oleh perbuatan berbahaya dan kondisi berbahaya. Contoh perbuatan berbahaya seperti berikut.

- a. Melaksanakan kegiatan ketenagalistrikan tanpa pengetahuan, keterampilan, dan sikap (tidak memiliki sertifikasi kompetensi).
- b. Melaksanakan kegiatan pembangkit ketenagalistrikan yang tidak sesuai prosedur.
- c. Mengakibatkan alat proteksi/pengaman ketenagalistrikan tidak bekerja sesuai fungsi.
- d. Tidak mengenakan alat pelindung diri (APD).
- e. Memperbaiki bagian instalasi ketenagalistrikan dalam keadaan beroperasi/tanpa izin.
- f. Bekerja dalam kondisi sakit.
- g. Memasang alat tanpa menggunakan peralatan pengaman yang memadai.

Contoh kondisi berbahaya di antaranya seperti berikut.

- a. Komponen pembangkit ketenagalistrikan yang rusak tetap digunakan.
- b. Posisi barang diletakkan tidak sesuai.
- c. Kurangnya tanda peringatan.
- d. Lingkungan kerja yang tidak memadai seperti licin.
- e. Pencemaran udara di lokasi kerja (gas, uap, asap, debu, dsb.).
- f. Tingkat kebisingan yang tinggi.
- g. Kurangnya ventilasi udara.
- h. Cahaya yang redup di lokasi kerja.

Aktivitas 2.9 K2 dan K3

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan keselamatan ketenagalistrikan (K2) serta kesehatan dan keselamatan kerja (K3) secara berkelompok.

Langkah-Langkah:

1. Buat beberapa kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa.
2. Tiap kelompok memberikan contoh perbuatan berbahaya dan kondisi berbahaya saat berkerja di PLTMH masing-masing 5 contoh.
3. Tiap kelompok menginventarisasi/mencatat alternatif jawaban hasil diskusi.
4. Tiap kelompok (atau diacak kelompok tertentu) membaca hasil diskusinya dan guru mencatat di papan dan mengelompokkan sesuai kebutuhan guru.
5. Dari data-data di papan, siswa diminta membuat kesimpulan atau guru memberi perbandingan sesuai konsep yang disediakan guru.

B. Perencanaan PLTMH

Perancangan PLTMH harus mampu memenuhi unsur di antaranya: kapasitas mencukupi, operasi yang handal, aman, dapat diakses, dan biaya yang efektif. Perancangan PLTMH dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

1. Tahap survei potensi
2. Tahap studi kelayakan (*feasibility study*)
3. Tahap perancangan teknis (*Detail Engineering Design (DED)*)

Dasar pertimbangan dalam menentukan sistem PLTMH ialah potensi yang ada. Potensi itu seperti debit air dan tinggi jatuh (*head*), sistem yang diharapkan (*on grid, off grid, hybrid*), ketersediaan teknologi dan sumber daya manusia setempat, biaya/anggaran yang tersedia, kondisi geografis dan akses, serta kondisi sosial ekonomi masyarakat PLTMH.

1. Analisis Potensi

Perencanaan PLTMH dilakukan dengan melakukan analisis potensi hidro berupa debit, *head*, dan potensi kapasitas.

a. Debit Air

Debit air dapat diperkirakan melalui dua metode, yaitu seperti berikut.

- 1) Penampang saluran, dengan metode perhitungan:
 - 🔍 mengukur kecepatan air pada sungai/saluran
 - 🔍 menghitung luas penampang saluran, menghitung debit air berdasarkan data pengukuran dan luas penampang

$$Q = A.v$$

dengan:

Q = debit air, dalam m^3/s

A = luas penampang aliran air, dalam m^2

v = kecepatan aliran air, dalam m/s .

Contoh Soal:

Sungai di Desa Susukan memiliki kecepatan aliran air 10 m/s, luas penampang aliran tersebut ialah 6 m². Tentukanlah debit air yang mengalir.

Jawaban:

$$V = 10 \text{ m/s}$$

$$A = 6 \text{ m}^2$$

$$Q = v.A$$

$$= 10 \times 6$$

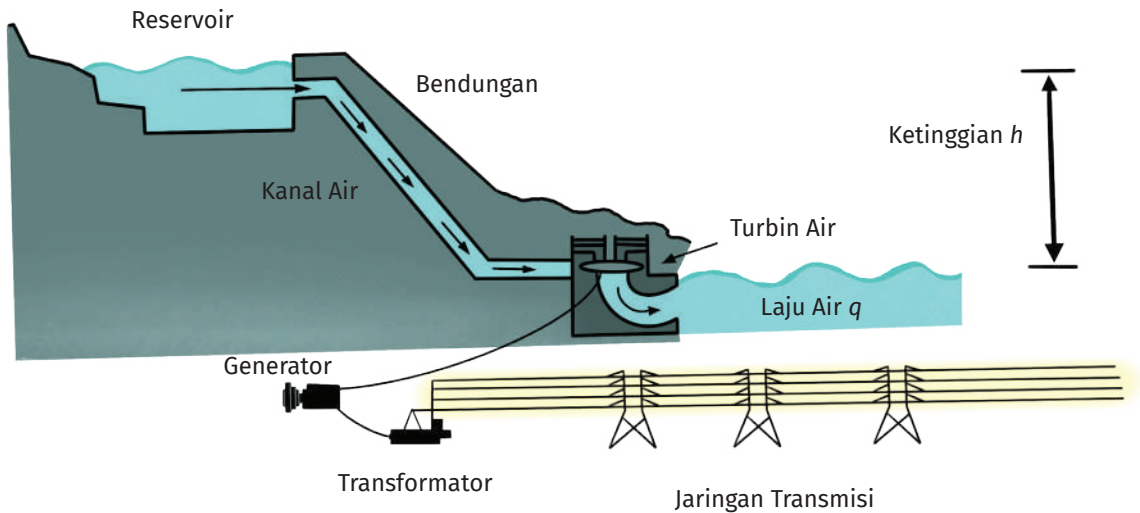
$$= 60 \text{ m}^3/\text{s}$$

2) V notch, dengan cara seperti berikut.

<p> <i>Menggunakan Pelampung</i></p>  <p>Menghitung debit air sungai (Indonesia 2023) https://buku.kemdikbud.go.id/s/enqq5u</p>	<p> <i>Metode Slope Area</i></p>  <p>Menghitung debit air dengan slope area ((Hakim 2015) https://buku.kemdikbud.go.id/s/5poube</p>
<p> <i>Menggunakan Metode Flow Duration Curve (FDC)</i></p>  <p>Menghitung debit air dengan Flow Duration Curve (FDC) (Air 2021) https://buku.kemdikbud.go.id/s/vauqev</p>	<p> <i>Menggunakan Alat Ukur Current Meter</i></p>  <p>Menghitung debit dengan current meter (Novita 2020) https://buku.kemdikbud.go.id/s/xh4jism</p>

b. Head

Head dihitung berdasarkan selisih elevasi antara permukaan air bagian hulu dan elevasi lokasi turbin (untuk turbin impuls) atau elevasi permukaan air pada bagian hilir (*tailrace*) (untuk turbin reaksi).



Gambar 2.28 Perhitungan *Head* Menggunakan Turbin Reaksi

Tinggi jatuh efektif dipengaruhi oleh rugi-rugi energi (*losses power*) pada saluran pembawa dan rugi-rugi energi pada pipa pesat yang disebabkan oleh gesekan pipa maupun belokan pada pipa pesat. Berikut ini beberapa cara menghitung *head*.

1. Menggunakan Selang Plastik

Mengukur *Head* dengan Selang Plastik (Share 2020b)
<https://buku.kemdikbud.go.id/s/qvllsi>

2. Menggunakan Selang Air dengan Alat Ukur Tekanan (*Pressure Gauge*)

Menghitung *Head* dengan *Pressure Gauge* (Share 2020a)
<https://buku.kemdikbud.go.id/s/y8rc7g>

3. Menggunakan Klinometer (*Sighting Meters*)



4. Menggunakan Teodolit



c. Kapasitas

Dengan mengetahui debit air selama beberapa waktu, rancangan dan desain yang akan digunakan untuk kebutuhan PLTMH dapat dibuat. Daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$Pt = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_o$$

Pt = daya terbangkit (W),

ρ = rapat massa air (kg/m^3),

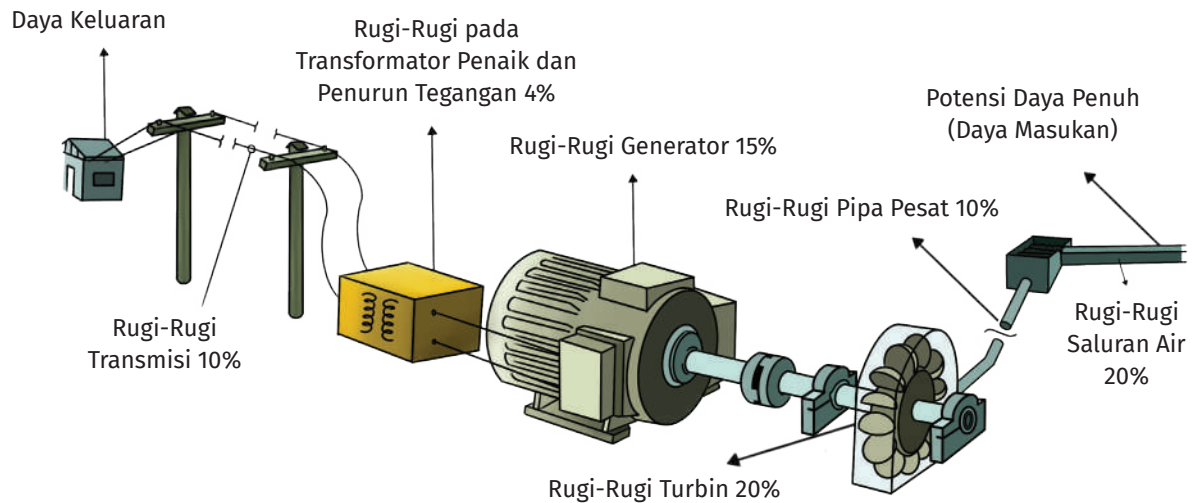
g = gravitasi (m/s^2),

Q = debit aliran (m^3/s),

H_n = tinggi jatuh bersih (m),

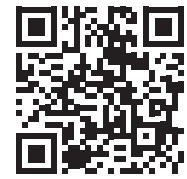
η_o = efisiensi overall, 50-70%

(Sumber: JICA, 2003)



Gambar 2.29 Rugi-Rugi Daya pada PLTMH

Nilai efisiensi berkisar pada 50–70% karena adanya rugi-rugi daya dari bak penenang sampai ke pelanggan. Rugi-rugi daya tersebut terjadi pada saluran pembawa 5%, pipa pesat 10%, turbin 20%, generator 15%, trafo 4%, dan sistem transmisi 10%. Rugi-rugi daya tersebut dapat dihindari dengan melakukan perancangan peralatan yang sesuai dengan kapasitas yang dibutuhkan.



https://buku.kemdikbud.go.id/s/Jurnal_1

Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi-Rugi PLTMH (Baqaruzi and Muhtar 2020)

Contoh Soal:

Sebuah pengukuran menghasilkan data sebagai berikut:

$$\text{Debit} = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Head} = 10 \text{ m,}$$

$$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$$

Jika efisiensi yang digunakan ialah 70%, berapa daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTA tersebut? (gravitasi = $9,8 \text{ m/s}^2$)

Jawaban:

$$P_t = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta$$

$$= 1 \times 9,8 \times 1,5 \times 10 \times 0,7$$

$$= 102,9 \text{ W}$$

Aktivitas 2.10 Analisis Potensi PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah mengerjakan aktivitas ini, kamu mampu menganalisis potensi PLTMH dengan bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Studi Kasus:

Saluran irigasi di Desa Kelungkung memiliki potensi PLTMH dengan hasil pengukuran sebagai berikut.

No	Lokasi	Head (m)	Debit (m ³ /s)
1	Kelungkung 1	8 m	6
2	Kelungkung 2	7.5 m	8
3	Kelungkung 3	9 m	8
4	Kelungkung 4	8.3 m	7.3

Berdasarkan data tersebut, tentukanlah:

- besar kapasitas pembangkit di tiap lokasi,
 - lokasi yang paling optimal untuk dijadikan titik PLTMH dan alasan penentuan lokasi tersebut,
 - jenis turbin yang digunakan,
 - jenis dan kapasitas generator yang digunakan.
2. Tugas:
- Bentuk kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa.
 - Setiap kelompok mendiskusikan studi kasus dan menjawab pertanyaan, kemudian membuat catatan dari hasil diskusi.
 - Susun laporan tertulis yang mencakup deskripsi setiap lokasi yang disurvei, penilaian faktor-faktor lingkungan, serta kesimpulan tentang lokasi yang paling optimal untuk pembangunan dan pemasangan PLTMH. Laporan juga harus mencakup alasan pemilihan lokasi terbaik.
 - Refleksi Akhir: Sebagai bagian dari laporan, renungkan pentingnya pemilihan lokasi dalam perencanaan PLTMH dan bagaimana faktor lingkungan dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem hidro.

Aktivitas 2.11 Analisis Debit PLTMH

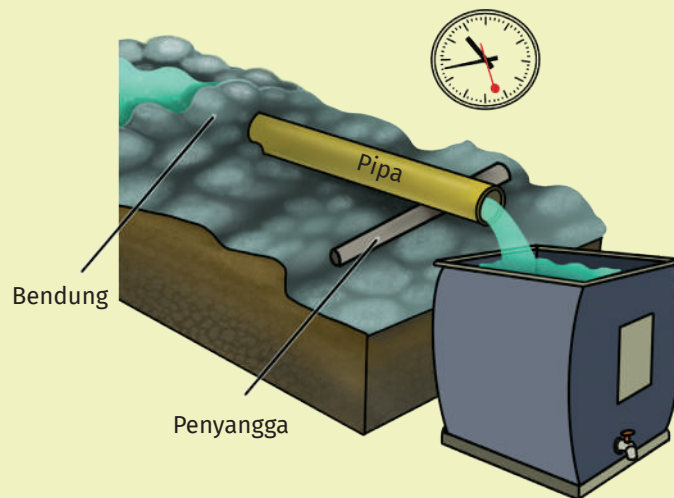
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan analisis debit PLTMH dengan bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok kecil yang terdiri atas 4–5 siswa.
2. Sediakan tangki air dengan kapasitas 1.000 liter.
3. Letakkan tangki air di keran air dengan posisi seperti gambar berikut.
4. Bukalah keran terus agar dapat mengalirkan air ke tangki.
5. Hitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengisi penuh tangki air.



6. Setiap kelompok membuat catatan dari hasil praktik.
7. Setiap kelompok mempresentasikan hasil praktik mereka di depan kelas.

Aktivitas 2.12 Analisis Debit Air dan Head

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menganalisis debit air dan *head* pada PLTMH secara gotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang.
2. Setiap kelompok memilih satu metode untuk mengukur debit dan satu metode untuk mengukur *head*.
3. Pilih lokasi di sekitar sekolah atau di lingkungan yang telah disetujui, di mana kelompok akan melakukan pengukuran debit dan *head*.
4. Setiap kelompok melakukan survei ke lokasi yang dipilih.
5. Amati debit air, *head*, dan hitung potensi kapasitas air tersebut.
6. Setelah survei, kelompok berdiskusi untuk mengevaluasi lokasi berdasarkan hasil pengukuran dan observasi.
7. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi kelompok.

2. Perancangan Bangunan Sipil

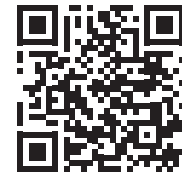
Konstruksi bangunan sipil harus memenuhi ketentuan umum. Fondasi pada *intake*, bendung, saluran pembawa, bak pengendap, dan bak penenang harus dipastikan kuat dan kokoh. Selain itu, galian tanah untuk fondasi harus dipastikan stabil dengan maksimal kedalaman 1.3 meter. Pengerukan fondasi juga harus dilakukan secara bertahap guna menghindari terjadinya longsor. Pemasangan batu tidak boleh dibebani lebih dari 20 sentimeter, dan pemasangan batu untuk menahan tanah harus lebih dari 50 sentimeter. Besi beton dan besi bertulang memiliki diameter < 15 cm dengan ketebalan dinding disesuaikan dengan beban yang ditahan. Jika pipa jembatan air terbuat dari baja ringan, ekspansi *joint* harus dipasang, dan pipa harus dicat dan dilindungi dari karat.

Rak sampah harus dapat dilepas untuk perbaikan dan pembersihan. Pipa pesat harus memiliki jarak minimal 30 cm ke tanah dan tidak boleh ditanam. Pipa pesat harus memiliki tekanan kerja minimal 12 kg/m² dengan kapasitas maksimal 5 kW. Jika kapasitas lebih besar,

pipa harus disesuaikan. *Anchor block* atau *penstock support* harus dipasang agar dapat menyalurkan gaya longitudinal dan lateral ke tanah. Standar fondasi minimal ialah 50 cm dari permukaan tanah. *Saddle* pada *penstock support* harus tersedia untuk mengantisipasi terjadi pemuaian atau sebaliknya. *Expansion joint* dilengkapi pada *anchor block* pipa pesat.

Rumah pembangkit harus memiliki pintu yang dibuat cukup lebar agar dapat dilewati turbin, generator, dan peralatan kontrol. Terdapat jendela agar cahaya dan udara dapat masuk. Jendela dapat terbuat dari kayu atau aluminium. Saluran pembuang diarahkan kembali ke sungai, atap yang kokoh dan tidak mudah bocor, terdapat lemari untuk menyimpan alat kerja dan catatan operator.

Posisi *ballast load* berada pada lokasi terlindungi dan tidak mudah diakses oleh siapa pun. Sistem penerangan juga harus disediakan pada intake dengan jarak 30 m sampai dengan ke rumah pembangkit. Penerangan ini tidak menggunakan lampu TL atau pijar.



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/tyfepe>

Pengenalan Perencanaan
PLTMH

Aktivitas 2.13 Perancangan Bangunan Sipil

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan perancangan bangunan sipil PLTMH secara bergotong royong.

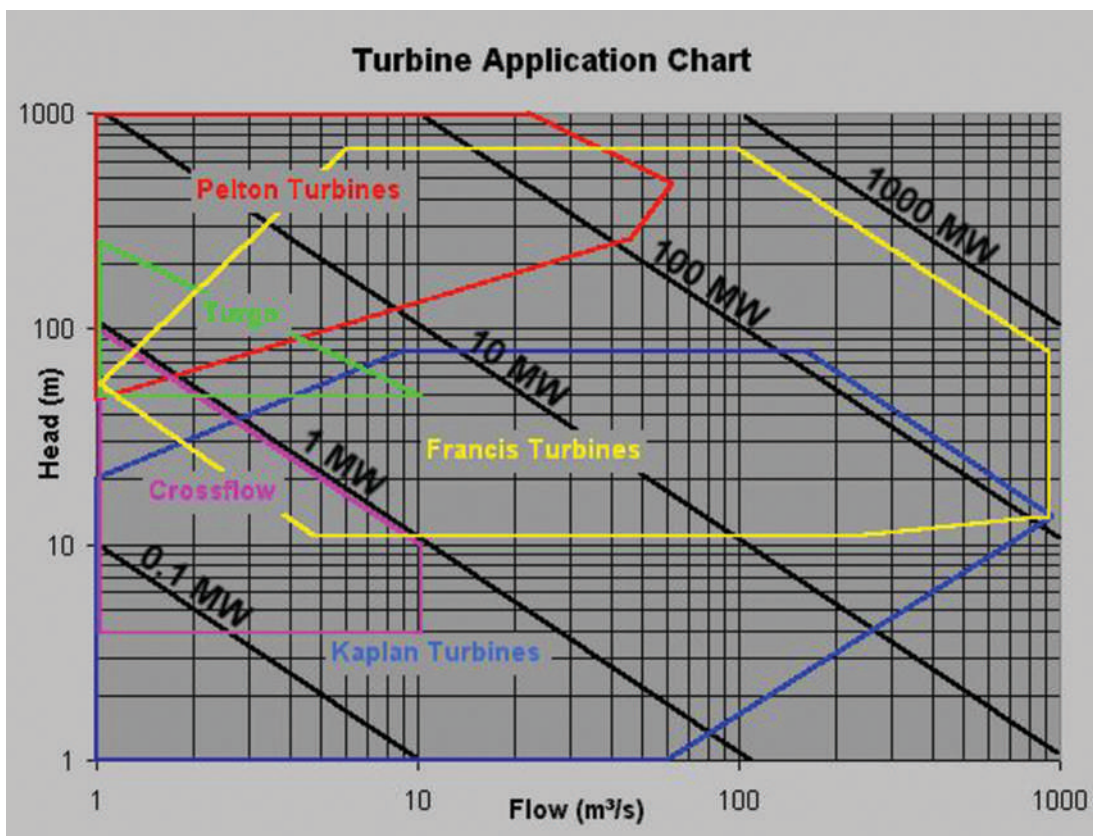
Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 siswa.
2. Tiap kelompok membuat gambar teknik rancangan bangunan sipil PLTMH.
3. Komponen bangunan sipil yang digambar ialah *intake*, bendung, saluran pembawa, bak pengendap, bak penenang, pipa pesat, rumah pembangkit, dan saluran pembuang.
4. Setiap kelompok merancang dengan *head* dan debit yang berbeda-beda.
5. Presentasikan hasil kerja kelompok di depan kelas.

3. Perancangan Sistem Mekanik

Perancangan jenis turbin harus mempertimbangkan beberapa aspek di antaranya:

- ketersediaan material untuk mampu menahan tekanan, aus, dan erosi dari kavitasi;
- jenis turbin yang digunakan dipengaruhi oleh *head* dan debit yang tersedia;
- besarnya kebutuhan putaran turbin yang diperlukan oleh generator;
- tingkat komponen dalam negeri atau dapat diproduksi di Indonesia;
- teknologi yang digunakan disesuaikan dengan kemampuan operator PLTMH;
- tingkat efektivitas biaya;
- kehadalan dan kualitas sistem.



Gambar 2.30 Aplikasi Jenis Turbin Berdasarkan Ukuran *Head* dan Debit Air

Sumber: G.Fisher (2007)

Contoh

Sebuah desa mempunyai potensi energi air dengan tinggi (*head*) 40 meter dan perkiraan debit sebesar 100 liter/detik. Berdasarkan grafik di atas, turbin yang cocok digunakan ialah Francis dan Kaplan.

Aktivitas 2.14 Perancangan Sistem Mekanik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan perancangan sistem mekanik PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang.
Suatu desa memiliki potensi PLTMH dengan hasil survei: *head* sebesar 10 meter dan debit air sebesar 8 liter/s.
2. Tentukan jenis turbin yang cocok untuk kondisi tersebut. Jelaskan mengapa jenis turbin tersebut yang dipilih. Jelaskan apa kelebihan dan kekurangannya dalam penggunaan di desa tersebut.
3. Presentasikan hasil kerja kelompokmu.

4. Perancangan Sistem Elektrik

Perancangan sistem elektrik dalam menentukan dan perhitungan generator dilakukan pada bagian generator dan peralatan kontrol.

a. Generator

Perancangan generator ditentukan oleh besarnya kapasitas energi listrik yang dibutuhkan. Pilihan antara sistem satu fasa atau tiga fasa bergantung pada dana dan peralatan listrik yang ada. Secara umum, sistem satu fasa digunakan untuk kapasitas di bawah 5 kW, sistem tiga fasa digunakan untuk kapasitas di atas 5 kW.

b. Peralatan Kontrol

Perancangan peralatan kontrol harus memenuhi kriteria kualitas bagus dan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI). Komponen yang mudah rusak dapat dibeli dengan mudah. Sistem kontrol harus memiliki indikator minimal, yaitu: arus beban pada setiap fasa, indikator pada *ballast* berupa tegangan dan arus, *hour* meter, energi yang dihasilkan (kWh), serta tegangan dan frekuensi dari generator. Selain itu, tombol darurat dan operasi dapat diakses dengan mudah.

Switchgear harus memiliki MCCB (*moulded case circuit breaker*) untuk menghubungkan beban ke generator dan mengidentifikasi kegagalan secara otomatis. Jika ada peralatan pengaman yang memutuskan arus secara otomatis jika terjadi kesalahan, kontak atau Mini Circuit Breakers (MCB) dapat digunakan. Di dalam peralatan kontrol, harus terdapat kipas pendingin. Peralatan kontrol dirancang dengan kubikel tersendiri dengan memperhatikan lubang ventilasi agar panas dapat keluar, kuat, dan terkunci. Rangkaian sistem kontrol dapat menahan getaran selama proses pengiriman, menggunakan *ballast* pemanas air dibandingkan dengan *ballast* pemanas udara. Kapasitas *ballast* minimal sama dengan kapasitas daya terbangkitkan atau 120% dari kapasitas terbangkit jika menggunakan ELC dengan *thyristor*. Pabrikan harus membuat *nameplate* dengan isi: nama pabrikan, alamat dan kontak pabrikan, jenis sistem kontrol, nomor produk, kapasitas daya yang dikontrol, dan tahun perakitan. Sistem kontrol harus mampu menghasilkan tegangan 220/415 Volt dan frekuensi 50 Hertz yang stabil.

Aktivitas 2.15 Perancangan Sistem Elektrik 1

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan perancangan sistem elektrik PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang.
2. Setiap kelompok mendiskusikan kasus berikut.
Suatu desa memiliki potensi PLTMH dengan kapasitas 5 kW.
Tentukan jenis generator dan peralatan kontrol yang digunakan.
Buatlah *single line diagram* (SLD) PLTMH tersebut.
3. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.

Aktivitas 2.16 Perancangan Sistem Elektrik 2

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan perancangan sistem elektrik PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang.
2. Setiap kelompok mengidentifikasi dan menganalisis gambar contoh panel kontrol di samping ini. Mengapa gambar tersebut menjadi *best practice*?
3. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.



Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

“Ingat, energi
terbarukan bukan hanya
tentang teknologi, tetapi tentang
harapan dan keberlanjutan. Jadilah
bagian dari perubahan untuk
bumi yang lebih baik!”

C. Pembangunan dan Pemasangan PLTMH

Pelaksanaan dan pemasangan PLTMH dapat mengacu pada Keputusan Kemenaker No 166 Tahun 2019 tentang Penetapan SKKNI kategori Pengadaan Listrik, Gas, Uap/Air Panas, dan Udara Dingin Golongan Pokok Pengadaan Listrik, Gas, Uap/Air Panas dan Udara Dingin Bidang Pemasangan dan Pembangunan Pembangkit Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan.

1. Persiapan Pembangunan dan Pemasangan PLTMH

Persiapan pembangunan dan pemasangan PLTMH meliputi penggunaan alat pelindung diri saat bekerja, serta peralatan dan perlengkapan kerja.

a. Alat Pelindung Diri (APD) Saat Bekerja

Jenis APD yang diperlukan di antaranya seperti berikut.

- 1) Alat pelindung kepala/helm, berfungsi untuk melindungi kepala dari benda jatuh dan benturan pada benda keras atau tajam.
- 2) Alat pelindung mata berupa kacamata yang dapat melindungi mata dari bahaya langsung maupun tidak langsung.
- 3) *Wearpack*, berfungsi untuk melindungi tubuh dari benda kasar, tajam, dan kotor.
- 4) Pelindung telinga (*earplug*), berfungsi melindungi telinga manusia dari tekanan udara berlebih, air, atau benda asing, dan suara berisik.
- 5) Pelindung/sarung tangan, berfungsi untuk melindungi bagian tangan dari benda keras, kasar, dan tajam, serta untuk melindungi tangan dari bahaya kesetrum.
- 6) Pelindung kaki (*safety shoes*), berfungsi mencegah tertimpa benda berat, terpeleset di daerah yang licin, dan melindungi kaki dari cedera ringan dan berat.

Tabel 2.3 Daftar Ceklis Alat Pelindung Diri (APD)

No.	Jenis APD	Status (Layak/Tidak)	Keterangan
1	Pelindung kepala	Layak	
2	Pelindung mata	Tidak layak	Kaca buram

No.	Jenis APD	Status (Layak/Tidak)	Keterangan
3	Pelindung tubuh	Layak	
4	Pelindung telinga	Tidak layak	Sudah tidak ketat
5	Pelindung tangan	Tidak layak	Sobek pada sarung tangan
6	Pelindung kaki	layak	

b. Dokumen, Peralatan, dan Perlengkapan Kerja

Dokumen kerja yang diperlukan di antaranya seperti berikut.

- 1) Surat perintah kerja
- 2) SOP/instruksi kerja pembangunan dan pemasangan PLTMH
- 3) Buku manual (*manual book*)
- 4) *Job safety analisis* (JSA)

Peralatan dan perlengkapan kerja yang diperlukan di antaranya seperti berikut.

- 1) Alat angkut dan angkat
- 2) Tembakan pelumas/gemuk
- 3) Perkakas tangan (*tool kits*)
- 4) Peralatan lain sesuai jenis turbin
- 5) Rambu-rambu K3 di lokasi kerja
- 6) Alat ukur yang diperlukan, di antaranya
 - 🔦 *Multimeter*, digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan hambatan.
 - 🔦 *Tank ampere*, digunakan untuk mengukur arus listrik bolak balik.
 - 🔦 *Vibration meter*, digunakan untuk mengukur getaran turbin dan transmisi mekanik.



Gambar 2.31 Multimeter

Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

- Termometer, digunakan untuk mengukur suhu turbin air dan transmisi mekanik utamanya pada bagian bagian yang berputar.
- Tachometer, digunakan untuk mengukur putaran mesin dalam satu rpm.



Gambar 2.32 Tank Ampere
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.33 Vibration Meter
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.34 Termometer
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.35 Tachometer
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

Bahan yang diperlukan misalnya seperti berikut.

- 1) Bahan perlengkapan sipil (semen, besi, pasir, batu, krikil)
- 2) Gemuk
- 3) Pelumas

Aktivitas 2.17 Persiapan Pembangunan dan Pemasangan PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Peserta didik mampu menerapkan alat pelindung diri saat bekerja di PLTMH.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok yang terdiri atas 4–5 orang.

2. Setiap kelompok mendiskusikan hal-hal berikut.
 - a. Identifikasi alat pelindung diri yang digunakan beserta fungsinya ketika melakukan pekerjaan pemasangan sistem mekanik dan elektrik!
 - b. Identifikasi risiko kecelakaan kerja apabila tidak menggunakan alat pelindung diri tersebut.
3. Sampaikan jawaban bagi siswa yang ditunjuk oleh guru.

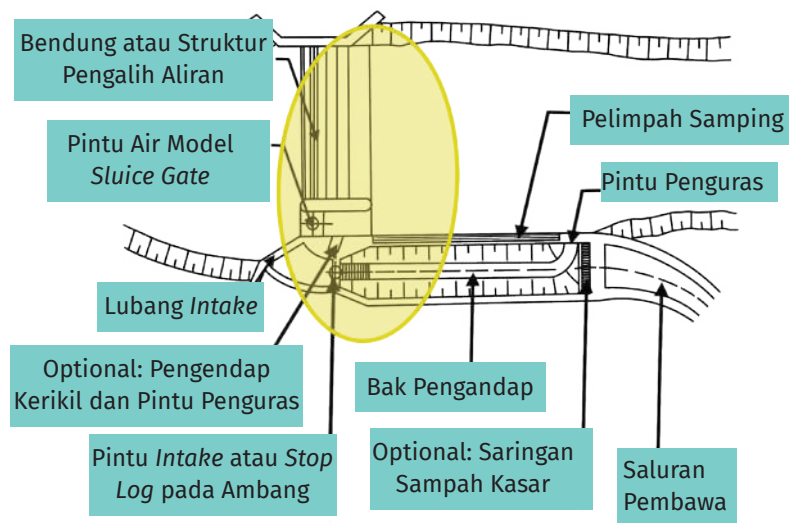
2. Pelaksanaan Pembangunan dan Pemasangan

Pelaksanaan pembangunan dan pemasangan PLTMH dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu pembangunan sipil, pemasangan sistem mekanik, dan pemasangan sistem elektrik.

a. Pembangunan Bangunan Sipil

Pembangunan dan pemasangan bangunan sipil meliputi pembangunan bendung dan *intake*, saluran pembawa, bak penenang, saluran pelimpah, pipa pesat, rumah pembangkit, dan saluran pembuang.

1) Bendung dan Intake

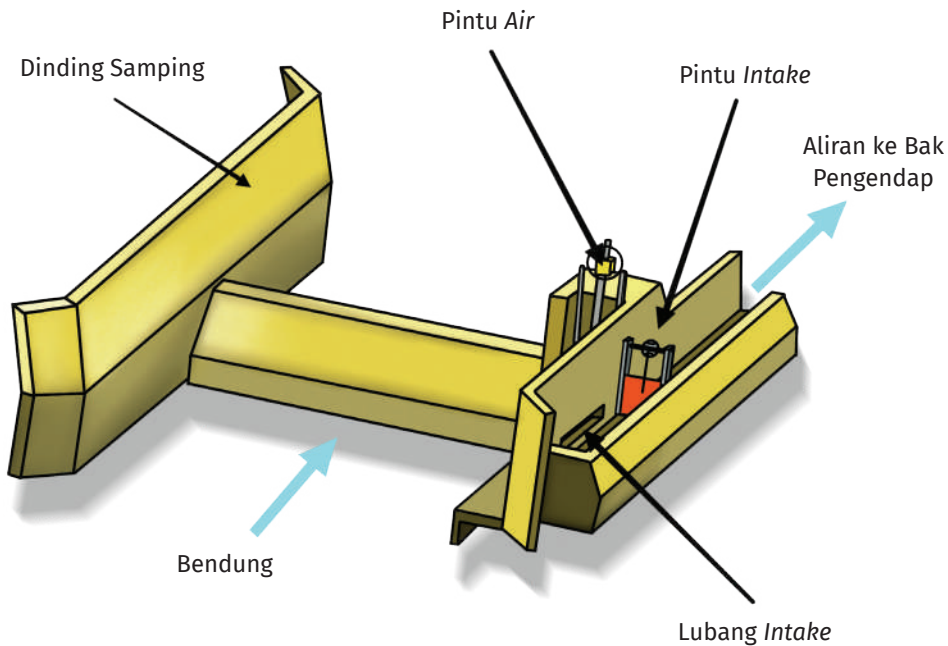


Gambar 2.36 Komponen Utama dan Pendukung Bendung dan Intake

Sumber: Jorde, K., Hartmann, E., Unger (2010)

Penempatan *intake* sangat penting agar tidak terjadi kekeringan karena setelah beroperasi, sungai tertimbun oleh lumpur atau bergeser dari aliran atau hanyut oleh banjir. Perancangan *intake* harus ditempatkan di sisi luar belokan. Tempat pengambilan air dipilih agar tidak

membawa sedimen apung dan dapat mengalir sebanyak mungkin air. Bendung dan *intake* harus dapat menahan banjir tahunan selama dua puluh lima tahun. Lubang *intake* bawah muka air atau saringan kasar harus digunakan untuk membedakan sampah terapung atau kerikil dengan air yang menuju saluran pembawa. Bukaan *intake* harus tenggelam dalam segala kondisi aliran. Pintu penutup *intake* digunakan saat pemeliharaan saluran pembawa. Pada *intake*, dipasang *trash rack* untuk sedimen apung berukuran besar.



Gambar 2.37 Sketsa 3D Dimensi Bendung dan *Intake*

Gambar di atas menunjukkan bendung dan *intake*, termasuk pintu air penguras yang membersihkan pasir dan kerikil yang mengendap di sekitar lubang *intake*.

Aktivitas 2.18 Bendung dan *Intake* 1

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan bendung PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok berpasangan.

2. Amatilah PLTMH berikut.



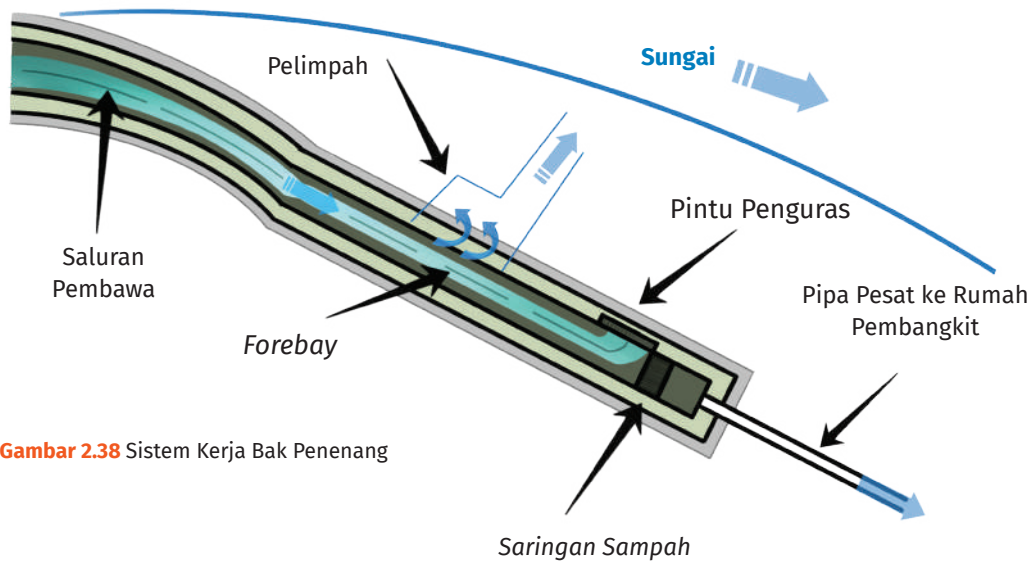
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

3. Setiap kelompok mengidentifikasi kelemahan yang terdapat di PLTMH tersebut.
4. Kemudian, jelaskan cara memperbaiki kondisi PLTMH tersebut agar sesuai dengan standar yang dibutuhkan.
5. Setelah selesai, setiap pasangan bergabung dengan satu pasangan yang lain.
6. Kedua pasangan tersebut bertukar pasangan, kemudian pasangan yang baru ini saling menanyakan dan mencari kepastian jawaban mereka.
7. Temuan baru yang didapat dari pertukaran pasangan kemudian dibagikan kepada pasangan semula.

2) Saluran Pembawa

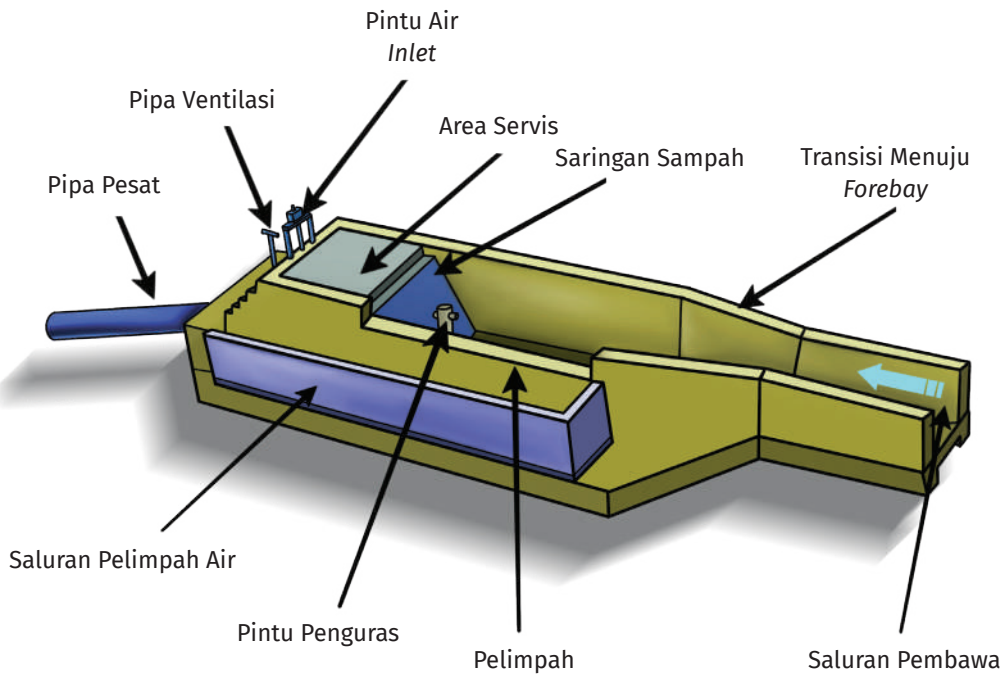
Saluran pembawa biasanya berbentuk terbuka karena lebih murah. Perancangan saluran harus dapat menampung air 10% lebih banyak daripada debit yang direncanakan. Dalam kasus di mana posisi penempatan tidak memungkinkan penggunaan bahan tahan terhadap tekanan, gunakan beton yang kuat. Area di sekitar saluran harus didrainase dengan benar untuk mencegah longsor. Hindari menggunakan saluran tanah.

3) Bak Penenang



Gambar 2.38 Sistem Kerja Bak Penenang

Bak penenang (*forebay*) harus terbuat dari bahan yang kedap air. Bak penenang dipasang saluran pelimpah dengan kapasitas 120% dari daya tampung. Bak penenang digunakan mengendapkan pasir dan batu-batu agar tidak memasuki pipa pesat.



Gambar 2.39 3D Bak Penenang

Gambar menunjukkan ada transisi antara pipa pesat dan saluran pembawa terbuka. Ketinggian pada muka air bak penenang menunjukkan kapasitas *head* untuk produksi energi. Saringan dan bak penenang ialah tempat terakhir di mana benda-benda di air yang berpotensi merusak turbin dapat dibuang, di antaranya sampah terapung dan sedimen. Pelimpah berfungsi sebagai alat untuk menghilangkan air berlebih di saluran.

Aktivitas 2.19 Bak Penenang

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan bak penenang PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4 orang siswa.
2. Amatilah bagian PLTMH berikut. Ini contoh bak penenang (*forebay*) yang sesuai standar.



Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

3. Setiap kelompok menganalisis mengapa bak penenang (*forebay*) di atas disebut sebagai contoh bak penenang (*forebay*) yang sesuai standar.
4. Setelah selesai, dua orang dari masing-masing menjadi tamu kedua kelompok yang lain.
5. Dua orang yang tinggal dalam kelompok bertugas membagikan hasil kerja dan informasi ke tamu mereka.
6. Tamu mohon diri dan kembali ke kelompok mereka sendiri dan melaporkan temuan mereka dari kelompok lain.
7. Kelompok mencocokkan dan membahas hasil kerja mereka.

Bak penenang juga diberikan saringan (*trash rack*) dengan ketentuan sebagai berikut.

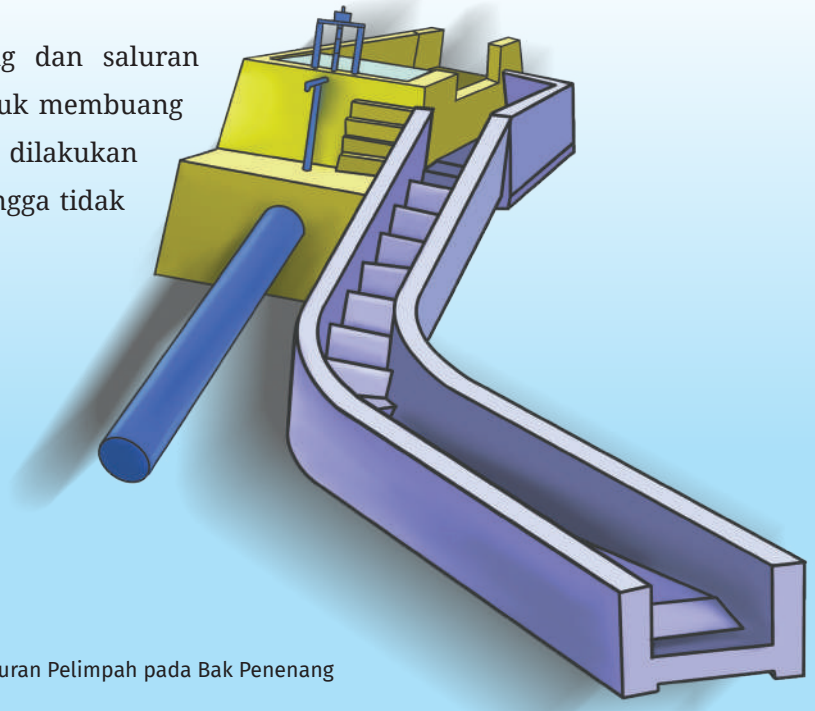
1. Saringan sampah memiliki sudut kemiringan di antara 60° - 80° ke posisi horizontal,
2. Saringan sampah dapat dikaitkan ke dasar dan dinding serta dapat diangkat untuk pemeliharaan.
3. Besi yang digunakan merupakan besi vertikal agar mempermudah proses pembersihannya.
4. Bahan terbuat dari besi pejal diameter 4 mm dan terlindungi dari korosi, tidak terbuat dari kayu atau bambu.

Bak penenang sesuai standar memiliki karakteristik berikut.

1. Saringan sampah diletakkan dengan kemiringan 70° dari posisi horizontal.
2. Saringan dikaitkan pada dinding, tetapi tetap dapat dilepas.
3. Saringan dibuat dari besi secara vertikal.
4. Jarak antarbesi dibuat rapat agar sampah tidak masuk turbin.
5. Adanya area untuk memudahkan perawatan saringan.
6. Terdapat area servis sementara untuk sampah.

4) Saluran Pelimpah

Gambar 2.40 menunjukkan bak penang dan saluran pelimpah bertangga yang digunakan untuk membuang kelebihan air ke aliran sungai. Hal ini dilakukan agar kecepatan air dapat berkurang sehingga tidak merusak dinding saluran pelimpah.



Gambar 2.40 Saluran Pelimpah pada Bak Penenang

Aktivitas 2.20 Saluran Pelimpah

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan bak penenang PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Amatilah saluran pembawa berikut. Ini merupakan contoh saluran pelimpah yang tidak sesuai standar.



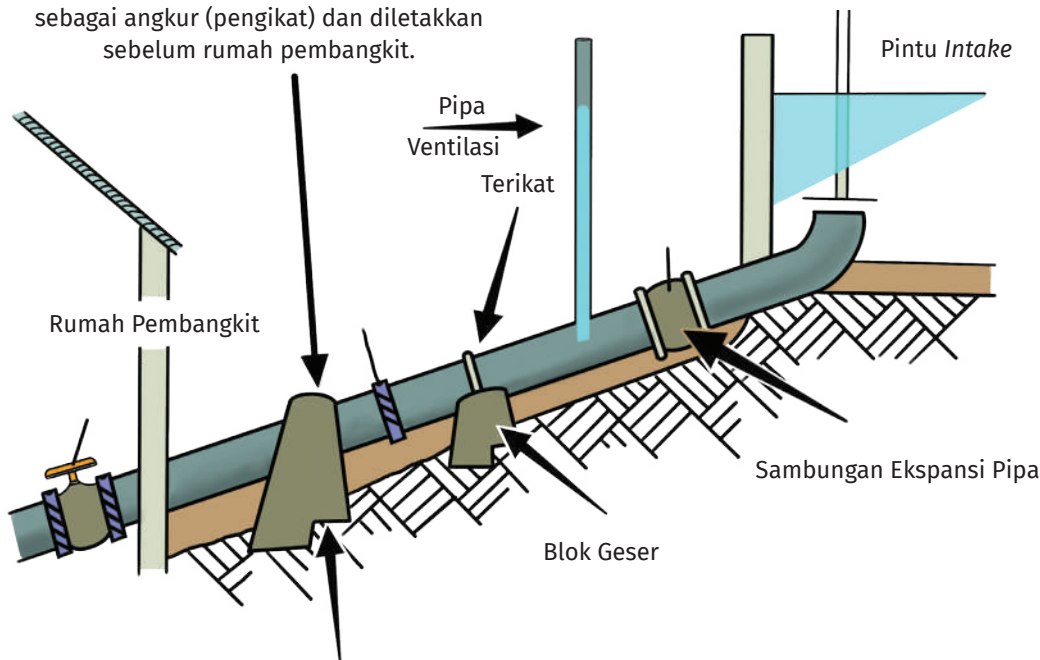
Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

3. Setiap kelompok menganalisis mengapa saluran pelimpah di atas disebut sebagai contoh saluran pelimpah yang tidak sesuai standar.
4. Kemudian, jelaskan cara memperbaiki kondisi saluran pelimpah tersebut agar sesuai dengan standar yang dibutuhkan.
5. Jelaskan juga mengapa saluran pelimpah tersebut perlu distandarkan.
6. Tiap kelompok (atau diacak kelompok tertentu) membaca hasil diskusinya dan guru mencatat di papan dan mengelompokkan sesuai kebutuhan.

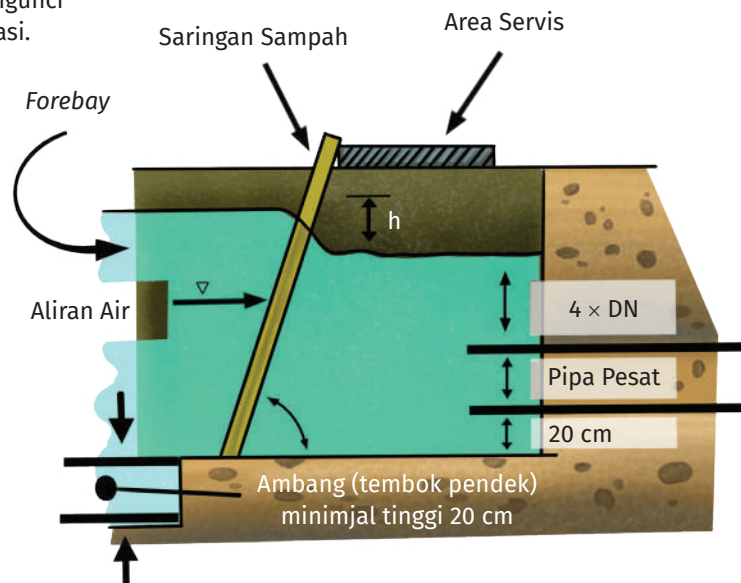
5) Pipa Pesat

Perancangan pipa pesat harus memperhatikan tekanan hilang dalam pipa pesat maksimal 10% dari total *head*. Pipa pesat harus mampu menerima berbagai jenis tekanan seperti tekanan statis, tekanan tiba-tiba (*surge pressure*), dan tekanan akibat *water hammer*. Pipa pesat memiliki *inlet* untuk ventilasi dan pipa napas di ujung atas dengan diameter 1-2% diameter pipa pesat. Saluran pembuang (*tailrace*) dibuat dengan tinggi muka air maksimal 30 cm dari *outlet* turbin.

Sebuah blok penahan tekanan dipakai sebagai angkur (pengikat) dan diletakkan sebelum rumah pembangkit.



Serations (alur kecil) mengunci blok angkur dan fondasi.



Gambar 2.41 Rancangan Pipa Pesat

Aktivitas 2.21 Pipa Pesat

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan pipa pesat PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok secara berpasangan dengan teman di samping.
2. Amatilah bagian dari PLTMH berikut. Ini merupakan contoh pipa pesat yang tidak sesuai standar.

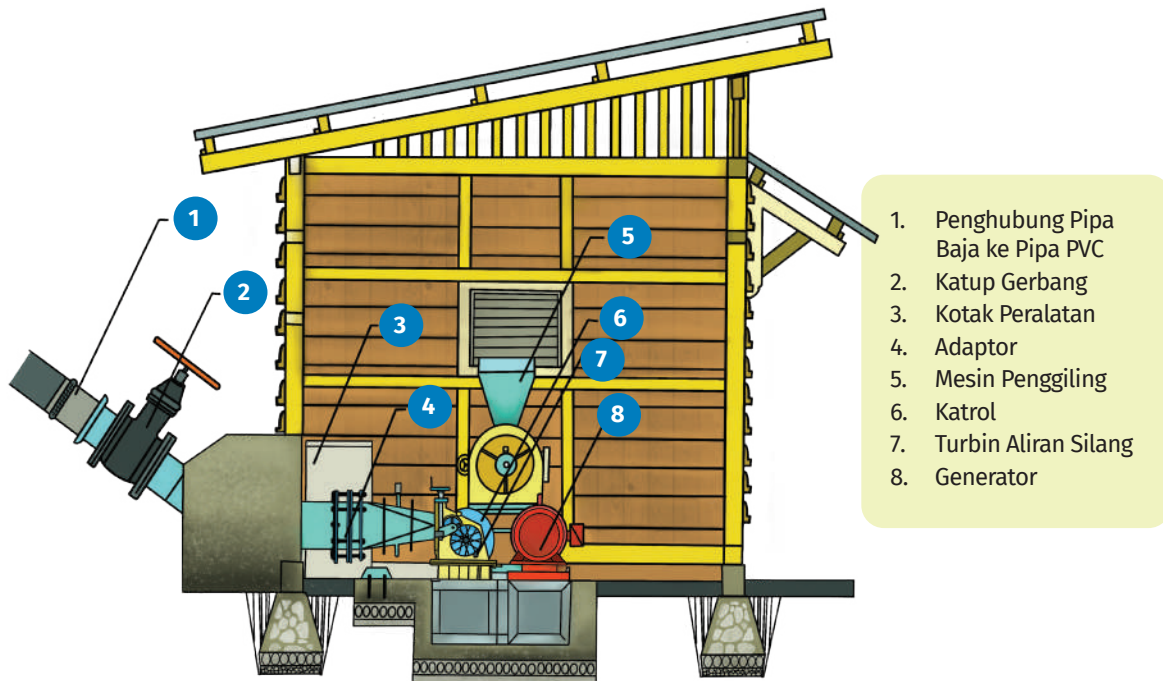


Sumber: Zainul, *Kemdikbudristek* (2024)

3. Setiap kelompok menganalisis mengapa pipa pesat di atas disebut sebagai contoh pipa pesat yang tidak sesuai standar.
4. Kemudian, jelaskan cara memperbaiki kondisi pipa pesat tersebut agar sesuai dengan standar yang dibutuhkan.
5. Jelaskan juga mengapa pipa pesat tersebut perlu distandarkan.
6. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.

6) Rumah Pembangkit

Pembangunan rumah pembangkit berada pada posisi tanah yang stabil, memiliki ventilasi udara dan jendela. Lokasi rumah pembangkit mudah diakses dan dekat dengan jalan. Selain itu, lokasi rumah pembangkit berada di atas level air jika terjadi banjir. Konstruksi fondasi turbin dan generator harus terpisah dari rumah pembangkit. Luas rumah pembangkit mampu untuk dilakukan bongkar pasang turbin.



Gambar 2.42 Rumah Pembangkit PLTMH

Aktivitas 2.22 Rumah Pembangkit

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan rumah pembangkit PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Separuh kelas berdiri membentuk lingkaran kecil dan menghadap keluar.
2. Separuh kelas lainnya membentuk lingkaran di luar lingkaran pertama, menghadap ke dalam.

3. Dua siswa yang berpasangan.
4. Amatilah bagian dari PLTMH berikut. Ini merupakan contoh rumah pembangkit yang sesuai standar.
5. Setiap pasangan menganalisis mengapa rumah pembangkit di atas disebut sebagai contoh rumah pembangkit yang sesuai standar.



Sumber: Feviana, Kemdikbudristek (2024)

6. Dua siswa yang berpasangan dari lingkaran kecil dan besar berbagi informasi. Pertukaran informasi ini dapat dilakukan oleh semua pasangan dalam waktu yang bersamaan.
7. Kemudian, siswa yang berada di lingkaran kecil diam di tempat, sementara siswa yang berada di lingkaran besar bergeser satu atau dua langkah searah jarum jam.
8. Sekarang, giliran siswa yang berada di lingkaran besar yang membagi informasi. Demikian seterusnya.

7) Saluran Pembuang

Perancangan saluran pembuang harus memerhatikan hal berikut.

- a) Memperhitungkan tinggi air jika terjadi banjir.
- b) Terhindar dari genangan air di sekitar rumah pembangkit.
- c) Saluran pembuang dibuat searah dengan aliran Sungai.

Aktivitas 2.23 Saluran Pembuang

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan saluran pembuang PLTMH secara bergotong royong.

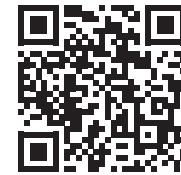
Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Amatilah bagian dari PLTMH berikut. Ini merupakan contoh saluran pembuang yang tidak sesuai standar.



Sumber: Zainul, *Kemdikbudristek (2024)*

3. Setiap kelompok menganalisis mengapa saluran pembuang di atas disebut sebagai contoh saluran pembuang yang tidak sesuai standar.
4. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.



<https://buku.kemdikbud.go.id/s/bx0yvt>

Pembangunan PLTMH
(Yusupa 2020)

b) Pemasangan Sistem Mekanik

Ketentuan umum pemasangan sistem mekanik pada PLTMH ialah seperti berikut. Sebelum instalasi peralatan elektromekanik, bangunan *powerhouse* harus selesai dan *baseframe* harus terpasang. Bangunan harus bebas dari bahan dan material konstruksi. Untuk PLTMH dengan bobot turbin atau generator lebih dari 50 kg, penyedia harus menyediakan *hoist* atau alat penggantung. Pemasangan komponen turbin yang masih terpisah harus dilakukan di pabrik oleh produsen turbin atau di bawah pengawasan produsen turbin. Pastikan bahwa *base frame* kuat dan tidak rusak lebih dari satu minggu setelah dibangun. Sebaiknya, tenaga ahli dari produsen turbin yang memasang turbin dan generator pada *baseframe*. *Alignment* harus dilakukan dengan peralatan yang tepat. Selama konstruksi, conduit kabel harus disiapkan. Jalur kabel harus dilindungi. Untuk menghindari kesalahan, tenaga pabrikan kontrol harus menyambungkan kabel generator ke kontrol. Setelah instalasi, penting untuk memastikan bahwa turbin tidak kotor dan bahwa setiap *bearing* memiliki pelumas atau gemuk.

Aktivitas 2.24 Peralatan Mekanik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan sistem mekanik PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang siswa. Setiap kelompok mendapatkan nomor.
2. Amatilah bagian dari PLTMH berikut. Ini merupakan contoh peralatan mekanik yang sesuai standar.
3. Setiap kelompok menganalisis mengapa peralatan mekanik di atas disebut sebagai contoh peralatan mekanik yang sesuai standar.
4. Setiap kelompok mempresentasikan hasil diskusi mereka di depan kelas.



Sumber: Zainul, Kemdikbudristek (2024)

Aktivitas 2.25 Peralatan Mekanik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan dapat menerapkan pelaksanaan pembangunan sistem mekanik PLTMH secara bergotong royong.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Setiap kelompok akan memasang turbin dan sistem mekanik PLTMH dari peralatan yang tersedia di sekolah.
3. Amatilah peralatan yang ada di sekolah atau di lingkungan.
4. Setiap kelompok merencanakan pemasangan turbin dan sistem mekanik berdasarkan ketersediaan peralatan.
5. Pasanglah turbin dan sistem mekanik dari peralatan yang ada tersebut.
6. Buatlah laporan hasil kerja kelompok dan presentasikan di kelas.

c) Pemasangan Sistem Elektrik

Pemasangan pada sistem elektrik dilakukan pada peralatan kontrol serta jaringan transmisi dan distribusi.

1) Peralatan Kontrol

Peralatan kontrol harus ditempatkan dalam kubikel. Jika berat kubikel lebih dari 25 kg, sebaiknya, kubikel diletakkan di lantai dengan dudukan yang tidak mudah lapuk. Jika terbuat dari besi, kubikel harus dibumikan. Kubikel di atas lantai juga harus diberikan drainase.

Sambungan kabel harus terlindungi dan tidak melintang bebas di lantai. Apabila kabel ditempel di dinding, harus dipastikan menempel dengan kokoh. Posisi *ballast load* sebaiknya diletakkan di luar rumah pembangkit. *Ballast load* tersebut juga harus terlindungi dan tidak mudah dijangkau anak-anak.

2) Jaringan Transmisi dan Distribusi

Pemasangan peralatan jaringan transmisi dan distribusi harus memenuhi ketentuan jarak ke tanah ialah 6 meter. Pada jaringan tersebut, dipastikan tidak ada cabang-cabang pepohonan. Selain itu, jaringan juga harus dibumikan sehingga akan aman dari bahaya petir. Pemasangan jaringan transmisi dan distribusi harus dilakukan oleh orang yang kompeten.

3) Instalasi Jaringan Sambungan Rumah

Pemasangan instalasi rumah harus dilakukan oleh tenaga kerja kompeten. Pemilihan kabel juga harus sesuai dengan peruntukan dan standar seperti antarrumah (SPLN 87-1991), di dalam bangunan (SNI 04-1925-1990), standar pembumian (SPLN 27-1980), alat pembatas daya (SNI 04-3862-1995).

Selain itu, titik sambungan menggunakan terminal yang dilindungi T DOS. Pemilihan lampu di dalam rumah ialah lampu hemat energi atau CFL. Listrik yang sudah tersalurkan harus diuji untuk seluruh rumah.

Aktivitas 2.26 Pemasangan Generator, Sistem Kontrol, dan Pengkabelan

Aktivitas Kelompok

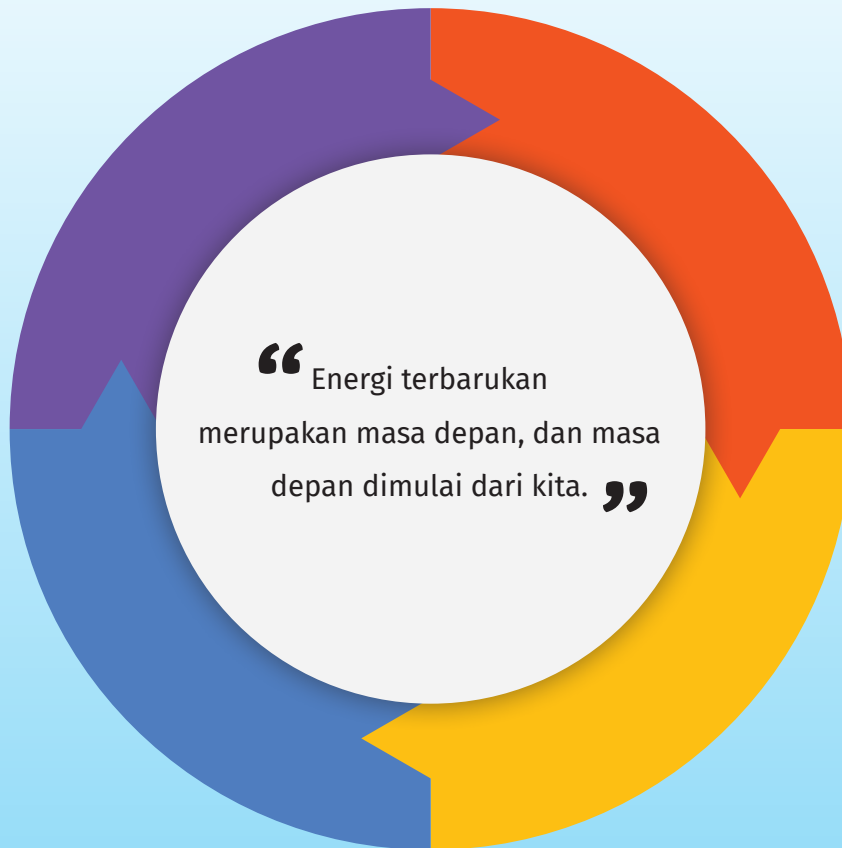
Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu akan mampu bekerja sama dalam proses pemasangan generator PLTMH, dengan fokus pada kestabilan dan orientasi yang optimal.

Langkah-Langkah:

1. Buat kelompok terdiri atas 4–5 orang siswa.
2. Setiap kelompok menyiapkan generator dan peralatan serta perlengkapan kerja.
3. Setiap kelompok akan melakukan pemasangan generator serta pemasangan sistem kontrol dan pengkabelan.
4. Amatilah peralatan yang ada di sekolah atau di lingkungan.
5. Setiap kelompok merencanakan pemasangan generator serta pemasangan sistem kontrol dan pengkabelan berdasarkan ketersediaan peralatan. Rencanakan setiap anggota kelompok mempunyai tanggung jawab tertentu dalam proses pemasangan.

6. Setiap kelompok melakukan pemasangan generator serta pemasangan sistem kontrol dan pengkabelan dengan langkah seperti berikut.
 - a. Pemasangan generator dilakukan di lokasi yang telah ditentukan.
 - b. Lakukan pemasangan generator dengan dudukan yang kuat dan stabil.
 - c. Setelah generator terpasang, lakukan pemasangan sistem kontrol dan pengkabelan.
 - d. Atur pengkabelan dari generator ke sistem kontrol dan beban.
 - e. Pastikan sistem berfungsi dengan optimal.
7. Buatlah laporan hasil kerja kelompok dan presentasikan di kelas.



Uji Kompetensi

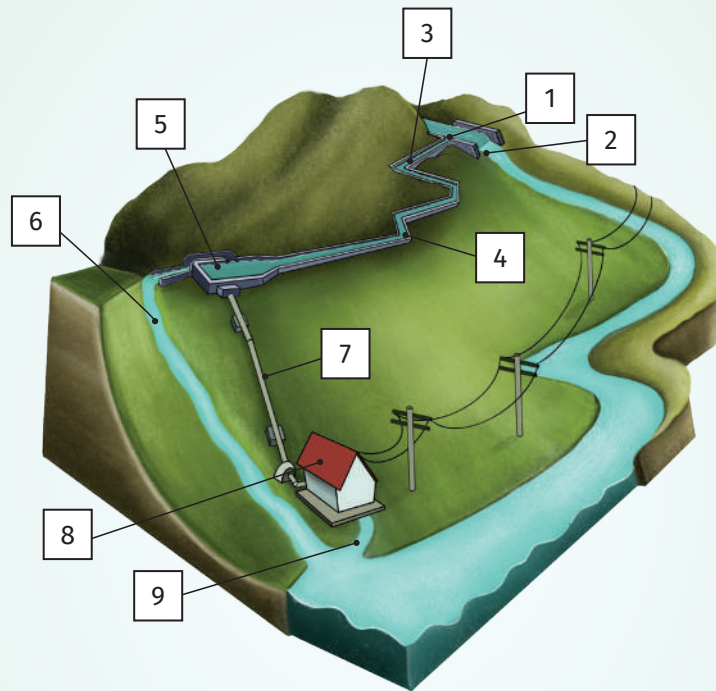
A. Pilihan Ganda

1. Secara umum, komponen PLTMH dapat dikelompokkan ke dalam 3 bagaian besar berikut, *kecuali*
 - A. bangunan sipil
 - B. komponen mekanikal
 - C. komponen elektrikal
 - D. komponen proteksi
 - E. bangunan konstruksi
2. Bangunan sipil PLTMH yang berfungsi untuk mengarahkan aliran sungai agar dapat masuk ke dalam pintu air ialah
 - A. bendung
 - B. *intake*
 - C. saluran pembawa
 - D. saluran pelimpah
 - E. bak pengendap
3. Pipa pesat (*penstock*) suatu instalasi PLTMH sebaiknya dilengkapi dengan peralatan atau komponen di bawah ini, *kecuali*
 - A. blok angkur
 - B. sambungan ekspansi
 - C. blok geser
 - D. saringan
 - E. pondasi
4. Komponen PLTMH yang berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi listrik ialah
 - A. turbin
 - B. generator
 - C. ELC
 - D. *ballast*
 - E. kontroller
5. Komponen elektrikal PLTMH yang berfungsi untuk mengatur tegangan dan frekuensi yang dihasilkan oleh PLTMH ialah
 - A. turbin
 - B. generator
 - C. panel kontrol
 - D. *ballast*
 - E. saluran pembawa

B. Esai

1. Apa saja komponen utama PLTMH?
2. Jelaskan fungsi bendung dan *intake* pada PLTMH.
3. Jelaskan jenis-jenis turbin pada PLTMH.
4. Jelaskan sistem elektrik yang harus ada dalam PLTMH beserta fungsinya.

C. Menjodohkan



No	Jawaban	No	Keterangan
1		A	Bak penenang
2		B	Rumah pembangkit
3		C	Saluran pelimpah
4		D	<i>Intake</i>
5		E	Pipa pesat
6		F	Bak pengendap
7		G	Bendung
8		H	Saluran pembawa
9		I	Saluran pembuang

Pengayaan

Lakukan kunjungan lapangan ke pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Lakukan pengamatan terhadap komponen sipil, mekanik, dan elektrik. Catat spesifikasi turbin dan generator yang digunakan.

Refleksi

Setelah melakukan pembelajaran tentang Energi Hidro, jawablah pertanyaan berikut ini.

1. Mengapa PLTMH merupakan energi masa depan di Indonesia?
2. *Insight* terbaik apa yang didapatkan dari materi ini?
3. Hal menarik apa yang ingin dipelajari lebih mendalam?

Beri tanda ceklis (✓) pada materi yang telah dikuasai.

Materi	1	2	3	4
Komponen PLTMH				
Sistem Kerja PLTMH				
Perencanaan PLTMH				
Pembangunan dan Pemasangan PLTMH				

Keterangan

- 1 = kurang memahami
- 2 = cukup memahami
- 3 = memahami
- 4 = sangat memahami



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2024

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin
untuk SMK/MAK Kelas XI

Penulis: Zainul M. Pulungan, Feviana Idarrani, dan Amin Wahyono

ISBN: 978-634-00-0046-7



Bagaimana prinsip kerja turbin angin dalam mengubah energi angin menjadi energi listrik?

Bab

3

Teknik Energi Angin

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan pemasangan sistem energi angin secara bergotong royong dan kreatif.

Kata Kunci

- energi terbarukan
- konversi energi
- generator
- aerodinamika
- kecepatan angin
- baterai

Peta Materi



Energi angin, sebagai sumber energi terbarukan, makin banyak dimanfaatkan. Kincir angin mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk pompa air dan energi listrik. Keunggulannya ialah ramah lingkungan, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, dan sumbernya tak terbatas. Pembangkit listrik tenaga angin telah dibangun di berbagai negara, berkontribusi pada upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Di Indonesia, pembangkit listrik tenaga angin disebut dengan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) atau *wind power*.

PLTB pada Gambar 3.1 ialah PLTB skala besar yang berlokasi di Laut Utara, lepas pantai Yorkshire, Inggris. PLTB ini berkapasitas 1,2 gigawatt (GW). Proyek yang bernama Hornsea, Hornsea One ialah ladang angin lepas pantai terbesar di dunia. Proyek ini memiliki 174 turbin angin yang mampu menghasilkan listrik untuk lebih dari satu juta rumah. Ini adalah salah satu contoh proyek energi angin yang berhasil mengurangi emisi karbon secara signifikan.

PLTB pada Gambar 3.2 PLTB Sidrap Indonesia Lokasi: Kabupaten Sidenreng Rappang (Sidrap), Sulawesi Selatan, Kapasitas: 75 MW Deskripsi: Ladang Angin Sidrap adalah ladang angin pertama di Indonesia dan terbesar di Asia Tenggara saat ini. Proyek yang mulai beroperasi penuh pada tahun 2018 ini memiliki 30 turbin angin dengan kapasitas masing-masing 2,5 MW.



Gambar 3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Besar di Inggris

Sumber: DeeWaluyo/infopublik.id (2017)



Gambar 3.2 PLTB Sidrap Indonesia

Sumber: The Asustralia-Indonesia Centre (2019)

1. Apakah peralatan yang digunakan untuk menangkap energi angin?
2. Bagaimana energi angin dapat menggerakkan generator?

A. Energi Angin

Energi kinetik dari massa udara yang bergerak, atau yang kita sebut energi angin, telah lama dimanfaatkan manusia. Awalnya, energi ini digunakan pada teknologi sederhana seperti kapal layar dan kincir angin tradisional. Kini, dengan kemajuan teknologi, energi angin dapat dikonversi menjadi listrik dalam skala besar, menengah, hingga kecil. PLTB skala kecil memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik guna memenuhi kebutuhan energi dalam skala kecil, seperti untuk rumah tangga atau komunitas kecil. Prosesnya dimulai dengan mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui rotasi turbin, kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Dengan demikian, energi angin yang semula hanya digunakan untuk keperluan sederhana, kini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik secara mandiri.



Gambar 3.3 menunjukkan proyek instalasi PLTB skala kecil di Pulau Mandangin. PLTB dengan kapasitas 500 watt ini dilengkapi dengan tiang penyangga setinggi 6 meter dan tiga buah bilah turbin. Untuk memastikan PLTB bekerja optimal, warga setempat memilih lokasi yang terbuka dan bebas dari penghalang angin. Proses pemasangan melibatkan pendirian tiang pengecoran fondasi, dan penempatan turbin secara tepat. PLTB ini diharapkan dapat memberikan penerangan jalan bagi masyarakat setempat, terutama bagi nelayan yang pulang melaut pada malam hari.

Untuk melihat proses pemasangan, kamu bisa melihat video dengan QR Code atau link berikut.

Gambar 3.3 Pemasangan PLTB di Pulau Mandangin Madura Jawa Timur
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

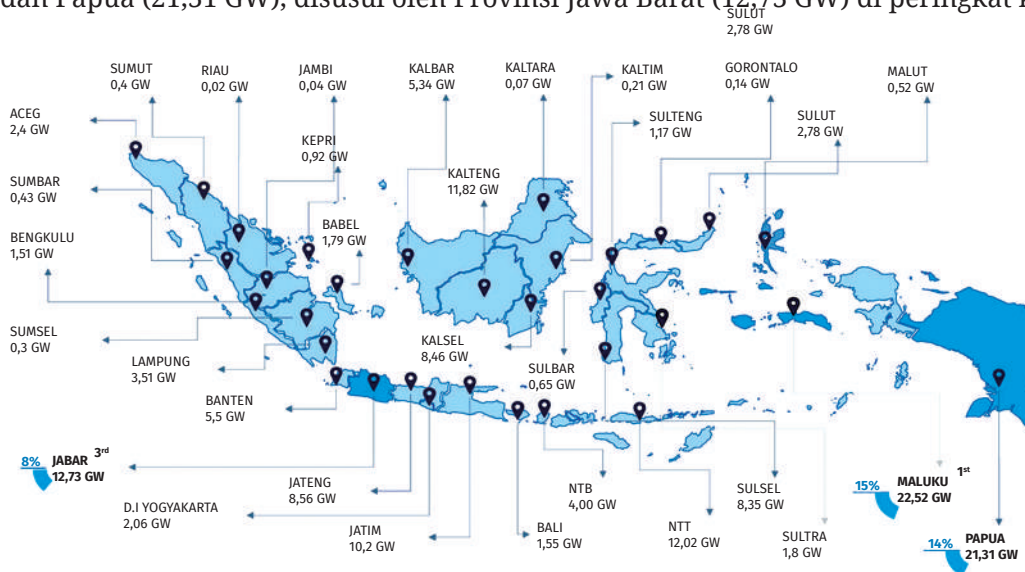


<https://buku.kemdikbud.go.id/s/vw9bod>

1. Potensi Angin di Indonesia

Secara umum, Indonesia memiliki dua musim, yaitu musim hujan dan kemarau. Saat musim hujan, daerah sekitar curahan hujan menjadi basah, udara menjadi lembab, dan memiliki suhu rendah. Di belahan bumi yang lain, terjadi musim panas. Udara di sekitar menjadi panas dan suhu udara juga meningkat. Perbedaan suhu ini memantik pergerakan udara dari daerah yang panas menuju daerah yang dingin, dan dari daerah yang dingin menuju daerah yang panas. Pergerakan udara ini terjadi secara terus-menerus. Di kalangan masyarakat kita, proses ini dikenal sebagai angin muson timur dan angin muson barat.

Indonesia ialah negara kepulauan yang memiliki garis pantai terpanjang, menyimpan potensi energi angin atau bayu yang cukup masif. Berdasarkan data Geoportal ESDM, embusan angin di sejumlah wilayah di Indonesia dapat menembus kecepatan 4 m/s hingga 6 m/s. Potensi energi baru tertinggi berada di kawasan Indonesia Timur, yaitu Maluku (22,52 GW) dan Papua (21,31 GW), disusul oleh Provinsi Jawa Barat (12,73 GW) di peringkat ketiga.



Gambar 3.4 Potensi PLTB di Indonesia

Sumber: Dewan Energi Nasional/Glen Kaonang (2024)

Indonesia memiliki kekayaan alam yang melimpah. Salah satu penyebabnya ialah letak geografis Indonesia. Indonesia terletak di posisi lintang sekitar 6° Lintang Utara (LU) hingga 11° Lintang Selatan (LS); posisi bujur sekitar 95° Bujur Timur (BT) hingga 141° Bujur Timur (BT). Bangsa Indonesia akan memperoleh kemanfaatan di bidang PLTB untuk memenuhi kebutuhan listrik yang murah, bebas polusi, dan ramah lingkungan. Pemerintah Indonesia telah mendukung adanya pengembangan PLTB dengan mengeluarkan regulasi berdasarkan

Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Pemerintah memiliki target kapasitas PLTB pada tahun 2025, yakni 255 MW. Sementara, hingga tahun 2020, PLTB baru terpasang sekitar 135 MW dengan perincian 75 MW di daerah Sidrap dan sebesar 60 MW di daerah Janeponto. Dengan demikian, pengembangan energi angin di Indonesia masih menjadi tantangan nasional.

2. Konversi Energi Kinetik ke Mekanik

Kecepatan angin dan energi yang terkandung di dalamnya ialah dua konsep yang sangat terkait dalam PLTB. Energi angin sebanding dengan kubus kecepatan angin. Artinya, sedikit peningkatan dalam kecepatan angin dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar dan memengaruhi proses konversi energi. Untuk mengukur kecepatan angin, kita dapat menggunakan anemometer yang mengukur kecepatan angin dalam satuan meter per detik (m/s), menunjukkan seberapa jauh angin bergerak setiap detik.

Gambar 3.5 di sebelah kiri menunjukkan tampilan aplikasi pada ponsel Android yang terhubung dengan anemometer. Di sebelah kanan melalui bluetooth, sebuah teknologi nirkabel yang memungkinkan pertukaran data antarperangkat dalam jarak pendek menggunakan gelombang radio UHF (*Ultra High Frequency*), dengan jangkauan antara 5 hingga 10 meter.



Gambar 3.5 Anemometer Berbasis Android
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Dalam PLTB terdapat hubungan yang saling terkait antara energi kinetik, energi mekanik, dan energi listrik. Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh suatu objek karena pergerakannya. Besarnya energi kinetik bergantung pada massa objek dan kecepatan pergerakannya. Rumus untuk energi kinetik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

di mana: E_k = energi kinetik,

m = massa benda (dalam kilogram),

v = kecepatan benda (dalam meter per detik).

Energi kinetik meningkat seiring dengan peningkatan massa atau kecepatan benda. Artinya, makin berat dan makin cepat suatu benda bergerak, makin besar pula energi kinetik yang dimilikinya.

Energi mekanik adalah jumlah energi yang dimiliki oleh suatu benda karena posisi dan gerakannya. Energi mekanik merupakan gabungan dari dua jenis energi, yaitu:

1. energi kinetik E_k : energi yang dimiliki oleh suatu benda karena gerakannya.
2. energi potensial E_p : energi yang dimiliki oleh suatu benda karena posisinya atau kondisi lainnya, seperti ketinggian (energi potensial gravitasi) atau keadaan pegas (energi potensial elastis).

Rumus untuk energi mekanik total E_m adalah:

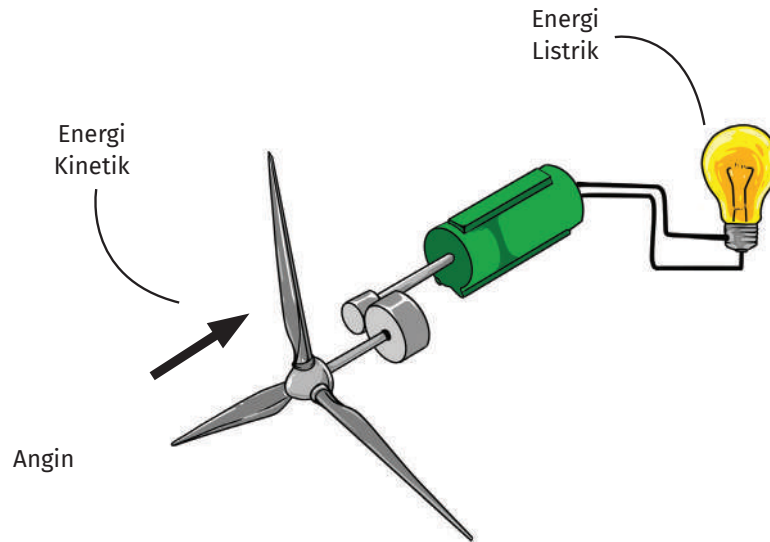
$$E_m = E_k + E_p$$

di mana: E_k = energi kinetik, yang dihitung dengan rumus $\frac{1}{2} mv^2$

E_p = energi potensial

Untuk energi potensial gravitasi, rumusnya adalah mgh , di mana m ialah massa benda, g adalah percepatan gravitasi, dan h ialah ketinggian benda dari suatu titik acuan.

Proses mengubah energi angin menjadi listrik melibatkan beberapa langkah. Pertama, energi kinetik dari angin ditangkap oleh baling-baling turbin angin. Saat angin berembus dan mengenai area baling-baling, energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanik.



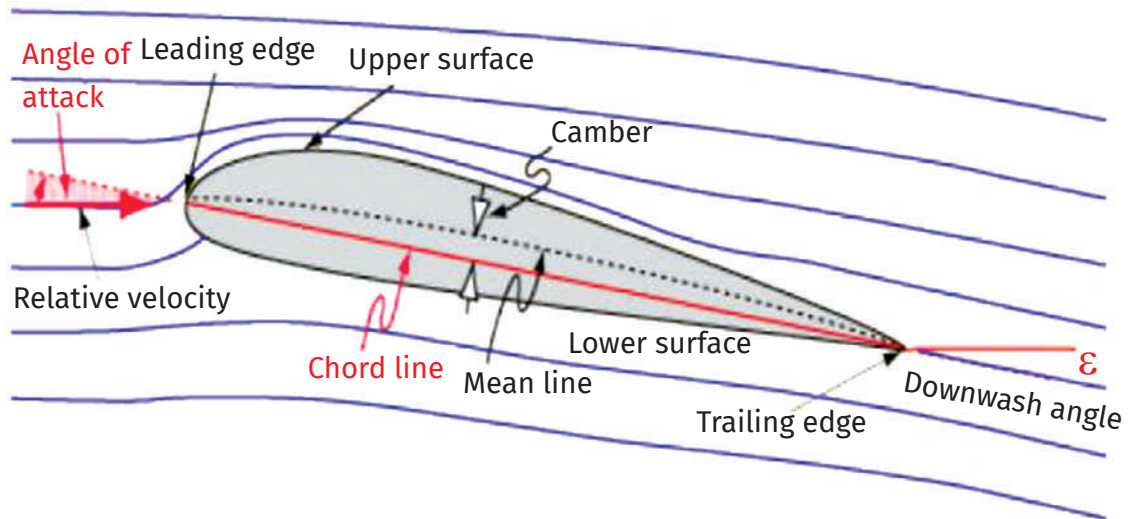
Gambar 3.6 Proses Konversi Energi Angin

Kecepatan aliran udara memengaruhi jumlah energi kinetik angin yang dapat ditangkap oleh turbin angin. Baling-baling dengan berbagai desain mengubah arah angin, menyebabkan turbin berputar. Jumlah energi kinetik angin yang dapat ditangkap oleh baling-baling bergantung pada bentuk konstruksi aerodinamisnya.



Gambar 3.7 Gaya Aerodinamis Bilah Turbin

Desain aerodinamis bilah turbin didasarkan pada prinsip Hukum Bernoulli, yang menyatakan bahwa peningkatan kecepatan fluida (udara) mengakibatkan penurunan tekanan di dalam fluida tersebut. Perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah bilah menciptakan gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). Untuk meningkatkan efisiensi aerodinamis, bilah turbin sering dirancang menyerupai bentuk airfoil, dengan tujuan untuk meningkatkan gaya angkat dan mengurangi gaya hambat.



Gambar 3.8 Nama Bagian Airfoil

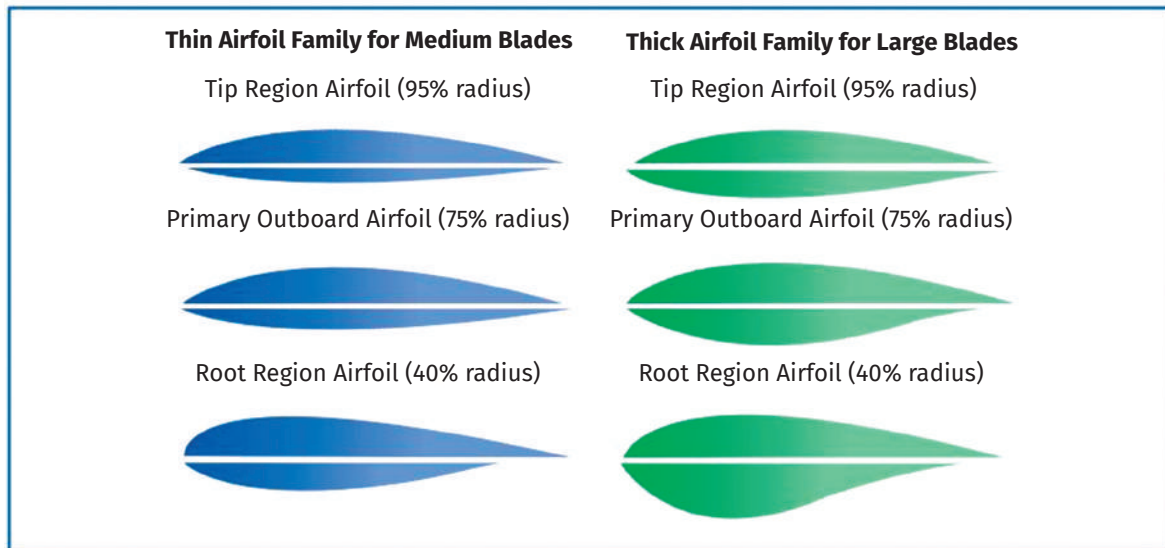
Sumber: Mangestiyono (2012)

Airfoil atau aerofoil adalah suatu bentuk geometri yang jika ditempatkan di suatu aliran fluida, akan memproduksi gaya angkat (*lift*) lebih besar dari gaya hambat (*drag*). Gambar 3.8 merupakan model aerofoil dengan nama bagian sebagai berikut.

- (1) *Leading edge* adalah bagian yang paling depan dari sebuah *airfoil*.
- (2) *Trailing edge* adalah bagian yang paling belakang dari sebuah *airfoil*.
- (3) *Chamber line* adalah garis yang membagi sama besar antara permukaan atas dan permukaan bawah dari *airfoil* mean *chamber line*.
- (4) *Chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*.
- (5) *Chord (c)* adalah jarak antara *leading edge* dan *trailing edge*.
- (6) Maksimum *chamber* adalah jarak maksimum antara *mean chamber line* dan *chord line*. Posisi maksimum *chamber* diukur dari *leading edge* dalam bentuk persentase *chord*.
- (7) Maksimum *thickness* adalah jarak maksimum antara permukaan atas dan permukaan bawah aerofoil yang juga diukur tegak lurus terhadap *chord line*.

Upaya untuk menemukan desain *airfoil* yang optimal terus dilakukan dan dikembangkan. Di antaranya penelitian oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) yang mencakup berbagai bentuk *airfoil* atau disebut "keluarga *airfoil*" untuk turbin angin. Keluarga *airfoil*

yang telah diuji ini mengutamakan aspek desain untuk memenuhi kebutuhan aerodinamis dan struktural turbin angin.



Gambar 3.9 Pembagian Area *Airfoil* pada Sebuah Bilah Turbin
Sumber: Schubel & Crossley (2012)

Penempatan *airfoil* pada bilah turbin terdiri atas tiga zona utama: *root region*, yang terletak dekat *hub* di tengah bilah, *primary region*, yang berada di bagian tengah bilah; dan *tip region*, yang terletak di ujung bilah. Contoh persentase untuk setiap zona bilah turbin dapat dilihat pada Gambar 3.10.

Gambar 3.10 Pembagian Posisi *Airfoil* pada Bilah Turbin PLTB
Sumber: Al Hicks/www.energy.gov (2023)



3. Model Bilah

Jenis bilah pada PLTB sangat memengaruhi efisiensi dan performa keseluruhan sistem. Beberapa jenis bilah yang digunakan dalam turbin angin memiliki ciri dan spesifikasi teknis yang berbeda-beda, yang memengaruhi bagaimana bilah tersebut menangkap dan mengubah energi angin menjadi energi mekanik.

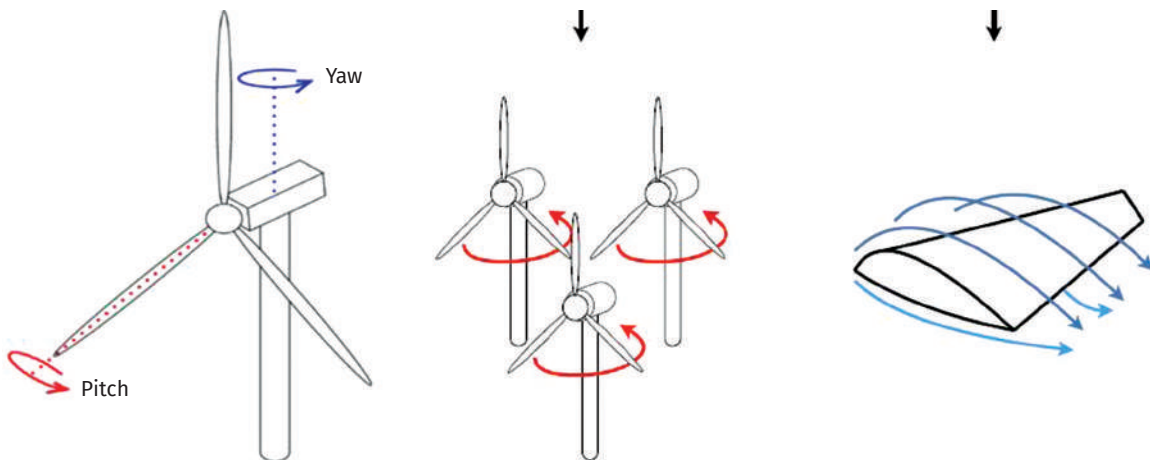
Pertama, Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) dengan tiga bilah. HAWT merupakan jenis bilah yang paling umum digunakan. Biasanya, bilah ini terbuat dari bahan komposit seperti *fiberglass* atau karbon. Keuntungannya ialah stabilitas rotasi yang baik, kinerja aerodinamis yang optimal, dan efisiensi tinggi. Model poros horizontal ini banyak digunakan pada pembangkit listrik skala kecil, menengah, dan besar, baik di darat maupun di lepas pantai.

Untuk mencapai kinerja optimal pada PLTB, terutama pada bilah turbin jenis HAWT, penting untuk meningkatkan gaya angkat dan mengurangi gaya hambat. Selain faktor ukuran panjang bilah, pengaturan sudut *pitch* dan sudut *yaw* *airfoil* juga berpengaruh besar. Pengaturan sudut *pitch* mengontrol sudut baling-baling terhadap arah angin, sementara sudut *yaw* mengatur orientasi bilah terhadap arah angin, keduanya memengaruhi efisiensi aerodinamis turbin.



Gambar 3.11 PLTB Menggunakan Sumbu Horizontal (HAWT)

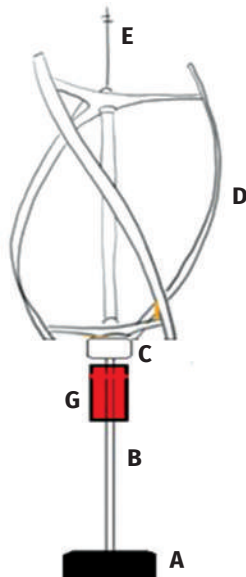
Sumber: *berlionemore_contributor, freepik (2024)*



Gambar 3.12 Arah Panah Gerakan *Pitch* dan *Yaw* Turbin HAWT

Sumber: *Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)*

Kedua, bilah Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), yaitu jenis turbin angin yang sumbu rotasinya tegak lurus terhadap tanah dan arah angin. Turbin ini dapat menangkap angin dari segala arah sehingga tidak memerlukan sistem orientasi *pitch* dan *yaw* untuk mengarahkan turbin ke arah angin.

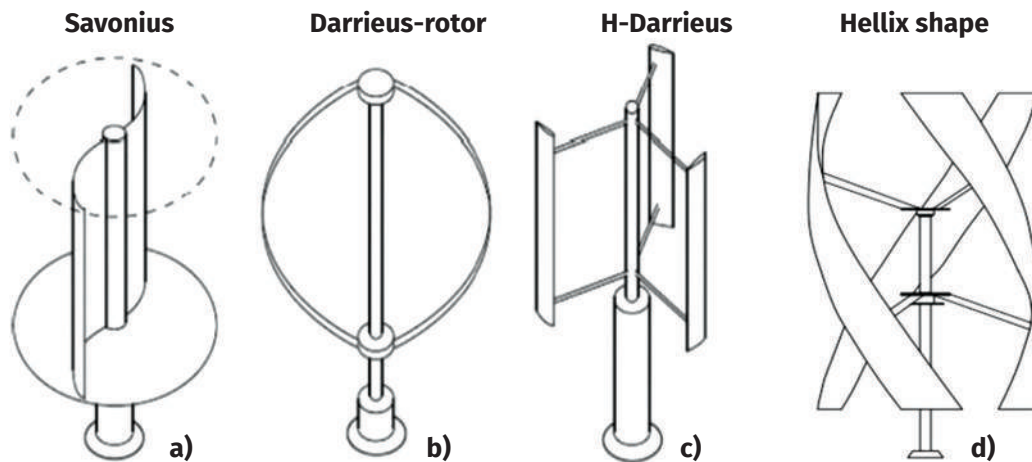


- A : Bagian fondasi penguat PLTB berupa besi bertulang yang ditanam di dalam tanah dengan kedalaman yang kuat.
- B : Penyangga yang terbuat dari pipa besi yang kuat dan tebal dan mampu memikul beban semua sistem PLTB.
- C : *Generator Low Rpm* yaitu penghasil energi listrik arus bolak-balik (AC) dengan putaran rendah, menggunakan magnet permanen.
- D : Bilah kipas *wind turbine*, menggunakan bentuk *airfoil*, sejumlah 3 untuk menangkap energi angin.
- E : Penyangga bagian atas, *bearing* dengan sistem pelumas sehingga kipas dapat berputar
- G : *Charger Controler* dan baterai, penyimpanan listrik dan koneksi ke jaringan

Gambar 3.13 PLTB Model VAWT

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Turbin angin sumbu vertikal dapat dibagi menjadi dua kategori utama: Savonius dan Darrieus. Turbin Savonius memiliki desain yang paling sederhana, terdiri atas dua atau lebih semi-silinder berbentuk . Turbin ini bekerja dengan gaya tarik dan dapat menangkap angin dari segala arah, memutar poros vertikal yang terhubung ke generator listrik. Turbin Savonius umumnya digunakan pada PLTB skala mikro.



Gambar 3.14 (a) Savonius; (b) Darrieus (c) Bilah Berbentuk H; (d) Bilah Berbentuk Heliks

Sumber: Yang (2011)

Berbeda dengan turbin Savonius, turbin Darrieus memiliki efisiensi yang lebih baik pada kecepatan putaran yang tinggi, tetapi torsi awalnya lebih rendah. Untuk menggabungkan keunggulan dari kedua model tersebut, beberapa turbin hibrida Savonius-Darrieus telah dikembangkan.

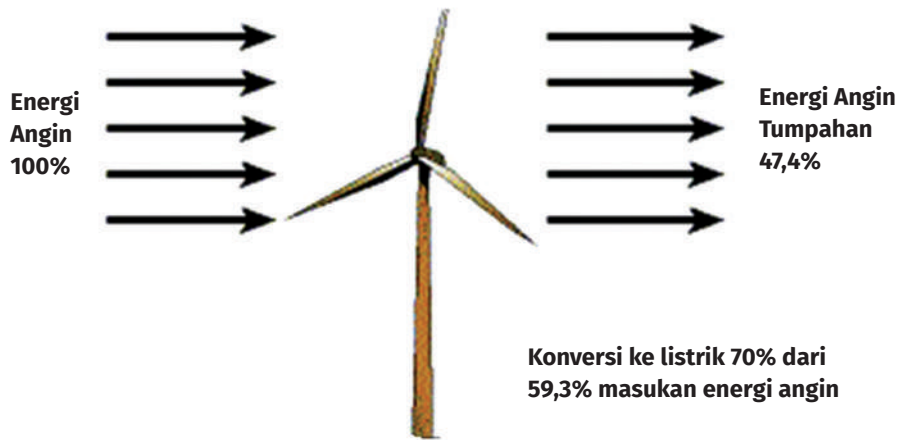
Pada PLTB komersial, turbin HAWT lebih cocok untuk proyek skala besar yang memerlukan daya *output* tinggi. Di sisi lain, untuk aplikasi skala kecil, seperti penerangan rumah atau gedung kecil, turbin VAWT lebih sesuai. Jika daerah kamu memiliki potensi kecepatan angin yang tinggi dan konsisten, turbin HAWT lebih cocok untuk lokasi seperti pantai atau dataran tinggi yang memiliki angin kencang dan stabil.

Tabel 3.1 Perbedaan Fitur HAWT dan VAWT

FITUR	HAWT	VAWT
Arah Angin	Mebutuhkan pengarah mata angin secara manual maupun elektronik.	Tidak membutuhkan, menerima energi angin dari berbagai arah.
Kecepatan Angin	Mebutuhkan kecepatan angin tinggi untuk start, kemudian di stabilkan dengan gearbox.	Kecepatan angin untuk memutar bilah dibutuhkan stabil dan cepat.
Betz Limit	59,3%	30%
Efisiensi konversi energi	35%-50%	30%-40%
Lokasi	Pegunungan, perbukitan, tanah lapang	Perkotaan
Biaya	Tinggi	Rendah
Hasil Listrik	Skala besar	Skala kecil
Jumlah Blade	3	Lebih dari 3

Dalam operasi turbin angin, prinsip Hukum Betz juga berlaku. Hukum ini merupakan prinsip dasar dalam aerodinamika turbin angin yang menetapkan batas maksimal efisiensi turbin dalam memanfaatkan energi kinetik dari angin. Dikenal sebagai "Batas Betz" atau "Koefisien Betz", hukum ini menyatakan bahwa turbin angin hanya dapat menangkap hingga

59% dari energi kinetik yang tersedia dalam aliran angin yang melewati rotornya. Konversi energi angin tersebut menjadi energi listrik juga dibatasi hingga maksimal 70% dari energi yang berhasil ditangkap.



Gambar 3.15 Gambaran Limitasi Betz

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan oleh sebuah bilah kipas sistem turbin angin, kita dapat menggunakan formula sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

P = daya yang dihasilkan (dalam watt, W).

ρ = densitas udara (dalam kilogram per meter kubik, kg/m^3), biasanya sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$ pada permukaan laut dan suhu 15°C .

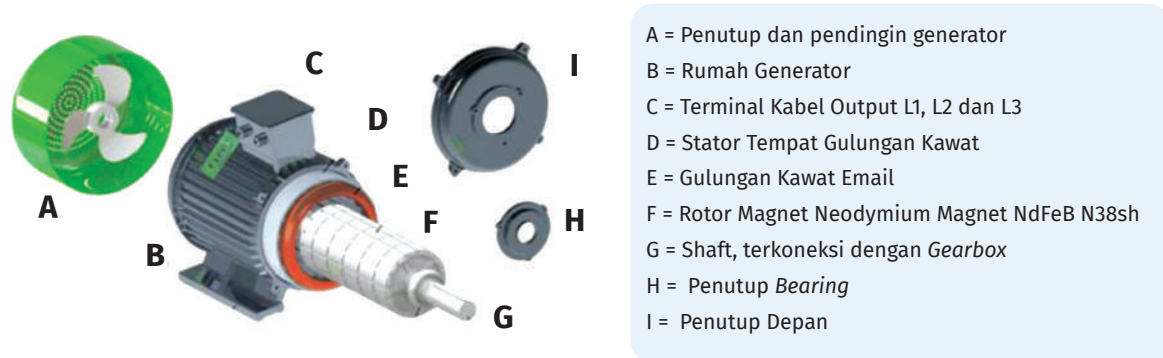
A = luas area sapuan bilah (dalam meter persegi, m^2). Untuk turbin angin horizontal, ini merupakan luas lingkaran yang dilalui oleh bilah, yaitu $A = \pi r^2$, di mana r ialah panjang radius bilah.

v^3 = kecepatan angin (dalam meter per detik, m/s) menggunakan *skala beaufort* atau anemometer.

C_p = koefisien daya turbin angin, yang merupakan efisiensi turbin dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik. Nilainya bervariasi bergantung pada desain turbin, tetapi maksimum teoretisnya (dikenal sebagai batas Betz) ialah sekitar 0,59 atau 59%.

4. Konversi Energi Mekanik ke Listrik

Konversi energi mekanik menjadi energi listrik dilakukan dengan menggunakan generator. Generator terhubung ke sumbu yang dipercepat oleh *gearbox*. Generator mengubah energi mekanik rotasi menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Nama-nama bagian generator dapat kita lihat pada Gambar 3.16.



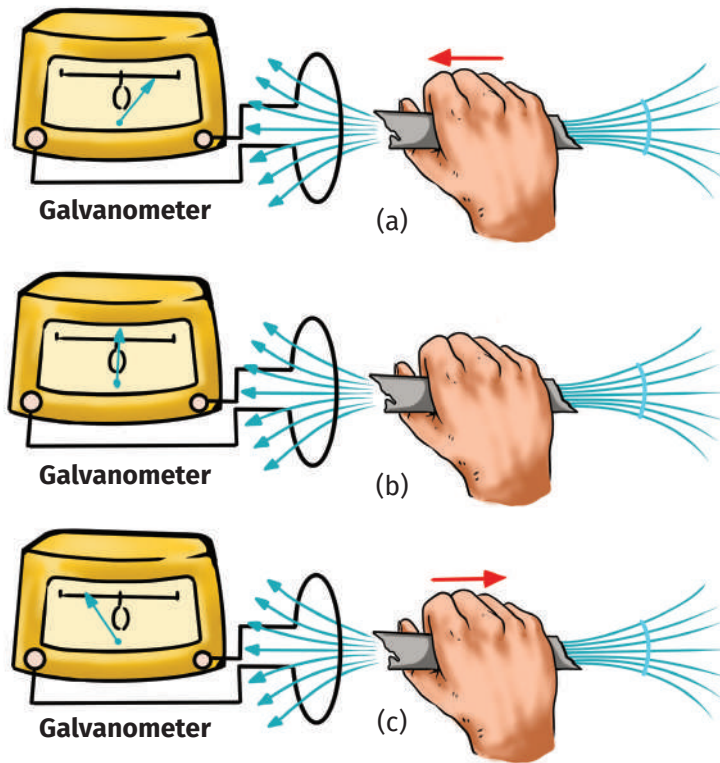
Gambar 3.16 Bagian Generator Low rpm

Sumber: Greef Energy (2024)

Pada generator, prinsip kerja induksi elektromagnetik didasarkan pada Hukum Faraday dan Hukum Lenz. Hukum Faraday menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menghasilkan GGL (gaya gerak listrik) induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. Hukum Lenz menjelaskan bahwa GGL induksi yang muncul akan memiliki arah yang melawan perubahan fluks magnetik yang menyebabkan terjadinya arus induksi. Dengan kata lain, arus induksi yang dihasilkan akan menciptakan medan magnet yang melawan perubahan fluks magnetik yang menghasilkan arus tersebut.

Prinsip-prinsip ini bekerja sama untuk mengubah energi mekanik rotasi menjadi energi listrik dalam generator. Gambar 3.17 menunjukkan ilustrasi dari prinsip-prinsip ini.

- Pada posisi (a), tangan kanan sebagai magnet, di antara kumparan kawat yang terhubung dengan galvanometer, bergerak ke arah kiri, pada ujung kumparan kawat timbul gaya gerak listrik, jarum menunjuk ke kanan.
- Pada posisi (b), tangan kanan diam, tidak bergerak, pada kumparan kawat yang terhubung dengan galvanometer diam, tidak ada gaya gerak listrik.
- Pada posisi (c), tangan kanan sebagai magnet bergerak kekanan, pada kedua ujung kawat kumparan timbul gaya gerak listrik, jarum menunjukkan ke arah kiri.



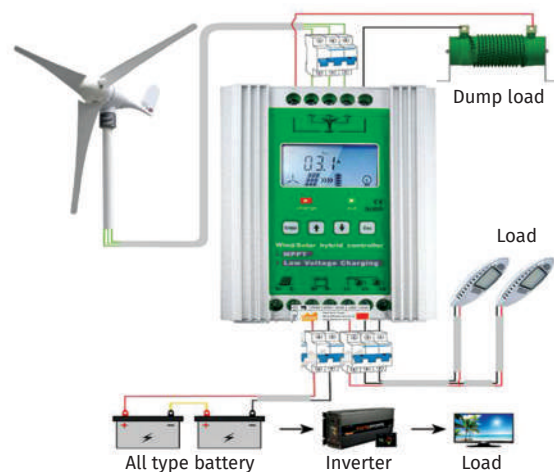
Gambar 3.17 Gaya Gerak Listrik dan Gaya Gerak Magnet

Galvanometer adalah sebuah instrumen yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur arus listrik kecil dalam rangkaian listrik. Alat ini sangat sensitif dan dapat menunjukkan arah dan besarnya arus listrik.

5. Konversi Energi Listrik AC – DC - AC

Arus listrik bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh generator pada PLTB skala kecil biasanya memiliki konfigurasi tiga fasa. Arus AC ini kemudian diubah menjadi arus searah (DC) menggunakan sistem penyearah (*rectifier*) untuk mengisi baterai sebagai peralatan yang bertugas menyimpan listrik, seperti yang terlihat pada gambar berikut.

Pada Gambar 3.18, tegangan listrik dari turbin angin masuk melalui sistem pengaman dan kemudian diteruskan ke peralatan yang terintegrasi menjadi satu unit. Peralatan tersebut seperti berikut.

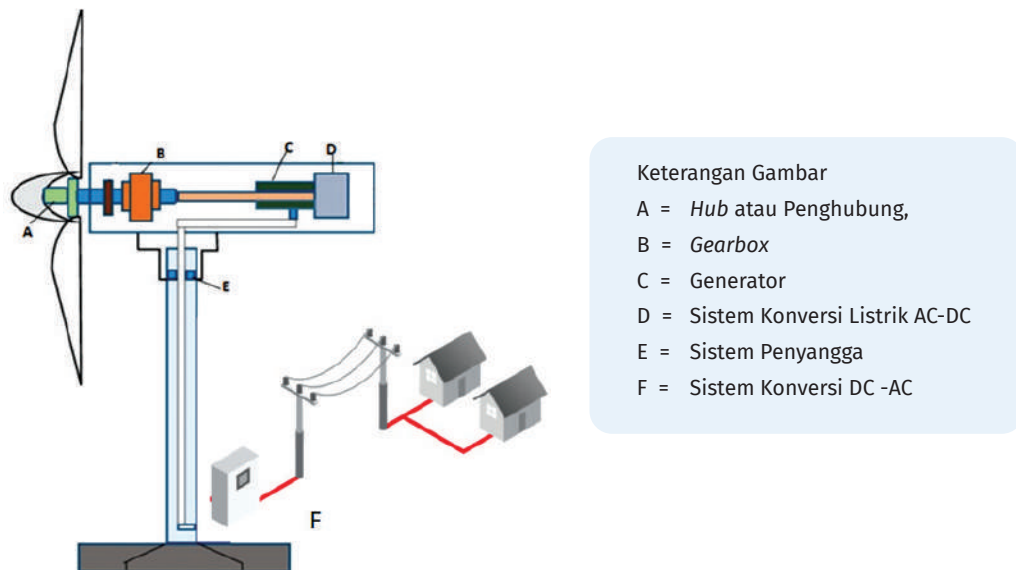


Gambar 3.18 Proses Konversi Energi Listrik AC-DC-AC

Sumber: Waveinverter (2024)

1. *Rectifier*: Mengubah tegangan AC yang dihasilkan oleh turbin angin menjadi tegangan DC.
2. Sistem pengisian baterai (*charger controller*): Mengelola pengisian baterai dari tegangan DC yang dihasilkan, memastikan pengisian yang aman dan efisien.
3. Inverter: Mengubah tegangan DC dari baterai menjadi AC 220 volt, 50 Hz, yang aman dan sesuai untuk penggunaan listrik rumah tangga.

Sistem ini bekerja bersama untuk menyediakan listrik yang stabil dan dapat saluran pada jaringan distribusi untuk kebutuhan rumah tangga. Sistem distribusi listrik pada PLTB dapat berupa *on-grid*, di mana energi disalurkan ke jaringan listrik utama, atau *off-grid*, di mana energi digunakan secara mandiri dengan sistem penyimpanan seperti baterai.



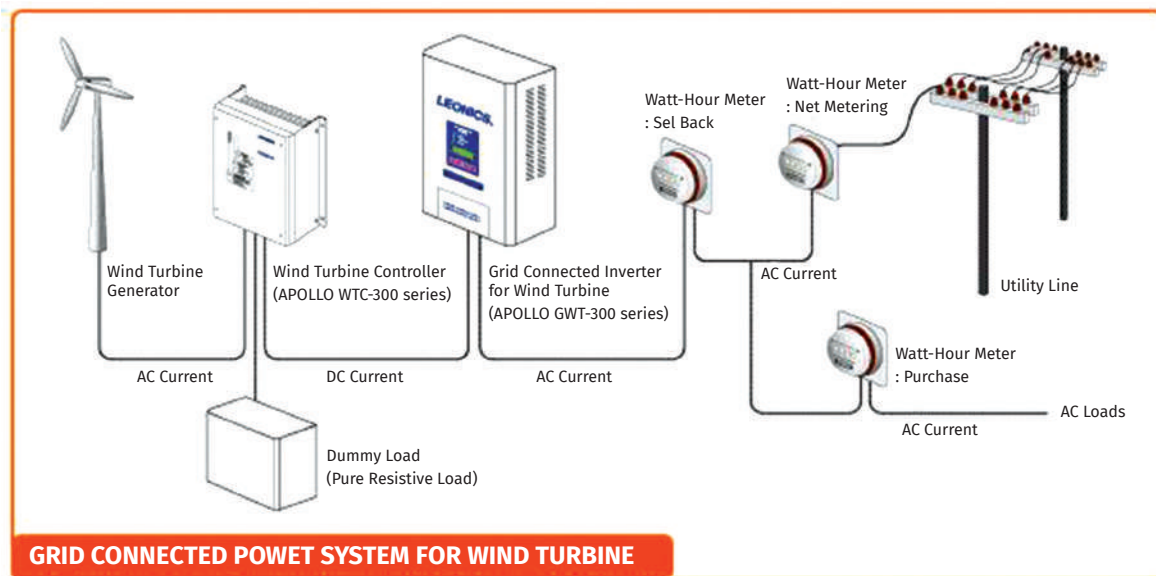
Gambar 3.19 Bagan Komponen PLTB Skala Kecil

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Pada Gambar 3.19, bilah kipas dengan desain *airfoil* pada turbin angin jenis HAWT menggunakan fitur kontrol *pitch* untuk mengonversi energi kinetik menjadi energi mekanik. Energi mekanik dari putaran bilah kemudian disalurkan melalui *gearbox* untuk menstabilkan putaran, dan selanjutnya dihubungkan ke generator yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Penyangga dan rumah turbin terhubung dengan bantalan (*bearing*) yang memungkinkan rotasi 360 derajat menggunakan kontrol yaw agar turbin selalu menghadap arah angin. Listrik tiga fase yang dihasilkan oleh generator kemudian diproses melalui sistem penyearah (*rectifier*), pengisian baterai (*charger*), dan inverter untuk mengonversi DC-AC kemudian didistribusikan dalam sistem jaringan *off-grid*.

Sistem Distribusi *Off-Grid* bersifat mandiri karena tidak membutuhkan koneksi ke jaringan listrik utama. Sistem ini memerlukan penyimpanan energi, seperti baterai, untuk menjamin ketersediaan daya saat turbin tidak beroperasi, seperti pada malam hari atau saat angin lemah. Pengaturan dan pemantauan dilakukan secara lokal tanpa ketergantungan pada jaringan listrik utama sehingga cocok untuk daerah terpencil yang tidak terjangkau oleh jaringan. Sistem ini juga tidak terpengaruh oleh pemadaman atau gangguan jaringan listrik utama. Namun, kekurangannya ialah biaya investasi tambahan untuk penyimpanan energi dan kebutuhan pengelolaan serta pemeliharaan yang lebih intensif untuk menjaga kinerja sistem

Sistem Distribusi *On-Grid* terhubung langsung ke jaringan listrik utama, misalnya PLN, sehingga memungkinkan suplai energi yang dihasilkan oleh turbin angin langsung ke *grid*. Sistem ini tidak memerlukan penyimpanan energi karena energi berlebih dapat dikirim ke jaringan listrik, dan kekurangan daya dapat ditarik dari jaringan. Dengan sistem ini, energi listrik dapat dimanfaatkan secara efisien dan stabil. Sistem *on-grid* cocok untuk wilayah dengan akses jaringan listrik PLN yang baik dan dapat mengurangi biaya penyimpanan energi. Namun, kekurangannya ialah ketergantungan pada jaringan listrik utama sehingga sistem ini tidak dapat berfungsi saat terjadi pemadaman jaringan. Sistem *on-grid* dapat dijelaskan pada gambar berikut.



Gambar 3.20 Sistem Jaringan Distribusi *On-Grid*

Sumber: Leonic (2024)

Pada Gambar 3.20, kontroler turbin angin seri APOLLO WTC-300 ialah penyearah yang mengubah daya AC tiga fase yang dihasilkan oleh turbin angin menjadi DC untuk disalurkan ke inverter yang terhubung ke jaringan seri APOLLO GWT-300. Fitur utamanya termasuk proteksi tegangan berlebih, yang sangat berguna untuk generator magnet permanen yang digerakkan oleh turbin angin. Kontroler ini dapat menangani tegangan AC variabel dan frekuensi variabel (VVVF), dan mengubahnya menjadi tegangan DC yang stabil, tidak melebihi tegangan setel yang ditentukan. Tegangan setel (*set voltage*) ialah nilai tegangan yang telah ditentukan sebagai batas aman atau target untuk operasi sebuah perangkat atau sistem listrik. Jika tegangan DC melebihi batas setel, kontroler akan mengalihkan daya dari turbin ke beban kosong seperti pemanas atau lampu pijar/*dumpload* untuk menghindari kerusakan. Selain itu, kontroler turbin angin ini menyediakan antarmuka komunikasi untuk mengontrol start dan stop turbin, serta untuk sinyal alarm dan kontrol lainnya guna mencegah malfungsi.

Studi Kasus

Ada sebuah desa yang terpencil. Hasil musyawarah desa memutuskan akan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Hasil listriknya akan dipergunakan untuk menghidupkan lampu di area pantai sebagai penerangan saat nelayan mendarat malam hari. Setelah melakukan studi lapangan, direncanakan bahwa kecepatan angin rata-rata ialah 6 m/s. Panjang baling-baling direncanakan 6 meter, menggunakan model sumbu horizontal. Berapakah kapasitas listrik yang akan dihasilkan dari proyek tersebut?

Diketahui : Kecepatan angin rata-rata: 6 m/s
Panjang baling-baling: 6 meter
Jumlah baling-baling: 3

Ditanyakan : Berapa daya listrik yang dihasilkan?

Jawab

Pertama, kita mencari luas sapuan angin pada permukaan baling-baling.

Untuk turbin angin horizontal, ini luas lingkaran yang dilalui oleh bilah $A = \pi r^2$, dimana r ialah panjang radius bilah.

$$A = \pi \cdot (6)^2 \approx 113.1 \text{ m}^2$$

Kedua, kita menghitung daya listrik dengan formula.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 113,1 \cdot (6)^3 \cdot 0,35$$

Dengan kecepatan angin rata-rata 6 m/s, panjang baling-baling 6 meter, dan menggunakan 3 baling-baling dengan koefisien daya sekitar 0,35 sumbu HAWT, daya listrik yang dapat dihasilkan oleh turbin angin tersebut ialah sekitar 5,237 watt atau 5,24 kW.

Aktivitas 3.1 Konsep Energi Angin

Aktivitas Individu dan Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan berlatih secara mandiri dan gotong royong dalam memahami konsep energi angin pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Sampaikan pendapatmu mengenai cara kerja PLTB yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini, kemudian presentasikan di depan kelas dan jawab pertanyaan dari teman-temanmu.



2. Berdiskusilah dengan temanmu tentang bagaimana baling-baling PLTB dapat berputar. Presentasikan hasil diskusi tersebut dan jawab pertanyaan dari teman-temanmu.

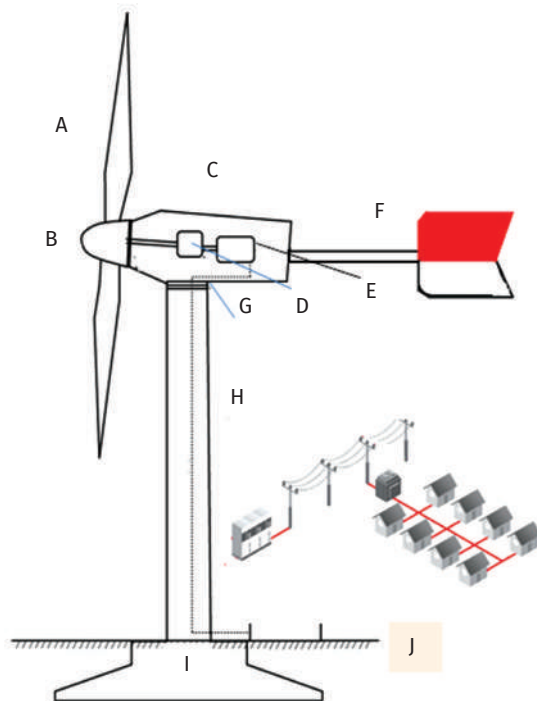
B. Komponen PLTB

PLTB memiliki kapasitas *output* yang bervariasi, bergantung pada desain dan tujuan penggunaannya. Secara umum, skala PLTB terdiri atas 4 bagian, yaitu skala mikro, kecil, menengah, dan besar. PLTB Mikro memiliki kapasitas 100 watt hingga 1 kilowatt (kW), skala kecil memiliki kapasitas 1 kW hingga 10 kW, skala menengah memiliki kapasitas listrik antara 10 kW hingga 50 kW, dan skala besar dengan kapasitas di atas 50 kW. Setiap kapasitas pembangkit listrik memiliki spesifikasi dan penggunaan yang berbeda-beda. Makin besar kapasitas, makin banyak dan kompleks peralatannya.

Turbin angin juga dibedakan berdasarkan sumbu rotasinya: sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Sumbu horizontal (HAWT) yang umum digunakan dan memiliki efisiensi tinggi pada angin stabil. Sumbu vertikal (VAWT) yang lebih fleksibel untuk berbagai arah angin dan cocok untuk wilayah perkotaan atau lahan terbatas. Kedua jenis ini memberikan solusi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan energi dan kondisi geografis.

1. Komponen PLTB Sumbu Horizontal

Secara umum, bagian dari PLTB sumbu horizontal tergambar pada bagan berikut ini.



- A = Baling-baling (*blade*) menggunakan desain *airfoil*, bagian rotor.
- B = *Hub* penghubung, konektor baling-baling yang berjumlah 3 buah.
- C = Rumah generator sistem PLTB, juga disebut *nacelle*.
- D = *Drive train* yang berupa *gearbox* dan *shaft*.
- E = Generator *low rpm*, generator magnet permanen yang berputar rendah.
- F = Pengarah mata angin, mengarahkan baling-baling selalu menghadap pada arah angin terkuat.
- G = *Yaw sistem*, sistem *bearing* yang dapat berputar 360 derajat.
- H = Penyangga (*tower*), di dalamnya terdapat kabel penghantar listrik dari generator.
- I = Fondasi yang kuat untuk menahan sistem PLTB.
- J = Sistem pengisian, penyimpanan, *controlling*, dan distribusi jaringan listrik menuju pelanggan.

Gambar 3.21 Posisi Peralatan PLTB Sumbu Horizontal

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

PLTB skala mikro, kecil, menengah, dan besar, secara umum, memiliki komponen utama yang sama. Perbedaannya pada komponen pendukung untuk memastikan sistem bekerja dengan baik dan efisien. Komponen utama PLTB ialah baling-baling dengan sistem *airfoil*, *hub*, *gearbox*, generator, rumah sistem, pengarah angin, penyangga, dan sistem kelistrikan.

Pembangkit skala menengah dan besar memiliki komponen tambahan yang berbeda karena mempertimbangkan keamanan dan efisiensi kinerja, di antaranya ialah *control pitch* dan *yaw* menggunakan sistem otomatis komputer. Sebagai contoh, pada saat sistem pembangkit dalam keadaan darurat atau tidak dioperasikan, ketika sistem *pitch* diaktifkan, sudut *airfoil* pada baling-baling dapat diatur tegak lurus dengan arah mata angin sehingga kipas tidak memiliki daya angkat dibantu sistem pengereman, baling-baling berhenti. Pada pembangkit skala kecil, *control pitch* dan *yaw* belum diperlukan karena mempertimbangkan kebutuhan dan pembiayaan.

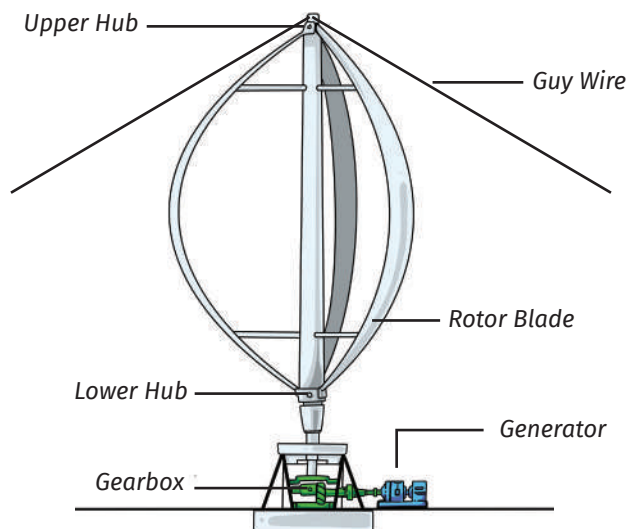
Tabel 3.2 Daftar Kebutuhan Komponen PLTB Sumbu Horizontal

Nama Komponen	PLTB Mikro	PLTB Kecil	PLTB Menengah
Turbin	✓	✓	✓
<i>Hub</i>	✓	✓	✓
Generator	✓	✓	✓
Rumah Sistem		✓	✓
Menara	✓	✓	✓
Sistem Kendali			
1. Kontrol <i>Pit</i>	✓	✓	✓
2. Kontrol <i>Yaw</i>	✓	✓	✓
Inverter	✓	✓	
Sistem Pengaman Elektrik	✓	✓	✓
Sistem Pengaman Mekanik			
1. <i>Aerodynamic Brakes</i>			✓
2. <i>Mechanical Breakes</i>	✓	✓	✓
Sistem Pengaman Cuaca			
1. <i>Lightning Protection</i>		✓	✓
2. <i>Weather Monitory System</i>			✓

Nama Komponen	PLTB Mikro	PLTB Kecil	PLTB Menengah
Sistem Pengaman Operasional			
1. SCADA			✓
2. <i>Redundancy Safety Systems</i>			✓
Sistem Pengaman Personel			
1. <i>Access Safety Systems</i>	✓	✓	✓
2. K3	✓	✓	✓
3. SOP	✓	✓	✓
Monitoring & Diagnostik			
1. IoT		✓	✓
2. Sensor			✓
Fondasi	✓	✓	✓

2. Komponen PLTB Sumbu Vertikal

Komponen utama pada model sumbu horizontal dan vertikal memiliki prinsip kerja yang sama, tetapi berbeda pada bentuk dan spesifikasinya. Komponen utama PLTB sumbu vertikal ialah baling-baling dengan model *airfoil* yang berbeda, dengan desain bilah Savonius; Darrieus, bilah berbentuk H, dan bilah berbentuk heliks. Perhatikan gambar berikut ini.



- Upper hub* : Penghubung baling-baling bagian atas
- Guy Wire* : Tali penguat sistem PLTB
- Rotor Blade* : Baling-baling bilah kipas yang berputar
- Lower Hub* : Bagian penghubung baling-baling bagian bawah
- Gearbox* : Penstabil gerak putar
- Generator* : Mengubah mekanik menjadi listrik.

Gambar 3.22 Posisi Komponen PLTB Sumbu Vertikal

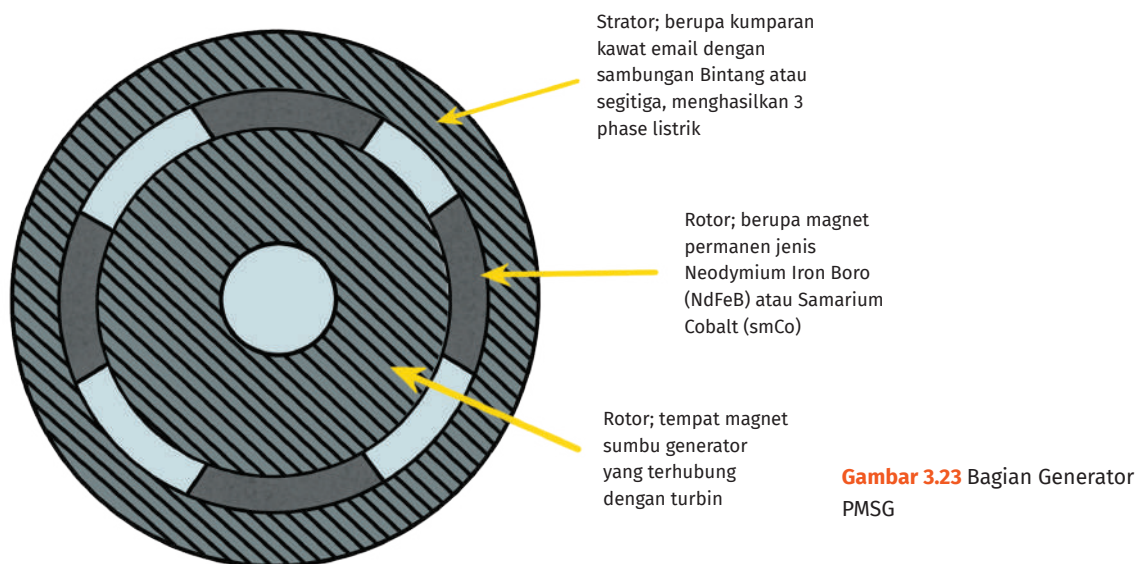
3. Generator Pembangkit Energi Listrik

Fungsi utama generator adalah mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Dalam konteks pembangkit listrik tenaga angin (PLTB), generator bekerja dengan cara mengonversi energi kinetik dari putaran turbin angin, yang digerakkan oleh angin, menjadi energi listrik. Proses ini melibatkan medan magnet yang bergerak melewati gulungan kawat dalam generator, yang menyebabkan elektron bergerak dan menciptakan arus listrik. Pada setiap jenis generator memiliki karakter sebagaimana terangkum pada Table 3.4.

Tabel 3.3 Karakteristik Generator PLTB

Jenis Generator	Kecepatan Variabel	Efisiensi	Biaya	Perawatan
Permanent Magnet Synchronous (PMSG)	Ya	Ya	Tinggi	Rendah
Doubly-Fed Induction	Ya	Ya	Menengah	menengah
Synchronous	Tidak	Ya	Menengah	Menengah
Asynchronous (Induction)	Ya	Tidak	Rendah	Rendah
Direct Drive	ya	ya	menengah	rendah

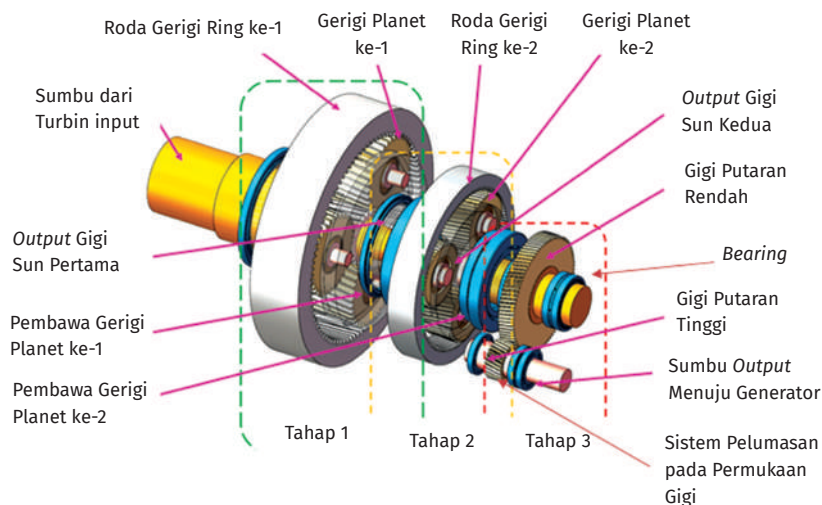
Bagian utama generator terdiri atas beberapa komponen kunci yang bekerja sama untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik seperti pada Gambar 3.22.



- Rotor bagian bergerak dari generator yang diputar oleh sumber energi mekanis (misalnya, turbin angin pada PLTB).
- Stator bagian diam dari generator yang terdiri atas kumpulan gulungan kawat (kumparan). Ketika rotor berputar, medan magnet dari rotor melewati kumparan stator, menghasilkan arus listrik.
- Kumparan (*winding*) terletak di stator dan digunakan untuk menangkap perubahan medan magnet dari rotor, yang kemudian menyebabkan arus listrik mengalir. Kumparan ini sering disebut *armature winding*.
- Rangka (*frame*), bagian ini melindungi komponen internal generator dan memberikan struktur fisik. *Frame* biasanya terbuat dari bahan logam yang kuat dan tahan terhadap lingkungan luar.
- Bearing* (bantalan mendukung rotor agar dapat berputar dengan halus dan mengurangi gesekan antara rotor dan stator).

4. Gearbox Penstabil Gerak Putar

Gearbox ialah salah satu komponen penting dalam PLTB, terutama pada turbin angin yang tidak menggunakan sistem *direct drive*. Fungsi utama *gearbox* ialah untuk meningkatkan kecepatan putaran dari rotor turbin ke generator. Prinsip kerja *gearbox* di antaranya untuk meningkatkan kecepatan putaran. Rotor turbin angin biasanya berputar pada kecepatan yang relatif rendah (misalnya, 20-60 rpm). *Gearbox* meningkatkan kecepatan putaran ini ke tingkat yang lebih tinggi yang dibutuhkan oleh generator (misalnya, 1.000-1.500 rpm) untuk menghasilkan listrik 220 volt 50 Hz.

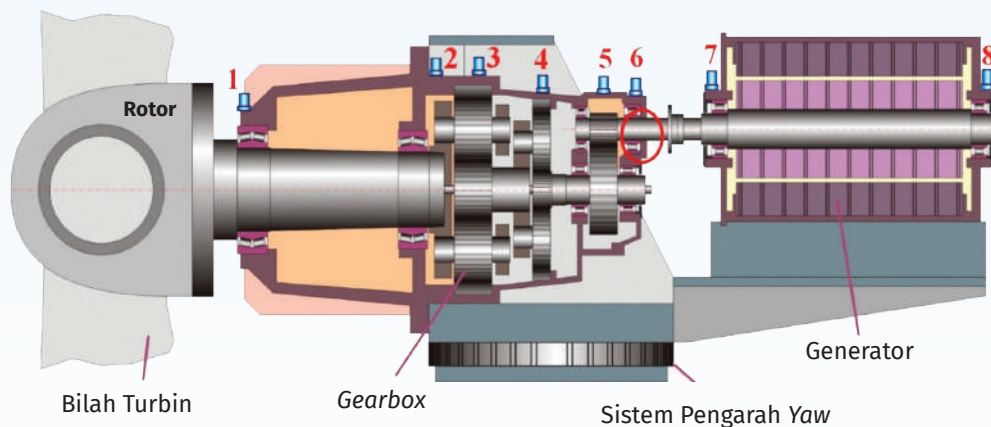


Gambar 3.24 Bagian Dalam *Gearbox*
 Sumber: Cui et al (2024)

Bagian dari *gearbox* di antaranya seperti berikut.

1. *Gears* (roda gigi) *gearbox* terdiri atas beberapa set roda gigi, termasuk roda gigi sun dan planet. Jenis dan konfigurasi roda gigi bergantung pada desain spesifik *gearbox*.
2. *Bearing* digunakan untuk mendukung roda gigi dan poros yang berputar di dalam *gearbox*. *Bearing* harus kuat dan tahan lama untuk menangani beban yang besar dan putaran tinggi.
3. *Housing* ialah penutup (*casing*) yang melindungi komponen internal *gearbox* dari debu, kotoran, dan elemen lingkungan lainnya. *Housing* juga membantu meredam getaran dan suara yang dihasilkan oleh *gearbox*.
4. *Lubrication system* (sistem pelumasan) untuk mengurangi gesekan dan keausan pada komponen bergerak di dalam *gearbox*. Ini melibatkan penggunaan minyak pelumas atau *grease* yang terus-menerus disirkulasikan di dalam *gearbox*.
5. *Transduser* perangkat yang mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk energi lainnya. Transduser banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pengukuran, kontrol, dan komunikasi.

Posisi *gearbox* pada PLTB dapat kita lihat pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 Posisi *Gearbox* pada PLTB Sumbu Horizontal

Sumber: Teng et al. (2017)

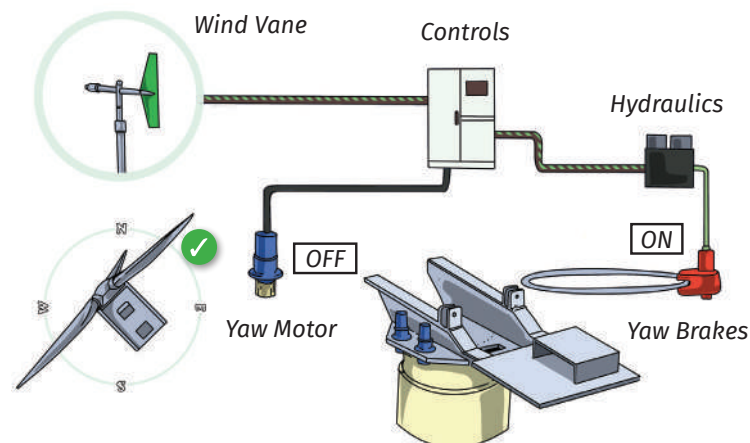
Rangkaian penggerak turbin angin modern, seperti yang terlihat pada Gambar 3.25, terdiri atas rotor, *gearbox*, dan generator. Rotor, yang terhubung dengan tiga bilah baling-baling, mengonversi energi angin menjadi energi mekanis berkecepatan rendah, yang kemudian ditingkatkan kecepatannya oleh *gearbox*. Rangkaian penggerak ini mencakup beberapa komponen penting seperti roda gigi, bantalan, dan poros. Untuk memantau kondisi

kesehatan sistem, (angka 1 – 8), terdapat delapan sensor transduser akselerasi yang dipasang di permukaan rangkaian penggerak, dengan setiap transduser memantau bagian yang berdekatan sehingga memudahkan dalam perbaikan.

5. Sistem Pengaman Cuaca

Sistem pengaman cuaca pada PLTB sangat penting untuk melindungi turbin angin dan peralatan terkait dari kerusakan akibat kondisi cuaca ekstrem. Berikut ini beberapa komponen dan strategi yang biasanya digunakan dalam sistem pengaman cuaca pada PLTB.

- Wind Vane* terintegrasi dengan anemometer; berfungsi untuk mengukur kecepatan dan arah angin, data kecepatan dan arah angin. Peralatan ini juga sebagai sensor peringatan dini jika angin melebihi batas aman.
- Controls*; sebuah sistem pengendali yang terdiri dari Peralatan elektronik terprogram, atau mikrokonroler yang terhubung dengan beberapa sensor. Misalnya apabila sensor angin membaca kecepatan angin antara 25-30 m/s maka mikrokonroler membacanya sebagai angin yang berbahaya dan sistem turbin digerakkan supaya berhenti, tidak menghadap arah angin *cut-out wind speed*, kemudian mengirim perintah *Yaw Motor* bergerak, mengubah sudut aerodinamis atau tidak menghadap angin.
- Mikrokontroler juga mengirimkan perintah *on* pada *Yaw Brakes* untuk melakukan pengereman dengan sistem hidraulik pada rumah turbin sehingga rumah turbin tidak menghadap arah angin.



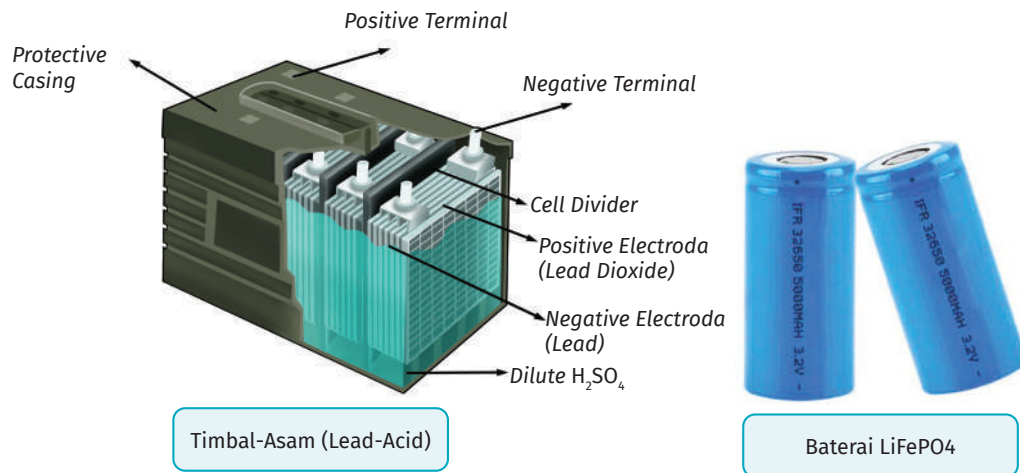
Gambar 3.26 Diagram Control System Pengaman Cuaca

6. Sistem Penyimpanan

PLTB skala kecil memerlukan sistem penyimpanan energi listrik (*power bank*). Baterai berguna untuk menyimpan listrik yang dihasilkan untuk digunakan di saat angin tidak bertiup. Beberapa macam jenis baterai di antaranya seperti berikut.

- Timbal-Asam (*Lead-Acid*) *Flooded Lead-Acid* yang memiliki kelebihan murah, handal, dan beredar sampai pelosok desa, juga disebut dengan *accu*.
- Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄),
- Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC), dan
- Vanadium Redox Flow Battery (VRFB),
- Zinc-Bromine Flow Battery

Pemilihan jenis baterai berkaitan dengan rencana anggaran biaya dan kemanfaatannya.



Gambar 3.27 Accu dan Baterai Penyimpanan Energi Listrik

7. Inverter

Inverter berfungsi mengubah listrik arus searah (*direct current/DC*) dari baterai penyimpanan, menjadi listrik arus bolak-balik (*alternating current/AC*). Berdasarkan fungsinya, inverter memiliki beberapa jenis.

a. Sinus Murni (*Pure Sine Wave Inverter*)

Peralatan ini menghasilkan gelombang sinus yang murni dan halus seperti yang disuplai oleh jaringan listrik umum. Ideal untuk perangkat elektronik sensitif seperti komputer, peralatan medis, dan sistem audio-video.



Gambar 3.28 Beberapa Model Inverter
Sumber: SoyanPower (2024)

b. Inverter Gelombang Sinus Termodifikasi (*Modified Sine Wave Inverter*)

Peralatan ini menghasilkan gelombang yang mendekati sinus, tetapi tidak sepenuhnya halus. Cocok untuk sebagian besar peralatan elektronik, tetapi mungkin kurang optimal untuk perangkat sensitif.

c. Inverter Gelombang Kotak (*Square Wave Inverter*)

Peralatan ini menghasilkan gelombang kotak sederhana. Biasanya, inverter ini digunakan untuk beban resistif sederhana seperti lampu pijar dan alat pemanas. Tidak direkomendasikan untuk perangkat elektronik sensitif.

Aktivitas 3.2 Komponen PLTB

Aktivitas Kelompok

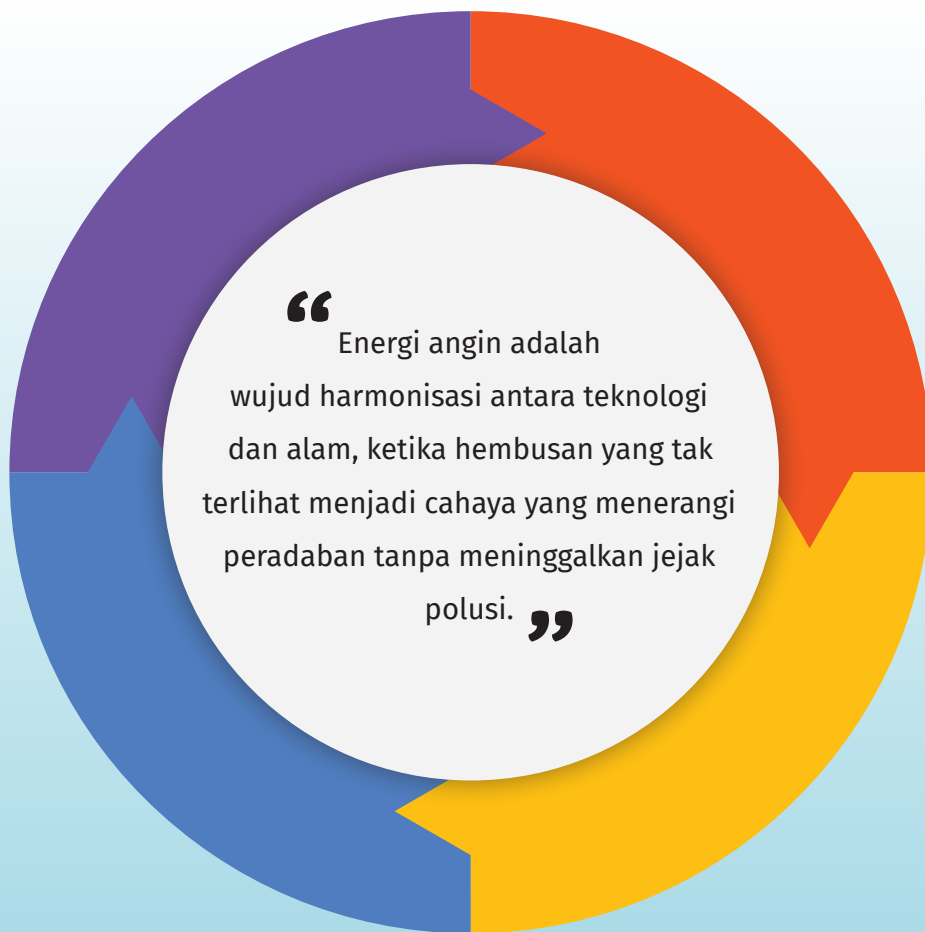
Tujuan:

Melalui kegiatan ini, kamu akan mengasah kemampuan bernalar kritis dan gotong royong dalam memahami komponen PLTB skala kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok 4-5 orang.
2. Eksplorasi nama komponen PLTB skala kecil.
3. Inventarisir peralatan, kemudian jelaskan fungsi dan kegunaannya serta perkembangan komponen teknologi terkini.

4. Buatlah sebuah rangkuman perkembangan teknologi penyimpanan listrik dari masa ke masa. Presentasikan di kelas.
5. Setiap komponen peralatan pembangkit listrik tenaga bayu dapat kita beli di berbagai penyedia berbasis *online* dan *offline*. Buat sebuah tabel daftar nama peralatan, harganya, dan tempat beli. Presentasikan di depan kelas, dan jawab pertanyaan temanmu bila ada
6. Buatlah sebuah resume berkaitan dengan cara kerja komponen komponen PLTB, dalam bentuk tulisan di buku tulis, di *googleside*, atau media sosial. Lakukan eksplorasi lebih jauh dengan mencari dari beberapa sumber.



C. Sistem dan Keselamatan Kerja

Sistem dan keselamatan kerja berkaitan dengan sistem pengaman personel pada sistem PLTB saat beroperasi. Sistem itu di antaranya ialah *Access Safety Systems*, Kesehatan Keselamatan Kerja, dan pemahaman Standar Operasional Prosedur bekerja pada ketinggian.



Gambar 3.29 Peralatan Sistem Pengaman Personel

Sumber: Petzl (2024)

Sistem Pengaman Personel (*Access Safety Systems*) merupakan jalan yang aman untuk petugas dalam pemasangan, perawatan, dan perbaikan PLTB. Komponen ini terhubung dengan peralatan lain, misalnya penyangga (*tower*). Sistem Pengaman Personel bertujuan memberikan kenyamanan dan keamanan personel saat melakukan perawatan dan perbaikan. Pendukung Sistem Pengamanan Personel yang lain ialah pengetahuan standar operasional prosedur bekerja pada ketinggian yang tergambar pada QR Code di samping.



[https://buku.kemdikbud.
go.id/s/Bekerja_Pada_
Ketinggian](https://buku.kemdikbud.go.id/s/Bekerja_Pada_Ketinggian)

Sebelum melaksanakan pemasangan dan pengoperasian, juga ada kegiatan wajib yang perlu kita lakukan, yaitu membaca dan memahami *manual book PLTB*. *Manual book PLTB* menjelaskan tentang (1) instalasi, aspek operasi, pemeliharaan, dan keselamatan dapat terlaksana dengan benar. (2) Prosedur Operasi Standar (SOP) Pemasangan dan Perawatan PLTB. (3) Tersedia proses *Lockout-Tagout (LOTO)*, yaitu prosedur untuk memastikan bahwa peralatan yang sedang diperbaiki tidak dapat dinyalakan untuk melindungi pekerja dari risiko cedera yang disebabkan oleh pelepasan energi yang tidak terduga, selama pemeliharaan atau perbaikan peralatan PLTB.

Aktivitas 3.3 K3

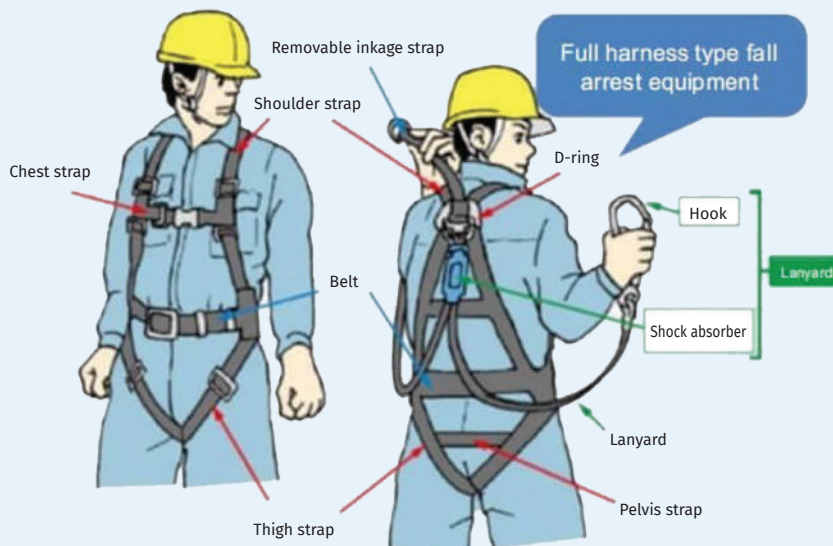
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui kegiatan ini, kamu akan mampu bernalar kritis dalam memahami kesehatan dan keselamatan kerja di ketinggian pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok 4-5 orang. Kemudian, kerjakan tugas berikut.
2. Carilah tanda yang mengandung informasi *notice* (peringatan) dalam pekerjaan konstruksi, kelistrikan, dan bekerja pada ketinggian. Diskusikan maksud dan tujuan dari peringatan tersebut. Presentasikan hasilnya di kelas.
3. Carilah sebuah *manual book PLTB*. Pahami maksud dan tujuannya. Kemudian, diskusikan dalam kelompokmu, dan presentasikan hasilnya di depan kelas.
4. Carilah informasi lebih lanjut berkaitan dengan nama, fungsi, dan harga dari peralatan yang dipakai oleh petugas yang bekerja di ketinggian seperti pada gambar berikut.

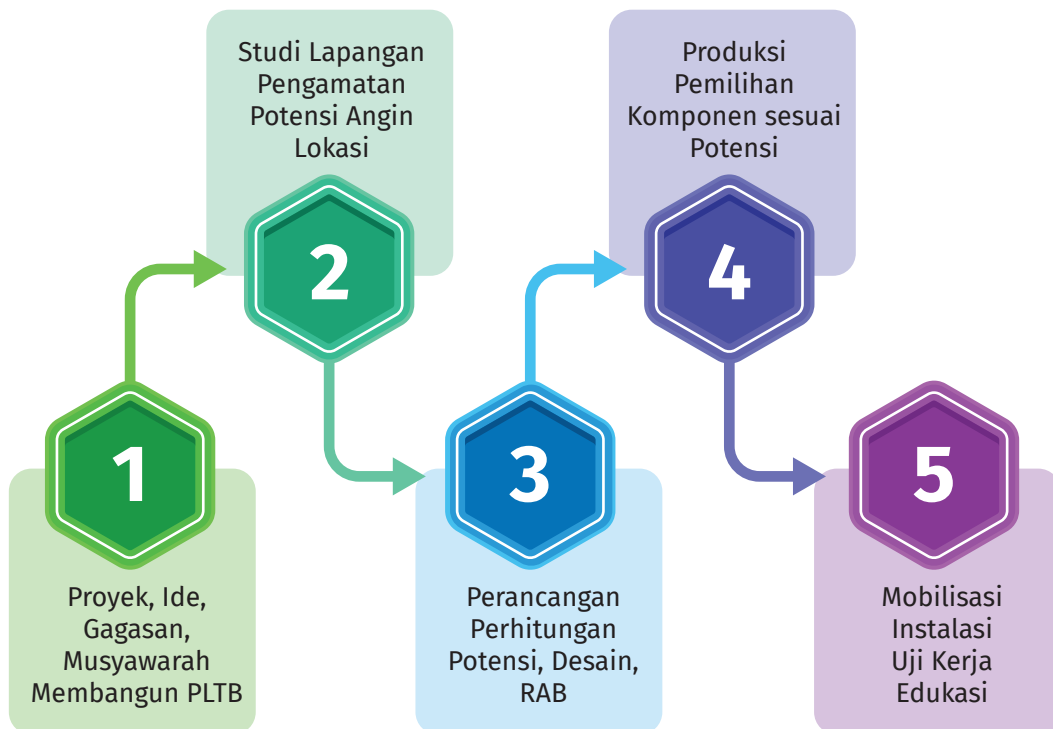


D. Perancangan PLTB Skala Kecil

Proses perancangan PLTB melalui beberapa tahap dan pertimbangan teknis yang perlu dilaksanakan secara berurutan. Diawali dengan studi lapangan untuk memilih titik lokasi, mengukur kecepatan angin, posisi topografi dan geografis untuk memastikan tidak ada hambatan yang signifikan pada aliran embusan angin. Faktor lain yang tidak kalah penting ialah aksesibilitas untuk memastikan lokasi dapat dijangkau untuk transportasi komponen dan perawatan saat PLTB sudah beroperasi.

Tabel 3.4 Contoh Hasil Studi Lapangan

No	Komponen Studi Lapangan	Data	Ya/ Tidak
1	Kecepatan Angin	5 m/s	Ya
2	Posisi Topografi	Elevasi 300 mdpl	Ya
3	Arah angin	Selatan 4 m/s, Utara 5 m/s, Timur 5 m/s, Barat 5/ms	Ya
4	Transportasi	Jalan Provinsi Lebar 7 meter	ya



Gambar 3.30 Langkah Membangun PLTB

Setelah kunjungan lapangan dilakukan dan hasilnya memiliki kriteria yang sesuai, selanjutnya, kita melakukan analisis potensi dengan menggunakan formula atau rumus PLTB. Hasil perhitungan matematis ini kemudian dibandingkan dengan kebutuhan listrik yang diperlukan. Jika hasil analisis antara potensi dan kebutuhan listrik sesuai, PLTB dapat dilanjutkan. Potensi angin rata-rata yang sudah didapatkan ialah hasil dari pengamatan dengan waktu minimal 3 bulan, kemudian sandingkan dengan data pendukung dari badan pengamatan cuaca setempat, misalnya BMKG.

Hasil studi lapangan yang memuat data kecepatan angin pada Tabel 3.4. Kemudian, kita masukkan ke dalam formula penghitungan konversi energi *Betz Limit* sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

P = daya yang dihasilkan (dalam watt, W).

ρ = densitas udara (dalam kilogram per meter kubik, kg/m^3), biasanya sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$ pada permukaan laut dan suhu $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

A = luas area sapuan bilah (dalam meter persegi, m^2). Untuk turbin angin horizontal, ini merupakan luas lingkaran yang dilalui oleh bilah, yaitu $A = \pi r^2$, di mana r ialah panjang radius bilah.

v^3 = kecepatan angin (dalam meter per detik, m/s) menggunakan skala Boaufort atau anemometer.

C_p = koefisien daya turbin angin, yang merupakan efisiensi turbin dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik. Nilainya bervariasi bergantung pada desain turbin, tetapi maksimum teoretisnya (dikenal sebagai batas Betz) ialah sekitar 0,59 atau 59%.

Studi Kasus

Kita akan membangun turbin dengan data seperti berikut:

- panjang bilah 4 meter (radius $r = 4$ meter)
- kecepatan angin 5 m/s
- koefisien daya turbin angin kita memilih sebesar 0,4
- kepadatan udara $1,225 \text{ kg/m}^3$

Berapakah perkiraan hasil listrik yang akan dibangkitkan?

Jawab:

1. Hitung luas area sapuan bilah

$$A = \pi r^2 \quad A = 3,14 \times 4^2 = 50,27 \text{ m}^2$$

2. Gunakan rumus daya:

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \text{ kg/m}^3 \times 50,27 \text{ m}^2 \times (5^3) \times 0,4 \\ = 1542,83 \text{ watt, diambil angka aman } 1,5 \text{ kW.}$$

Hasil perhitungan 1.500 watt termasuk pada kapasitas PLTB Skala Kecil. Selanjutnya, buat daftar kebutuhan komponen utama dan pendukung, dengan spesifikasi peralatan yang tepat listrik sehingga energi yang dihasilkan akan mendekati harapan. Hasil perhitungan ini menjadi dasar apakah kebutuhan listrik yang dibangkitkan memenuhi kebutuhan atau belum. Jika dirasa sudah memenuhi, lanjutkan pada tahap penyusunan rencana anggaran biaya.

Rencana anggaran biaya merupakan gambaran kebutuhan peralatan dan kelengkapan lain secara utuh sebuah PLTB. Rencana itu dari titik nol sampai dapat dioperasikan, ditambah pajak sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Untuk mengetahui contoh rencana anggaran biaya pembangunan PLTB, silakan pindai QR Code di samping ini.

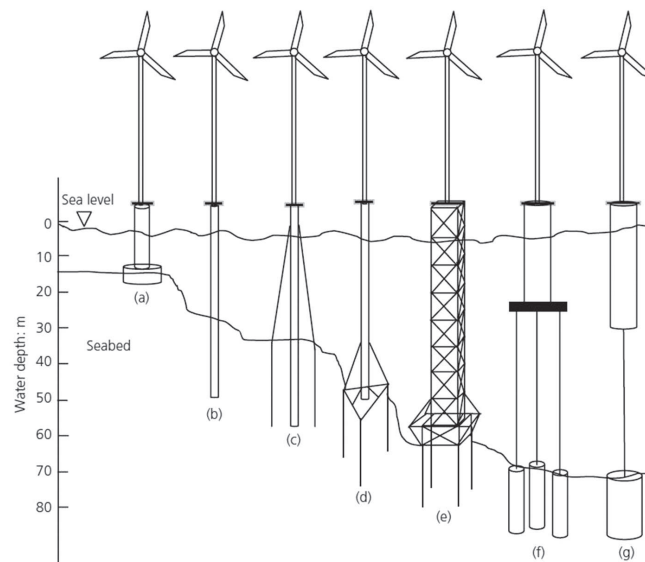


1. Perancangan Bangunan Sipil

Kegiatan perancangan bangunan sipil pada pembangunan PLTB di antaranya ialah mempersiapkan desain fondasi dan penyangga (*tower*) dengan mempertimbangkan dukungan keamanan personel. Sebelum kegiatan pembangunan, kita perlu melakukan pengujian tanah, dengan peralatan geoteknik. Dengan demikian, terangkum data yang lengkap berkaitan dengan jenis tanah, kekuatan geser, kepadatan, dan tingkat air tanah.

a. Merancang Fondasi

Fondasi PLTB, secara umum, dilakukan di darat (*onshore*) dan di lepas pantai (*offshore wind farm*). Struktur fondasi untuk ladang angin lepas pantai, harus mampu menahan gaya beban aerodinamis saat turbin bekerja serta harus mampu menahan gelombang dan lingkungan laut yang keras serta dampak jangka panjang dari pembebanan gelombang besar. Berbagai konsep struktur atau fondasi yang digunakan ialah adaptasi dari industri minyak dan gas lepas pantai.



Gambar 3.31 Model Fondasi Bawah Laut (*Offshore*)

Sumber: Arshad & O'Kelly (2013)

Pembangunan fondasi di daratan (*onshore*) dirancang untuk mampu menahan pembebanan aerodinamis yang berasal dari interaksi rotor dan bagian menara yang di dalamnya terjadi medan udara turbulen. Kemudian, pembangunan fondasi mempertimbangkan kondisi tanah dan akses jalan untuk membawa material ke lokasi.

Contoh Soal:

Kita akan membangun Proyek PLTB dengan kapasitas 1.500 watt, di sebuah desa dengan karakter tanah liat, berpasir di tepi pantai, dengan perhitungan dan analisis hasil studi lapangan. Kecepatan angin 5 m/s. Berapa ukuran fondasi yang akan kita bangun?

Jawab:

Kita akan menghitung beban keseluruhan dari komponen turbin dan penyangga, dengan cara memperkirakan berapa kg.

Misalnya,

berat turbin = 1.000 N

berat penyangga = 2.000 N

Langkah pertama, menghitung berat secara keseluruhan

W_t = berat total

$$W_t = W_{\text{turbin}} + W_{\text{penyangga}}$$

$$= 1.000 + 2.000 \text{ (newton)}$$

$$= 3.000 \text{ N di konversi menjadi kN}$$

$$= 3.000 : 1000$$

$$= 3,0 \text{ kN}$$

American Concrete Institute (ACI) menyediakan standar dan pedoman untuk berbagai aspek desain dan konstruksi beton. Dalam berbagai dokumen dan kode praktik, berat jenis beton sering diambil sebagai 24 kN/m³ untuk tujuan desain dan analisis struktural. Setelah kita mengetahui beban total dari turbin dan penyangga, selanjutnya, kita mencari volume beton (V_b).

$$V_b = \frac{W_t}{24 \text{ kN/m}^3}$$

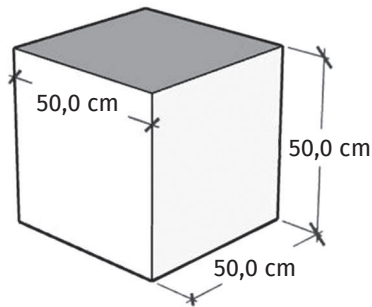
$$V_b = \frac{3,0}{24} = 0,125 \text{ m}^3$$

Kemudian, kita mencari ukuran sisi fondasi yang perlu kita bangun sehingga beban PLTB saat ditambah beban angin dapat bekerja dengan aman.

Formula untuk ukuran sisi fondasi ialah $= \sqrt[3]{V_b}$

$$= \sqrt[3]{0,125 \text{ m}^3}$$

$$= 0,5 \text{ m atau } 50 \text{ cm.}$$

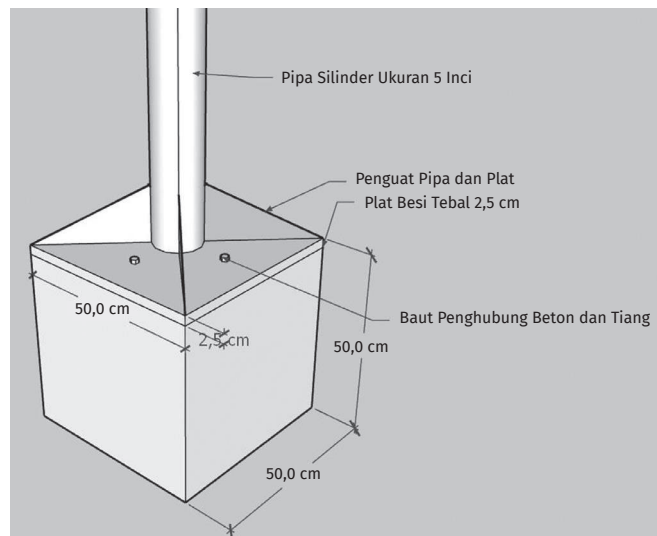


Gambar 3.32 Rancangan Fondasi PLTB 1.500 Watt

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Jadi, ukuran fondasi dari PLTB 1.500 watt dengan panjang baling-baling 4 meter ialah fondasi dengan bentuk kubus dengan ukuran panjang \times lebar \times tinggi ialah 50 cm. Untuk memperkuat dan memperkirakan beban lebih, kita dapat menambah 2 atau 3 kali lipat. Namun, sebagai titik minimal, harus disediakan bahan untuk membangun fondasi dengan ukuran 50 cm. Kita dapat membayangkan sebuah bangunan fondasi bertulang dengan panjang 50 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 50 cm.

Ada beberapa model tiang penyangga PLTB, di antaranya model tiang silinder baja yang terbuat dari pipa baja. Ukuran pipa baja pada proyek ini berdiameter 5 inci, panjang pipa 6 meter, berat 2.000 N, dikonversi menjadi 204,08 kg. Pada bagian fondasi, sebelum melakukan pengecoran, dipasang baut pengait yang berfungsi mengoneksikan penyangga dengan fondasi seperti pada Gambar 3.32. Baut pengait ini terhubung dengan tulangan baja dengan model penguat baut yang berjumlah 4 buah ditempatkan pada keempat sudut permukaan fondasi.

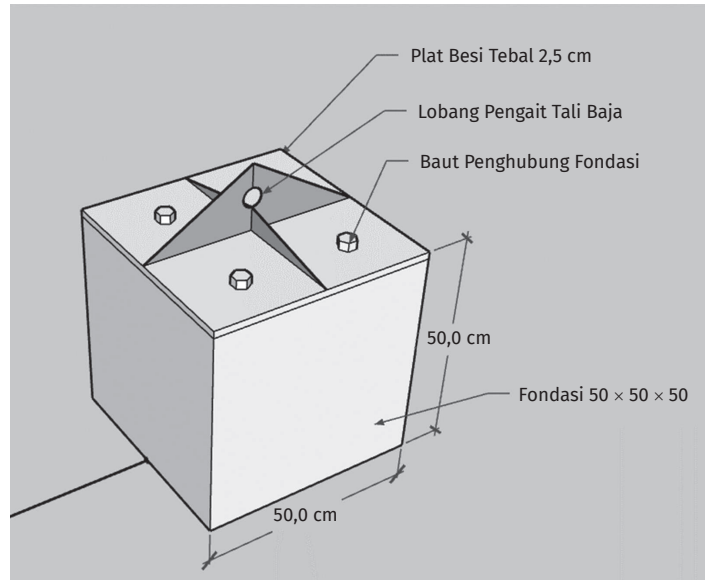


Gambar 3.33 Pembautan Penyangga dan Permukaan Fondasi

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Jika menggunakan penyangga model tiang silinder baja, penyangga wajib ditopang dengan tali baja penguat (*guy wire*) terkoneksi dengan fondasi jangkar seperti pada Gambar 3.33, yang memiliki ukuran sisi sama dengan fondasi utama. Fondasi jangkar ditempatkan

mengelilingi fondasi utama dengan mempertimbangkan arah mata angin berembus. Ukuran tali baja (*guy wire*) dapat dipertimbangkan dengan melihat beban seberat 3,0 kN. Untuk lebih aman, pilih tali baja yang mampu menahan beban 6 kN.



Gambar 3.34 Fondasi Jangkar dengan Tempat Pengait Tali Baja
 Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

b. Tali Penguat

Pertama kita menghitung kebutuhan panjang tali baja penguat dengan pilihan sudut 45 derajat. Pilihan sudut dapat kita sesuaikan dengan kondisi lahan di lapangan. Kemudian, tali baja penguat ini dihubungkan dengan fondasi jangkar dengan pengait di bagian atasnya. Ukuran fondasi jangkar sama dengan fondasi utama.

Pada proyek kita saat ini;

- Diketahui tinggi tiang penyangga model silinder ialah 6 meter.
- Ditanyakan:

berapakah panjang tali baja penguat (L) untuk sudut kemiringan 30 atau 45 derajat. berapa jarak antara fondasi utama dan fondasi jangkar?

Perhitungannya menggunakan rumus segitiga.

$$L = \frac{H}{\sin 45^\circ} = \frac{6 \text{ m}}{0,707} \approx 8,49 \text{ m}$$

Sekarang, sudah kita ketahui bahwa kebutuhan tali baja penguat untuk kemiringan 45 derajat ialah sepanjang 8,49 meter. Langkah selanjutnya ialah memilih ukuran tali baja yang mampu menahan 6 kN. Caranya dengan melihat Tabel 3.5 pada spesifikasi tali baja yang tersedia di pasaran.

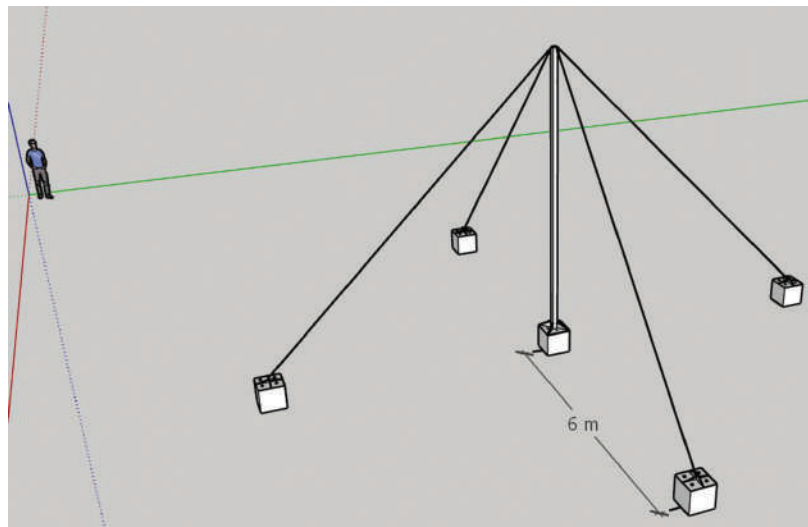
Tabel 3.5 Spesifikasi Tali Baja Penguat

Diameter Tali (mm)	Gaya Tarik Minimum (kN)	Berat per meter (kg/m)
6	23.7	0.15
8	42.3	0.26
10	66.2	0.40
12	95.1	0.58

Kemudian, kita menghitung berapa jarak horizontal (JH) antara fondasi utama dan fondasi jangkar untuk sudut tali 45°,

$$JH = L \times \cos (45^\circ) = 8,49 \times 0,707 \approx 6 \text{ m}$$

Terjawab bahwa jarak horizontal antara fondasi utama dan fondasi jangkar ialah 6 meter. Fondasi jangkar berjumlah 4 buah, seperti pada Gambar 3.34, dengan penempatan pada empat penjuru arah mata angin. Dengan demikian, PLTB dapat bekerja dengan aman.

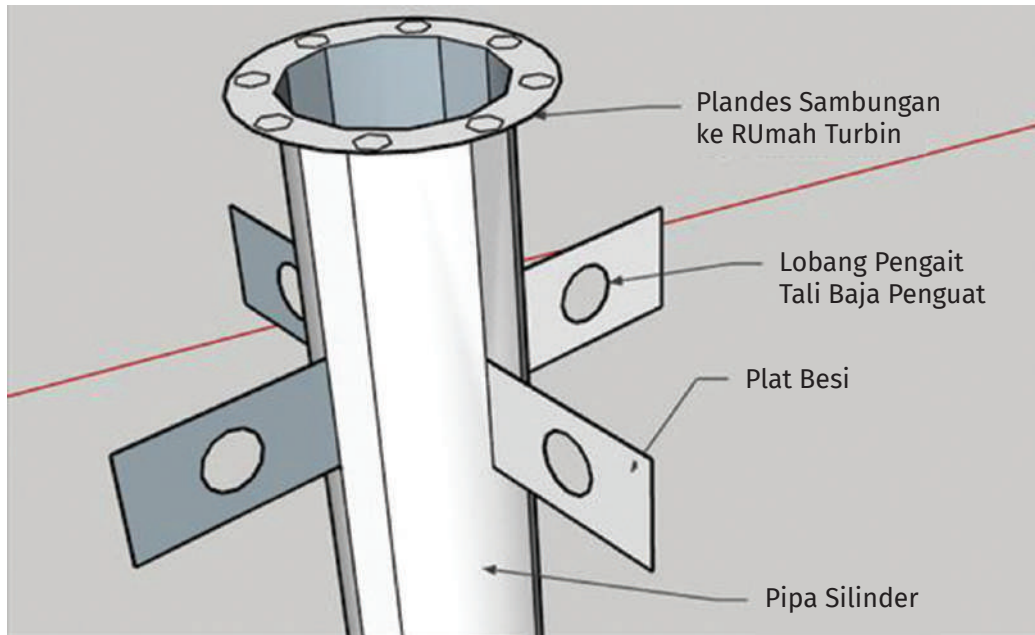


Gambar 3.35 Posisi Fondasi Utama dan Fondasi Jangkar

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

C. Penyangga

Penyangga PLTB di antaranya model silinder. Penyangga ini sederhana dan mudah dalam pemasangannya. PLTB skala kecil sampai besar dalam dunia kerja menggunakan model silinder dengan beberapa pengembangan model.



Gambar 3.36 Penyangga Dilengkapi Tempat Span Skrup

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada bagian atas tiang penyangga model silinder, kita perlu menyediakan tempat pengait kawat baja. Kawat ini berupa span skrup dengan kelengkapannya yang terhubung dengan fondasi jangkar.





Sumber: Amin Wahyono, kemdikbudristek (2024)

Pada saat penarikan kawat baja penguat, perlu dipertimbangkan penggunaan waterpas untuk menjaga posisi vertikal. Waterpas ditempatkan pada 4 sisi tiang saat melakukan pengencangan untuk presisi atau ketepatan pengencangan. Kita memutar span skrup ke kanan dan ke kiri sampai menemukan titik vertikal pada tiang penyangga model silinder.

Model tiang Truss pada Gambar 3.35 atau kerangka baja terdiri atas rangkaian batang-batang baja yang disusun dalam bentuk segitiga atau segi empat untuk membentuk struktur kerangka. Penyangga dengan ukuran tinggi 6 meter idealnya memiliki lebar kaki sepertiganya atau sekitar 2 meter.

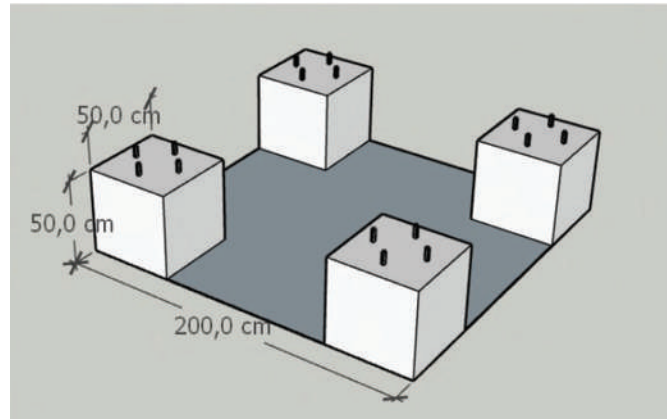
Penyangga model Truss memiliki kekuatan yang stabil dengan model sudut empat (4) kaki, dapat menyesuaikan kondisi di lapangan. Penyangga ini tidak memerlukan penguat tambahan sehingga lebih hemat lokasi.

Bahan penyangga model Truss yang ada di pasaran ialah besi model siku dengan berbagai ukuran seperti pada tabel berikut.

Tabel 3.6 Ukuran Bahan Penyangga Truss

Ukuran Besi Siku (mm)	Ketebalan (mm)	Panjang (m)	Berat per Batang (kg)
50 × 50	4		23.50
60 × 60	6		28.38
65 × 65	6		35.58
70 × 70	7		38.48
75 × 75	6		54.08
90 × 90	9		57.70
100 × 100	8		73.28

Besi siku yang dijual memiliki ukuran panjang standar 600 cm per batang. Kita dapat memotong sesuai kebutuhan dan model.



Gambar 3.37 Penyangga dan Fondasi Truss

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Aktivitas 3.4 Perancangan Bangunan Sipil

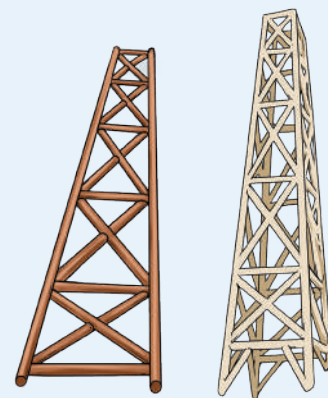
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui kegiatan ini, kamu akan mengasah kreativitas dan gotong royong dalam memahami perancangan bangunan sipil pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

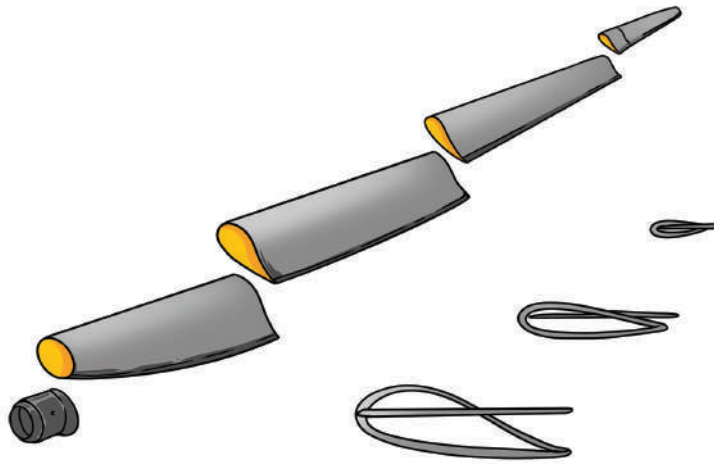
1. Bentuk kelompok 4-5 orang. Kemudian, kerjakan tugas berikut.
2. Hitunglah kapasitas yang akan dibangkitkan sebuah bilah turbin dengan ukuran diameter 8 meter dengan kecepatan angin 5 m/s. Tentukan berapa ukuran bangunan fondasi yang dibutuhkan.
3. Buatlah sebuah miniatur penyangga PLTB berbahan dari stik bambu, dengan model silinder baja atau Truss dengan cara berikut.
 - a. Gambar sebuah penyangga model Truss pada sebuah kertas ukuran F4.
 - b. Siapkan stik bambu, lem, dan pemotong stik.
 - c. Letakkan stik bambu yang sudah dipotong sesuai gambar di atas kertas.
 - d. Lakukan pemotongan, penyesuaian ukuran, dan pengeleman.
 - e. Lakukan uji beban dan getaran.



2. Perancangan Sistem Mekanik

Sistem mekanik PLTB ialah turbin terdiri atas bilah kipas, *hub*, *shaft*, rumah turbin, dan *gearbox*. Bilah turbin atau baling-baling berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi mekanik. *Hub* berfungsi untuk penghubung pada titik tengah baling-baling. Kemudian, ada poros *shaft* yang menghubungkan bagian turbin dan *gearbox* sebagai penstabil putaran. Rumah turbin memberikan perlindungan pada sistem.

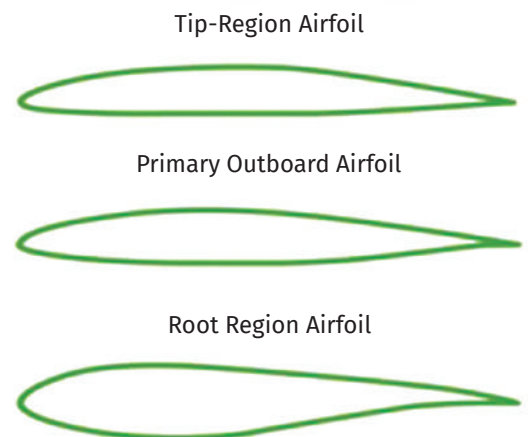
a. Perancangan Turbin



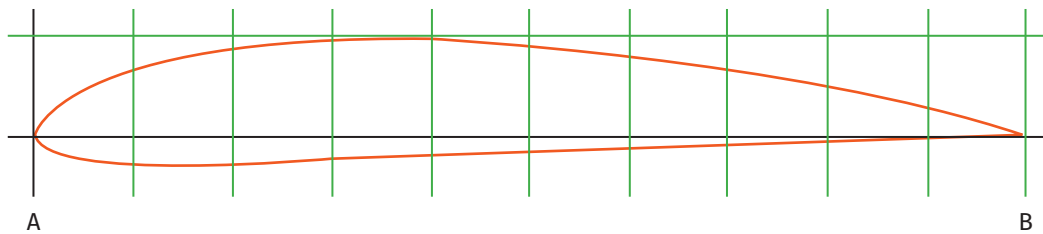
Gambar 3.38 Pembagian Posisi *Airfoil* pada Bilah Turbin

Pembagian posisi model *airfoil* seperti pada Gambar 3.37, proses pembuatan baling-baling PLTB dapat dikembangkan untuk mencari efisiensi turbin dalam menangkap energi angin. Para pengembang berlomba dan berinovasi untuk mendapatkan efisiensi kinerja semaksimal mungkin, dengan membagi dan memosisikan *airfoil* pada bentuk bilah kipas.

Perhatikan huruf A dan B pada model *airfoil* berikut. Bayangkan, seperti sebilah pedang yang panjangnya 5 meter. Bagian tajam diwakili dengan huruf B, sedangkan bagian punggung pedang diwakili dengan huruf A.



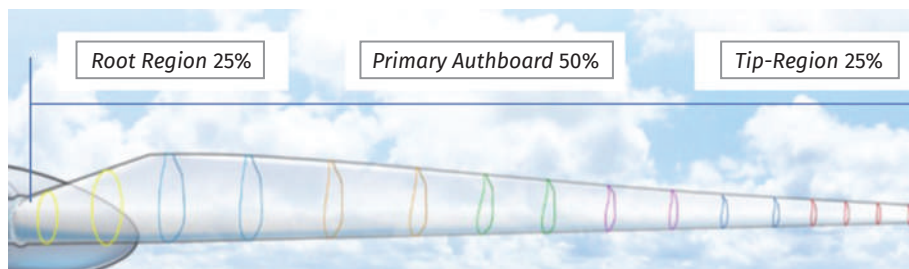
Gambar 3.39 Gambar Model *Airfoil*
Sumber: [Energy.gov/John Frenzl](https://www.energy.gov) (2023)



Gambar 3.40 Desain Turbin dengan Mode NACA

Sumber: Prasetyo Tris Doan (2018)

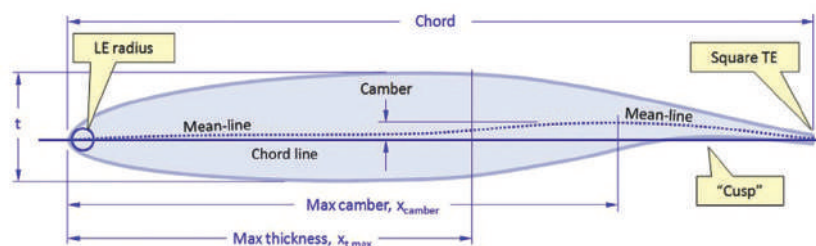
Bilah kipas dengan panjangnya 5 meter itu terdiri atas beberapa bagian model *airfoil* yang dapat kita modifikasi dan kembangkan. Misalnya, kita akan membagi model *root region* memiliki panjang 25%, *primary outboard* 50%, dan *tip-region* 25%. Selanjutnya, lebar baling-baling juga dapat dipilih sendiri. Artinya, kita dapat berkreasi dan mengembangkan sesuai dengan bahan yang tersedia untuk mencari model baling-baling yang paling efektif.



Gambar 3.41 Persentase Pembagian Posisi Model *Airfoil*

Sumber: Energy.gov/Al Hicks (2023)

Hasil penelitian NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) menyampaikan bahwa pembagian posisi *airfoil* pada baling-baling *wind turbine* ialah langkah penting dalam desain untuk memastikan efisiensi dan kinerja maksimal. NACA ialah lembaga yang didirikan pada tahun 1915 untuk melakukan penelitian dan pengembangan dalam bidang aeronautika dan energi terbarukan dengan seri *airfoil* NACA NACA 4-digit, NACA 5-digit, dan NACA 6-series.



Gambar 3.42 Bagian *Airfoil*

Sumber: Wardhana & Fridayana (2020)

Keterangan Gambar

- 🔦 *Leading Edge* (LE Radius), yaitu tepi depan dari *airfoil*, di mana aliran udara pertama kali bertemu dengan *airfoil*.
- 🔦 *Trailing Edge* (*Square Edge*), yaitu tepi belakang dari *airfoil*, di mana aliran udara meninggalkan *airfoil*.
- 🔦 *Chord Line* merupakan garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*. Panjang garis ini disebut panjang *chord* (*chord length*).
- 🔦 *Camber* merupakan deviasi permukaan *airfoil* dari *chord line*. *Airfoil* dengan *camber* positif memiliki permukaan atas yang lebih cembung dibandingkan dengan permukaan bawah, yang membantu menghasilkan *lift*.

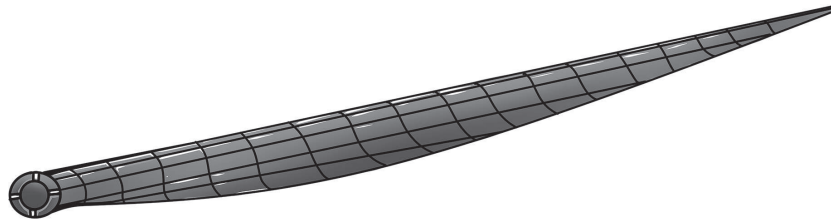
Proses perancangan dapat melalui beberapa tahapan secara manual dan komputerisasi. Perancangan secara manual seperti berikut.

1. *Download* model *airfoil* sebagai contoh NACA 4112. Cetak di atas kertas folio ukuran 21×33 cm, atau dengan kertas ukuran lain.
2. Sediakan kertas karton, atau kertas yang lebih tebal, untuk dilipat mengikuti lekukan, lengkungan, dan bentuk *airfoil*.
3. Panjang dan pendek turbin dapat disesuaikan dengan bahan yang ada.
4. Pembagian alokasi *airfoil* dengan persentase dari pangkal sampai ujung.
5. Uji kinerja langsung di lapangan, kekuatan bahan, kepekaan menangkap angin, dan kemampuan angkat beban.

Perancangan secara komputerisasi seperti berikut.

1. Analisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*), yaitu simulasi untuk menguji performa aerodinamis dari berbagai *airfoil*. *Software* yang digunakan di antaranya ialah ANSYS Fluent. *Software* Qblade, Solidworks, Sketchup, atau disesuaikan dengan yang ada.
2. *Prototyping* dan pengujian membuat prototipe baling-baling dan melakukan uji lapangan untuk memastikan efisiensi dan kinerja.
3. Literasi desain menggunakan data dari pengujian untuk memperbaiki dan mengoptimalkan desain *airfoil*, kemudian cetak di atas *printer* tiga dimensi.

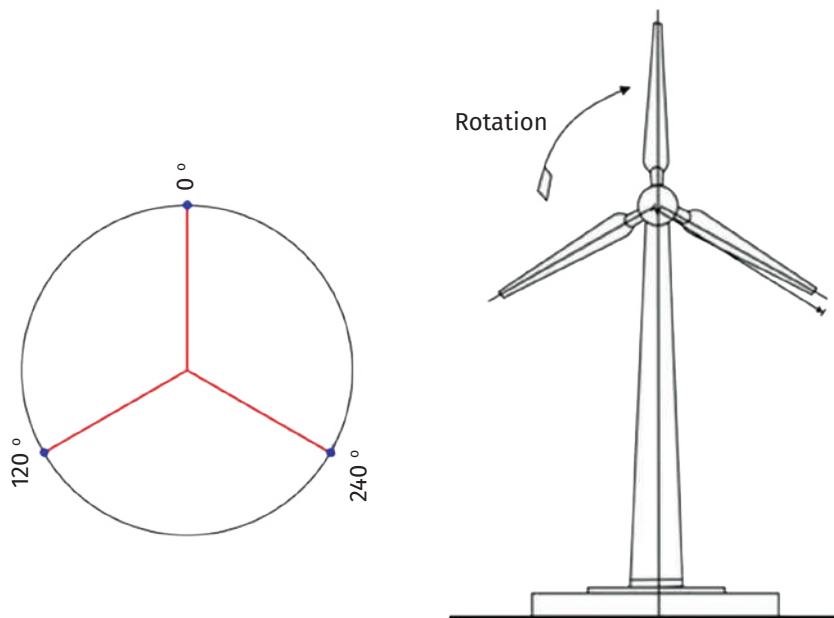
Selanjutnya, kita mempersiapkan model tulang penguat yang bentuknya sesuai *airfoil*. Penulangan berfungsi sebagai penahan beban bilah kipas dan menghubungkan badan bilah kipas dengan *hub*. Kita dapat memilih bahan tulang penguat dari kayu, bambu, baja ringan atau pipa alumunium.



Gambar 3.43 Rencana Penulangan untuk Memperkuat Bilah Baling-Baling

b. Posisi Pemasangan Bilah Baling-Baling

Pada bagian *hub*, yaitu penghubung dari beberapa bilah baling-baling, dilakukan pembagian posisi bilah baling-baling. Pembagian sudut pemasangan bilah kipas turbin didasarkan pada penerapan 3 sudut putaran angin (*wind turning*). Kita dapat membagi lingkaran menjadi tiga bagian yang sama besar. Setiap bagian akan memiliki sudut sebesar 120 derajat. Titik awalnya pada posisi 0 derajat dengan panduan menunjuk angka 12 pada jam dinding. Berikut ini posisi derajat dalam 3 putaran angin.

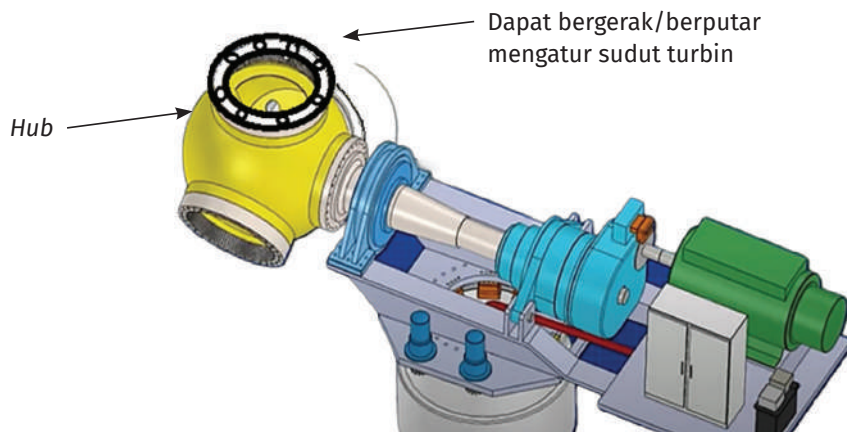


Gambar 3.44 Posisi Pemasangan Turbin

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

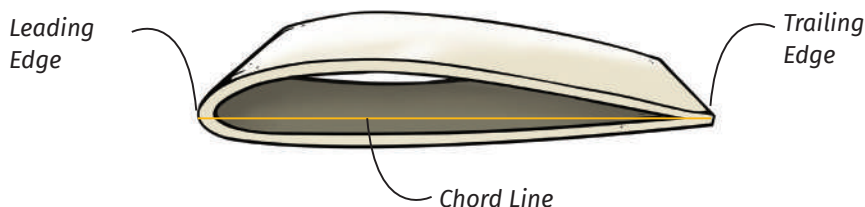
c. Hub Penghubung

Hub merupakan komponen yang berfungsi sebagai penghubung antara bilah-bilah turbin (*blade*) dan poros utama. Ini memungkinkan bilah-bilah untuk berputar bersama dengan poros ketika terkena angin. *Hub* membantu mendistribusikan beban yang diterima oleh bilah turbin secara merata ke poros utama dan struktur pendukung. *Hub* dalam PLTB skala menengah dan besar dapat menyesuaikan sudut bilah, yaitu berfungsi sebagai mekanisme penyesuaian sudut bilah (*pitch control*). Ini memungkinkan sudut bilah dapat diubah untuk mengoptimalkan penangkapan energi angin pada kecepatan angin yang berbeda. *Hub* juga sebagai keamanan dan pengendalian, yaitu berperan dalam mekanisme pengereman dan pengendalian turbin angin. Dalam kondisi angin yang sangat kencang, mekanisme pengereman dapat diaktifkan untuk menghentikan putaran turbin guna mencegah kerusakan.



Gambar 3.45 Hub Menghubungkan Bilah Baling-Baling

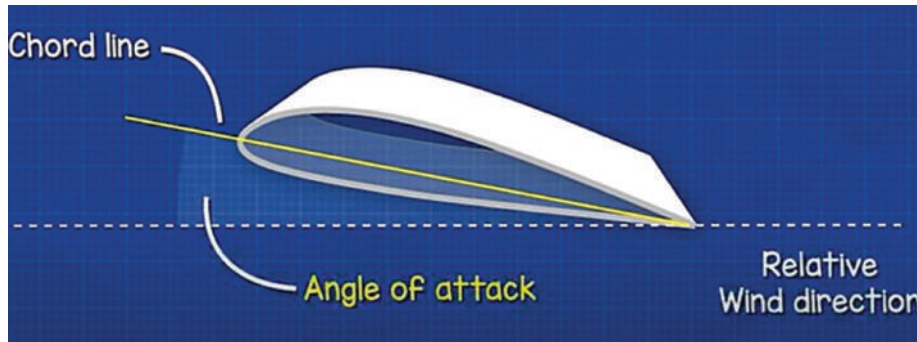
Prinsip kerja *hub* ialah menghubungkan 3 bilah kipas turbin dan mengatur sudut bilah kipas terhadap arah angin. Pada proyek kita kali ini, sudut bilah kipas diatur secara manual antara 8 derajat sampai dengan 15 derajat. Perubahan derajat pada bilah kipas turbin memengaruhi kecepatan (*speed*) dan tenaga (*torgue*) proses konversi angin ke mekanis. Ada penamaan pada bagian dalam bilah kipas. Bagian yang tajam (A) *trailing edge*, bagian punggung (B) *leading edge*, dan garis lurus antara A dan B ialah *chord line*, seperti pada Gambar 3.45 di bawah ini.



Gambar 3.46 Chord Line Saat Posisi Sejajar, Turbin Belum Bekerja

Ketika posisi *chord line* sejajar antara A dan B terhadap arah angin, kipas tidak berputar. Andaikan ada putaran, putaran akan berjalan sangat lambat dan tidak bertenaga bahkan berhenti karena ketika angin melewati objek kipas, tidak ada hambatan.

Ketika posisi *Chord Line* tidak sejajar, sebagai contoh sudut A lebih besar daripada sudut B terhadap arah angin. Maka, kipas berputar ke arah kanan dan memiliki tenaga karena ketika angin melewati objek kipas, ada hambatan dan menimbulkan daya angkat *angle of attack*.

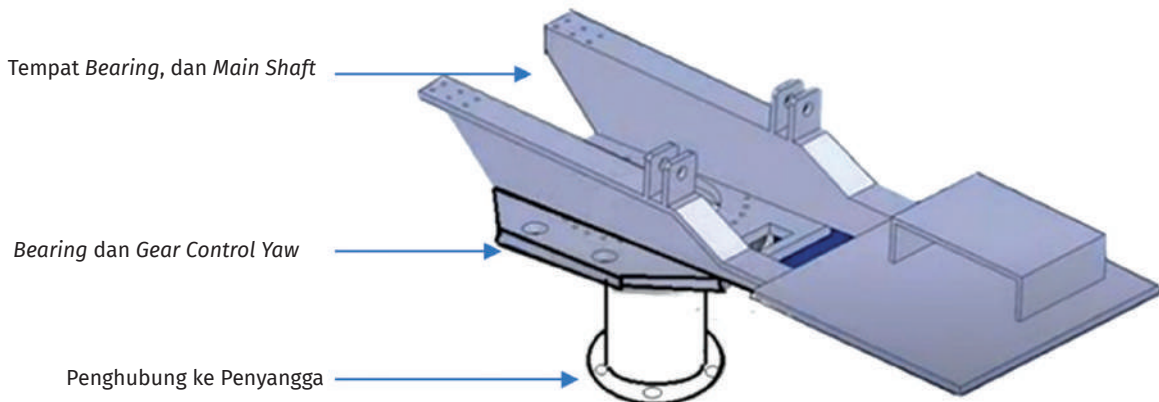


Gambar 3.47 Cordline Tidak Sejajar

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

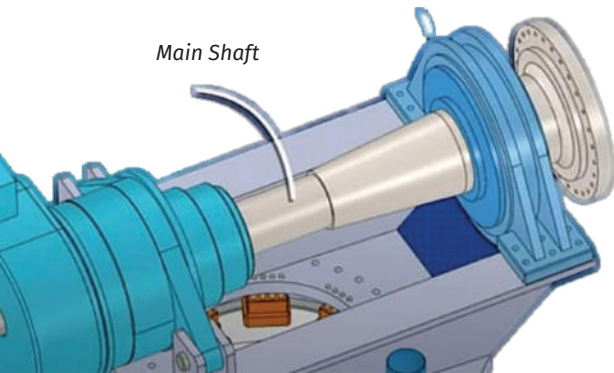
d. Kerangka Rumah Turbin

Bagian kedua sistem mekanik ialah rumah turbin yang berfungsi sebagai tempat meletakkan komponen *main shaft* atau as penghubung, *bearing*, *gearbox*, dan generator. Rumah turbin yang terhubung dengan penyangga dapat berputar 360 derajat *control yaw* sesuai pengarah angin sehingga perlu desain, bahan, dan ukuran yang tepat, seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.48 Kerangka Rumah Turbin

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

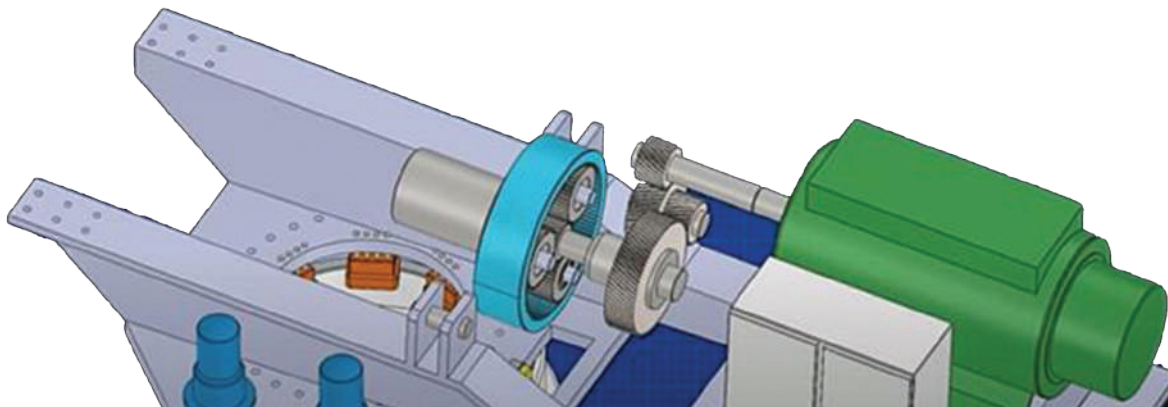


Gambar 3.49 Main Shaft dan Bearing
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Main shaft bertugas menghubungkan komponen *hub* dan *gearbox*. *Main shaft* dikuatkan oleh *bearing* yang selalu diberi pelumas untuk dapat berputar dengan kecepatan tinggi dan untuk meredam panas.

Putaran *main shaft* dipengaruhi oleh kecepatan angin. Jika angin berembus dengan cepat, ia akan berputar dengan cepat. Begitupun sebaliknya. Maka, perlu distabilkan *gearbox*, yang terdiri atas paduan beberapa komponen gerigi dengan diameter yang berbeda beda. Dengan demikian, dapat mempercepat atau memperlambat sebuah putaran.

Jenis *gearbox* ada dua, yaitu model penurun kecepatan (*speed down*) dan peningkatan kecepatan (*speed up*). *Wind turbine* menggunakan jenis *gearbox speed up* yang berfungsi meningkatkan kecepatan. Perbandingan antara putaran pada *main shaft* dan putaran *output* yang menuju generator dapat mencapai 1 : 20. Artinya, jika turbin angin berputar 1 kali, generator akan berputar 20 kali.



Gambar 3.50 Output Gearbox Terhubung dengan Generator
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Bagian ketiga dari sistem mekanik ialah pengarah mata angin (*wind tail*). *Wind tail* dipasang di belakang rumah turbin yang bertugas mengarahkan bilah kipas turbin dan rumah turbin selalu pada arah mata angin yang paling kuat. Pada pembangkit skala besar, pengarah angin menggunakan perpaduan sistem terpusat dengan mikrokontroler, anemometer, kontrol *yaw*, dan kontrol *pitch*. Proyek kita saat ini menggunakan pengarah angin mekanik.

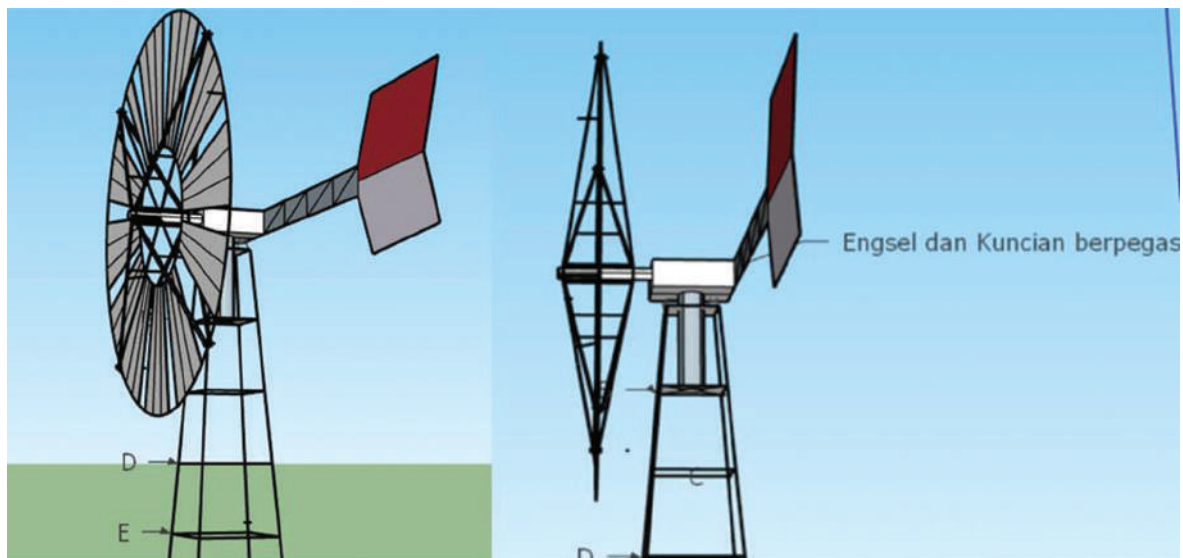
Pada Gambar 3.50, posisi *wind tail* sejajar atau lurus dengan garis tengah *hub* bilah turbin. Posisi sistem *wind turbine* sedang bekerja, mencari arah angin yang terkuat.

Mekanisme sistem pengereman menggunakan *wind tail* cukup sederhana. Dengan melipat posisi *wind tail* sejajar dengan bilah turbin angin, *wind tail* akan menolak arah angin terkuat, baling-baling turbin angin selalu menghindari pada arah angin terkuat. Apabila *wind tail* posisinya sejajar dengan bilah kipas, terpaan angin ini akan membuat rumah turbin berputar searah mata angin. Saat rumah turbin berputar menghindari arah mata angin, bilah turbin angin tidak menghadap arah angin. Bilah akan berputar sebentar dan berhenti karena angin tidak mengenai pembukaan bilah kipas turbin angin secara berhadapan-hadapan.



Gambar 3.51 Beberapa Model Pengarah Angin *Wind Tail*

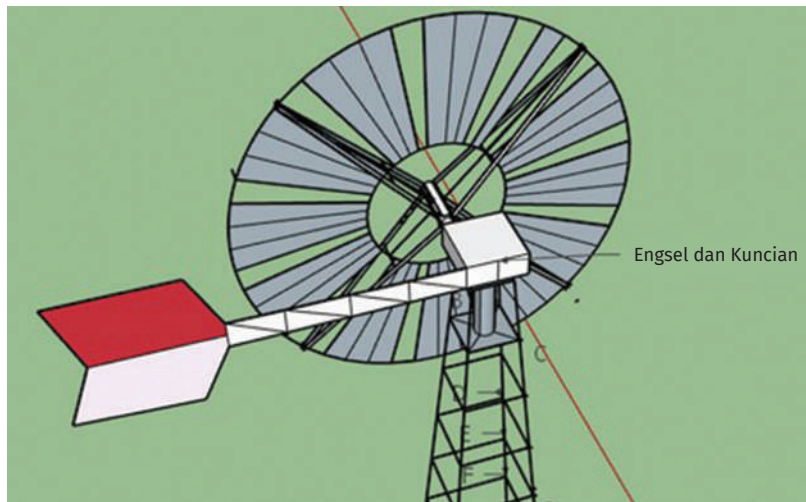
Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)



Gambar 3.52 Sistem Pengereman Menggunakan *Wind Tail*

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Pengoperasian sistem mekanik *wind tail* menggunakan tuas pengangkat, tali, dan sistem pegas yang dapat dioperasikan secara sederhana dari bawah turbin. Sistem mekanik diletakkan dekat fondasi sehingga petugas saat pengoperasian tidak perlu memanjat tiang penyangga.



Gambar 3.53 Sistem Kunci Pengereman *Wind Tail* Tampak Belakang
 Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Aktivitas 3.5 Komponen PLTB

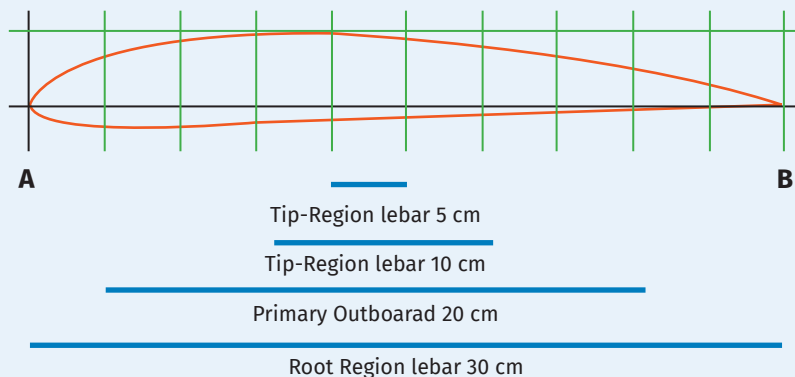
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, bertujuan untuk mengasah kemampuan bernalar kritis, kreatif, dan gotong royong dalam memahami Perancangan Sistem Mekanik pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok beranggotakan 3 orang.
2. Setiap kelompok membuat purwarupa bilah kipas *wind turbine* dengan panjang 1 meter.
3. Setiap anggota menggambar airfoil dengan model *root*, *primary*, dan *tip*, di sebuah kertas ukuran 215 × 330 model kertas horizontal.



4. Sediakan kertas karton atau kertas kardus. Kemudian, tekuk mengikuti pola *airfoil* yang sudah digambar, dengan pembagian *root region airfoil* memiliki panjang 25 cm, lebar 30 cm; *primary outboard airfoil* panjangnya 50 cm, lebar 20 cm; dan *tip-region airfoil* 25 cm, lebar 10 cm; dan paling ujung model tip region 5 cm. Gabungkan pekerjaan anggota kelompok kerja dengan menyambung bagian-bagian yang terpisah menjadi satu. Hasilnya menjadi sebuah purwarupa bilah kipas turbin dari kertas.
5. Buatlah sebuah bilah turbin angin dengan panjang 100 cm, berbahan busa, kayu atau bambu dengan menggunakan pola *airfoil*, berjumlah 3. Buat desain *hub*-nya. Uji perputaran bilah menggunakan kipas angin, atau dibawa ke luar ruangan yang memiliki potensi angin.
6. Hitunglah daya yang dihasilkan apabila kita memiliki turbin dengan panjang bilah 1 meter (sehingga radius $r = 1$ meter), kecepatan angin 5 meter per detik atau sesuaikan hasil pengamatan di lingkungan sekitar, dengan koefisien daya sebesar 0,4.

3. Perancangan Sistem Elektrik

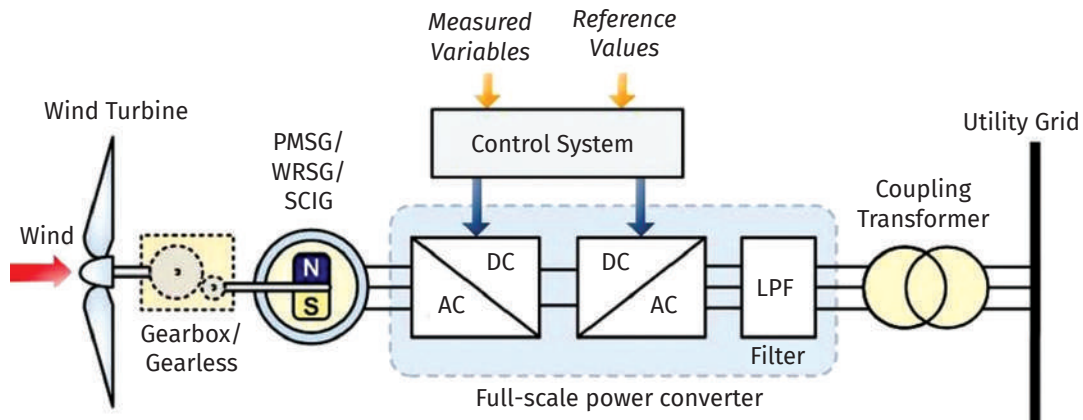
Pada perancangan sistem kelistrikan, kita akan mengenal generator, kontroler, inverter, baterai, pengaman, dan monitoring, yang sudah tersedia di pasaran *online* maupun *offline*. Proses perancangan sistem elektrik memerlukan keterampilan dalam memilih peralatan, spesifikasi teknik, perhitungan beban, dan *layout* instalasi.

a. Generator

Pada kegiatan penentuan peralatan, pertama, kita memilih generator berdasarkan tujuan proyek, misalnya kapasitas daya yang diinginkan dan target *output* energi yang dibutuhkan. Caranya dengan menganalisis data angin di lokasi proyek: kecepatan angin rata-rata, ketinggian angin, dan pola musiman. Sebagai contoh, pada proyek kita saat ini, kita akan membangun PLTB skala kecil dengan kapasitas 1.500 watt.

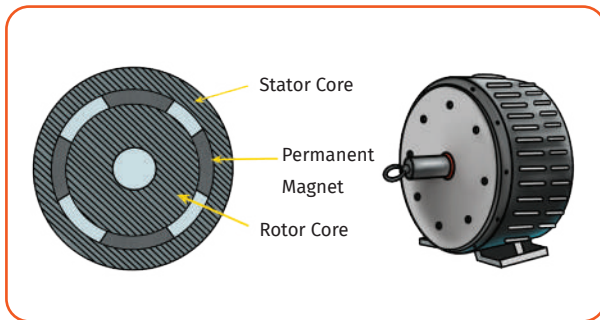
Generator PLTB memiliki beberapa tipe di antaranya ialah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Ini jenis generator yang sering digunakan dalam PLTB karena efisiensinya yang tinggi dan desain yang lebih sederhana. *Wound Rotor Synchronous Generator* (WRSG) ialah jenis generator sinkron yang menggunakan rotor dengan lilitan (*wound rotor*) daripada magnet permanen atau lilitan induksi. *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG) ialah jenis generator induksi yang menggunakan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*). Ini merupakan pilihan populer dalam aplikasi PLTB karena kesederhanaan, keandalan, dan biaya rendah.

Perhatikan posisi generator pada *Control System* berikut ini.



Gambar 3.54 Diagram Blok Pengkabelan Generator PMSG
 Sumber: *Theengineering (2024)*

Berikut ini contoh spesifikasi Generator Sinkron (*Synchronous Generator*) yang memiliki karakter khusus PMSG.

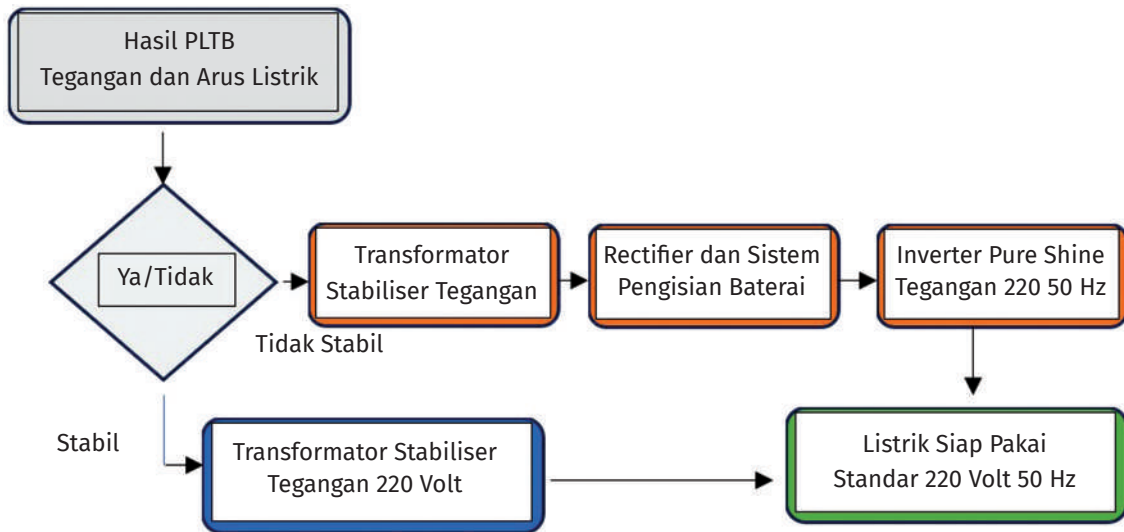


Synchronous Generator			
Type	GDH6529S-14	INSUL. CLASS	F
Output	1500/17250 kVA	FREQUENCY	
Voltage	13800 A	POLES	60 HZ
Current	628/722 A	PHASES	28
Ex. Voltage	230 A	RATING	3
Ex. Current	590/645 A	TEMP. RISE	CONT.
Power Factor	0,85	AMB. TEMP.	SR 75/90 RT 80/100 °C
Speed	257 rpm		40 °C
Standard	ANSI C50. 12-1982	SERIAL NO.	KC69008L 1
	MANUFACTURED	1991	

Gambar 3.55 Spesifikasi Generator PMSG
 Sumber: *Theengineering (2024)*

b. Kontroler

Setelah turbin angin bekerja dengan potensi angin yang tersedia, kita melihat hasilnya dengan mengukur tegangan listrik (volt) dan arus (ampere) yang dihasilkan. Kemudian, kita menentukan peralatan kelistrikan selanjutnya. Sebagai contoh: tegangan listrik yang dihasilkan PLTB stabil di angka 230 volt. Maka, kita memerlukan trafo (transformator) sebagai penstabil tegangan hasil, kemudian listrik dapat langsung dipakai. Namun, jika tegangan yang dihasilkan PLTB tidak stabil, tegangannya bervariasi dan naik-turun disebabkan karena potensi alam yang berubah, misalnya 20 volt sampai dengan 50 volt, dan terkadang 200 volt. PLTB model ini dimanfaatkan untuk men-charge baterai menyimpan listrik DC, kemudian diubah menjadi AC dengan inverter.



Gambar 3.56 Bagan Langkah Perancangan Sistem Kelistrikan

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Selanjutnya, kita perlu mempersiapkan transformator yang berfungsi menstabilkan tegangan. Transformator atau sering disebut trafo memiliki dua jenis, yaitu trafo *step-up* untuk menaikkan tegangan dan trafo *step-down* untuk menurunkan tegangan. Di samping itu, ada juga model ac-matic yang mengatur input – output tegangan secara otomatis.



Transformator dengan AC Matic Input



Transformator Step-UP & Down

Gambar 3.57 Transformator dengan Berbagai Model

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

c. Inverter

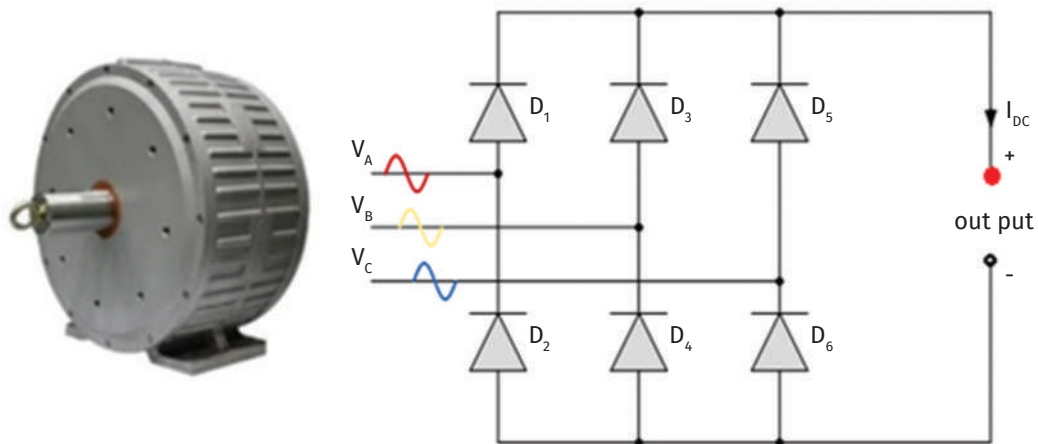
Generator pembangkit sinkron dan asinkron memiliki 3 *phase*: tegangan AC dengan kode L1, L2, dan L3. Sistem penyearah arus listrik (*rectifier*) berfungsi mengubah tegangan AC menjadi DC dengan dua kutub positif dan negatif. Hasil dari sistem penyearah ini kemudian menuju sistem *charge* baterai. Pada perkembangannya, sistem penyearah, pengisian baterai, dan inverter di pasaran dibundel menjadi satu dalam satu nama alat *charging controler*.



Gambar 3.58 Peralatan *Control Charging System* Pengisian Baterai

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Penyearah *rectifier* yang terpisah atau tidak satu bundel *Control Charging System*, juga masih dipergunakan dalam PLTB skala mikro. Penyearah ini sederhana dan mempermudah perawatan dan penggantian komponen.



Gambar 3.59 Komponen Penyearah Tegangan *Rectifier*

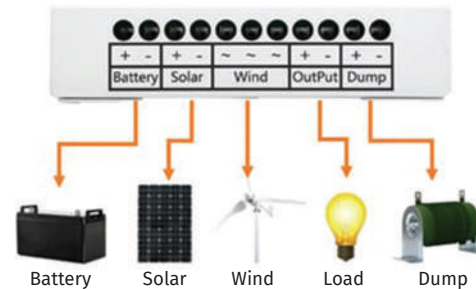
Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Sistem pengisian baterai (*charge controller*) bertugas mengontrol kondisi baterai apakah kosong atau penuh. Jika baterai dalam kondisi kosong, *sensor controller* akan terbuka, arus listrik mengisi baterai sampai penuh, kemudian sensor akan menutup dan proses *charging* berhenti. Peralatan ini juga dilengkapi dengan *dumload* yang bertugas untuk mengalihkan atau membuang kelebihan energi yang dihasilkan oleh turbin angin ketika produksi listrik melebihi permintaan atau kapasitas penyimpanan.



Gambar 3.60 Sistem Pengisian Baterai yang Terintegrasi dan *Dumload*

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)



d. Baterai

Pada perancangan sistem kelistrikan, kita juga perlu memahami jumlah baterai sebagai penyimpanan listrik yang perlu dipersiapkan sesuai dengan beban yang akan dipikulnya. Pemilihan jenis dan jumlah baterai yang tepat akan memberikan performa kerja yang baik.

Sebagai contoh, kita akan menghidupkan peralatan listrik dengan total beban 1.500 watt dengan waktu pemakaian 10 jam.

Pertama, kita menghitung total konsumsi energi dengan formula sederhana sebagai berikut.

$$E = P \times t$$

Dimana

E = total energi

P = daya yang diperlukan dalam satuan kilo watt (kW)

t = waktu yang diperlukan dalam satuan jam

$$E = 1,5 \text{ kW} \times 10 \text{ jam} = 15 \text{ kWh (kilo watt hours)}$$

Kita sudah mengetahui bahwa total energi yang dipakai peralatan dengan total beban 1.500 watt dan menyala selama 10 jam ialah sebesar 15 kWh.

Kedua, kita menghitung kapasitas baterai. Sebaiknya, nilainya di atas kebutuhan 1,5 kW. Hal ini untuk menjaga stabilitas suplai listrik. Kita perkirakan kondisi baterai memiliki daya simpannya 90%, spesifikasi 12 volt, 100 ampere. Menghitung kapasitas baterai dengan formula

$$C = \frac{E}{\eta_{Baterai}}$$

Dimana

C = kapasitas baterai yang dibutuhkan

E = kebutuhan energi dan

$\eta_{Baterai}$ = efisiensi baterai (umumnya antara 0,85 hingga 0,95)

Maka, untuk menghitung kapasitas baterai, kita masukkan ke dalam formula berikut.

$$C = \frac{E}{\eta_{Baterai}}$$

$$C = \frac{15 \text{ kWh}}{0,9} \approx 16,67 \text{ kWh}$$

Dengan kondisi baterai 90%, kita dapat menggunakan peralatan bantu tester baterai. Maka, ditemukan kebutuhan kapasitas baterai ialah 16,67 kilo watt hours. Selanjutnya, kita mengonversi kapasitas baterai dalam satuan ampere-hour (Ah), dengan formula:

$$C_{ah} = \frac{C \times 1.000}{V}$$

C_{ah} = Kapasitas baterai dalam satuan ampere per jam (Ah),

C = Kapasitas Baterai, dan

V = Tegangan nominal baterai (dalam volt).

Pada proyek kita saat ini, spesifikasi baterai ialah 12 volt, 100 Ah. Maka, kita masukkan angkanya ke formula:



Gambar 3.61 Peralatan Tester Baterai

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

$$C_{\text{ah}} = \frac{C \times 1.000}{V}$$

$$C_{\text{ah}} = \frac{16,67 \times 1.000}{12 \text{ Volt}} \approx 1388,89 \text{ Ah}$$

Sudah terjawab bahwa kapasitas baterai dalam satuan ampere per jam (Ah) ialah 1388,89 Ah. Kemudian, kita menghitung berapa jumlah baterai yang dibutuhkan.

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{1388,89 \text{ Ah}}{100 \text{ Ah per baterai}} = 13,89$$

Terjawab, kebutuhan baterai ialah 13,89, dibulatkan menjadi 14 buah baterai dengan spesifikasi 12 volt, 100 ampere.

Sudah terjawab bahwa untuk mendukung beban 1.500 watt selama 10 jam ialah dengan menyediakan baterai 12 V 100 Ah, berjumlah 14 buah. Jika menggunakan baterai dengan spesifikasi berbeda, kita dapat mengganti nilai-nilai di atas sesuai spesifikasi baterai yang tersedia di lokasi terdekat.



Gambar 3.62 Baterai 12 Volt 100 Ah

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

e. Pengaman dan Monitoring

Sebelum masuk ke instalasi rumah tangga, kita perlu mempersiapkan sistem kontrol yang bertugas melakukan monitoring dan pengamanan. Sistem kontrol ini terdiri atas *amperemeter* untuk mengukur arus listrik dan *voltmeter* untuk mengukur tegangan pada jalur input dan pada jalur *output*.



Gambar 3.63 Peralatan Panel Kontrol dan Monitoring

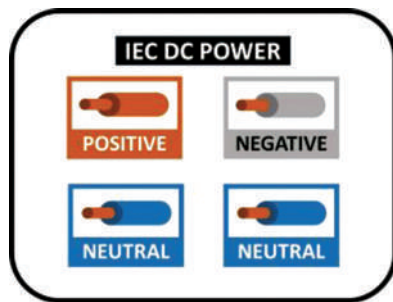
Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Peralatan kelistrikan selanjutnya ialah kabel dengan warna standar dan ukuran diameter yang cocok dengan beban 1.500 watt. Berikut ini tabel standar warna kabel.

Tabel 3.7 Warna Kabel Standar pada Instalasi Listrik

No	Warna Kabel	Standar SNI	IEC	NEC	Eropa
1	L1	Merah	Cokelat	Hitam	Cokelat
2	L2	Kuning	Hitam	Merah	Hitam
3	L3	Hitam	Abu-Abu	Biru	Abu-abu
4	Netral	Biru	Biru	Putih/Abu	Biru
5	Pembumian	Hijau-Kuning	Hijau-Kuning	Hijau/Telanjang	Hijau-Kuning

Phase (L1, L2, dan L3) digunakan untuk aliran arus listrik bolak-balik AC dari sumber. Netral (N) mengembalikan arus listrik ke sumber daya. Pembumian (PE) untuk mencegah bahaya sengatan listrik dengan mengalirkan arus bocor ke tanah. Untuk tegangan DC, warna kabel yang sering dipakai menggunakan standar dari IEC seperti pada gambar berikut.



Tegangan Positif (+) warna kabel merah,
Tegangan Negatif (-) warna kabel abu-abu
dan Tegangan Netral warna kabel biru,

Gambar 3.64 Warna Kabel Tegangan DC

Sumber: Wiraelectrical (2024)

Ukuran diameter kabel juga perlu diperhitungkan dalam instalasi kelistrikan supaya kabel aman dan awet. Pada proyek kita saat ini, berapakah ukuran diameter kabel yang cocok dengan beban listrik sebesar 1.500 watt? Mari, kita hitung dengan menggunakan formula arus listrik yang lewat di kabel.

$$I = \frac{P}{V}$$

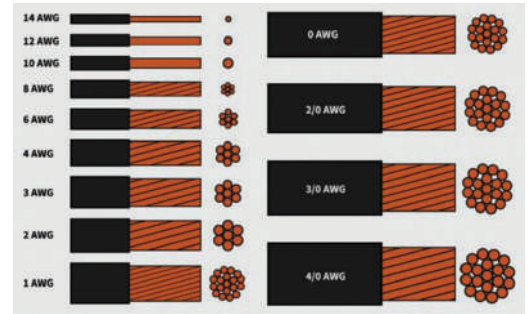
$$I = \frac{1.500 \text{ watt}}{220 \text{ volt}} \approx 6,28 \text{ A}$$

I = arus listrik

P = beban listrik

V = tegangan listrik

Terjawab bahwa arus listrik yang akan melewati instalasi kita sebesar 6,28 ampere. Kemudian, perkirakan berapa ukuran kabel yang tepat. Kabel ini akan mampu dialiri arus tersebut. Ukuran diameter dan kemampuan maksimal dilewati arus dapat kita temukan tertulis pada isolator atau pembungkus kabel. Sebagai contoh, menurut tabel standar AWG (American Wire Gauge), 18 AWG dapat menahan arus hingga 10 A atau standar mm², kabel diameter 1,5 mm².



Gambar 3.65 Standar Kabel AWG

Sumber: Visiniaga (2024)

Ada beberapa jenis kabel yang memiliki kegunaan masing-masing di antaranya ialah

1) Kabel NYA

Jenis kabel ini terbuat dari bahan tembaga tunggal dengan inti satu dan dilapisi bahan isolator PVC satu lapis. Kabel jenis ini sering digunakan untuk instalasi di perumahan dan instalasi kabel udara. Contoh aplikasi penggunaan kabel NYA seperti instalasi rumah seperti stop kontak, saklar, dan lampu serta instalasi di atas plafon.

2) Kabel NYM

Jenis kabel ini banyak juga dikenal sebagai jenis kabel HYO dengan inti kabel yang terdiri atas satu sampai empat inti dan dilengkapi dengan lapisan isolasi PVC. Jenis kabel NYM juga dapat digunakan untuk lampu penerangan luar atau jalan, dan luar ruangan.

3) Kabel NYAF

Jenis kabel ini memiliki isi inti tembaga berserabut, dengan inti tunggal berisolasi bahan isolator PVC satu lapis. Kabel NYAF memiliki sifat fleksibel karena inti tembaganya berbentuk serabut. Kabel jenis ini cocok untuk instalasi pada panel listrik yang membutuhkan banyak lekukan. Kabel NYAF banyak digunakan oleh perusahaan dalam bidang produksi panel listrik.

4) Kabel NYMHY

Jenis kabel NYMHY memiliki lebih dari satu inti tembaga berserabut dengan bahan isolasi terluar berupa PVC. Kabel ini sering dipakai untuk instalasi listrik skala rumah tangga di bawah 900 watt. Contoh aplikasi penggunaan kabel NYMHY seperti terminal stop kontak, penyambung kabel pompa air rumah pada area yang kering.

Aktivitas 3.6 Perancangan Sistem Elektrik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan mengasah kemampuan bernalar kritis, kreatif, dan bergotong royong dalam memahami perancangan sistem elektrik pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok beranggotakan 3 orang.
2. Carilah informasi tentang *Generator Asinkron (Induction Generator)* dan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*. Buat resume berisi ciri khas, kelebihan, dan kekurangannya.
3. Diskusikan dengan kelompok kerja, informasi *name plate* atau spesifikasi teknis sebuah generator. Presentasikan di depan kelas.
4. Ada sebuah rumah tangga yang akan membangun PLTB untuk memenuhi kebutuhan listrik sebesar 900 watt. Berapakah jumlah baterai yang harus disediakan? Tersedia 12 Volt, 70 Ah?
5. Untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga 900 watt, buatlah sebuah rencana anggaran biaya, peralatan yang dibutuhkan, spesifikasi dan daftar harga alat dan biaya lain-lain sehingga calon pelanggan kamu merasa yakin dengan proposal yang kamu ajukan.

E. Pembangunan dan Pemasangan PLTB Skala Kecil

Ada beberapa persiapan yang perlu dilakukan ketika akan membangun dan memasang PLTB skala kecil. Hal itu di antaranya ialah membersihkan lahan, membangun jalan akses, dan mempersiapkan tenaga teknis serta menjalin komunikasi dengan berbagai pihak untuk kelancaran pemasangan.

1. Pembangunan dan Pemasangan Bangunan Sipil

Pada tahap ini, ada beberapa langkah yang akan dilaksanakan di antaranya pemasangan fondasi, pemasangan tulang baja dan pengujian dengan waterpas serta pengecoran dan proses *curing*.

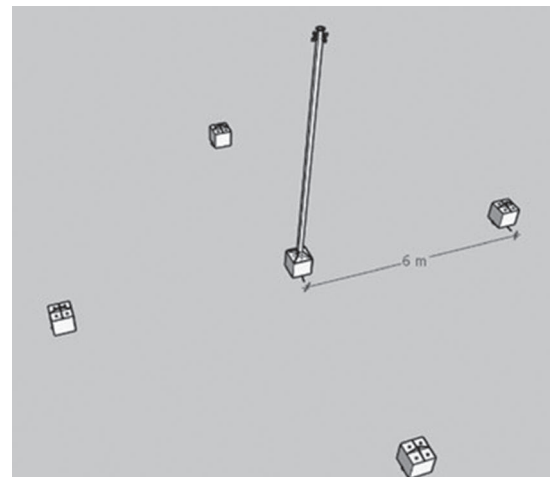
a. Pemasangan Fondasi

Dalam rangka pemasangan fondasi, langkah pertama yang harus dilakukan ialah penggalian tanah. Kita akan menggali lubang fondasi sesuai dengan spesifikasi desain penyangga model silinder dengan ketinggian 6 meter. Kebutuhan fondasi utama sebanyak satu buah yang berada di tengah dengan ukuran panjang 50 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 50 cm. Kemudian, kita menggali lagi empat buah lubang untuk fondasi jangkar penguat dengan ukuran panjang 50 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 50 cm, yang posisinya disesuaikan dengan arah mata angin terkuat. Jarak lubang fondasi tiang utama dan fondasi penguat jangkar masing-masing 6 meter.

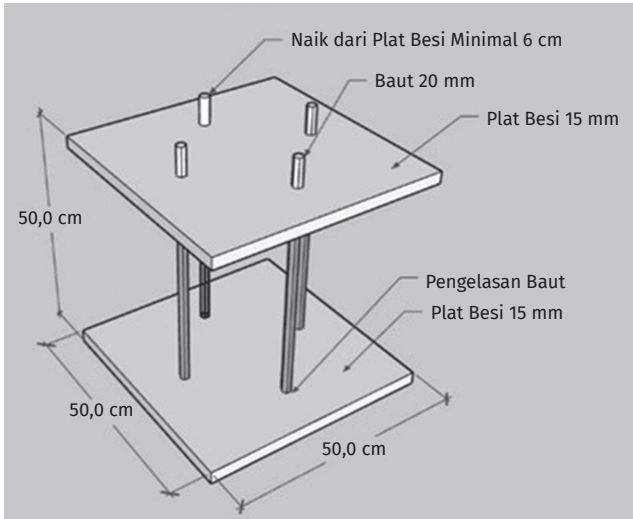
Posisi lubang fondasi jangkar sebaiknya memperhatikan arah mata angin yang berembus. Penempatan fondasi jangkar akan membantu penyangga menahan beban saat PLTB bekerja dengan arah mata angin yang berbeda-beda. Jumlah dan ukuran fondasi jangkar dapat ditambah apabila diperlukan sebagai penguatan.

b. Pemasangan Tulang Baja

Setelah fondasi siap, selanjutnya, kita memasang tulangan baja dengan menempatkan plat besi ketebalan 15 mm, pada bagian atas dan bawah. Kemudian, dilakukan pengelasan dengan



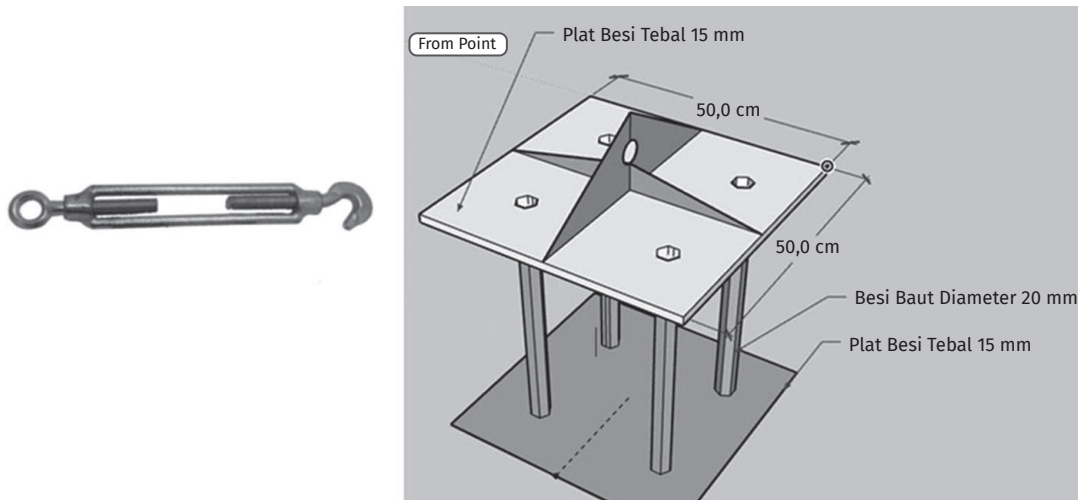
Gambar 3.66 Posisi Fondasi Utama dan Fondasi Jangkar
Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)



Gambar 3.67 Pemasangan Tulangan Baja pada Fondasi Utama
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

baut besi ukuran 20 mm sehingga bagian atas dan bawah bersatu dengan kuat. Untuk fondasi tiang utama, posisi baut dinaikkan minimal 6 cm untuk menyambungkan dengan tiang pipa silinder.

Penulangan baja pada bagian fondasi jangkar hampir mirip dengan penulangan baja pada fondasi utama. Bedanya, pada bagian atas, disediakan lubang tempat *spand* skrup (*turnbuckle*) yang dikaitkan dengan teknik tali-temali, kemudian dihubungkan dengan bagian atas penyangga.



Gambar 3.68 Pemasangan Tulangan Baja Fondasi Jangkar dengan Lubang *Spand* Skrup
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Ukuran lubang dapat disesuaikan dengan ukuran *spand* skrup yang akan dipakai. Sebagai contoh, jika menggunakan *spand* skrup M20, kita membutuhkan lubang dengan diameter minimal $\frac{3}{4}$ inch. Jika menggunakan ukuran yang berbeda, lubangnya dapat disesuaikan. Selanjutnya, pelat besi diletakkan pada lubang yang sudah dipersiapkan dengan tambahan bekisting (kotak cetak/*formwork*) secukupnya.

c. Pengujian dengan Waterpas

Setelah pelat besi berada di posisinya, kita akan mengukur apakah posisi pelat sudah benar. Pengukuran itu menggunakan *waterpass spirit level* atau *leveler* untuk memastikan permukaan horizontal atau vertikal benar-benar datar.

Pengujian level datar dan vertikal dimaksudkan untuk memastikan tiang penyangga dalam kondisi tegak lurus dan dudukan rumah turbin datar. Kondisi tegak lurus dan datar juga berpengaruh pada putaran bilah kipas dan pengarah angin sehingga penggunaan *leveler* sangat penting.



Gambar 3.69 Penggunaan Waterpas untuk Pengujian Level Horizontal

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)



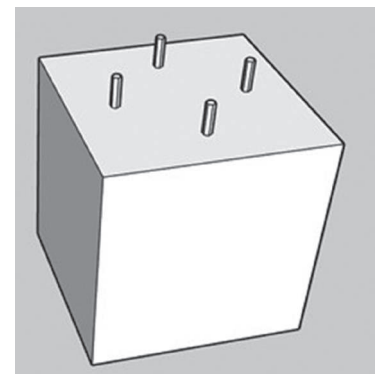
Gambar 3.70 Penggunaan Waterpas untuk Pengujian Vertikal

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

d. Pengecoran dan Proses Curing

Selanjutnya, proses pengecoran dengan mengisi campuran bahan beton dengan perbandingan 1 : 2 : 3 berarti 1 bagian semen, 2 bagian pasir, dan 3 bagian kerikil. Misalnya, jika menggunakan ember sebagai satuan, 1 ember semen, 2 ember pasir, dan 3 ember kerikil. Pengecoran beton dengan menuangkan campuran beton dan memastikan pengecoran yang merata pada semua bagian. Pengecoran dilakukan pada sekali waktu langsung jadi.

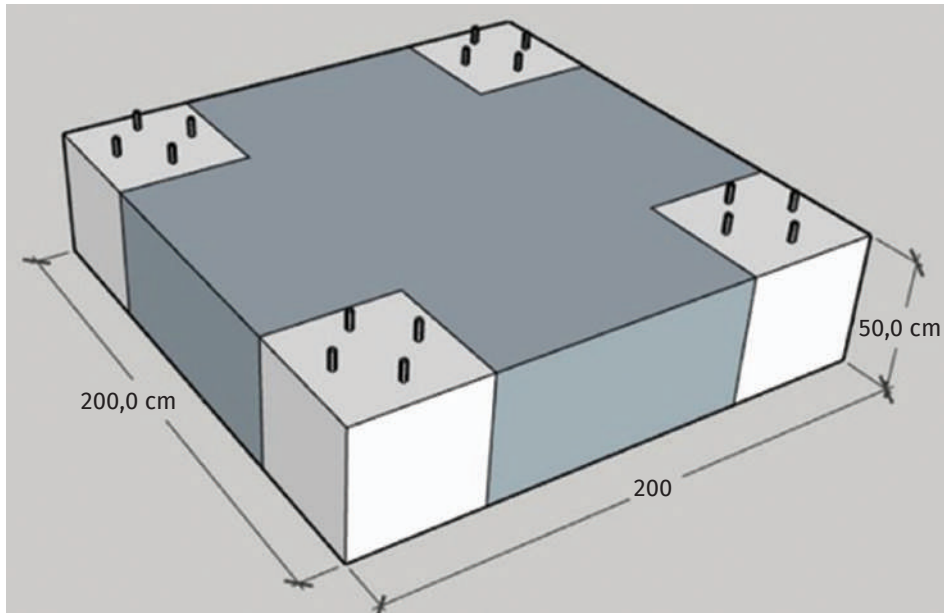
Proses *curing* ialah masa tunggu, membiarkan beton mengering dan mengeras sesuai dengan waktu yang ditentukan untuk mencapai kekuatan penuh. Waktu *curing* membutuhkan 7 sampai dengan 14 hari. Selama waktu *curing*, lakukan penutupan dan penyiraman untuk menjaga kelembaman beton.



Gambar 3.71 Fondasi Utama Model Penyangga Silinder

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada pembuatan fondasi penyangga model Truss, untuk menambah daya rekat antara satu titik simpul fondasi dan titik yang lain, sebaiknya, disatukan juga dengan pengecoran. Dengan demikian, satu sama lain akan menguatkan.



Gambar 3.72 Fondasi Model Truss

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Aktivitas 3.7 Pemasangan Bangunan Sipil

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan mengasah kemampuan berkreasi dan bergotong royong dalam memahami Pemasangan Bangunan Sipil pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok beranggotakan 3 orang.
2. Lakukan simulasi di tempat terbuka di mana PLTB akan dibangun. Lakukan persiapan dengan pembersihan lahan, penggalian, mempersiapkan jalan akses, dan mengamati arah mata angin, dengan bantuan alat anemometer. Tentukan model tiang yang akan digunakan.

3. Lakukan wawancara dengan ahli bangunan di sekitarmu untuk mendaftar kebutuhan alat dan bahan serta kebutuhan tukang yang cakap untuk pembangunan dan pemasangan fondasi model penyangga silinder dengan ukuran 50 cm × 50 cm. Rangkum hasil wawancara menjadi sebuah data rencana anggaran biaya.
4. Buatlah persiapan pembuatan fondasi PLTB dengan plat besi dengan baja bertulang untuk fondasi utama dan jangkar.

2. Pembangunan dan Pemasangan Sistem Mekanik

Ada beberapa persiapan sebelum melakukan pembangunan dan pemasangan mekanik. Persiapan personel, kendaraan transportasi menuju lokasi, penggunaan alat bantu, dan teknik pemasangan sistem mekanik PLTB harus diperhatikan sebagai persiapan pembangunan.

a. Persiapan Personel

Persiapan personel diawali dengan pengujian kesehatan dan kelengkapan peralatan keselamatan kerja sesuai dengan standar untuk bekerja di ketinggian. Kelengkapan peralatan perkakas seperti kunci pas, ring, kunci L, tang dan kelengkapan tali temali, didaftar secara terperinci, dengan jumlah dan kondisi baik kemudian dibawa ke lokasi dengan aman.



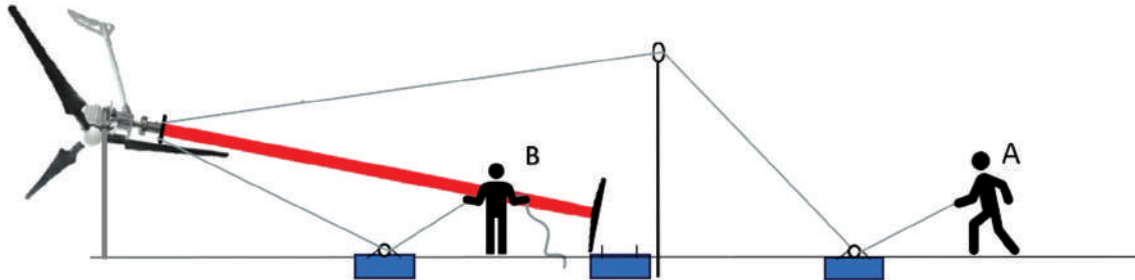
Gambar 3.73 Kotak Peralatan Perkakas

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Setelah sampai di lokasi, sebaiknya membuat sebuah direksi *keet* atau tenda kerja tempat para personel berdiskusi, beristirahat, dan menempatkan perkakas serta mengamati kinerja PLTB saat bekerja.

b. Merakit Turbin Angin

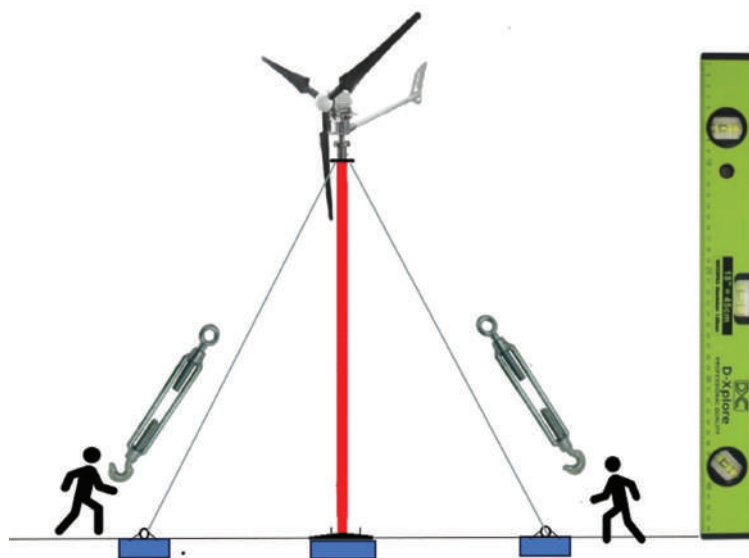
Pekerjaan pembangunan dan pemasangan sistem mekanik selanjutnya ialah merakit *wind* turbin, memposisikan pada tempat yang aman, dan menaikkan penyangga secara gotong royong. Jika penyangga model silinder, dengan tinggi 6 meter; perakitan bilah kipas menempatkan rumah generator, mengoneksikan kabel, dilakukan di bawah. Artinya, semua peralatan mekanik dipasang sampai siap, kemudian baru didirikan ke udara secara bersama-sama, dengan alat bantu dan tali penghubung ke jangkar, dengan alat bantu angkat seperti pada gambar berikut.



Gambar 3.74 Pemasangan Penyangga Model Silinder

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

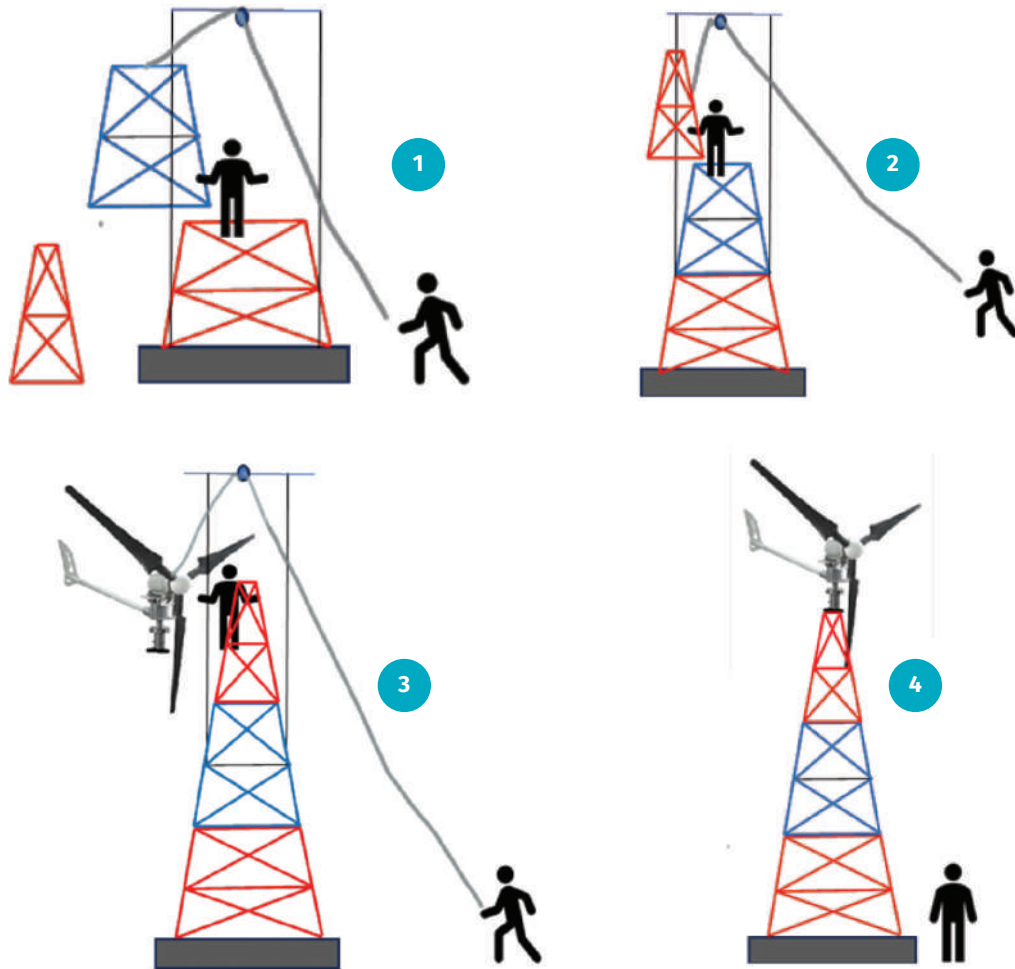
Tali-temali pada bagian atas tiang silinder dihubungkan dengan fondasi jangkar. Personel A menarik salah satu sisi tali penguat. Personel B mengontrol kekencangan ketiga tali. Kemudian, dilakukan penguatan baut pada fondasi utama. Penguatan baut *span*d skrup dibantu dengan *leveler*, untuk menguji sampai pada posisi normal vertikal dan horizontal.



Gambar 3.75 Pemasangan Baut Span dengan *Leveler* Horizontal dan Vertikal

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Untuk penyangga model Truss, kegiatan mendirikan penyangga untuk ketinggian di bawah 8 meter dapat secara langsung seperti penyangga model silinder. Akan tetapi, lebih aman diinstal per bagian menggunakan alat bantu angkat katrol sederhana.



Gambar 3.76 Pemasangan Penyangga Model Truss

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada gambar nomor 1 dan 2, penyangga model Truss dibagi menjadi bagian kecil. Kemudian, kita memasang alat bantu angkat atau katrol. Alat dipasang secara berurutan: bagian bawah, tengah, dan puncak. Setelah tiang berdiri, alat pengangkat dipindah ke bagian atas, untuk mengangkat tubin angin. Keunggulan penyangga model Truss dari segi kekuatan dan keawetan lebih baik, dari segi kemudahan dalam perawatan serta perbaikan PLTB, *access personel*, lebih mudah karena seorang teknisi dapat memanjat melalui tangga penyangga dengan nyaman.

Aktivitas 3.8 Pembangunan dan Pemasangan Sistem Mekanik

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan mengasah kemampuan kreativitas dan gotong royong dalam memahami Pembangunan dan pemasangan Sistem Mekanik pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bentuk kelompok beranggotakan 3 orang.
2. Gambar dan daftar kebutuhan alat dan bahan membuat alat bantu angkat pemasangan penyangga model Silinder.
3. Gambar dan daftar kebutuhan alat dan bahan membuat alat bantu angkat pemasangan penyangga model Truss.
4. Pasanglah PLTB yang tersedia di sekolahmu dan lakukan pengujian menggunakan *leveler* pada norma vertikal dan horizontal.
5. Amati dan buatlah resume pemasangan PLTB dengan menonton video dengan link berikut <https://buku.kemdikbud.go.id/s/jrj8vx> atau dengan scan QR di samping ini.



3. Pembangunan dan Pemasangan Sistem Elektrik

Persiapan sebelum melakukan pembangunan dan pemasangan sistem elektrik di antaranya melengkapi komponen instalasi, peralatan perkakas, dan alat ukur listrik. Bor listrik *cordless* berguna membantu saat membuat lubang saat memasang pengkabelan, keamanan, dan monitoring. Tang ampere untuk mengukur arus listrik. AVO meter untuk menguji arus, volt, ohm serta instalasi kelistrikan lainnya.



Bor Listrik Cordless



Tang Ampere

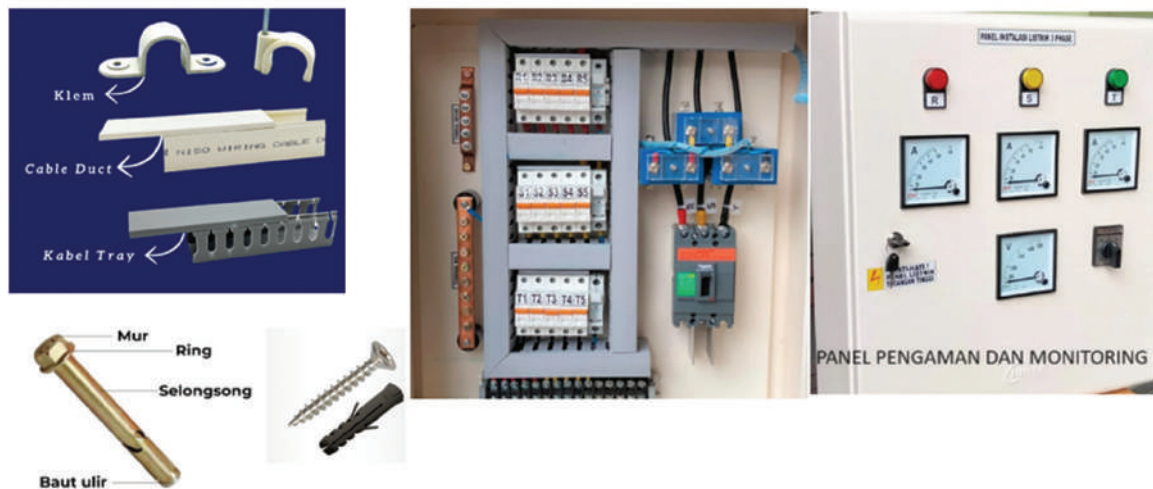


AVO Meter

Gambar 3.77 Perkakas dan Alat Ukur

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Kita juga memerlukan komponen pelengkap instalasi seperti kabel *duck*, baut *fisher*, dan *dynabolr*. Penggunaan kabel *duck* untuk mengamankan kabel listrik dan mempermudah perbaikan dan penambahan kabel jika suatu saat ada penambahan dan *upgrade* peralatan.

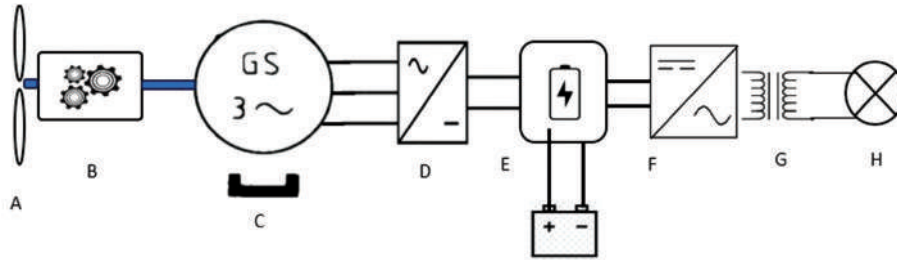


Gambar 3.78 Kabel Duck, Baut Dynabolt, Fisher, dan Panel Pengaman dan Monitoring

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Baut *fisher* bermanfaat untuk menempelkan komponen seperti kabel *duck* pada tembok atau papan. *Dyanabolr* menempelkan kotak panel pada tembok atau papan sehingga dapat menahan beban panel dengan aman.

Selanjutnya, kita akan membaca bagan gambar, kemudian melengkapi instalasi kelistrikan dari PLTB kapasitas 1.500 watt.



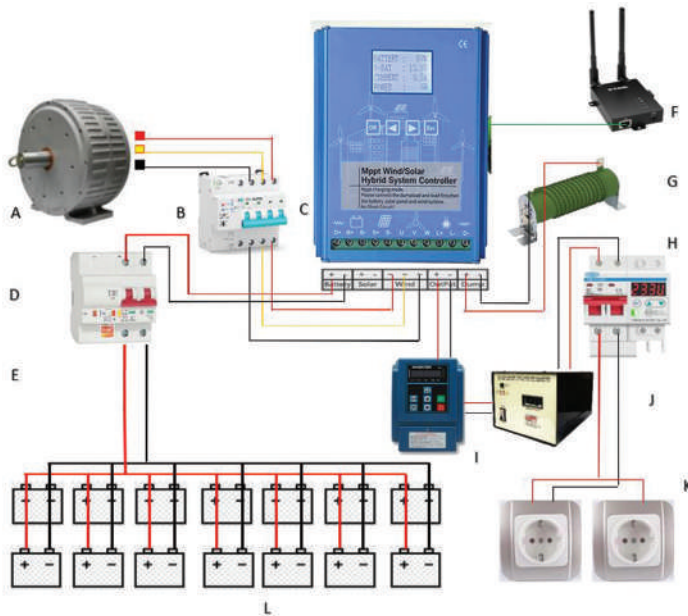
Keterangan:

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| A : Bilah Kipas | B : Gearbox |
| C : Generator Permanen Magnet 3 phase | D : Rectifier tiga phase |
| E : Sistem Charge dan Baterai | F : Inverter DC to AC |
| G : Penstabil Tegangan Transformator | H : Beban listrik |

Gambar 3.79 Bagan Kelistrikan Sistem PLTB

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Dari bagan di atas, kita detailkan sistem pengkabelan PLTB kapasitas 1.500 watt. Pengkabelan menggunakan warna standar SNI, dengan kelengkapan indikator alat ukur dan monitoring hasil input dan output.



Keterangan:

- A = Generator Jenis Permanent Magnet Generator 3.000 Watt,
- B = Miniature Circuit Breaker (MCB) AC dengan Koneksi Wifi
- C = Rectifier, Control Charger Baterai, Ampere Meter, Volt Meter, Dumpload
- D = Miniature Circuit Breaker (MCB) DC dengan Koneksi Wifi
- E = Sistem Baterai 12 Volt,
- F = Modem 4 G untuk Terkoneksi dengan Internet
- G = Dumpload untuk Membuang Energi yang Berlebih,
- H = Miniature Circuit Breaker (MCB) AC Wifi menuju Konsumen
- I = Transformator dengan Sistem Automatic Voltage Regulator
- J = Stop Kontak Terminal Koneksi ke Peralatan Listrik Rumah Tangga 220 Volt

Gambar 3.80 Sistem Pengkabelan PLTB 1.500 Watt

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Aktivitas 3.9 Pembangunan dan pemasangan Sistem Kelistrikan

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan mengasah kemampuan gotong royong dalam memahami Pembangunan dan Pemasangan Sistem Kelistrikan pada PLTB Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

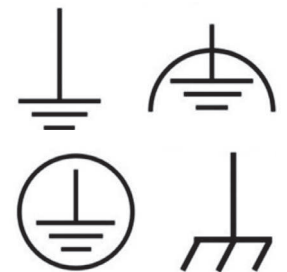
1. Bentuk kelompok beranggotakan 3 orang.
2. Gambar diagram sistem kelistrikan PLTB kapasitas 1.500 watt. Selanjutnya, daftar alat dan bahan yang dibutuhkan dilengkapi dengan rencana anggaran biaya sehingga menjadi sebuah proposal yang layak jual.
3. Lakukan instalasi sistem kelistrikan sesuai gambar kerja seperti pada Gambar 3.78 atau gambar kerja lain yang lebih sederhana. Lakukan pengujian kinerja, catat indikator baterai cecker, volt, ampere pada jalur input dan jalur *output*. Evaluasi kinerja sistem kelistrikan saat diberi beban dan beban tidak ada.

4. Pembangunan dan Pemasangan Sistem Proteksi

Peralatan proteksi bermanfaat melindungi PLTB dari lonjakan tegangan yang disebabkan oleh petir atau gangguan lainnya. Peralatan sistem proteksi yang kita akan pasang ialah *grounding*, arrester, dan Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB).

a. *Grounding*

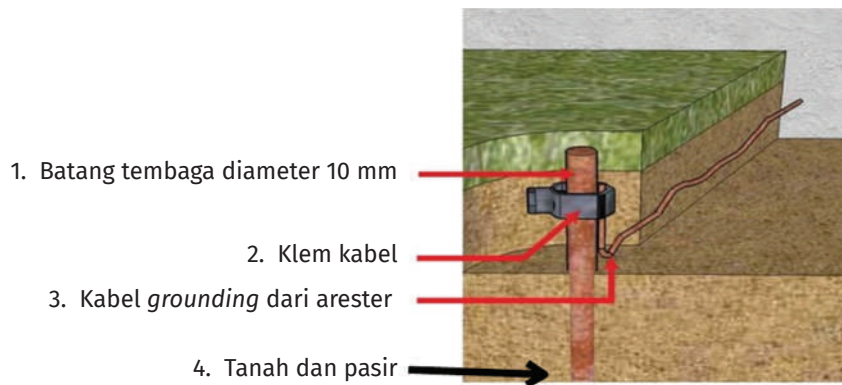
Pemasangan *grounding* harus dilakukan sesuai dengan standar nasional atau internasional yang berlaku, seperti National Electrical Code (NEC) atau International Electrotechnical Commission (IEC). Pada sistem kelistrikan khusus seperti sistem tenaga surya, turbin angin, atau generator, *grounding* harus dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik khusus dari sistem tersebut. Misalnya, *grounding* pada turbin angin harus memperhitungkan potensi tegangan induksi dari petir. Resistansi *grounding* harus cukup rendah untuk memastikan bahwa arus gangguan dapat dengan aman dialirkan ke tanah. Besarnya resistansi *grounding* di bawah 5 ohm dianggap baik. Logo dan tanda *grounding* ada beberapa model.



Gambar 3.81 Logo dan Tanda *Grounding*

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek (2024)*

Bagian dari sistem *grounding* ialah sebagai berikut.

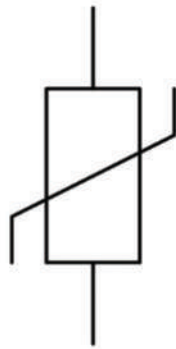


Gambar 3.82 Bagian Sistem *Grounding* dan Pemasangannya
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

b. Arrester



Contoh salah satu bentuk (*surge protection devices*) SPD milik pabrikan Sc'neld'r



Simbol universal SPD berdasarkan (*International Electrotechnical Commission*) IEC

Gambar 3.83 Simbol Komponen Arrester
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Arrester atau sering disebut *surge arrester* atau *lightning arrester*, ialah perangkat yang digunakan untuk melindungi sistem kelistrikan dari lonjakan tegangan atau arus yang disebabkan oleh petir atau gangguan lainnya. Fungsi arrester secara khusus ada dua. Pertama, proteksi terhadap petir dengan cara menyalurkan arus petir langsung ke tanah sehingga mencegah kerusakan pada peralatan listrik. Kedua, proteksi terhadap lonjakan tegangan dengan cara menyerap lonjakan tegangan yang disebabkan oleh *switching* atau gangguan lainnya dalam jaringan listrik.

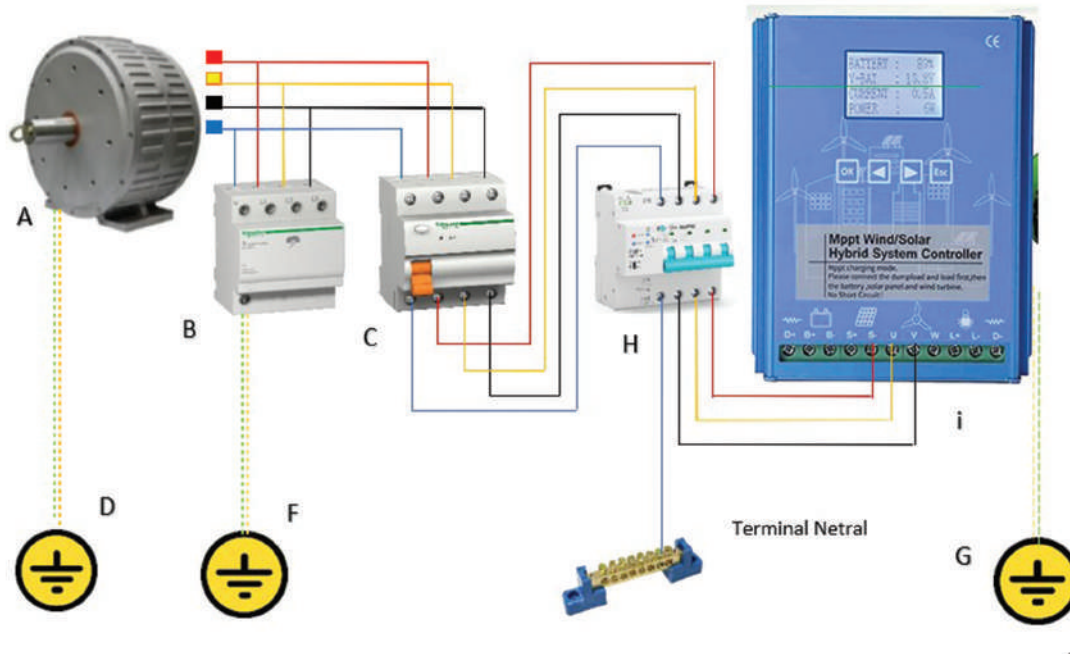
Ada beberapa jenis-jenis *arrester*.

- 1) *Surge arrester* (penangkal lonjakan): melindungi peralatan dari lonjakan tegangan yang singkat.
- 2) *Lightning arrester* (penangkal petir): melindungi instalasi dari arus petir yang besar.
- 3) *Station class arrester* khusus digunakan di instalasi besar seperti pembangkit listrik dan gardu induk.
- 4) *Distribution class arrester* banyak digunakan di jaringan distribusi listrik.
- 5) *Secondary arrester*: melindungi peralatan di rumah atau bangunan komersial.

c. Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB)

Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB) ialah perangkat perlindungan yang dirancang untuk memutus aliran listrik saat terjadi kebocoran arus ke tanah. ELCB sering digunakan untuk melindungi manusia dari sengatan listrik dan mencegah kerusakan peralatan akibat kebocoran arus. ELCB ada dua jenis.

- 1) *Voltage ELCB* (vELCB): Bekerja dengan mendeteksi tegangan pada *grounding*. Jika ada kebocoran arus yang menyebabkan tegangan meningkat, ELCB akan memutus aliran listrik.
- 2) *Current ELCB* (cELCB): Juga dikenal sebagai RCD (*Residual Current Device*) atau RCCB (*Residual Current Circuit Breaker*). Bekerja dengan mendeteksi perbedaan arus antara konduktor fase dan netral. Jika ada perbedaan arus yang melebihi ambang batas tertentu, cELCB akan memutus aliran listrik.



Keterangan ambar

- A = Generator PMSG dengan *output* 3 phase
- B = *Lightning arrester* adalah suatu alat pelindung bagi peralatan sistem tenaga listrik terhadap surja petir (*surge*)
- C = ELCB (*Earth-Leakage Circuit Breaker*) melindungi manusia dari sengatan listrik.
- D = *Grounding* adalah sistem pentanahan yang berfungsi untuk meniadakan beda potensial sehingga jika ada kebocoran tegangan atau arus akan langsung dibuang ke bumi.
- E = *Pertanahan Arester*

Gambar 3.84 Pengkabelan Arester, ELCB dan *Grounding* pada Sistem Kelistrikan PLTB

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Aktivitas 3.10 Pembangunan dan Pemasangan Sistem Proteksi

Aktivitas Kelompok dan Individu

Tujuan:

Melalui aktivitas ini, kamu akan dapat membuat gambar rancang bangun pemasangan sistem kelistrikan pada Sistem Proteksi pada pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Kecil.

Langkah-Langkah:

1. Bekerja secara mandiri. Gambarlah rancang bangun pemasangan sistem kelistrikan dan proteksi dengan standar sistem pengkabelan SNI (Standar Nasional Indonesia).
2. Bekerja secara berkelompok. Buatlah rencana anggaran biaya sistem kelistrikan dan proteksi dilengkapi dengan daftar kebutuhan, alat, bahan spesifikasi, jumlah, dan harga satuan.
3. Bekerja secara mandiri. Lakukan simulasi pemasangan sistem kelistrikan di papan simulasi instalasi listrik dengan menerapkan sistem keamanan kerja dengan panduan gambar rancang bangun pemasangan sistem kelistrikan yang kamu gambar dan beban tidak ada.

Uji Kompetensi Pengetahuan

Kerjakanlah soal-soal berikut.

1. Dalam sebuah proyek PLTB, seorang teknisi mendapati bahwa efisiensi turbin menurun drastis pada kecepatan angin yang sangat tinggi. Apa tindakan terbaik yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin tersebut?
 - A. Meningkatkan jumlah bilah turbin untuk menangkap lebih banyak angin.
 - B. Menggunakan sistem kontrol *pitch* bilah untuk mengatur sudut bilah.
 - C. Menambahkan generator tambahan pada sistem turbin.
 - D. Mengurangi tinggi menara turbin untuk menghindari kecepatan angin tinggi.
 - E. Mengganti turbin angin dengan panel surya untuk menyesuaikan dengan kondisi cuaca
2. Dalam desain sistem mekanik turbin angin, *gearbox* memainkan peran penting dalam meningkatkan kecepatan putaran dari rotor ke generator. Namun, *gearbox* juga dapat menjadi sumber kerusakan mekanis. Bagaimana cara terbaik untuk meminimalkan risiko kegagalan *gearbox*?
 - A. Menggunakan oli pelumas dengan viskositas tinggi.
 - B. Mengganti *gearbox* dengan *direct-drive system* yang tidak memerlukan *gearbox*.
 - C. Menambahkan lebih banyak baling-baling pada rotor untuk mengurangi beban *gearbox*.
 - D. Mengurangi kecepatan putaran rotor untuk mengurangi beban pada *gearbox*.
 - E. Menggunakan material logam yang lebih keras untuk komponen *gearbox*.
3. Untuk meningkatkan keandalan turbin angin, teknisi merancang sistem pemantauan kondisi komponen mekanik seperti *gearbox* dan bantalan. Sistem ini menggunakan sensor untuk mendeteksi getaran dan suhu. Mengapa parameter getaran dan suhu penting untuk dipantau, dan apa langkah yang dapat diambil jika ada anomali?
 - A. Getaran dan suhu memengaruhi efisiensi; jika terjadi anomali, turbin harus dihentikan secara otomatis.

- B. Getaran dan suhu menunjukkan tingkat kerusakan komponen; jika terdeteksi anomali, perlu dilakukan perawatan atau penggantian komponen.
 - C. Getaran dan suhu memengaruhi konsumsi daya generator; jika terdeteksi anomali, *output* energi harus ditingkatkan.
 - D. Getaran dan suhu memengaruhi arah turbin; jika terdeteksi anomali, sudut bilah harus diubah.
 - E. Getaran dan suhu memengaruhi distribusi beban; jika terdeteksi anomali, beban harus dialihkan ke komponen lain.
4. Sebuah sistem turbin angin menghasilkan daya 5 kW dengan tegangan keluaran 48V DC. Sistem ini menggunakan baterai berkapasitas 12 V, 200 Ah untuk menyimpan energi yang dihasilkan. Berapa banyak baterai yang diperlukan untuk menyimpan total daya selama 10 jam operasi penuh?
- A. 8 baterai
 - B. 10 baterai
 - C. 12 baterai
 - D. 15 baterai
 - E. 20 baterai
5. Sebuah turbin angin menghasilkan daya listrik sebesar 2 MW pada kecepatan angin 12 m/s dengan efisiensi konversi 40%. Jika kecepatan angin turun menjadi 9 m/s dan efisiensi konversi tetap sama, berapa daya listrik yang akan dihasilkan oleh turbin tersebut? (Diasumsikan daya berbanding lurus dengan kubus kecepatan angin)
- A. 0,75 MW
 - B. 1,125 MW
 - C. 1,5 MW
 - D. 1,8 MW
 - E. 2 MW

Uji Kompetensi Praktikum

Perancangan dan Pemasangan Sistem Pengkabelan

Tujuan: Menguji kemampuan peserta dalam merancang dan memasang sistem pengkabelan yang aman dan efisien untuk sistem turbin angin skala kecil.

Instruksi:

- a. Rancang diagram pengkabelan untuk sistem turbin angin skala kecil yang akan terhubung ke baterai penyimpanan dan inverter.
- b. Pasang pengkabelan sesuai dengan diagram yang dibuat, dan pastikan ada perlindungan sekering atau pemutus sirkuuit yang memadai.
- c. Setelah selesai, lakukan pengujian untuk memastikan tidak ada koneksi pendek atau arus bocor.

Pertanyaan:

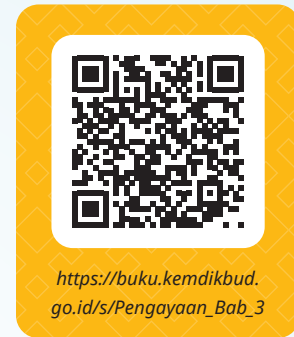
1. Jelaskan bagaimana cara menentukan ukuran kabel yang tepat untuk turbin angin berdaya 500 W dengan tegangan keluaran 12 V. Berikan perhitungannya.
2. Bagaimana cara mengidentifikasi potensi risiko yang disebabkan oleh pengkabelan yang salah dan bagaimana mencegahnya?

Analisis:

- 🔍 Peserta harus menghitung ukuran kabel berdasarkan arus yang dihasilkan oleh turbin dan mempertimbangkan faktor panjang kabel untuk meminimalkan kerugian daya.

Pengayaan

Materi pengayaan bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai PLTB. Berikut ini materi pengayaan yang dapat membantu memperluas wawasan kamu dalam membangun sebuah generator putaran rendah yang dapat dipasang pada PLTB, dengan menscan kode QR di samping ini.



Refleksi

1. Bagaimana proses pembelajaran Perancangan, Pembangunan dan Instalasi PLTB?
2. Apa yang membuatmu tertarik saat belajar Perancangan, Pembangunan, dan Instalasi PLTB
3. Apa hal yang paling penting dan berkesan pada bab Teknik Energi Angin?
4. Apakah yang ingin kamu pelajari lebih lanjut berkaitan Perancangan, Pembangunan dan Instalasi PLTB?
5. Apa yang perlu kita perbaiki agar pembelajaran Perancangan, Pembangunan dan Instalasi PLTB berikutnya dapat lebih menarik?
6. Bagaimanakah model usaha di bidang PLTB di masa depan?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA, 2024

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin
untuk SMK/MAK Kelas XI

Penulis: Zainul M. Pulungan, Feviana Idarrani, dan Amin Wahyono

ISBN: 978-634-00-0046-7



Bagaimanakah pengoperasian sistem hibrida
PV-Diesel pada kondisi beban rendah?

Bab

4

Teknik Energi Hibrida

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan pemasangan sistem energi hibrida secara bergotong royong dan kreatif.

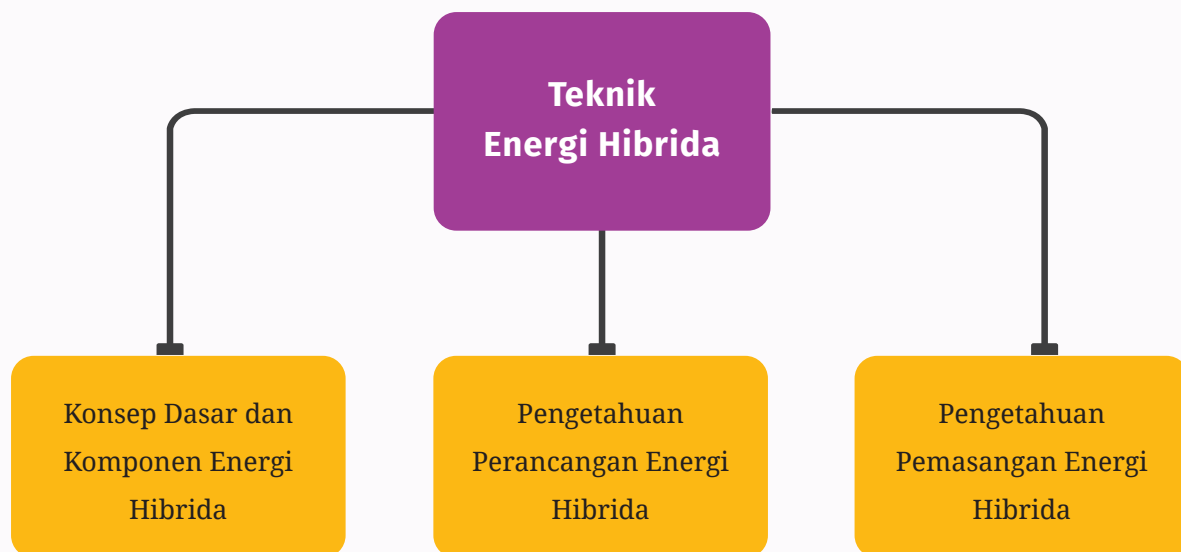
Kata Kunci

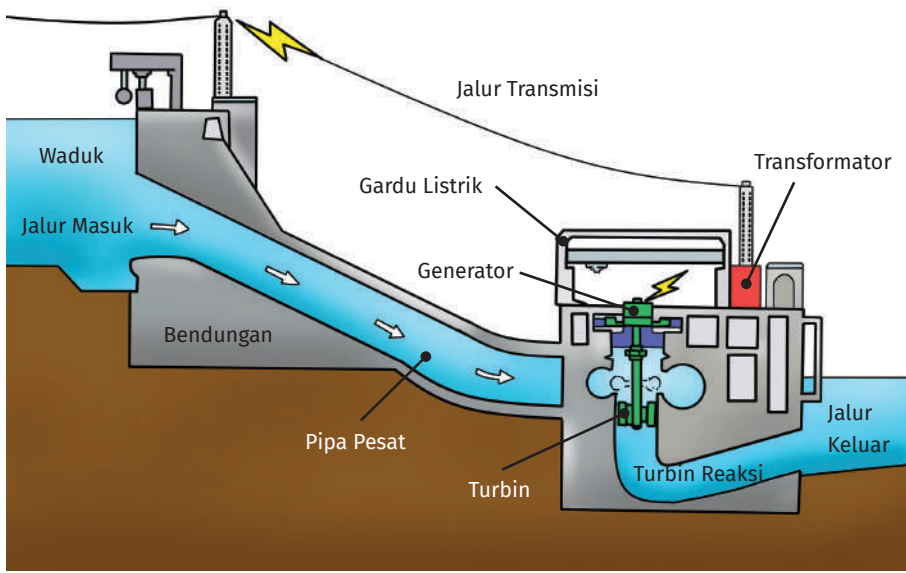
🔗 hibrida

🔗 *electrical manajemen system*

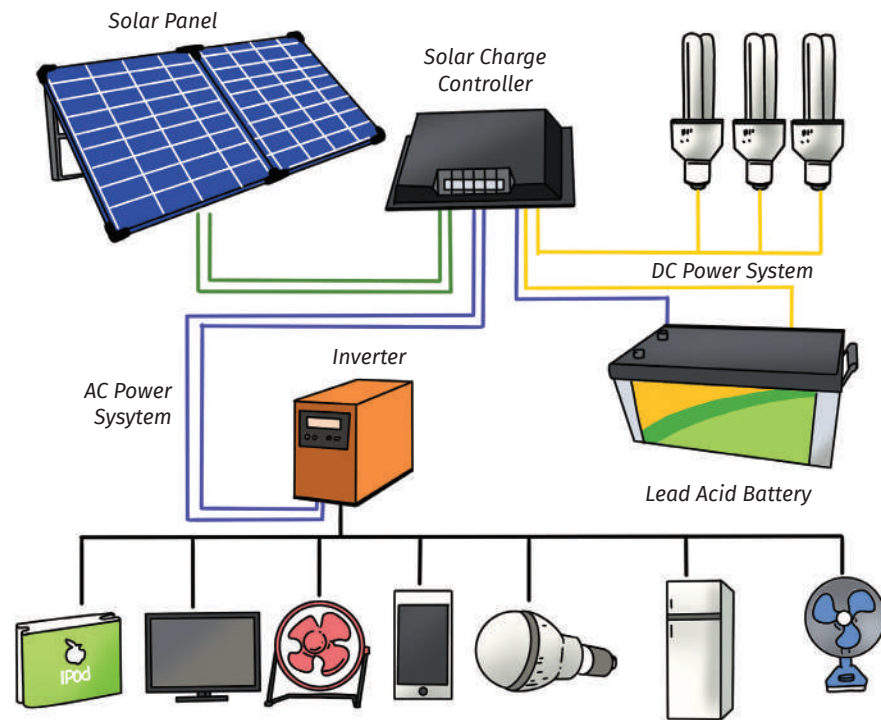
🔗 sinkronisasi

Peta Materi

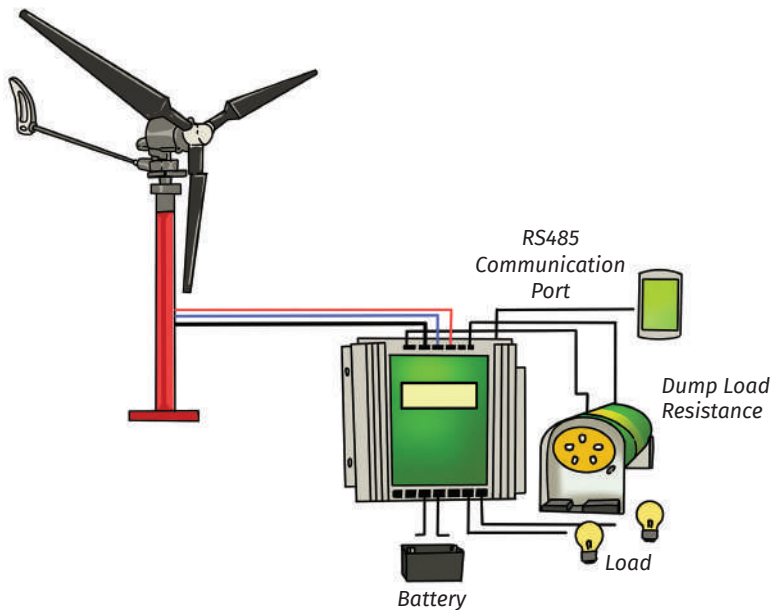




Bagaimana Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) bekerja?



Mengapa PLTS pada malam hari tidak bekerja?



Kapankah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) bekerja?

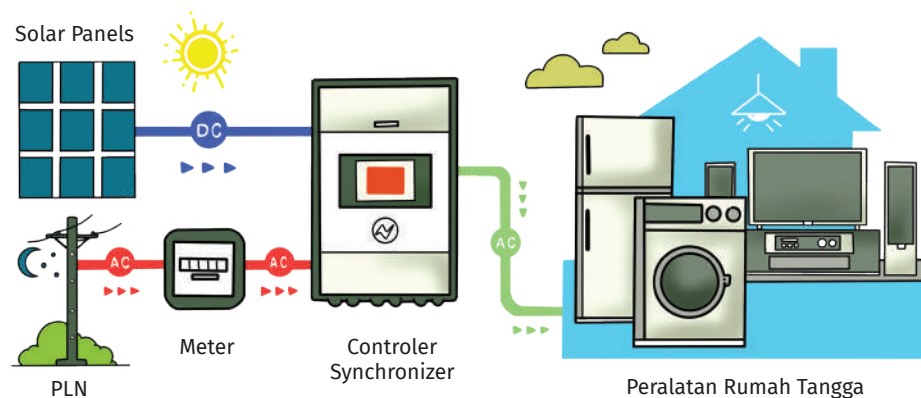
A. Konsep Dasar dan Komponen Energi Hibrida

Konsep dasar energi hibrida (*hybrid*) melibatkan penggabungan beberapa sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan tenaga angin, untuk menyediakan pasokan listrik yang lebih stabil dan efisien. Dengan memanfaatkan potensi energi matahari dan angin secara bersamaan, sistem ini mampu mengatasi fluktuasi produksi dari setiap sumber energi. Komponen utama dari sistem energi hibrida mencakup panel surya untuk menangkap energi matahari, turbin angin untuk memanfaatkan energi angin, serta baterai penyimpanan untuk menyimpan energi yang dihasilkan dan memastikan pasokan listrik yang konsisten. Integrasi yang cermat dari komponen-komponen ini memastikan ketersediaan energi yang berkelanjutan, bahkan di lokasi terpencil dengan akses jaringan listrik terbatas.

1. Konsep Energi Hibrida

Konsep energi hibrida merujuk pada sistem yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk menghasilkan listrik atau memenuhi kebutuhan energi lainnya. Tujuan utama dari konsep ini ialah untuk memanfaatkan kelebihan dari setiap sumber energi, mengurangi kelemahannya, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Mengapa kita perlu mengembangkan energi hibrida? Karena keandalan dan stabilitas energi. Sistem hibrida memungkinkan penggunaan beberapa sumber energi, seperti tenaga surya (PLTS), tenaga angin (PLTB), dan generator set atau pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Beberapa sistem juga menggabungkan energi dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan PLTS. Dengan menggabungkan berbagai sumber energi, sistem ini dapat memberikan pasokan energi yang lebih stabil dan andal, terutama ketika salah satu sumber energi tidak tersedia, seperti saat tidak ada sinar matahari pada malam hari atau angin tidak bertiup.



Gambar 4.1 Energi Hibrida PLN dan PLTS untuk Rumah Tangga

Sumber: BTI Energy (2024)

Alasan kedua untuk mengembangkan energi hibrida ialah untuk mengurangi kebergantungan pada satu sumber energi sehingga mengurangi risiko kekurangan energi dan fluktuasi harga yang dapat terjadi jika hanya mengandalkan satu sumber. Dengan menggunakan energi hibrida, kita dapat mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi. Misalnya, generator berbahan bakar fosil dapat digunakan sebagai cadangan hanya ketika sumber energi terbarukan seperti surya atau angin tidak mencukupi sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi.

Sebuah penelitian telah dilakukan dengan fokus pada peningkatan penggunaan sistem energi terbarukan hibrida untuk menyediakan listrik di daerah terpencil, terutama di mana pembangunan jaringan kabel listrik PLN dianggap terlalu mahal. Penelitian ini menyajikan analisis tekno-ekonomi dari sistem hibrida yang menggabungkan energi surya dan angin untuk menyuplai daya ke *base transceiver station* (BTS) di daerah terpencil di Nigeria. Studi ini menggunakan perangkat lunak HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) untuk semua pemodelan, simulasi, dan evaluasi tekno-ekonomi yang diperlukan.

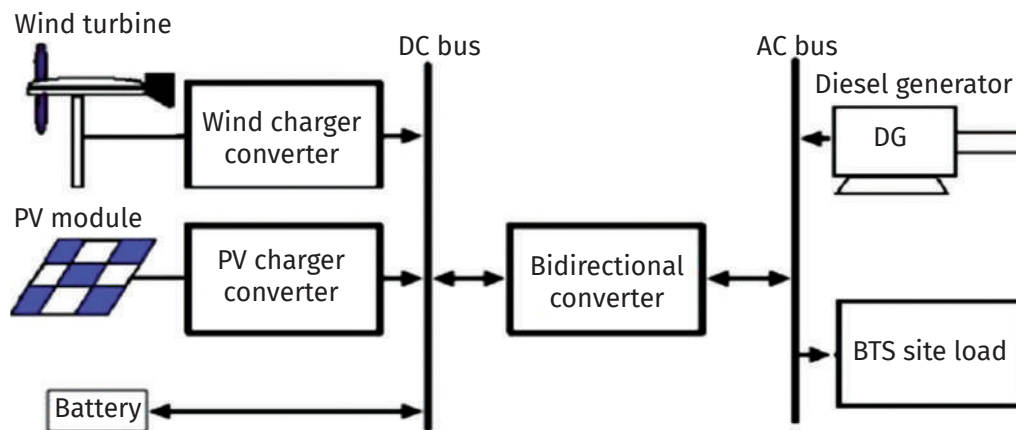


Gambar 4.2 Off-Grid Hybrid PV-Wind-Diesel untuk Persediaan Listrik pada Sebuah Base Station
Sumber: Ikram (2022)

Dua konfigurasi sistem optimal—PV (fotovoltaik surya)—diesel—baterai dan PV—angin—diesel—baterai—dibandingkan dengan sistem generator diesel (DG) mandiri konvensional. Analisis menemukan bahwa opsi yang paling layak secara ekonomi ialah konfigurasi yang terdiri atas *array* PV 10 kW, generator diesel 5,5 kW, dan 64 unit baterai Trojan L16P. Konfigurasi ini memiliki total biaya sekarang bersih sebesar \$ 69.811 dan biaya listrik per unit sebesar \$ 0,409.

Studi ini juga mencakup analisis sensitivitas untuk menilai dampak variasi yang mungkin terjadi pada radiasi matahari, kecepatan angin, dan harga diesel terhadap konfigurasi sistem optimal. Selain itu, studi ini menyoroti manfaat lingkungan dari sistem hibrida dibandingkan dengan sistem diesel mandiri konvensional, menunjukkan bahwa sistem PV–diesel–baterai hibrida dapat mengurangi emisi CO₂ sekitar 16,4 ton per tahun dibandingkan dengan sistem diesel generator mandiri.

Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa sistem energi terbarukan hibrida tidak hanya menawarkan keuntungan ekonomi di daerah terpencil. Sistem ini juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan dengan mengurangi emisi gas rumah kaca (Ikram, 2022).

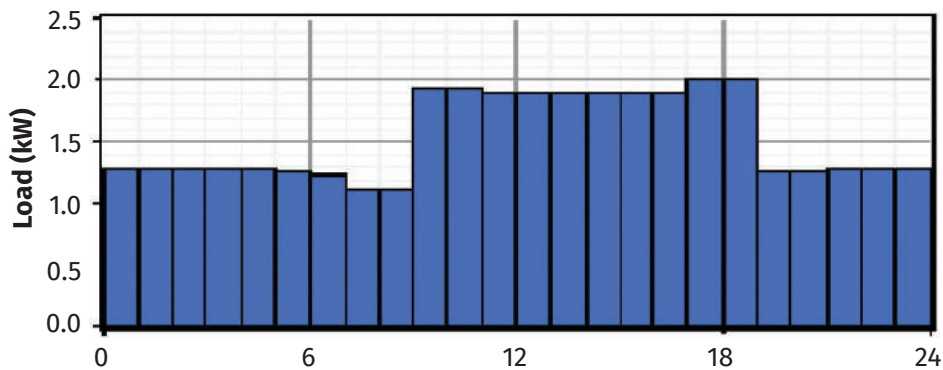


Gambar 4.3 Konfigurasi Sistem Penyimpanan Listrik Hibrida PLTS-PLTD

Sumber: Ikram (2022)

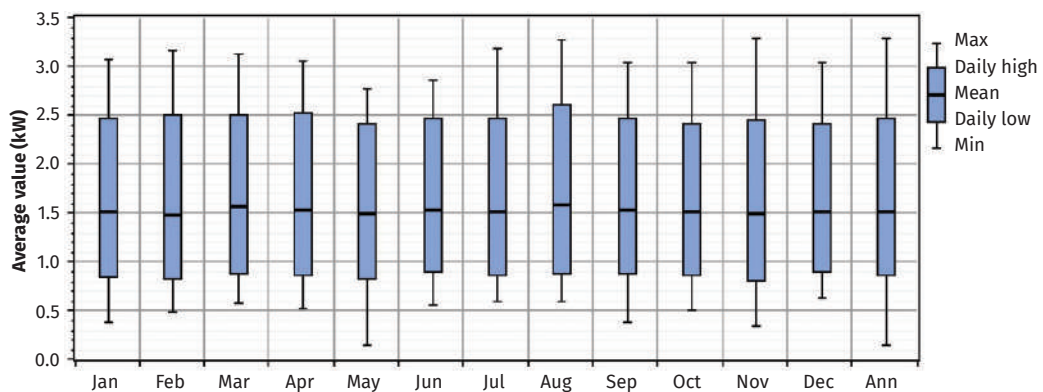
Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menghasilkan listrik AC yang fluktuatif di konversi menjadi DC, kemudian terhubung dengan terminal *DC bus*. PLTS *Photovoltaic* menghasilkan listrik DC dihubungkan dengan *DC bus* yang terhubung dengan *bidirectional converter*. *Bidirectional converter* ialah perangkat elektronik yang dapat mengonversi energi listrik dalam dua arah. Ini berarti bahwa konverter ini dapat beroperasi dalam moda dua arah, mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dan sebaliknya, atau mengonversi antara dua level tegangan DC (*DC-DC conversion*) yang terhubung *AC bus*, kemudian ke *BTS site load*. *BTS site load* ialah peralatan telekomunikasi seperti komputer server, modem, pendingin ruangan, dan penguat sinyal. Saat energi angin atau matahari tidak tersedia, pembangkit listrik tenaga diesel PLTD berjalan untuk terhubung ke *AC bus* dan juga ke *bidirectional converter* untuk mengisi penyimpanan listrik baterai.

Pada manajemen beban, penelitian yang dilakukan oleh Elbaset & Ata (2021) mengklasifikasikan beban menjadi tiga kategori berdasarkan tingkat penggunaan, yaitu: beban jam rendah, beban jam sedang, dan beban jam sibuk. Berdasarkan kategori pertama, diasumsikan bahwa pelanggan hanya memanfaatkan 10% dari total beban BTS, yang biasanya terjadi antara pukul 12 AM hingga 6 AM. Pada kategori kedua, dianggap 30% penggunaan, yang terjadi antara pukul 7 AM hingga 10 AM dan antara pukul 6 PM hingga 11 PM. Akhirnya, kategori ketiga dianggap 50% dan biasanya terjadi selama jam kerja pada siang hari (10 AM hingga 6 PM). Klasifikasi beban dapat kita lihat pada gambar berikut.



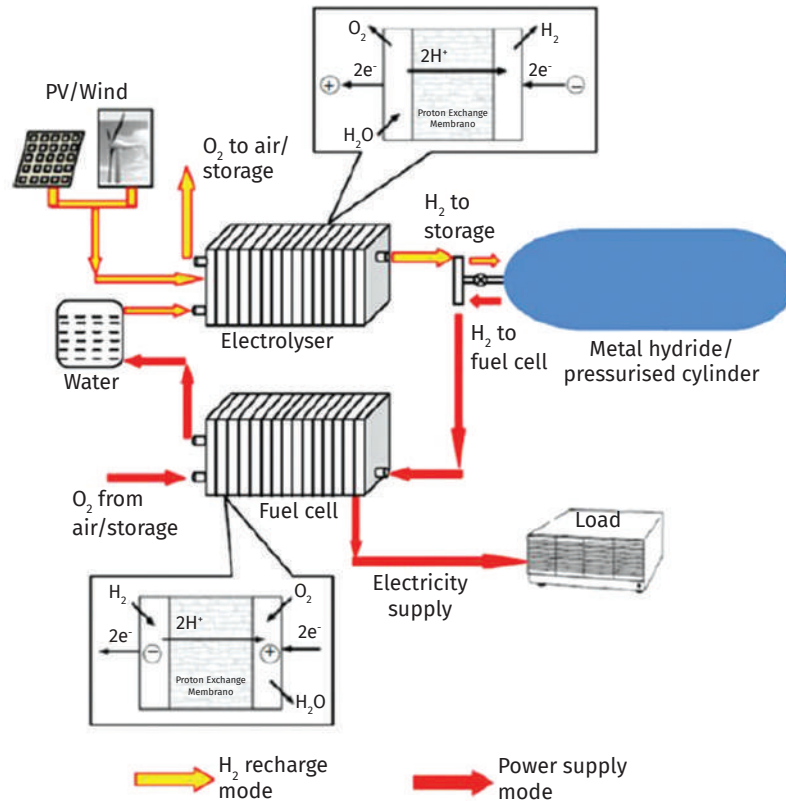
Gambar 4.4 Beban Harian Penggunaan Energi Hibrida PLTS-PLTB-PLTD
 Sumber: Elbaset & Ata (2021)

Perlu juga dicatat bahwa AC hanya dianggap beroperasi selama jam kerja (jam matahari bersinar) pada hari ketika permintaan daya tinggi diharapkan dari peralatan BTS. Sementara, beban tambahan (penerangan) hanya beroperasi pada malam hari (6 PM hingga 6 AM). Berdasarkan variasi ini, variabilitas acak dari hari ke hari sebesar 5% dan variabilitas acak dari jam ke jam sebesar 10%.



Gambar 4.5 Grafik Konsumsi Energi Hibrida Setiap Bulan
 Sumber: Elbaset & Ata (2021)

Dari gambar ini, dapat diamati bahwa beban maksimum berkisar antara 2,8 kW hingga 3,6 kW per bulan, dengan beban terendah pada bulan Mei dan tertinggi pada bulan Agustus. Puncak harian terlihat bervariasi dari 2,4 kW hingga 2,7 kW, sedangkan beban rata-rata hampir sama di semua bulan.



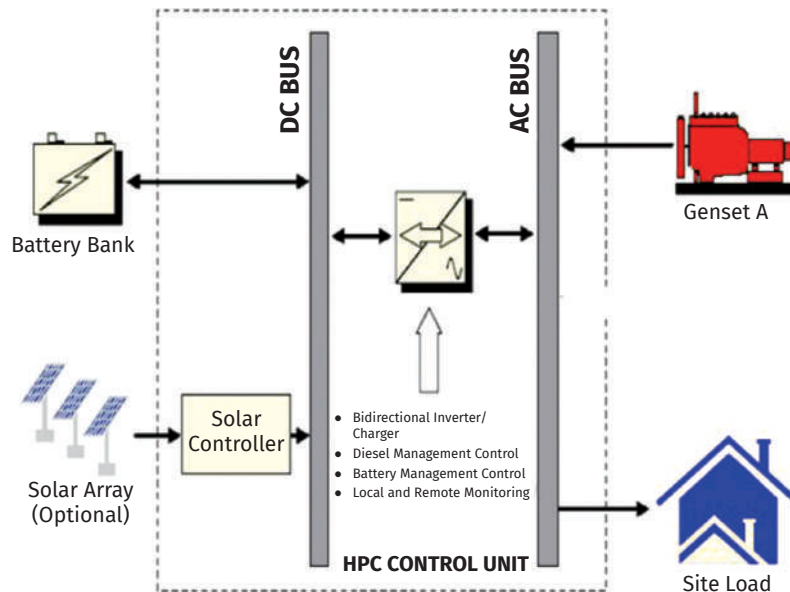
Gambar 4.6 Energi Hibrida PLTS-PLTB dengan Sistem Penyimpanan Fuel Cell
 Sumber: Elbaset & Ata (2021)

Pada Gambar 4.6, sistem kerja *fuel cell* melibatkan proses elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar, biasanya hidrogen, menjadi listrik. Proses ini dimulai ketika hidrogen masuk ke anode, di mana katalis memecah molekul hidrogen menjadi proton dan elektron. Proton melewati elektrolit menuju katode, sementara elektron dipaksa mengalir melalui sirkuit eksternal, menciptakan arus listrik yang dapat digunakan. Di katode, proton dan elektron bergabung dengan oksigen yang masuk untuk membentuk air sebagai satu-satunya produk sampingan. Karena *fuel cell* tidak melalui proses pembakaran, mereka beroperasi dengan efisiensi tinggi dan menghasilkan emisi yang sangat rendah.

Dengan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin konvensional dan operasi yang hampir tanpa kebisingan, *fuel cell* menawarkan solusi yang berkelanjutan untuk berbagai aplikasi, mulai dari kendaraan listrik hingga pembangkit listrik skala besar. Ada beberapa jenis energi *fuel cell* di antaranya seperti berikut.

- 🔦 *Polymer Electrolyte Membrane FC (PEMFC),*
- 🔦 *Molten Carbonate FC (MCFC) and Solid Oxide FC (SOFC),*
- 🔦 *Phosphoric Acid Electrolyte FC (PAFC) and Alkaline FC (AFC),*
- 🔦 *Direct Methanol FC (DMFC),*
- 🔦 *Protonic Ceramic Fuel Cell (PCFC),* serta
- 🔦 *Microbial Fuel Cell (MFC) (Elbaset & Ata, 2021).*

Sistem hibrida PV-Diesel pengoperasian dapat dibagi menjadi 3 kondisi beban, yaitu beban rendah, beban sedang, dan beban puncak. Dalam kondisi beban rendah, generator diesel mati dan energi beban disuplai oleh energi PV melalui inverter. Generator diesel akan beroperasi pada pembebanan optimal untuk memberi listrik beban, dan akan mengisi baterai jika ada energi berlebih pada beban sedang. Pada kondisi beban puncak, generator diesel berjalan pada pembebanan optimal secara paralel dengan inverter. Inverter mengubah daya DC dari baterai menjadi daya AC.



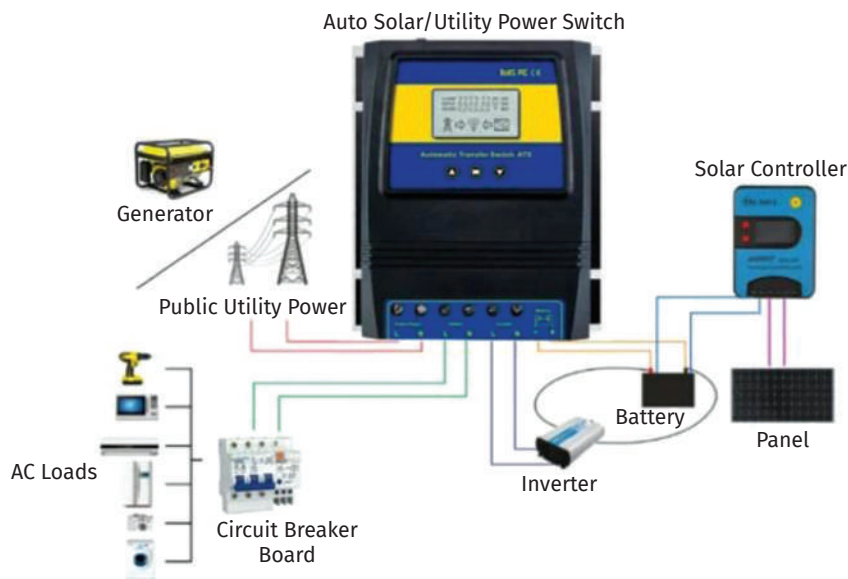
Gambar 4.7 Sumber Energi Hibrida PLTS dan PLTD

Sumber: knepublishing.com (2020)

Ada dua mode pengoperasian, yaitu mode manual dan otomatis. Mode pengoperasian otomatis PLTD dilengkapi dengan sistem *on-off* otomatis. Adapun pada mode manual, operator selalu memantau pada tiga kondisi beban, kemudian melakukan pekerjaan menghidupkan dan mematikan PLTD secara manual.

PLT-hibrida dapat sinkron apabila memenuhi tiga syarat utama sinkronisasi, yaitu tegangan, frekuensi, dan sudut *phase* berada pada nilai yang sama. Proses sinkronisasi PLT Hibrida dapat dilakukan secara manual dan otomatis. Proses sinkronisasi secara manual dilakukan oleh operator pada saat pembangkit listrik utama sudah tidak mampu menyediakan energi.

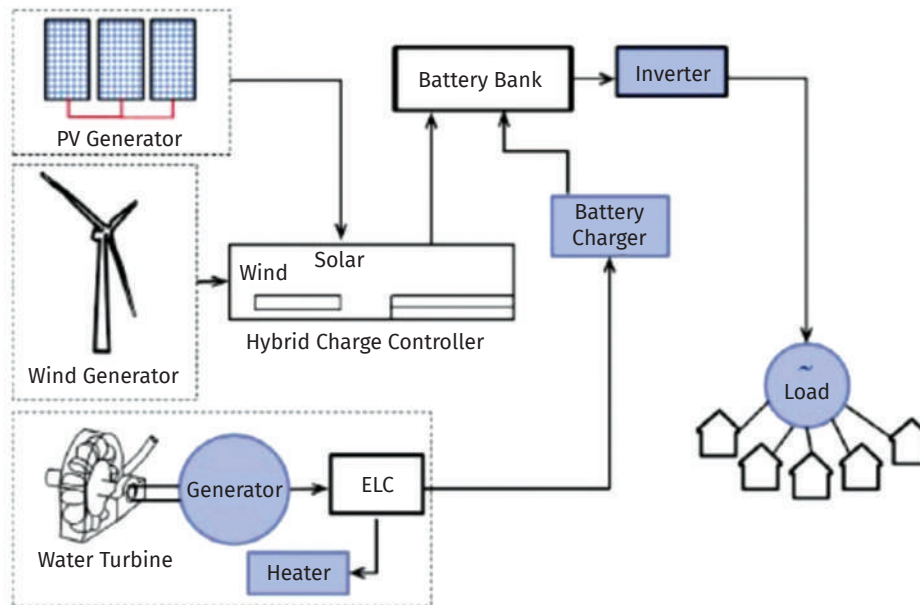
Pada proses peralihan daya, saat beban rendah, beban sedang, dan beban puncak, energi hibrida PLTS dan PLTD melakukan proses sinkronisasi otomatis. Proses ini dilakukan dengan bantuan sistem kontrol peralihan sumber energi yang bernama *Auto Transfer Switch* (ATS) dengan beberapa model dapat diprogram dan manual.



Gambar 4.8 Model ATS yang Dapat Diprogram
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Sinkronisasi antara PLTD dan PLTS melibatkan penggabungan kedua sumber energi agar dapat bekerja bersama dalam satu sistem. Untuk mencapai hal ini, frekuensi dan tegangan keluaran dari kedua pembangkit harus disesuaikan hingga hampir identik. Perlu pemantauan dan penyesuaian dinamis, sistem kontrol terus memantau parameter seperti frekuensi, tegangan, dan beban, serta melakukan penyesuaian secara *real-time* untuk menjaga sinkronisasi yang stabil. Jika terjadi fluktuasi dalam *output* energi terbarukan (misalnya karena perubahan cuaca), sistem akan menyesuaikan beban secara otomatis atau mengalihkan ke sumber lain untuk mempertahankan kestabilan. Proteksi dan pemutus otomatis ialah sistem dilengkapi dengan proteksi yang mampu mendeteksi anomali atau ketidaksesuaian dalam proses sinkronisasi, seperti perbedaan frekuensi atau tegangan yang terlalu besar. Jika ini terjadi, sistem dapat memutuskan sumber energi terbarukan dari jaringan untuk mencegah kerusakan.

Teknik energi hibrida akan terus dikembangkan dalam rangka meningkatkan ketersediaan energi listrik dan efisiensi sumber daya. Skema sistem hibrida angin-surya-hidro dan sumber lainnya, kemudian terhubung ke jaringan *on-grid* atau *off-grid*. Banyak peneliti telah menggunakan teknik optimasi yang berbeda untuk sistem hibrida energi terbarukan dalam rangka mengurangi total biaya produksi dan meningkatkan efisiensi.



Gambar 4.9 Diagram Energi Hibrida Blok PLTS-PLTB dan PLTMH

Sumber: Hayes dkk. (2019)

Gambar 4.9 menunjukkan contoh *mini-grid* yang dikembangkan dengan menghubungkan berbagai jenis generator distribusi di sebuah Desa Thingaan dan Kolkhop di Makawanpur. Sistem ini mencakup mikro-hidro 20 kW yang dipasang di Desa Kolkhap, dan sistem hibrida yang terdiri atas 5 kW solar dan pembangkit tenaga angin 3 kW di Desa Thingan. Kedua sistem ini terhubung melalui saluran transmisi sepanjang 7 kilometer dengan tegangan 11 kV. Proyek ini menyuplai daya ke 232 rumah tangga, satu pos polisi, satu puskesmas, dua sekolah, sebelas pertanian komersial, satu peternakan ayam, dan satu perpustakaan menggunakan tegangan 220 V. (Hayes dkk., 2019)

Pendekatan energi hibrida secara berkelanjutan akan mengurangi emisi CO₂, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan energi terbarukan secara keseluruhan. Mengimplementasikan teknologi hibrida juga memungkinkan integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan listrik yang lebih stabil dan andal, membantu dalam transisi menuju ekonomi rendah karbon.

AGENDA INDONESIA MENUJU PEMBANGUNAN RENDAH KARBON

Upaya Pembangunan Rendah Karbon (PRK) dilakukan pada bidang-bidang prioritas yang diatur dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024.

BIDANG PRIORITAS PRK

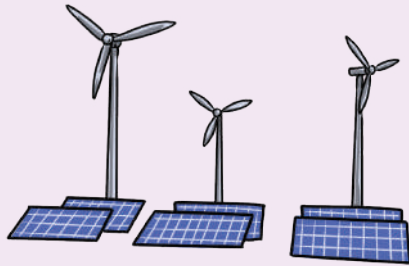
Program

Energi Berkelanjutan

Target 2024

Menuju porsi bauran EBT

23%



Pemulihan Lahan

- Restorasi gambut **330 ribu/tahun**
- Peningkatan luasan tutupan lahan **420 ribu/tahun**



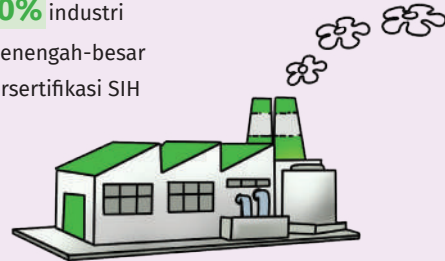
Pengelolaan Limbah

Akumulasi sampah terkelola nasional

339,4 juta ton

Industri Hijau

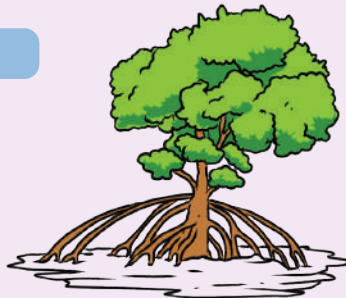
10% industri menengah-besar tersertifikasi SIH



Pesisir dan Laut

Luas pemulihan ekosistem mangrove dan pantai

50 ribu ha



Keterangan:

Karhutla: Kebakaran hutan dan lahan

GRK: Gas Rumah Kaca

SIH: Standar Industri Hijau

CAPAIAN PENURUNAN EMISI GRK (2018)

Menjadi kontributor terbesar berkat moratorium sawit & hutan, pengendalian karhutla, dan rehabilitasi hutan.



Kehutanan, lahan, dan pertanian

Penurunan Emisi GRK (Juta Ton CO₂e)

↓ 377



Energi, transportasi, dan industri

↓ 70



Pengelolaan limbah

↓ 5

SUMBER: RPJMN 2020-2024, LAPORAN IMPLEMENTASI PERENCANAAN PEMBANGUNAN RENDAH KARBON | PENULIS: ALFONS

Gambar 4.10 Peta Pembangunan Rendah Karbon Indonesia

Sumber: Alfons Yoshio/Katadata (2021)

Pembangunan rendah karbon merupakan salah satu strategi transisi menuju peningkatan ekonomi dan pembangunan yang berkelanjutan, pembangunan rendah karbon, dan juga menjadi tulang punggung menuju Ekonomi Hijau untuk mencapai visi Indonesia Maju 2045 dan mencapai nolemisi pada 2060. Transformasi ekonomi Indonesia menjadi Ekonomi Hijau merupakan salah satu strategi agar Indonesia dapat keluar dari “*middle income trap*”. Ekonomi Hijau dan pembangunan rendah karbon akan mendorong pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan kesejahteraan sosial dengan tetap menjaga kualitas lingkungan.

Aktivitas 4.1

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memahami konsep energi hibrida dengan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Buat beberapa kelompok kecil yang terdiri atas 4-5 siswa.
2. Diskusikan kelebihan dan kelemahan sistem energi hibrida PLTS dan PLTB. Presentasikan di depan kelas. Kelompok lain menanggapi.
3. Buatlah rangkuman tentang bagaimanakah sistem kerja energi hibrida PLTD dan PLTS.
4. Buatlah sebuah esai minimal 500 kata. Lakukan pengamatan sederhana, dari beberapa sumber energi terbarukan yang ada sekitar kamu. Energi apakah yang cocok untuk dijadikan sumber energi hibrida?

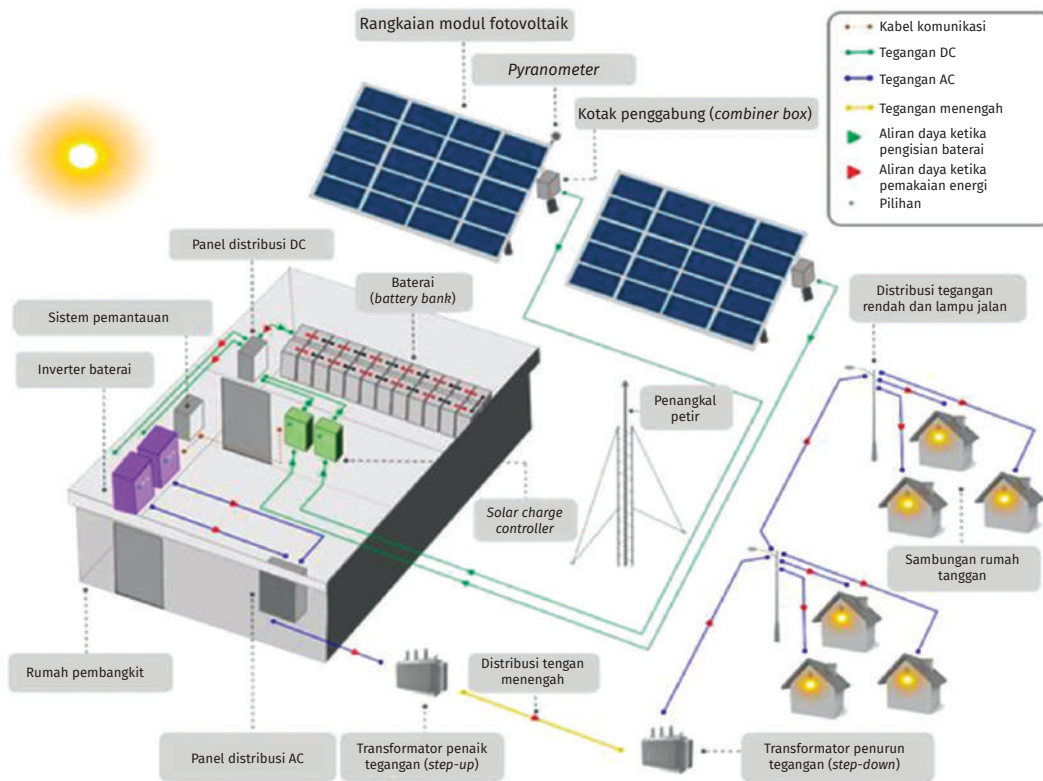
2. Komponen Pembangkit Listrik Energi Hibrida

PLT Hibrida memiliki komponen yang sudah tersedia di pasaran dan dapat disediakan dengan memilih sesuai dengan kebutuhan. Komponen tersebut di antaranya ialah seperti berikut.

a. Pembangkit Listrik Utama

Pembangkit listrik utama ialah pembangkit yang digunakan sebagai pembangkit yang menyediakan energi utama untuk beban. Pembangkit utama dipilih berdasarkan potensi sumber daya dan infrastruktur yang tersedia di lokasi sekitar. Sebagai contoh, apabila di daerah sekitar terdapat potensi sumber panas matahari, pembangkit utamanya ialah PLTS.

Atau, apabila daerah tersebut terdapat sumber air yang melimpah, terbangun terjangkau infrastruktur jaringan *micro grid*, pembangkit Listrik utama ialah Pembangkit Listrik Mikro Hydro (PLMH). Pembangkit listrik utama memiliki karakter jaminan ketersediaan tinggi, keandalan pembangkit listrik utama dalam sistem hibrida (*hybrid*) biasanya dinyatakan dalam bentuk *Availability Factor* (AF) atau *Capacity Factor* (CF). Hal ini menggambarkan seberapa sering pembangkit tersedia untuk menghasilkan listrik dibandingkan dengan waktu total yang ada (Kunaifi, 2021).



Gambar 4.11 PLTS Off-Grid sebagai Sumber Utama

Sumber: Mhd Brian Awiruddin/Kompasiana (2022)

Pada Gambar 4.11, terlihat sebuah PLTS sebagai pembangkit utama pada sebuah kelompok kecil perumahan. Saat matahari bersinar, ada dua rangkaian panel surya yang dilengkapi dengan Pyranometer, yang terhubung dengan (2) dua *combiner box*. Rangkaian ini menghasilkan listrik arus searah DC menuju (2) dua solar *charger controller* yang hasilnya terkumpul pada Panel Distribusi DC. Panel ini bertugas sebagai terminal aliran daya untuk pengisian baterai dan saat baterai mengeluarkan energi. Daya yang berada di Panel Distribusi

DC menuju ke inverter baterai untuk menghasilkan arus AC dan bergabung pada Panel Distribusi AC. Daya listrik dari Panel Distribusi AC menuju transformator *step-up* untuk diubah menjadi tegangan menengah medium voltage antara 1 kV hingga 35 kV. Tegangan menengah dipilih karena lebih efisien untuk mentransmisikan daya listrik jarak menengah, mengurangi kerugian daya, dan biaya infrastruktur dibandingkan dengan tegangan rendah. Tegangan melewati Jalur Distribusi Menengah menuju transformator *step-down* penurun tegangan, menjadi 220 Volt 50 Hz, untuk menuju jaringan rumah tangga.

Untuk mengetahui komponen pembangkit utama *hybrid* silakan pindai/memindai QR Code berikut.

b. Pembangkit Listrik Cadangan

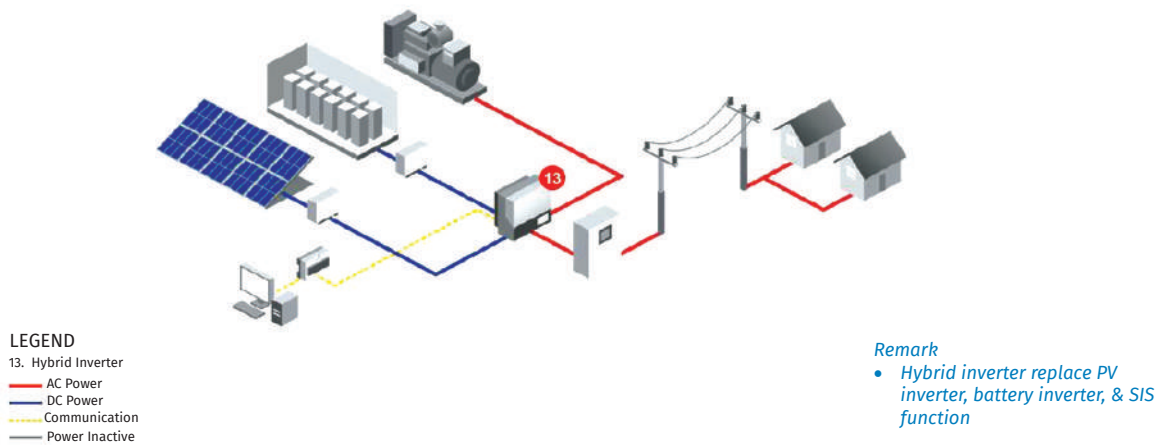
Pembangkit listrik cadangan ialah pembangkit yang menyediakan energi cadangan untuk beban apabila pembangkit listrik utama tidak dapat menyediakan energi. Sebagai contoh ada sebuah puskesmas yang berada di daerah pelosok, belum terjangkau jaringan PLN. Puskesmas ini memiliki PLTS sebagai sumber utama, dengan beberapa alasan: menambah cadangan PLTD sehingga persediaan listrik selalu siap digunakan.

Karakteristik energi listrik cadangan (*backup power*) mencakup beberapa aspek penting yang perlu dipertimbangkan, di antaranya reliabilitas atau keandalan. Energi listrik cadangan harus tersedia setiap saat ketika sumber listrik utama gagal. Sistem yang digunakan, seperti genset, baterai, atau UPS (*Uninterruptible Power Supply*), harus mampu memberikan listrik dengan segera tanpa jeda yang signifikan. Dari segi kapasitas, sistem cadangan harus mencukupi untuk memenuhi kebutuhan daya selama periode pemadaman listrik. Ini mencakup penentuan daya yang dibutuhkan untuk menjaga operasi perangkat penting dan durasi waktu yang sistem bisa menopang.



https://buku.kemdikbud.go.id/s/Tabel_Komponen_Pembangkit_Utama_Hibryd

PV Hybrid System – Hybrid Inverter



Gambar 4.12 Hibrida PLTS Utama Ditambah Diesel sebagai Cadangan

Sumber: BPVP Aceh (2023)

Pada Gambar 4.12, panel surya sebagai pembangkit utama. Pada siang hari, panel surya melakukan pengisian pada baterai. Pada malam hari saat panel surya tidak menghasilkan daya, baterai menyuplai daya listrik ke beban. Karena kebutuhan listrik yang terus meningkat, ditambahkan PLTD atau generator set/genset. Saat genset bekerja, garis merah, tegangan genset masuk ke *bidirectional AC/DC power*, mengisi baterai. Bersamaan itu pula, tenaga listrik genset tersalurkan ke beban dengan tegangan 220 volt AC.

c. Sistem Pengelolaan Energi

Sistem pengelolaan energi (*energy management system* (EMS) ialah sistem yang mengelola aliran energi antara berbagai komponen dalam sistem hibrida, memastikan penggunaan energi yang efisien dan stabilitas sistem. Komponen EMS sebagai berikut.

1) Pengukuran dan Monitoring

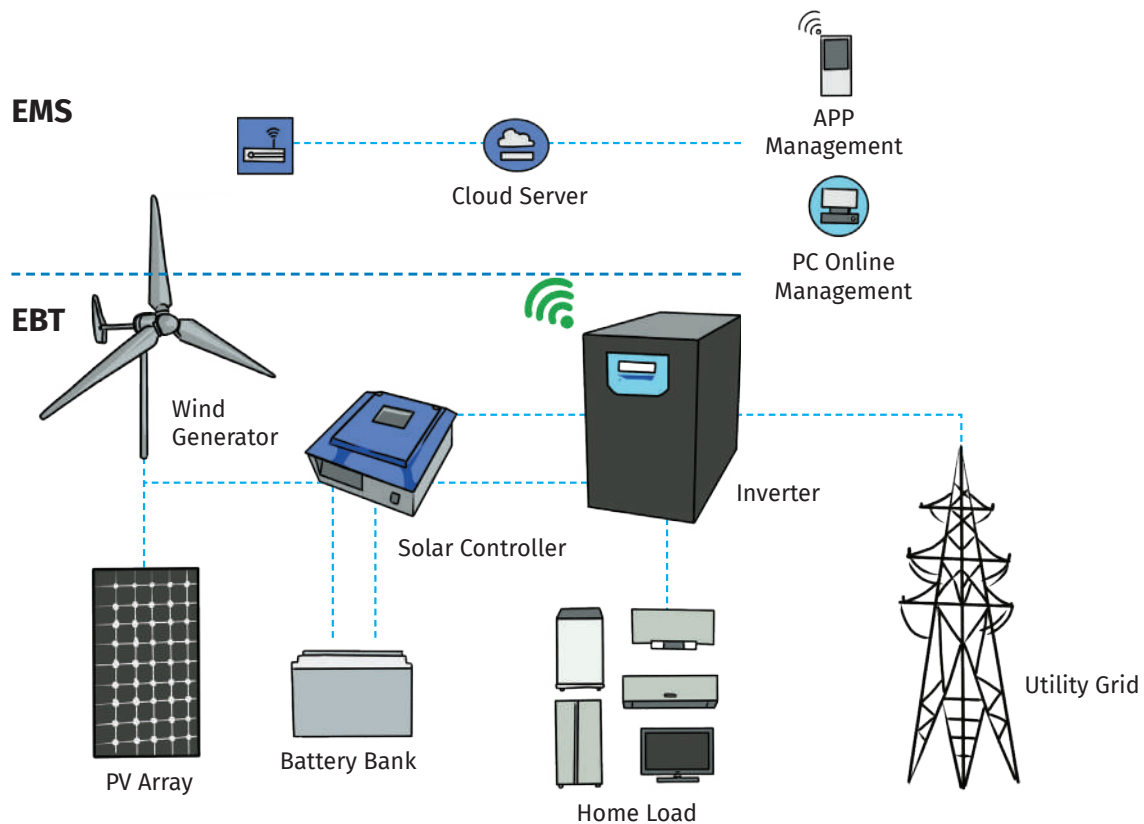
Di dalamnya terdapat sensor dan meteran yang mengukur penggunaan energi secara *real-time*, sensor arus, serta tegangan dan daya.

2) Data Logger

Data *logger* untuk merekam dan memantau parameter listrik seperti tegangan, arus, dan konsumsi energi secara *real-time*, kemudian mengidentifikasi pola penggunaan energi,

mendeteksi masalah listrik lebih awal, dan mengoptimalkan efisiensi daya. Dengan data yang dikumpulkan, perusahaan atau rumah tangga dapat membuat keputusan yang lebih cerdas.

Pada Gambar 4.13, sebuah sistem manajemen energi hibrida PLTB dan PLTS. Sistem ini menggunakan inverter. Inverter ini dapat terintegrasi dan terkoneksi dengan *internet cloud server*. *Internet cloud server* merekam kemudian melaporkan aktivitas energi yang dapat dihasilkan oleh PLTB dan PLTS, kondisi baterai, dan konsumsi listrik. Laporan ini dapat dipantau menggunakan komputer dan aplikasi di *smart phone*, yang terkoneksi dengan internet. Dengan memiliki data *real time*, kita dapat memperhitungkan penggunaan energi dan merencanakan untuk pengembangan lebih lanjut.



Gambar 4.13 EMS (Energy Manajemen System) EBT (Energi Baru Terbarukan)

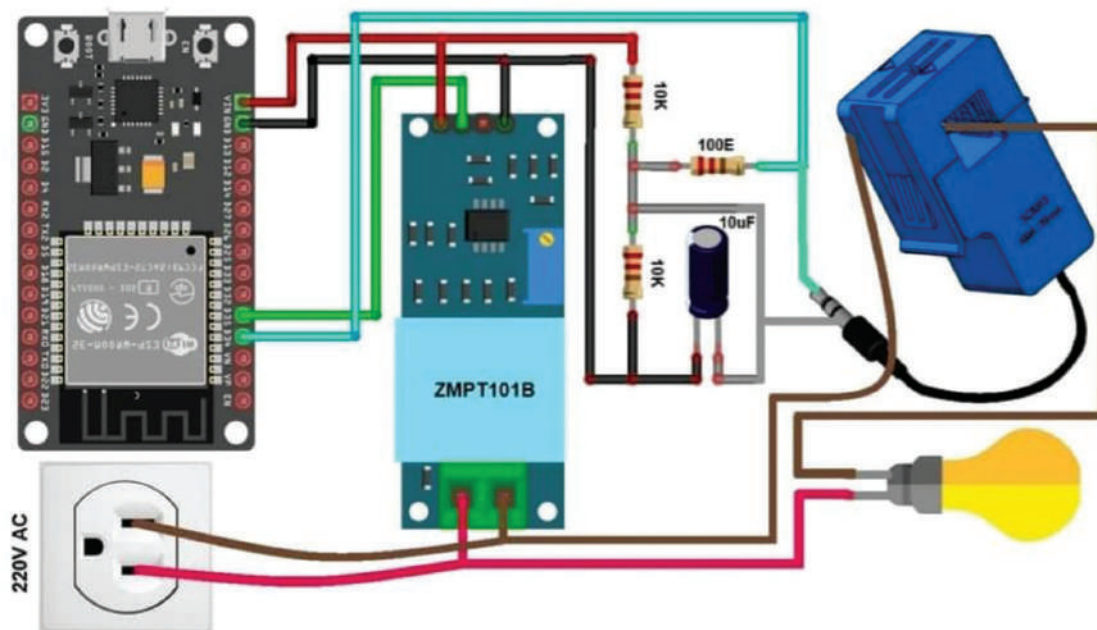
Sumber: Sunway Solar (2024)

Contoh lain dari EMS ialah kita akan membuat meteran energi listrik berbasis IoT menggunakan ESP32 dan memantau datanya melalui aplikasi Blynk. Dengan IoT, kita dapat mengotomatisasi pembacaan meteran dan menghemat waktu serta biaya. Karena meteran energi pintar makin populer, kita akan membangun versi kita sendiri.

Bahan yang diperlukan untuk membuat meteran energi listrik berbasis IoT: ESP32 ialah seperti berikut.

- (1) *Microcontroller* dengan fitur WiFi dan bluetooth untuk mengirim data ke aplikasi Blynk.
- (2) Sensor Arus SCT-013: sensor arus AC non-invasif yang mampu mengukur arus hingga 100 ampere.
- (3) Sensor Tegangan AC ZMPT101B: sensor untuk mengukur tegangan AC dengan akurat.
- (4) Resistor dan Kapasitor: komponen pasif untuk mendukung rangkaian elektronik.
- (5) Papan *Breadboard* atau PCB: untuk merakit dan menghubungkan semua komponen.
- (6) Kabel Jumper: untuk menghubungkan komponen-komponen pada *breadboard* atau PCB.
- (7) Adaptor Daya: untuk menyediakan sumber daya ke ESP32 dan sensor.
- (8) Aplikasi *Blynk*: aplikasi *mobile* untuk memantau data yang dikirimkan dari ESP32.
- (9) Koneksi internet.

Kemudian, kita rakit seperti berikut.



Gambar 4.14 Bagan IoT Meteran Listrik

Sumber: *howelectronis* (2024)

Setelah dipasang dengan benar, kemudian menulis program (kode program tersedia di link QR Code) untuk otomatisasi. Dengan parameter yang kita tentukan, kita dapat memonitor penggunaan listrik menggunakan *smartphone* kapan saja.

3) Sistem Sinkronisasi

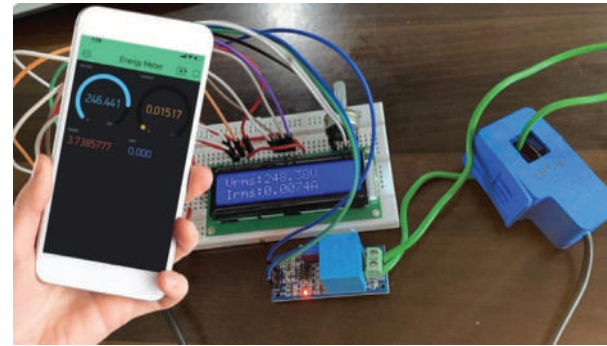
Sinkronisasi hibrida memungkinkan beberapa sumber energi dapat beroperasi secara harmonis, menyesuaikan *output* mereka dengan kebutuhan beban yang berubah-ubah. Komponen dari sistem sinkronisasi seperti berikut.

a) Panel Sinkronisasi

Panel ini untuk mengatur dan mengontrol proses sinkronisasi antara berbagai sumber energi. Ini memastikan bahwa semua sumber energi bekerja pada fase, frekuensi, dan tegangan yang sama sebelum terhubung ke jaringan atau beban.

b) Pengukuran Parameter

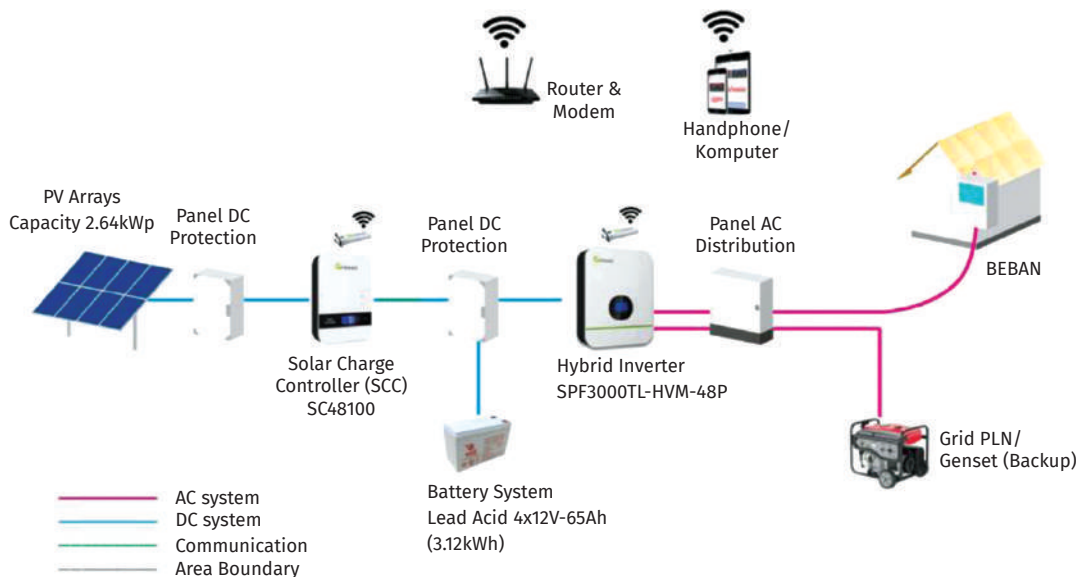
Berfungsi untuk mengukur parameter seperti tegangan, frekuensi, dan sudut fase guna memastikan sinkronisasi yang tepat.



Gambar 4.15 Memonitor Penggunaan Listrik dengan Smartphone
Sumber: howelectronis (2024)



https://static.buku.kemdikbud.go.id/content/media/pdf/SMK/Memonitor_Penggunaan_Listrik_dengan_Smartphone.pdf



Gambar 4.16 DC Couple PLTS-PLTD Sinkronisasi
Sumber: BPVP Aceh (2023)

c) Pengendali Generator, Pengatur Tegangan, dan AVR

Pengendali generator (*generator controller*) yang dilengkapi dengan pengatur tegangan seperti terlihat pada Gambar 4.16 yang dilengkapi juga dengan Otomatis *Automatic Voltage Regulator* (AVR). AVR ini mengontrol tegangan *output* dari generator agar sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

d) Gubernur Elektronik

Mengontrol kecepatan generator untuk menjaga frekuensi stabil selama operasi sinkronisasi.

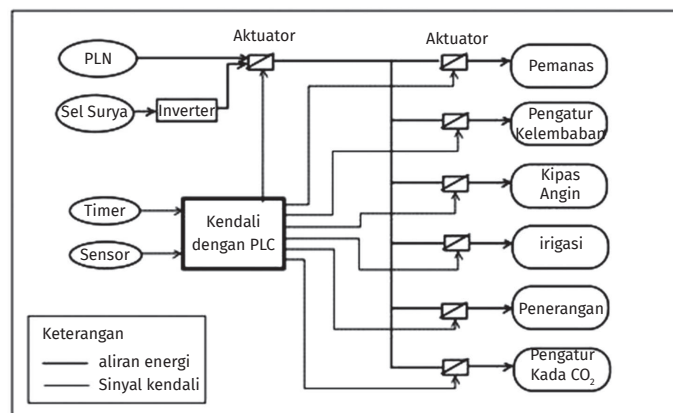
e) Pengatur Beban

Mengatur pembagian beban antara generator yang berbeda untuk memastikan distribusi yang efisien.

Pada peralatan Hybrid Inverter SPF 3000 TL-HVM-48P (Gambar 4.20), terjadi proses mengubah energi DC menjadi AC. Tegangan AC ini kemudian diproses penyeragaman fase, frekuensi, dan tegangan, disinkronkan dengan tegangan yang berasal dari generator set *backup*. Setelah seragam frekuensi dan tegangannya, energi disalurkan ke distribusi ke pelanggan.

Proses sinkronisasi juga dapat memakai Unit Pengendali Logika Terprogram (*Programmable Logic Controller*, PLC) yang bertugas melakukan:

- (1) kontrol otomasi, yaitu mengotomatisasi proses sinkronisasi dan distribusi daya antara sumber energi yang berbeda;
- (2) pemantauan dan diagnostik dengan memantau kinerja sistem dan memberikan diagnosis jika terjadi masalah sehingga dapat diselesaikan dengan cepat.



Gambar 4.17 Sinkronisasi Menggunakan PLC

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

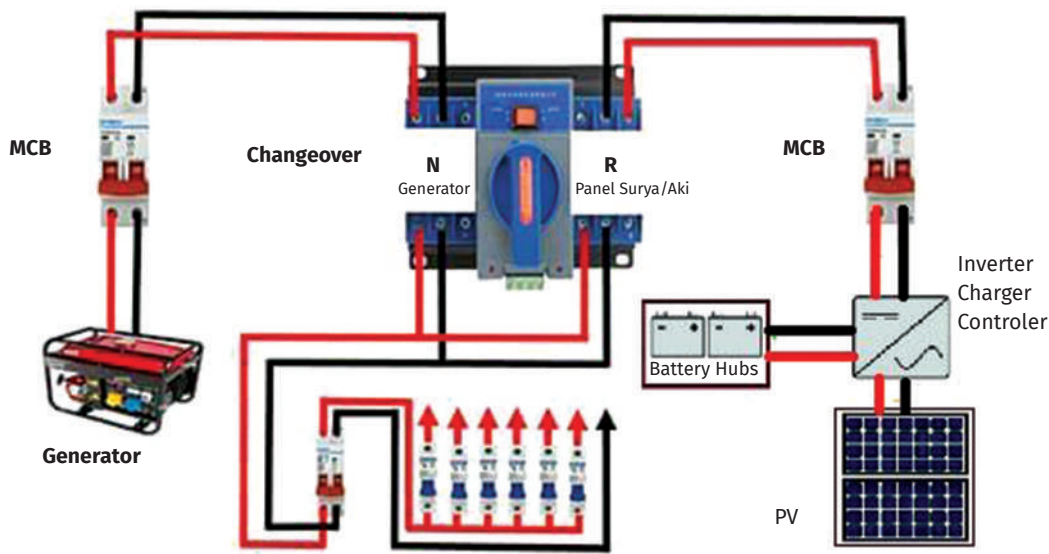
Proses sinkronisasi perlu dilaksanakan dengan standar keamanan kerja dan SOP standar kelistrikan yang berlaku, misalnya di Indonesia menggunakan tegangan *output* 220 Volt, 50 Hz.



Gambar 4.18 Generator Synchronization Controller
Sumber: DEIF (2024)

Pada Gambar 4.18, sebuah PLC (*Programmable Logic Controller*) terhubung ke monitor melalui *port* RJ45, menampilkan kondisi sistem yang tertanam dalam PLC tersebut. PLC ini menggunakan AGC MA II (*Automatic Generation Control Model Algorithm II*), sebuah algoritma atau perangkat yang digunakan dalam sistem kontrol tenaga listrik, khususnya pada pembangkit listrik hibrida, untuk mengatur frekuensi dan daya aktif. Selain itu, AGC MA II berfungsi untuk mengoptimalkan pembagian beban di antara pembangkit listrik sehingga operasi pembangkit menjadi lebih efisien. Algoritma ini juga berperan dalam menjaga keseimbangan daya aktif antara pembangkitan dan beban sistem, memastikan tidak terjadi kekurangan atau kelebihan daya.

Pada beberapa pemanfaatan energi hibrida PLTD dan PLTS, pemindahan sistem daya menggunakan Saklar Transfer Otomatis (*Automatic Transfer Switch, ATS*) merupakan transisi otomatis yang memungkinkan transisi otomatis antara sumber daya, seperti dari jaringan listrik utama ke generator cadangan, ketika terjadi pemadaman. Proses pemindahan energi memiliki jeda beberapa saat pada proses peralihan sumber energi untuk penggunaan peralatan elektronik sensitif seperti komputer akan padam sehingga perlu peralatan tambahan misalnya UPS.



Gambar 4.19 ATS sebagai Pemindah Sumber Energi PLTS-PLTD

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Cara kerja ATS pada Sistem Gabungan PLTD dan PLTS ialah seperti berikut.

1. Melakukan Pemantauan Daya dari PLTS

ATS memantau *output* daya yang dihasilkan oleh PLTS. Ketika PLTS menghasilkan daya yang cukup (misalnya, pada siang hari dengan sinar matahari yang cukup), PLTS digunakan sebagai sumber daya utama untuk memasok beban listrik. ATS akan tetap memonitor *output* daya dari PLTS untuk memastikan bahwa daya yang dihasilkan tetap stabil dan mencukupi untuk kebutuhan beban.

2. Alihkan ke PLTD Saat Daya PLTS Tidak Cukup

Ketika *output* daya dari PLTS menurun, seperti saat cuaca mendung, malam hari, atau saat produksi energi surya tidak mencukupi untuk memenuhi permintaan beban, ATS akan mendeteksi penurunan tersebut. ATS secara otomatis mengirim sinyal untuk menyalakan genset diesel (PLTD) sebagai sumber cadangan.

Aktivitas 4.2

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memahami komponen-komponen peralatan energi hibrida secara gotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Buatlah daftar kebutuhan komponen energi hibrida PLTS–PLTD dilengkapi dengan spesifikasi barang dan perkiraan estimasi harganya. Presentasikan secara berkelompok di depan kelas.
2. Bekerja dalam kelompok. Apakah peralatan sinkronisasi yang digunakan untuk phase, frekuensi, dan tegangan? Jelaskan bagian-bagian dan fungsinya.

B. Perancangan Energi Hibrida

Perancangan energi hibrida merupakan upaya menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan tenaga angin, untuk menciptakan sistem pembangkit listrik yang lebih efisien dan andal. Sistem ini dirancang untuk memanfaatkan potensi energi matahari di siang hari dan energi angin yang dapat tersedia sepanjang hari sehingga dapat saling melengkapi dalam menyediakan pasokan listrik yang stabil. Dengan tambahan baterai penyimpanan, sistem hibrida mampu memastikan ketersediaan listrik bahkan saat kondisi cuaca tidak mendukung.

1. Perancangan Sistem Konstruksi Sipil Energi Hibrida

Perancangan energi hibrida dapat dilakukan menggunakan bantuan *software* atau perangkat lunak simulasi berbasis komputer. Program simulasi/perangkat lunak yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) ialah HOMER, HYBRID2, iHOGA, HYBRIDS. Dengan menggunakan simulasi komputer, ukuran optimal dari komponen HRES dapat ditentukan dengan membandingkan kinerja dan biaya produksi energi untuk konfigurasi sistem yang berbeda. (Yahyaoui, 2018a)

Perancangan konstruksi sipil untuk sistem energi hibrida melibatkan kombinasi antara energi terbarukan, seperti tenaga angin dan tenaga surya, dengan sumber energi lain, seperti generator diesel atau jaringan listrik. Proyek ini mencakup berbagai aspek teknik sipil, seperti fondasi, struktur penyangga, penempatan peralatan, dan infrastruktur pendukung.

a. Fondasi dan Struktur Penyangga PLTS Hibrida (PV-Diesel)

Untuk mendesain fondasi PLTS-PLTD, ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan agar fondasi tersebut mampu menahan beban dan mengurangi getaran yang dihasilkan saat operasi. Beberapa langkah umum yang dapat kita laksanakan seperti berikut.

1) Menentukan Lokasi Fondasi

Pilih lokasi yang stabil dan jauh dari area yang rentan terhadap banjir atau longsor. Pastikan lokasi memiliki jalan yang dapat diakses kendaraan roda empat untuk pemasangan dan pemeliharaan genset.

2) Lakukan Analisis Beban

Perhatikan dan hitung total berat genset termasuk semua komponennya (mesin, alternator, sistem pendingin, dll.) ditambah dengan beban dinamis yang dihasilkan oleh getaran dan perubahan beban selama operasi. Di samping itu, harus direncanakan ukuran fondasi. Panjang, lebar, dan kedalaman fondasi harus sesuai dengan dudukan PLTD dan cukup untuk menahan berat dan mengurangi getaran.

3) Memilih Jenis Fondasi

Jenis fondasi yang dipilih ialah seperti berikut.

- Fondasi beton bertulang yang umum digunakan untuk genset. Beton bertulang menawarkan kekuatan dan ketahanan terhadap getaran.
- Fondasi beton pracetak. Jika genset perlu dipindahkan, fondasi beton pracetak dapat menjadi pilihan karena lebih mudah dipasang dan dipindahkan. Sebagai contoh kita melihat sebuah identitas sebuah generator berikut ini.

Pada *name plate*, tertera *Rated Output* merupakan daya yang dikeluarkan atau dihasilkan ialah 20 kW, arus Listrik *rated current* 36,1 Ampere, dengan putaran generator *Rated Speed* 1500 rpm. Listrik yang dihasilkan ialah 3 phase dengan frekuensi *Rated Frequency* 50 Hz. Ukuran atau dimensi generator set ini ialah 2250 × 960 × 1450 mm, dengan berat 650 kg.

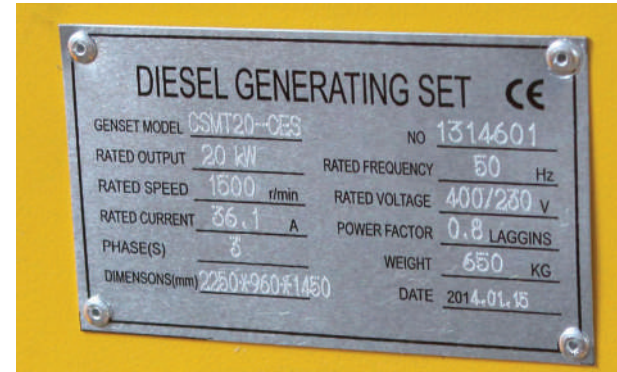
Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Frame Base (Dudukan)



Gambar 4.20 Generator Set dengan Frame Base/Dudukan Mesin

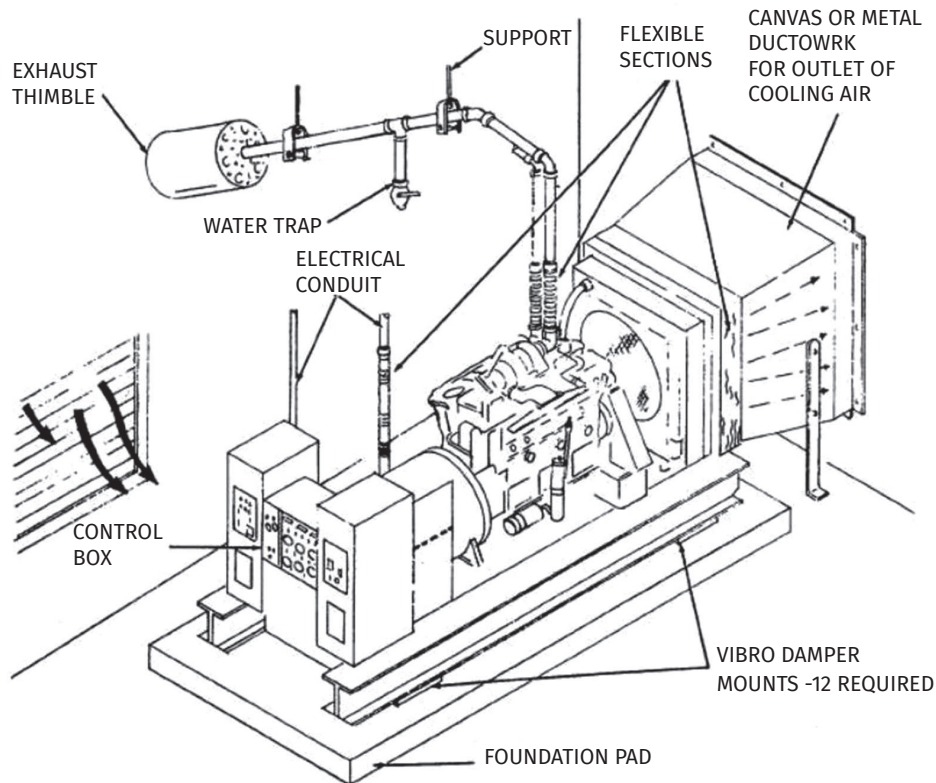
Sumber: BPVP Aceh (2023)



Gambar 4.21 Name Plate Generator Set

Sumber: Elecmana (2024)

Jika pembangunan fondasi di dalam ruangan, yang perlu direncanakan ialah sistem sirkulasi udara seperti tertera pada gambar berikut.



Gambar 4.22 Saluran Udara Masuk dan Udara Buang Genset

Sumber: *Integrated Publishing (2024)*

4. Sistem Peredam dan Drainase

Peredam getaran dapat menggunakan bantalan atau isolator getaran di antara genset dan fondasi untuk mengurangi getaran yang ditransfer ke fondasi. Bahan penambahan lapisan peredam getaran di antaranya bantalan karet. Drainase merupakan sistem saluran air mencegah akumulasi air di sekitar fondasi sehingga kita memastikan area di sekitar fondasi bebas dari air untuk menghindari korosi pada komponen genset.

5. Pengamanan dan Pencegahan

Pengamanan dari cuaca ekstrem misalnya hujan dan jangkauan manusia, dengan memberi pagar pengamanan genset. Termasuk di dalamnya tanda-tanda peringatan yang memberikan informasi pencegahan kepada orang yang tidak berkepentingan sehingga genset dalam kondisi aman dan siap kerja.



Gambar 4.23 Informasi Peringatan dan Pencegahan
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

b. Fondasi dan Struktur Penyangga Energi Hibrida PLTS - PLTB

Menentukan jarak ideal antara fondasi dan struktur penyangga untuk PLTS dan PLTB ialah aspek penting dalam desain hibrida untuk memastikan efisiensi, keamanan, dan kinerja optimal dari kedua sistem. Faktor yang perlu diperhatikan dalam membangun fondasi dan struktur penyanggah energi hibrida PLTS dan PLTB ialah sebagai berikut.

1) Interferensi Bayangan Turbin Angin

Menara turbin angin dapat menghasilkan bayangan yang memengaruhi kinerja panel surya. Oleh karena itu, jarak antara turbin angin dan panel surya harus cukup jauh untuk mencegah bayangan menutupi panel, terutama selama jam-jam produktif (siang hari). Sebagai panduan praktis, jarak antara turbin angin dan panel surya harus minimal 3 hingga 4 kali diameter rotor turbin untuk mencegah bayangan yang signifikan. Misalnya, jika turbin angin memiliki diameter rotor 40 meter, jarak minimalnya ialah sekitar 120 hingga 160 meter.

Gambar 4.24 Hybrid Solar PV and wind di Eropa
 Sumber: Jens Dresling (2023)



2) Perhitungan Beban Dinamis dan Getaran

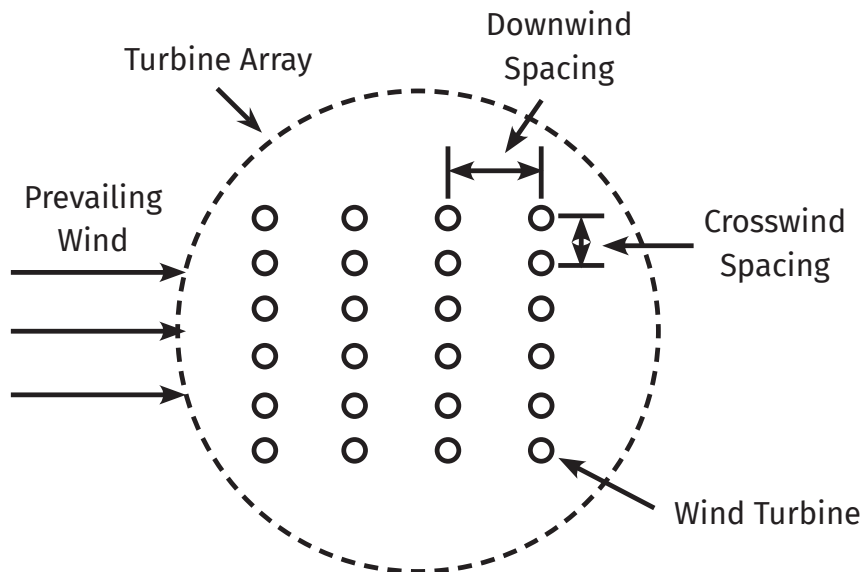
Getaran dari turbin angin dapat memengaruhi struktur penyangga panel surya jika jaraknya terlalu dekat. Perlu dipastikan adanya jarak yang cukup untuk mengurangi dampak getaran. Panduan praktisnya: jarak minimum sekitar 20-30 meter dari fondasi turbin angin biasanya cukup untuk mengurangi dampak getaran terhadap struktur penyangga panel surya. Apabila kita akan membangun PLTB lebih dari satu, kita perlu memikirkan Jarak Antar-Turbin Angin (PLTB).

3) Efisiensi Aerodinamika, Jarak Horizontal Downwind

Turbin angin harus ditempatkan cukup jauh satu sama lain untuk menghindari efek “wake” atau *turbulensi* yang dihasilkan oleh turbin di depan. Efek ini dapat mengurangi efisiensi turbin yang ada di belakang. Panduan Praktis: Jarak minimal antarturbin biasanya 5 hingga 10 kali diameter rotor turbin. Misalnya, untuk turbin dengan diameter rotor 40 meter, jarak antarturbin sebaiknya 200 hingga 400 meter.

4) Jarak Lateral Crosswind

Jarak lateral biasanya lebih kecil daripada jarak horizontal, tetapi tetap harus cukup jauh untuk mengurangi interaksi *aerodinamika*. Panduan praktisnya jarak lateral antara turbin sebaiknya sekitar 3 hingga 5 kali diameter rotor turbin (Manwell et al., 2010).



Gambar 4.25 Posisi Ladang Turbin Angin

Sumber: Manwell et al., (2010)

6) Jarak Antarpanel

Jarak antarpanel surya (PLTS) juga perlu diperhitungkan dengan tepat untuk mencegah bayangan antarpanel saat kemiringan panel. Jarak antarbaris panel surya harus cukup untuk mencegah bayangan dari panel yang satu menutupi panel yang lain, terutama pada sudut matahari rendah di pagi dan sore hari. Panduan praktisnya: jarak antarbaris panel surya dihitung berdasarkan sudut kemiringan dan lintang lokasi. Sebagai aturan umum, jarak antarbaris biasanya 2 hingga 3 kali tinggi panel di titik tertinggi.

7) Aksesibilitas

Kita perlu membangun fondasi yang menyediakan cukup ruang antarbaris panel suryan sehingga memudahkan perawatan dan pembersihan rutin. Panduan praktisnya: jarak minimal antarbaris panel minimal sekitar 1,5 hingga 2 meter untuk memudahkan akses.

Aktivitas 4.3

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan perancangan sistem kontruksi sipil energi hibrida secara gotong royong dan kreatif.

Langkah-Langkah:

1. Lakukan studi lapangan dengan mencari informasi berkaitan dengan alat, bahan, dan tenaga, untuk membuat sebuah fondasi mesin generator set dengan ukuran $2.250 \times 960 \times 1.450$ mm di luar ruangan yang dilengkapi dengan pelindung dari panas dan hujan serta drainase. Susunlah informasi itu menjadi kumpulan rencana anggaran biaya yang lengkap.
2. Gambarlah rencana denah lokasi penempatan: jika kita memiliki 1 (satu) unit PLTS, 2 (dua) unit PLTB, dan 1 (satu) PLTD dalam satu area, dilengkapi dengan perencanaan biaya pembuatan Sistem Kontruksi Sipil Energi Hibrida sehingga calon investor yakin dengan rencanamu.

2. Perancangan Sistem Mekanik Energi Hibrida

Kegiatan perancangan sistem mekanik energi hibrida di antaranya seperti berikut.

a. Menghitung Kebutuhan Daya (PK) Diesel

Kegiatan perancangan sistem mekanik energi hibrida diawali dengan menghitung kebutuhan daya (PK) diesel yang seimbang dengan spesifikasi generator dan beban listrik. Dengan demikian, ditemukan sebuah formula mekanik yang tepat antara kapasitas mesin diesel, generator, dan beban pemakaian.

Contoh:

Jika kita memiliki kebutuhan listrik 10.000 watt, berapakah spesifikasi mesin dan generator yang dibutuhkan?

Pertama, hitung kapasitas generator dengan formula standar yang diterangkan sebagai berikut.

- ☉ Daya Listrik (P): 10.000 watt (10 kW)
- ☉ Faktor Daya (PF): Misalkan $PF = 0,8$ (standar industri untuk beban induktif)
- ☉ Efisiensi Generator (η): Misalkan $\eta = 0,9$ (90%)

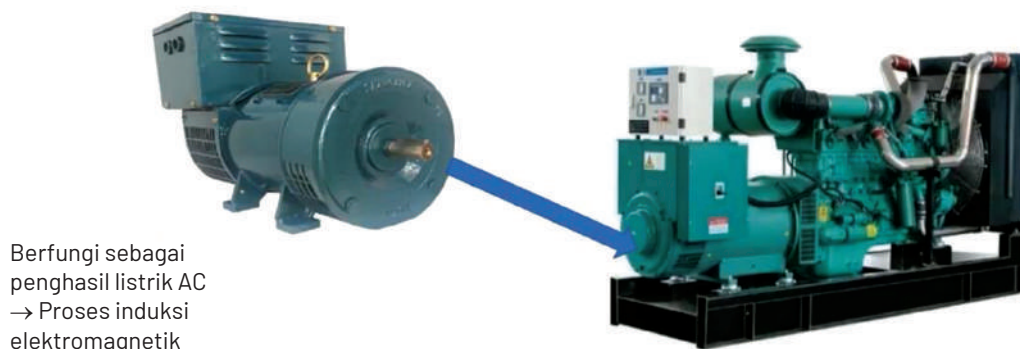
Rumus mencari Kapasitas Generator

$$P_{gen} = \frac{P}{PF \times \eta} = \frac{10.000}{0,8 \times 0,9} = \frac{10.000}{0,72} \approx 13.888 \text{ watt atau sekitar } 13,9 \text{ kW}$$

Jadi, kita membutuhkan generator dengan kapasitas sekitar 14 kW.

Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Alternator



Berfungsi sebagai
penghasil listrik AC
→ Proses induksi
elektromagnetik

Gambar 4.26 Bagian Alternator

Sumber: BPVP Aceh, (2023)

Alternator dan generator sebenarnya istilah yang sering digunakan secara bergantian. Namun, ada perbedaan teknis di antara keduanya. Secara umum, alternator menghasilkan arus bolak-balik (AC). Dari segi konstruksi, alternator dapat digunakan dalam kendaraan seperti mobil untuk mengisi baterai dan memberi daya pada sistem kelistrikan saat mesin berjalan. Alternator memiliki stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Medan magnet dihasilkan oleh rotor, arus listrik dihasilkan di stator. Terpasang *rectifier* dimana alternator memiliki *dioda rectifier* yang mengubah AC menjadi DC untuk mengisi baterai stator dan juga untuk membangkitkan gaya magnet pada rotor. Tersedia juga AVR yang terpadu dengan sistem *rectifier*.

b. Mencari Spesifikasi Diesel

Langkah berikut dalam kegiatan perancangan sistem mekanik energi hibrida ialah mencari spesifikasi diesel daya kuda (PK) yang cocok untuk menggerakkan generator 14 kW. Dengan demikian, dapat memutar dengan lancar dan listrik yang dihasilkan stabil.

Contoh:

Diketahui;

- 🔸 Kapasitas Generator (P): 13,9 kW (hasil dari perhitungan di atas)
- 🔸 Efisiensi Mesin Diesel (η): Misalkan $\eta = 0,35$ (35%)
- 🔸 Faktor Koreksi (k): Misalkan $k = 0,9$

Konstanta 1,341 dalam konteks konversi daya kuda (PK) berasal dari hubungan antara dua satuan daya: kilowatt (kW) dan horsepower (HP). Daya kuda, yang dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *horsepower* (HP) ialah satuan daya yang awalnya digunakan untuk mengukur tenaga mesin

$$1 \text{ HP} = 0,7457 \text{ kW} \text{ atau } 1 \text{ kW} = \frac{1}{0,7457} \text{ HP} \approx 1,341 \text{ HP}$$

Rumus mencari daya kuda (PK) diesel ialah;

$$PK = \frac{P \times 1,341}{PF \times \eta} = \frac{13,9 \times 1,341}{0,35 \times 0,9} = \frac{18,6419}{0,315} \approx 59,19 \text{ PK}$$

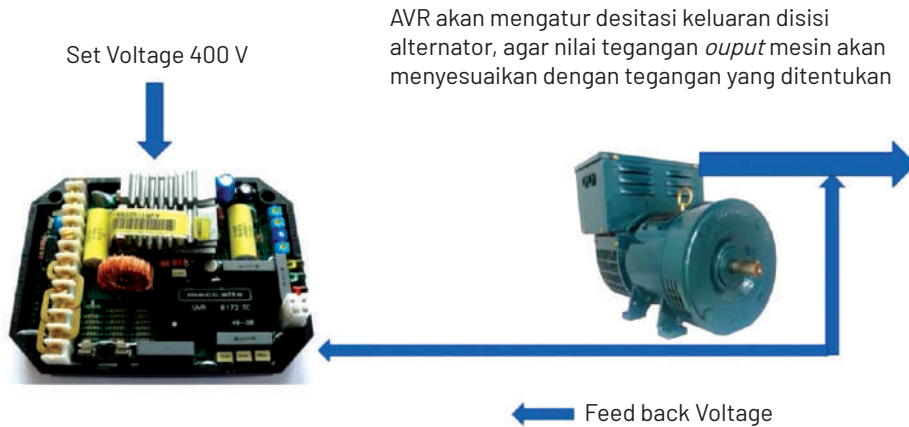
Jadi, kita membutuhkan mesin diesel dengan daya kuda sekitar 60 PK.

Kesimpulan:

Generator dengan kapasitas 14 kW dan mesin diesel dengan daya sekitar 60 PK akan cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik sebesar 10.000 watt dengan asumsi faktor daya dan efisiensi yang diberikan.

Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG AVR (Automatic Voltage Regulator)



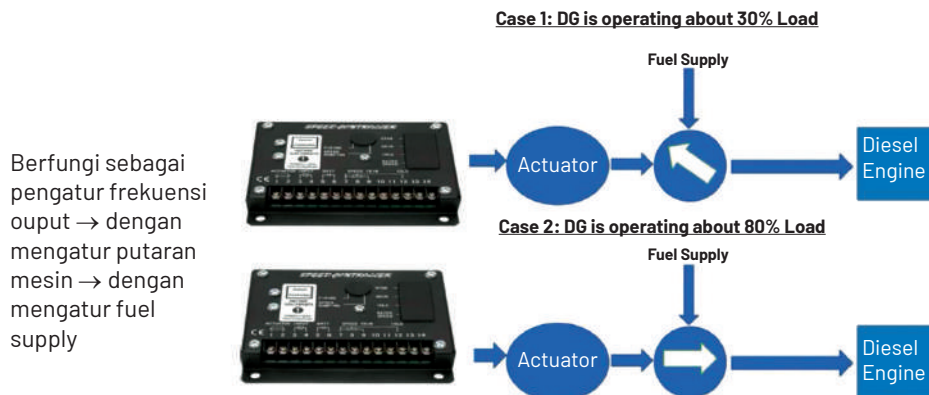
Gambar 4.27 Bagian Penstabil Tegangan Alternator

Sumber: BPVP Aceh (2023)

Generator menghasilkan dua jenis arus listrik, yaitu arus searah (DC) atau arus bolak-balik (AC), bergantung pada desainnya. Secara konstruksi, generator bekerja dengan prinsip yang serupa dengan alternator, tetapi dapat diaplikasikan dalam berbagai kebutuhan, seperti pembangkit listrik darurat, generator portabel untuk aktivitas *outdoor*, pengelasan, dan penerangan. Generator yang menghasilkan arus DC dikenal sebagai dinamo, sedangkan generator yang menghasilkan arus AC disebut alternator. Alternator dilengkapi dengan aktuator yang mengatur keluaran listrik berdasarkan putaran mesin. Ketika beban listrik meningkat, generator secara otomatis menambah kekuatan mesin untuk menyesuaikan *output*.

Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Governor



Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Control Panel (Sistem Kontrol)

Berfungsi sebagai sistem kontrol genset (monitoring, set parameter, sistem kontrol, synchronization, dll)



Gambar 4.28 Bagian Control Output Generator Set

Sumber: BPVP Aceh (2023)

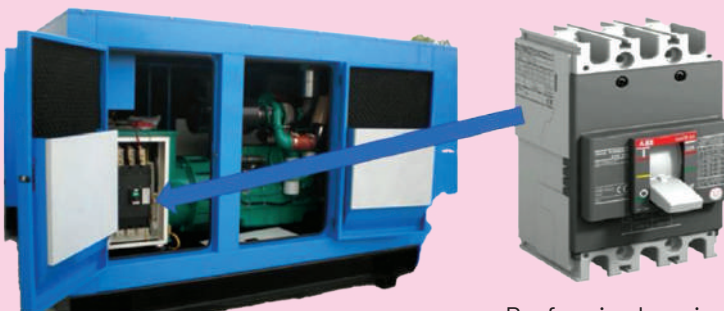
Sistem kontrol dan pengaman pada alternator sangat penting untuk memastikan operasi yang aman dan efisien, terutama dalam aplikasi seperti kendaraan, pembangkit listrik, dan industri lainnya. Beberapa komponen sistem kontrol dan pengaman pada alternator ialah:

- (1) perlindungan tegangan lebih (*overvoltage protection*),
- (2) perlindungan tegangan rendah (*undervoltage protection*),
- (3) perlindungan arus lebih (*overcurrent protection*),
- (4) pemantauan suhu (*temperature monitoring*),
- (5) pemadaman otomatis (*automatic shutdown*),
- (6) perlindungan terhadap gangguan ground (*ground fault protection*) dan
- (7) pemantauan kecepatan (*speed sensing*).

Sistem ini bekerja terintegrasi yang diatur pada *panel control*.

Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Circuit Breaker



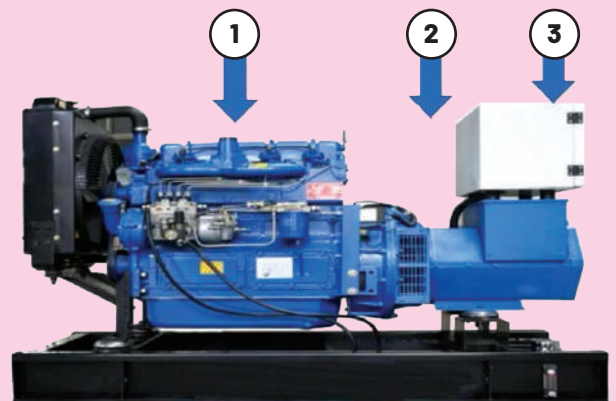
Berfungsi sebagai pengaman (proteksi) di sisi *output* mesin diesel

Gambar 4.29 Bagian Mesin Generator Set

Sumber: BPVP Aceh (2023)

Pengenalan Mesin Diesel (DG)

DG Engine (Mesin Diesel)



1. Primeover
2. Alternator
3. Panel Kontrol

Pada generator set (genset), *prime mover* merujuk pada mesin atau perangkat utama yang menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. *Prime mover* pada genset biasanya berupa mesin pembakaran dalam, seperti mesin diesel atau gas. *Prime mover* berfungsi sebagai sumber tenaga mekanis yang menggerakkan generator. Ketika bahan bakar, seperti solar, gas alam, atau bensin, dibakar di dalam mesin, proses ini menghasilkan tenaga mekanis berupa putaran poros. Poros tersebut kemudian terhubung ke rotor generator, dan saat berputar, rotor menghasilkan medan magnet yang memicu pembangkitan energi listrik.

Aktivitas 4.4

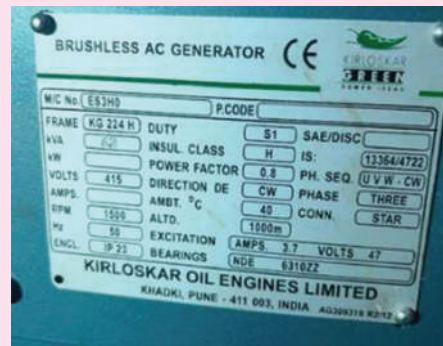
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan perancangan sistem mekanik energi hibrida secara gotong royong.

Langkah-Langkah:

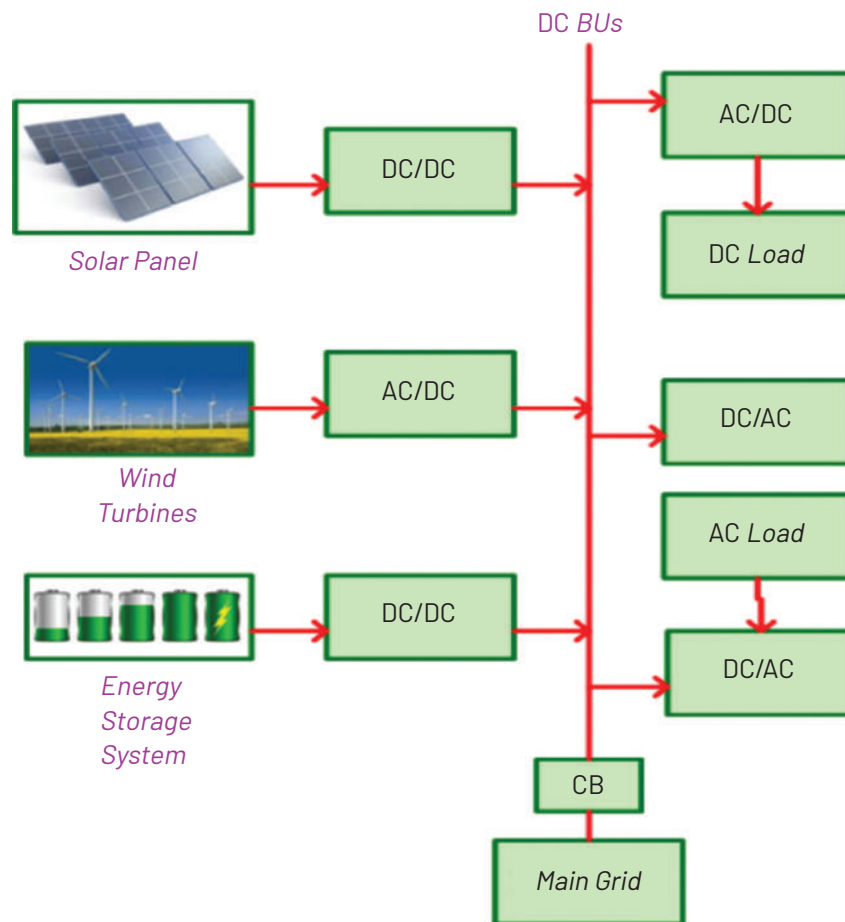
1. Carilah informasi dari berbagai media untuk memahami maksud dari *name plate* generator set di samping ini. Kemudian, rangkum apa yang kamu pahami. Ceritakan kepada temanmu di depan kelas.
2. Carilah informasi yang berkaitan dengan konsumsi bahan bakar yang dapat digunakan untuk menggerakkan generator set yang berbasis biodiesel, yaitu bahan bakar yang ramah lingkungan dan mudah diproduksi dari hasil perkebunan. Kemudian, isilah tabel observasi berikut.



Kapasitas Genset PK/Watt	Listrik yang Dihasilkan	Bahan Bakar	Konsumsi Bahan Bakar per Jam	Biaya Operasional per Jam

3. Perancangan Sistem Elektrik Energi Hibrida

Dalam pemasangan energi hibrida, terdapat dua model *microgrid*, yaitu DC *microgrid* dan AC *microgrid*. DC *microgrid* (*Direct Current Microgrid*) ialah tipe *microgrid* yang menggunakan arus searah (DC) sebagai bentuk utama untuk distribusi listrik. DC *microgrid* digunakan di berbagai sektor seperti maritim, otomotif, dan industri manufaktur. Dalam distribusi listriknya, DC *microgrid* dapat dibagi menjadi tiga jenis konfigurasi: monopolar, bipolar, dan homopolar. Beberapa keuntungan menggunakan sistem distribusi DC termasuk pengurangan kehilangan daya, penurunan tegangan jatuh (*voltage drop*), dan peningkatan kapasitas saluran listrik. Dalam DC *microgrid*, tautan DC bertegangan rendah sering didukung oleh konfigurasi bipolar, yang memungkinkan beban terhubung antara dua polaritas.

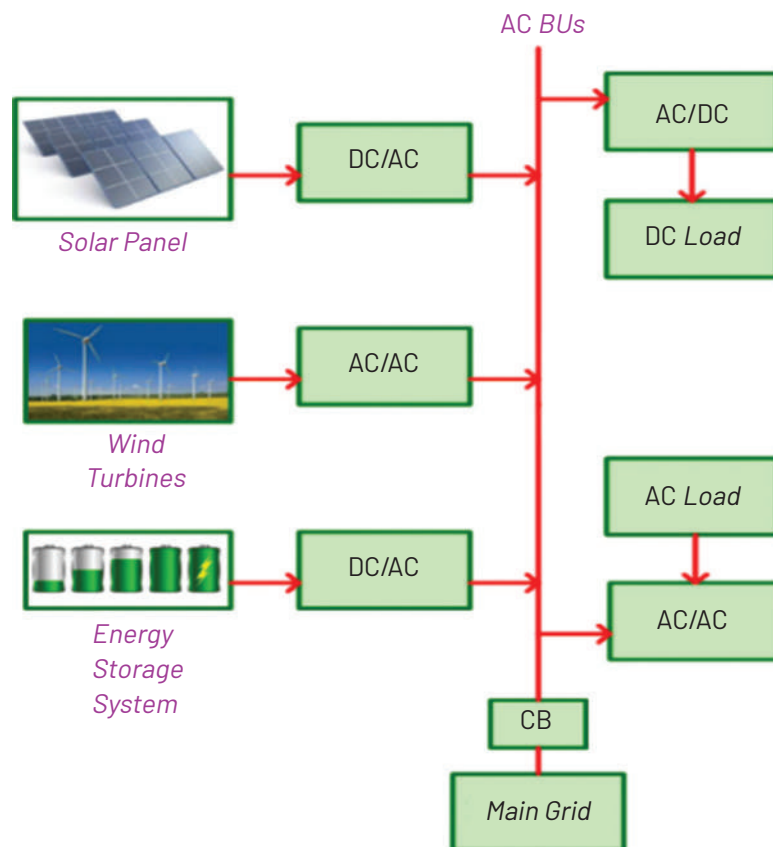


Gambar 4.30 Bagan Sistem Microgrid DC (*Direct Current Microgrid*)

Sumber: Yahyaoui (2018)

Pada Gambar 4.30, PLTB, PLTS, dan baterai sebagai sumber energi terbarukan menghasilkan dan menyimpan energi dalam bentuk DC. Penggunaan *microgrid* DC memungkinkan distribusi energi dari sumber-sumber ini langsung ke beban tanpa perlu dikonversi terlebih dahulu menjadi arus bolak-balik (AC) sehingga mengurangi kerugian akibat konversi daya. Selain itu, banyak perangkat elektronik modern seperti LED, komputer, server data, dan peralatan rumah tangga lainnya juga beroperasi dengan arus DC.

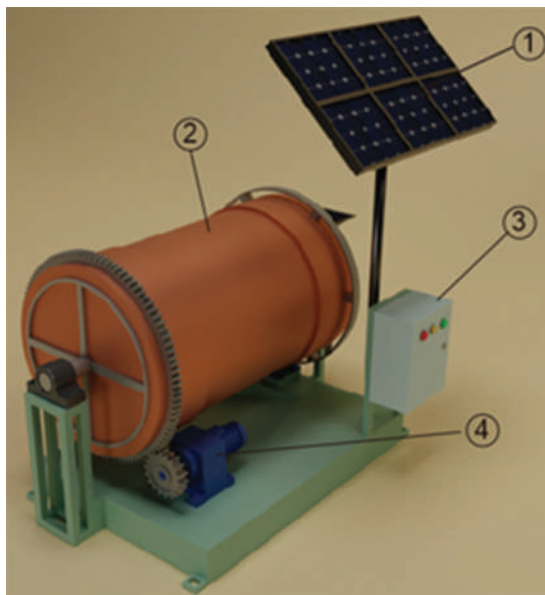
Microgrid AC (*Alternating Current Microgrid*) ialah jenis *microgrid* yang menggunakan arus bolak-balik (AC) sebagai metode utama untuk distribusi listrik. *Microgrid* AC merupakan sistem distribusi listrik skala kecil yang dapat beroperasi secara mandiri (terpisah) dari jaringan listrik utama atau terhubung ke jaringan tersebut. Konfigurasi *microgrid* AC dapat dibagi menjadi dua jenis: terhubung ke jaringan (*on-grid*) dan terpisah dari jaringan (*off-grid*). Konfigurasi ini juga dapat melibatkan koneksi dengan jaringan AC, DC, dan utilitas lainnya. Dalam hal distribusi, *microgrid* AC dapat terdiri atas sistem AC satu *phase* atau tiga *phase* dengan atau tanpa saluran netral.



Gambar 4.31 Bagan Sistem *Microgrid* AC
 Sumber: Yahyaoui (2018)

Pada Sistem *Microgrid* AC yang ditunjukkan dalam Gambar 4.31, sejumlah sumber energi dikonversi menjadi arus AC dengan tegangan yang memenuhi standar transien. Standar ini mencakup kemampuan sistem untuk tetap sinkron dan mempertahankan stabilitas operasional setelah menghadapi gangguan besar seperti hubung singkat atau pelepasan beban besar. Ini melibatkan bagaimana sistem merespons perubahan mendadak dalam kondisi operasi serta seberapa cepat sistem dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan. Peralatan transien, seperti *surge arrester*, *transient voltage surge suppressor* (TVSS), dan *capacitor bank*, dirancang untuk melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan sementara yang dapat merusak peralatan. *Surge arrester* mengalihkan tegangan berlebih akibat sambaran petir atau gangguan lainnya ke tanah, TVSS membatasi lonjakan tegangan untuk melindungi peralatan elektronik sensitif, dan *capacitor bank* membantu menstabilkan tegangan serta mengurangi efek transien dari perubahan mendadak dalam arus listrik. Selain itu, perangkat seperti *transient voltage filter*, *voltage stabilizer*, dan *uninterruptible power supply* (UPS) juga memainkan peran penting dalam mengurangi dampak fluktuasi dan menjaga kestabilan sistem tenaga.

Sebagai contoh: studi kasus menerapkan pengetahuan pemasangan energi hibrida pada mesin pengering hasil pertanian bertenaga *hybrid* dan portabel pada pemukiman terpencil di Desa Broto, Kecamatan Slahung, Ponorogo, Jawa Timur.



Keterangan Gambar

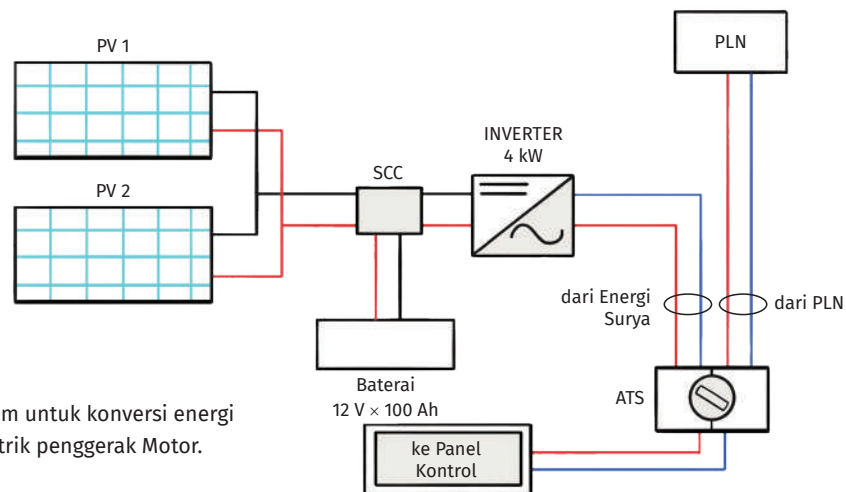
1. Panel surya
2. Silinder mesin pengering
3. Panel kontrol kelistrikan dan motor
4. Motor listrik dengan gearbox

Gambar 4.32 Desain Alat Pengering Menggunakan Energi Hibrida

Sumber: Al Kindhi et al. (2024)

Desa Broto, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo merupakan salah satu desa yang terletak di ujung paling selatan perbatasan antara Ponorogo dan Pacitan, Jawa Timur. Lokasinya yang berada di pegunungan dan jauh dari pusat kota menjadikan pertanian merupakan mata pencaharian utama penduduk di sana. Pada saat panen padi, untuk memisahkan biji padi dari sekamnya, padi harus dijemur dan dikeringkan terlebih dahulu. Selama ini, proses penjemuran padi dilakukan secara manual sehingga memakan banyak waktu dan tenaga. Selain itu, cuaca di pegunungan tidak menentu, terkadang sinar matahari tertutup kabut walaupun di musim panas, mengakibatkan proses pengeringan padi menjadi lebih lama. Ada yang mengusulkan desain alat pengering padi dan produk pertanian lainnya dengan tenaga hibrida dan *portable*. Mesin pengering yang diusulkan memiliki sumber energi dari listrik PLN maupun listrik dari tenaga surya. Dengan adanya penyimpanan energi dari tenaga surya ke dalam baterai, alat yang diusulkan menjadi mudah di mobilisasi ke area-area sawah tanpa perlu memikirkan sumber listrik. Melalui pemanfaatan mesin pengering bertenaga hibrida ini, hasil padi kering di Desa Broto menjadi 3-5% lebih banyak dibandingkan dengan pengeringan cara manual dengan perhitungan seluruh hasil panen dan penambahan satu mesin tenaga hibrida (Al Kindhi et al., 2024).

Proses pengerjaan dimulai dengan perancangan atau desain model mesin pengering yang fleksibel. Kemudian, dilakukan perancangan secara mekanikal dan elektronik. Secara mekanikal, dengan merancang dan mengidentifikasi kebutuhan pembangunan mesin secara mekanik. Secara elektronik, pembuatan *wiring diagram* dan analisis kebutuhan komponen elektronik saat ini, seperti perhitungan jumlah panel surya yang dibutuhkan, kapasistas baterai spesifikasi inverter serta penggunaan ATS (*Automatic Transfer Swicth*) yang berfungsi seperti saklar otomatis. Akibatnya, jika sumber listrik dari PLN terputus atau pemadaman, saklar akan berpindah ke sumber listrik dari baterai yang disuplai dari solar panel.



Gambar 4.33 Wiring diagram untuk konversi energi tenaga surya ke tenaga listrik penggerak Motor.
Sumber: Al Kindhi et al., (2024)

Sumber listrik pada mesin pengering hasil pertanian bertenaga hibrida bersumber dari listrik PLN dan listrik baterai yang berasal dari panel surya, *wiring diagram* dapat dilihat pada Gambar 4.33. Untuk menangkap energi matahari, peralatan ini menggunakan panel surya 120 wp 2 buah sebagai sumber tegangan. Disediakan kotak panel berisi ATS dan SCC (*Solar Charge Controller*) yang berfungsi untuk: (1) memutus tegangan jika baterai sudah terisi penuh; (2) sebagai penghubung antara baterai dan inverter untuk mengubah listrik DC dari baterai menjadi listrik AC, (3) menggerakkan motor listrik pada mesin pengering yang akan memutar bak pengaduk.

Aktivitas 4.5

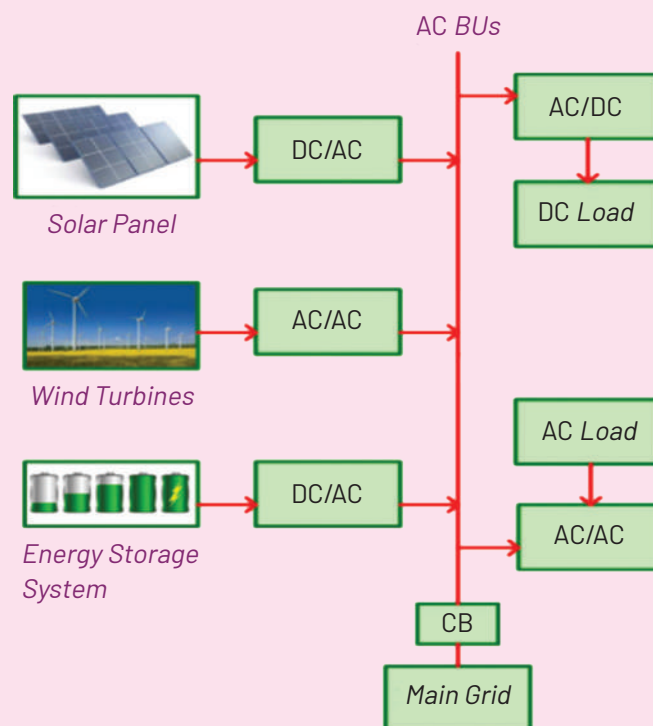
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan perancangan sistem elektrik energi hibrida secara gotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

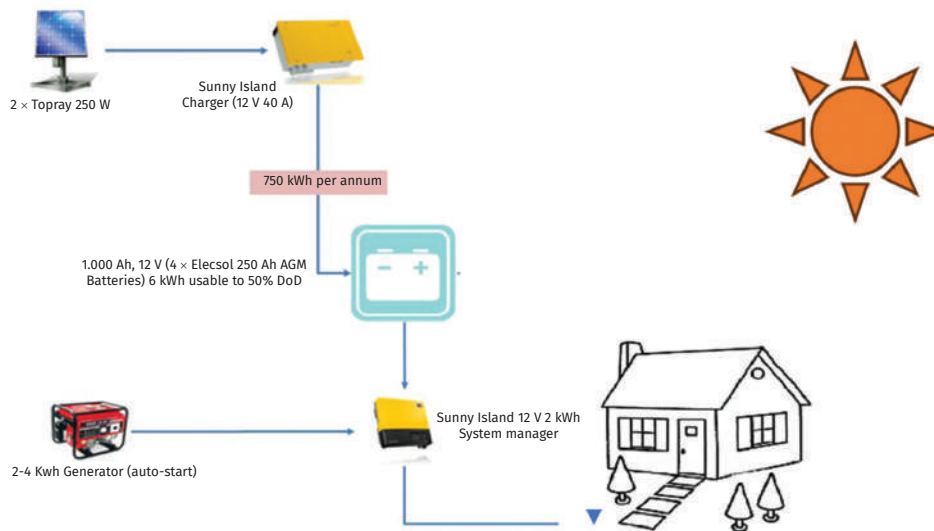
1. Buatlah kelompok terdiri atas 4-5 orang.
2. Perhatikan gambar berikut ini.



3. Diskusikan dalam kelompok, kemudian presentasikan di dalam kelas dari berikut ini.
 - a. Buatlah daftar kebutuhan peralatan dan komponen untuk memasang energi hibrida berdasarkan gambar di atas.
 - b. Bagaimanakah sistem kerja dari bagan gambar di atas? Terangkan dengan singkat dan jelas.
 - c. Ide apa yang akan kamu lakukan jika memiliki pendanaan yang cukup untuk membeli peralatan dan komponen energi hibrida. Resume rencanamu menjadi proposal yang dapat bermanfaat bagi dirimu, keluarga atau lingkungan sekitar.

4. Perancangan Sistem Elektrik Hibrida PLTD – PLTS

Sistem kerja hibrida PLTD dan PLTS menggabungkan dua sumber energi untuk menciptakan solusi yang efisien dan andal dalam penyediaan listrik. PLTS menghasilkan energi listrik dari sinar matahari, sementara PLTD menyediakan daya cadangan dan stabilitas ketika sinar matahari tidak mencukupi, seperti pada malam hari atau saat cuaca buruk.



Gambar 4.34 Hibrida PLTD dan PLTS

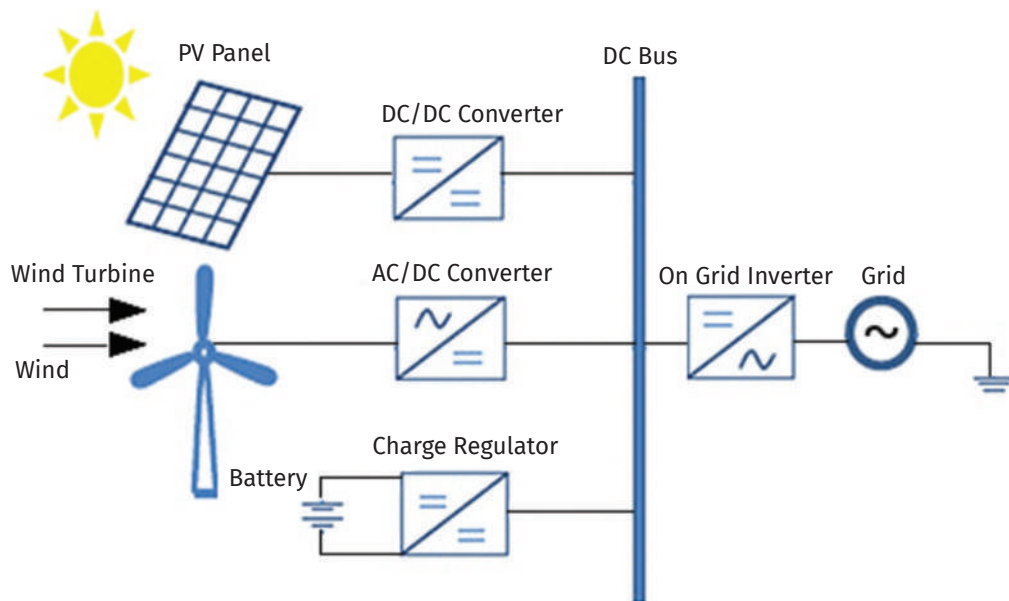
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada Gambar 4.34, panel surya menghasilkan listrik DC selama siang hari, kemudian dialirkan ke peralatan *charger controller*. Sistem pengisian baterai beroperasi pada tegangan 12 volt dengan arus maksimum 40 A, menggunakan empat baterai dengan spesifikasi 12 volt

dan 250 Ah masing-masing sehingga total kapasitas baterai mencapai 1.000 Ah. Tegangan *output* dari baterai diteruskan ke inverter dengan sistem manajer yang beroperasi pada 12 volt dan batas maksimal 2 kW, yang mengubah arus DC menjadi AC sebelum disalurkan ke jaringan rumah tangga. PLTD dengan kapasitas 2-4 kW menghasilkan tegangan AC yang juga terhubung ke sistem manajer untuk menyesuaikan *phase* dan frekuensi, dan kemudian didistribusikan ke rumah tangga. Selama operasi, PLTD juga berfungsi untuk mengisi baterai. Sistem hibrida ini saling melengkapi dan berkolaborasi untuk memastikan pasokan listrik yang stabil.

5. Perancangan Sistem Elektrik Hibrida PLTB - PLTS

Perancangan sistem elektrik untuk PLT Hibrida, yang mengintegrasikan PLTB dan PLTS, bertujuan untuk memanfaatkan dua sumber energi terbarukan secara bersamaan. Kedua sumber ini dapat saling melengkapi dan diatur melalui sistem distribusi DC *Microgrid*, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.35 Perencanaan Hibrida PLTB dan PLTS

Sumber: Özçelik (2017)

Saat matahari bersinar terang, panel surya menghasilkan listrik tegangan DC yang dialirkan ke DC Bus. Tegangan DC ini dibagi menjadi dua jalur: jalur pertama menuju inverter, yang mengubah tegangan DC menjadi AC untuk disuplai ke jaringan listrik beban. Jalur kedua menuju *charge regulator* untuk mengisi baterai. *Wind turbine* atau PLTB, ketika

ada embusan angin, menghasilkan listrik AC dengan tegangan rendah yang fluktuatif, yang kemudian dialirkan ke AC/DC *converter* untuk diubah menjadi tegangan DC. Tegangan dari PLTB juga dibagi menjadi dua arah: bagian pertama menuju inverter untuk diubah menjadi AC dan disalurkan ke jaringan pemakaian beban, sementara bagian kedua menuju *charge regulator* untuk mengisi baterai. Ketika PLTS dan PLTB tidak menghasilkan listrik, tegangan yang disimpan dalam baterai digunakan untuk memberi daya pada inverter sehingga pasokan listrik untuk beban tetap tersedia setiap saat.

Contoh:

Kita memiliki kebutuhan listrik pada sebuah puskesmas terpencil yang akan dibangun PLTS dan PLTB. Berapakah kapasitas sumber energi yang harus disediakan sehingga kebutuhan harian ini dapat terpenuhi?

1. Perkirakan atau estimasi beban listrik harian, dengan melakukan identifikasi semua beban listrik: lampu, peralatan elektronik, dan penambahan alat lain.
2. Tentukan daya (dalam watt) untuk setiap perangkat dan berapa lama mereka akan digunakan per hari (dalam jam).
3. Hitung total kebutuhan energi harian dalam watt-jam (Wh) atau kilowatt-jam (kWh).

Tabel 4.1 Identifikasi Beban Listrik

Nama Alat	Spesifikasi Watt	Lama Pemakaian	Watt Hour
Lampu LED	500	15	7.500
Radio Komunikasi	50	24	1.200
Modem	25	24	600
Motor Oksigen	50	24	1.200
Pompa Air	100	24	2.400
Lemari Pendingin	100	24	2.400
Kipas	100	7	700
TOTAL			16.000 WH

Setelah melakukan inventarisasi, kita mendapatkan data kebutuhan energi harian (Wh), yaitu total kebutuhan energi harian = 16.000 Wh (16 kWh).

1. Kapasitas PLTS: Estimasi waktu penyinaran matahari efektif per hari: misalnya, 4 jam per hari (bergantung pada lokasi).

☉ Kapasitas panel surya yang dibutuhkan = $16.000 \text{ Wh}/4 \text{ jam} = 4.000 \text{ Wp}$ (Watt peak)

Ini merupakan kapasitas total panel surya yang harus dipasang. Untuk memperhitungkan efisiensi sistem (misalnya, efisiensi inverter, penyimpanan baterai, kerugian dalam konversi, dll.), biasanya ditambahkan sekitar 20-30% lebih dari kapasitas yang dibutuhkan:

☉ Kapasitas dengan margin = $4.000 \text{ Wp} \times 1,3 = 5,200 \text{ Wp}$

2. Kapasitas PLTB: Estimasi kecepatan angin rata-rata dan waktu operasional per hari. Misalnya, anggaplah turbin angin dapat beroperasi 8 jam per hari dengan kecepatan angin rata-rata yang mendukung.

☉ Kebutuhan dari PLTB = $16.000 \text{ Wh} - (4.000 \text{ Wp} \times 4 \text{ jam}) = 16.000 \text{ Wh} - 16.000 \text{ Wh} = 0 \text{ Wh}$ (Jika PLTS dapat memenuhi seluruh kebutuhan, PLTB menjadi cadangan atau menurunkan kapasitas PLTS).

☉ Jika sebagian energi diharapkan dari PLTB, kapasitas turbin angin yang dibutuhkan dihitung berdasarkan kontribusinya terhadap total kebutuhan energi. Misalnya, jika PLTB diharapkan menyuplai 50% kebutuhan:

PLTB harus menghasilkan 8.000 Wh selama 8 jam = 1.000 W

3. Untuk menghitung kapasitas baterai yang diperlukan, kita perlu mempertimbangkan beberapa faktor, termasuk kebutuhan energi harian, hari otonomi (jumlah hari tanpa sinar matahari atau angin), dan kedalaman pelepasan baterai (*Depth of Discharge/DoD*).

Langkah-langkah menghitung kapasitas baterai ialah seperti berikut.

☉ Kita menghitung kebutuhan energi harian (Wh), sudah diketahui total kebutuhan energi harian = 16.000 Wh .

☉ Hari Otonomi (*Autonomy Days*): Misalkan kita ingin sistem dapat beroperasi selama 2 hari tanpa sinar matahari atau angin.

- 🔸 Kebutuhan energi selama 2 hari = $16.000 \text{ Wh} \times 2 = 32.000 \text{ Wh}$
- 🔸 Kedalaman Pelepasan Baterai (DoD): misalkan kita menggunakan baterai dengan DoD 80%. Artinya, kita hanya ingin menggunakan 80% dari kapasitas total baterai untuk menjaga umur baterai. Maka;

kapasitas baterai yang dibutuhkan = $32.000 \text{ Wh} / 0,8 = 40.000 \text{ Wh}$

Dengan Tegangan Sistem: Misalkan sistem menggunakan baterai 48 V, akan ditemukan: kapasitas baterai dalam Ah = $40.000 \text{ Wh} / 48 \text{ V} = 833,33 \text{ Ah}$

Kesimpulannya, kita menemukan angka baterai yang harus disediakan: kapasitas baterai yang dibutuhkan ialah 40.000 Wh atau 833,33 Ah pada 48 V.

Jumlah baterai yang tersedia di pasaran misalnya 100 Ah. Maka, jumlah baterai yang diperlukan:

jumlah baterai = $833,33 \text{ Ah} / 100 \text{ Ah} = 8,33$ dibulatkan menjadi 9 buah dengan pemasangan sistem 48 Volt. Memerlukan rekayasa pemasangan antara seri dan paralel.

Aktivitas 4.6

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menghitung kapasitas sumber energi dalam sistem elektrik energi hibrida secara gotong royong dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Perhatikan studi kasus berikut ini.

Ada sebuah Sekolah SMK Terpencil yang akan dibangun PLTS dan PLTB, membutuhkan Listrik 20.000 Watt.
2. Berapakah kapasitas sumber energi yang harus disediakan oleh PLTS-PLTB-Baterai sehingga kebutuhan harian dapat terpenuhi?

Aktivitas 4.7

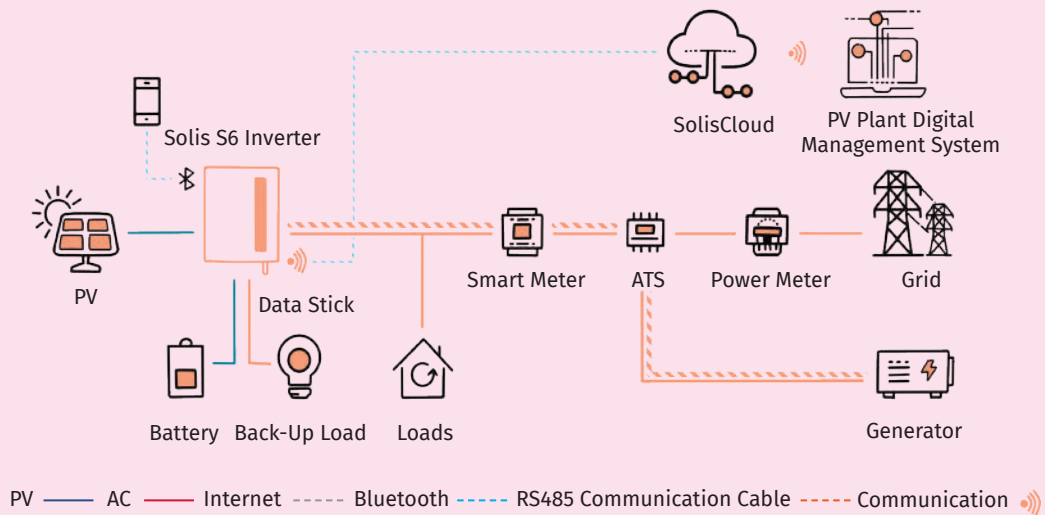
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan perancangan sistem elektrik energi hibrida secara mandiri dan bernalar kritis.

Langkah-Langkah:

1. Perhatikan gambar berikut ini.



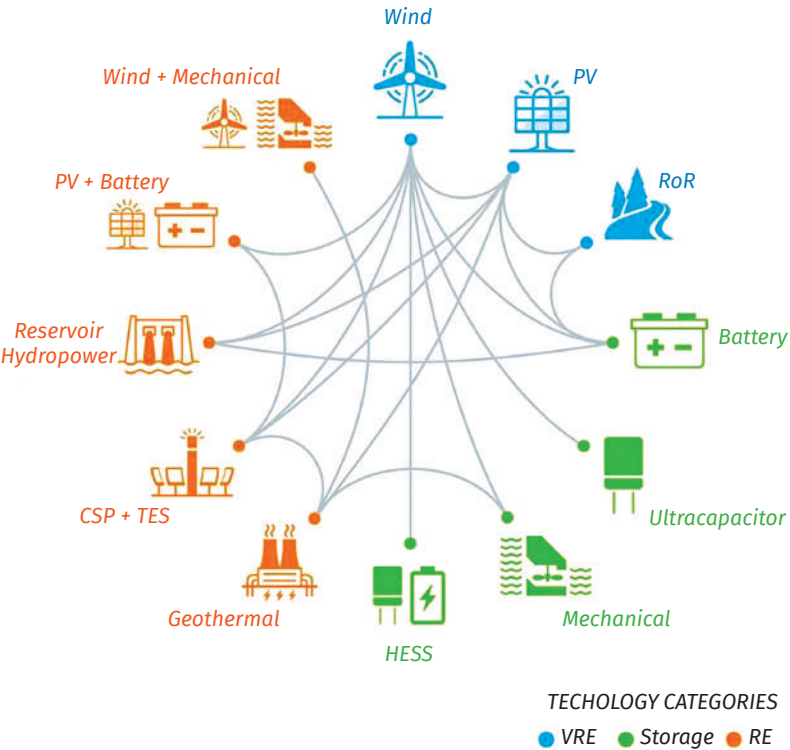
2. Deskripsikan gambar di atas dengan bahasa yang kamu pahami. Presentasikan penjelasan tersebut di depan kelas dan siap untuk menjawab pertanyaan jika ada teman yang belum memahami.

C. Pemasangan Energi Hibrida

Pemasangan sistem energi hibrida merupakan proses integrasi antara PLTS dan PLTD, serta PLTS dan PLTB untuk menciptakan sumber energi yang berkelanjutan dan efisien. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan dengan menggabungkan keunggulan dari setiap sumber sehingga mampu menghasilkan listrik secara konsisten sepanjang hari, baik di siang hari melalui tenaga surya maupun saat angin bertiup. Dengan perencanaan dan instalasi yang tepat, pemasangan energi hibrida dapat memenuhi kebutuhan listrik di berbagai kondisi geografis dan cuaca, serta memberikan solusi bagi daerah yang belum terjangkau jaringan listrik utama.

1. Pemasangan Sistem Mekanik Energi Hibrida

Sistem mekanik ialah rangkaian komponen yang bekerja bersama untuk mengubah, mentransmisikan, atau mengontrol gerak dan energi fisik. Komponen-komponen ini biasanya melibatkan elemen-elemen seperti roda gigi, katrol, poros, bantalan, pegas, dan lainnya, yang berinteraksi secara mekanis untuk menghasilkan suatu *output* atau kinerja tertentu berdasarkan input yang diberikan.



Gambar 4.36 Kombinasi Energi Hibrida
Sumber: Murphy et al. (2021)

Dalam teknologi energi hibrida, terdapat bagian yang melibatkan teknologi mekanik dan non-mekanik. Tinjauan pustaka dari National Renewable Energy Laboratory (NREL) mengidentifikasi beberapa kombinasi teknologi yang diusulkan. Node berwarna biru mewakili teknologi variabel energi terbarukan (*variable renewable energy*, VRE), node berwarna hijau menunjukkan jenis teknologi penyimpanan energi (*storage*), dan node berwarna oranye mewakili teknologi lain yang melengkapi kelemahan sistem energi terbarukan (*renewable energy*, RE). Garis busur menggambarkan pasangan teknologi yang telah diusulkan dalam literatur. Beberapa contohnya termasuk PV (fotovoltaik), RoR (*run-of-river*), sistem penyimpanan energi hibrida (*Hybrid Energy Storage System*, HESS), dan CSP + TES (pemusatan daya surya dengan penyimpanan energi termal). Ikon penyimpanan mekanis mencakup penyimpanan energi udara terkompresi dan *flywheel*, yang pada akhirnya mengubah energi yang tersimpan menjadi listrik.

Kegiatan pemasangan mekanik pada sistem hibrida, seperti pada turbin angin atau sistem energi terbarukan lainnya yang menggabungkan beberapa sumber energi, biasanya melibatkan beberapa tahap penting. Tahapan itu di antaranya ialah persiapan gambar kerja, peralatan, dan tenaga terlatih yang memami kesehatan dan keselamatan kerja.

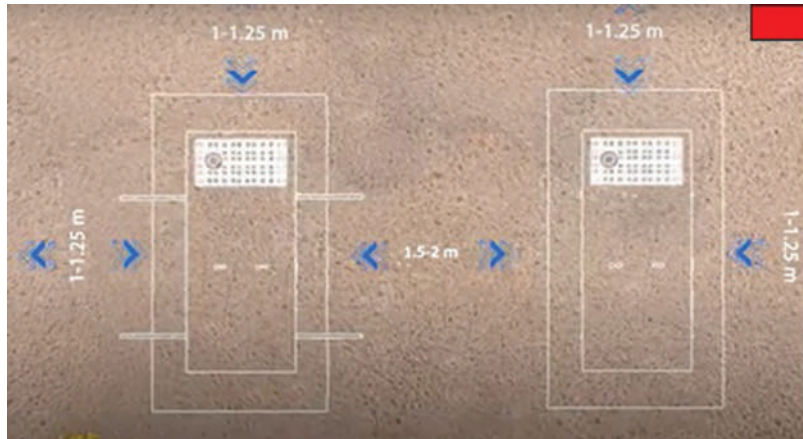
a. Pemasangan Sistem Mekanik PLTD

Dalam proses pemasangan bagian mekanik, penting untuk mempersiapkan alat bantu khusus untuk memasang generator set. Hal itu karena generator set memiliki berat dan memerlukan perlakuan khusus saat pemasangannya. Untuk mengangkat genset, terutama yang berukuran besar dan berat, diperlukan alat angkat yang sesuai agar prosesnya berlangsung aman dan efisien. Beberapa alat bantu angkat yang sering digunakan, misalnya *crane mini portable*, yaitu jenis peralatan angkat model *crane* yang dapat dipindahkan dan harus memperhatikan spesifikasi daya angkatnya. Peralatan ini dapat membantu memindah, menggeser, dan mengangkat generator set yang perlu ditempatkan pada lokasi yang sudah dibangun dalam ruangan terbuka dan tertutup.



Gambar 4.37 Crane Mini yang Dapat Berpindah

Apabila kita memasang peralatan, perlu diperhitungkan jarak antara peralatan yang akan kita pasang. Sebaiknya, kita juga memperhatikan kesehatan dan keselamatan kerja dan kenyamanan saat ada perawatan dan perbaikan.



Gambar 4.38 Jarak Aman Penempatan Peralatan Generator Set

Pada generator ukuran besar, perlu perlakuan khusus untuk menggunakan peralatan angkat yang kapasitasnya melebihi berat beban. Hal itu dapat dilakukan dengan menggunakan *crane* yang lebih besar dan mampu menjangkau lokasi penempatan dengan tepat.



Gambar 4.39 Penempatan Genset dengan *Crane Mobile*

Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

b. Pemasangan Sistem Sipil - Mekanik PLTB

Pemasangan sistem hibrida PLTB dan PLTS di antaranya memasang penyangga dengan alat bantu yang sesuai dengan beban dan lokasi pembangkit. Sebagai contoh, pemasangan bagian mekanik pompa air tenaga angin (*wind pump*) yang mirip dengan PLTB di Kabupaten Boyolali Jawa Tengah, seperti diterangkan dalam gambar berikut.

Penyangga *wind pump* menggunakan model Truss dengan penambahan koneksi ke fondasi. Penyanggah ini memerlukan presisi yang tinggi agar lobang baut dari setiap kaki cocok.

Pemasangan baling-baling turbin angin untuk model banyak bilah (*multiblade*) perlu bantuan teknik tali-temali yang seimbang ditempatkan pada bagian *hub*. Dengan demikian, saat diangkat dengan peralatan, posisinya seimbang dan memudahkan dalam pemasangan.



Gambar 4.40 Penempatan Koneksi Penyangga dan Fondasi
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)



Gambar 4.41 Pemasangan Bilah Turbin
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Peralatan angkat, sebagai contoh *crane*, memiliki spesifikasi tinggi pengangkatan dan maksimal beban yang dapat diangkat. Untuk pemasangan yang aman, kita perlu memilih spesifikasi beban dan tinggi di atas peralatan yang akan kita pasang. Sebagai contoh, jika penyangga turbin angin 10 meter, peralatan angkat harus maksimal tinggi 16 meter.

Aktivitas 4.8

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan pemasangan sistem mekanik energi hibrida secara gotong royong dan kreatif.



Gambar 4.42 Pemasangan Bagian Mekanik Turbin Angin
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Langkah-Langkah:

1. Buatlah kelompok terdiri atas 3-4 orang.
2. Kemudian, buatlah daftar komponen energi terbarukan yang memiliki sistem mekanik dan tidak memiliki sistem mekanik.
3. Cari informasi peralatan bantu angkat di sekitar daerahmu: nama pemilik usaha, nama peralatan, spesifikasi, dan harga sewa.
4. Jelaskan langkah-langkah pemasangan sistem mekanik energi hibrida berdasarkan Gambar 4.42, menggunakan bahasamu sendiri. Presentasikan penjelasan tersebut di depan kelas dan bersiaplah untuk menjawab pertanyaan dari teman-temanmu dengan jelas.

2. Pemasangan Sistem Kelistrikan Energi Hibrida

Pembangunan dan pemasangan pembangkit listrik hibrida menggunakan prosedur pemasangan pembangkit listrik, yaitu Standar Nasional Indonesia Komite Teknis Instalasi dan Keandalan Ketenagalistrikan dan Komite Teknis PUIL. Di antara standar yang harus dipenuhi ialah penggunaan alat pelindung diri (APD). APD untuk menjaga kesehatan dan keselamatan kerja di bidang kelistrikan seperti tergambar di bawah ini.



Keterangan Gambar

- | | |
|--------------------|------------------------|
| A : Helm Safety | E : Tudung Pelindung |
| B : Kacamata | F : Body Harness |
| C : Sarung Tangan | G : Sepatu Safety Boot |
| D : Baju Tahan Api | H : Gas Detekto |

Gambar 4.43 Alat Pelindung Diri Kelistrikan

Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Peralatan, bahan, dan dokumen kerja yang diperlukan di antaranya, Surat Perintah kerja, tersedianya *Standard Operational Prosedure* (SOP), buku manual perlatan dan *job safety* analisis (JSA). Peralatan kerja yang diperlukan di antaranya peralatan sipil, *tool kits*, alat ukur listrik, dan peralatan lain yang sesuai dengan jenis teknologi yang akan dipasang pada lokasi target. Bahan pelengkap lainnya, misalnya bahan perlengkapan sipil (semen, pasir, batu, kerikil, serta *stempet*, dan pelumas.



Gambar 4.44 Peralatan Pemasangan Energi Hibrida
Sumber: Amin Wahyono, *Kemdikbudristek* (2024)

Tabel 4.2 Contoh Formulir JSA Pemasangan Energi Hybrid

JOB SAFETY ANALYSIS – FORMULIR PENGECEKAN	
<p>Lokasi : Jln Raya Sukorame Gandusari Trenggalek</p> <p>Departemen : Energi Terbarukan</p> <p>Pekerjaan : Pembangunan Pompa Air Tenaga Hibrida PLTS-PLTB</p> <p>Tanggal : 22 Agustus 2024</p>	
REFERENSI YANG DIPERLUKAN	
Sudahkah Prosedur, Standar, atau Praktik Kerja yang aman diperiksa.	<input type="checkbox"/> Ya <input type="checkbox"/> Tidak
(Lampirkan atau sebutkan prosedur yang diperlukan):	
PENILAIAN RISIKO (RISK ASSESSMENT – RA)	
Haruskah prosedur/praktik kerja yang ada dimodifikasi untuk melakukan pekerjaan ini? (MOC diperlukan)	<input type="checkbox"/> Ya <input type="checkbox"/> Tidak
Setelah dilakukan mitigasi (penanganan), apakah masih ada potensi bahaya yang dapat menimbulkan risiko yang besar? (RA berbasis skenario diperlukan)	<input type="checkbox"/> Ya <input type="checkbox"/> Tidak
PEMERIKSAAN JSA	
Sambil menunggu konfirmasi dari pemimpin pelaksana mengenai kondisi lokasi kerja, Saya setuju JSA ini mengidentifikasi langkah-langkah pelaksanaan tugas, bahaya, dan kontrol yang dibutuhkan.	
PEMERIKSA JSA (K3 Departemen):	
Nama :	
VERIFIKASI AREA KERJA	
Tim Kerja telah mengamati kondisi area kerjanya dan memastikan bahwa:	
<ul style="list-style-type: none"> • JSA ini telah mencakup bahaya yang mungkin terjadi dan menyiapkan kontrol yang diperlukan. • Tim memiliki pekerja & peralatan yang memadai untuk melaksanakan pekerjaan dengan aman. • Pihak lain yang akan terkena dampak pekerjaan telah diberi tahu. • Pengisolasian energi (jika perlu) telah DIVERIFIKASI dan DIBUKTIKAN. 	








<p>APABILA ADA JAWABAN “YA” PADA SALAH SATU PERTANYAAN DI ATAS, BERHENTI & HUBUNGI PIC UNTUK MELAKUKAN MOC ATAU RA</p>	
<p>PPE YANG DIPERLUKAN UNTUK PEKERJAAN INI (Simpulkan PPE dari THA dan/atau Formulir Penanganan Bahaya)</p>	
<input type="checkbox"/> HELM KESELAMATAN	<input type="checkbox"/> KACAMATA KESELAMATAN
<input type="checkbox"/> SEPATU KESELAMATAN	<input type="checkbox"/> PELINDUNG WAJAH (<i>SHIELD</i>)
<input type="checkbox"/> BOOT KESELAMATAN	<input type="checkbox"/> PELINDUNG MATA (<i>GOGGLES</i>)
PELINDUNG TELINGA <input type="checkbox"/> TUNGGAL/ <i>SINGLE</i> <input type="checkbox"/> GANDA/ <i>DOUBLE</i>	SARUNG TANGAN <input type="checkbox"/> KATUN <input type="checkbox"/> KULIT <input type="checkbox"/> PELINDUNG BENTURAN <input type="checkbox"/> UNTUK BAHAN KIMIA:
<input type="checkbox"/> MASKER DEBU <input type="checkbox"/> TUDUNG PELINDUNG <input type="checkbox"/> SCBA/SUPPLIED AIR	<input type="checkbox"/> APRON UNTUK BAHAN KIMIA <input type="checkbox"/> BODY HARNESS <input type="checkbox"/> GAS DETEKTOR
Lain-Lain:	








<p align="center">PEMIMPIN PELAKSANA / PEMEGANG IZIN</p>	
Nama / Tanda Tangan :	No.Telp. :
Perusahaan :	
<p align="center">LENGKAPI BAGIAN BERIKUT INI JIKA JSA <u>BUKAN</u> MERUPAKAN BAGIAN DARI IZIN KERJA</p>	
<p align="center">(Tanda tangani Pernyataan Izin (<i>Permit Declaration</i>) jika JSA ini merupakan bagian dari Izin Kerja/Permit)</p>	
<p align="center"><u>Pernyataan Tim Kerja:</u></p>	
<p>Saya menyatakan bahwa saya telah memeriksa JSA ini. Saya memahami tugas & tanggung jawab, saya memiliki keterampilan/ pengetahuan yang diperlukan, dan saya akan mematuhi perintah/ instruksi dalam melaksanakan tugas ini.</p>	
Nama	Tanda Tangan

JOB SAFETY ANALYSIS – TASK HAZARD ASSESSMENT FORM

Gunakan tabel ini untuk mengidentifikasi bahaya yang berkaitan dengan pekerjaan yang diusulkan. Tabel ini tidak memuat semua bahaya. Tentukan bahaya yang akan muncul untuk pekerjaan tersebut beserta cara mengatasinya & PPE yang diperlukan. CATATAN : JIKA JSA INI BAGIAN DARI PERMIT, THA PADA PERMIT DAPAT DIGUNAKAN UNTUK

MENGGANTIKAN THA BERIKUT

 Zat-Zat Berbahaya	 Bahaya Tumpahan	 Peralatan Panas/Dingin	 Kebisingan	 Benda Jatuh	 Peralatan Pengangkat	 Bekerja Pada Ketinggian
Kosongkan peralatan <input type="checkbox"/> Ikuti MSDS <input type="checkbox"/> Terapkan kontrol bahaya kesehatan terhadap (timbang, asbes, H2S, besi sulfide, sulfur dioksida dan NORM) <input type="checkbox"/> Uji/analisis material	<input type="checkbox"/> Kosongkan peralatan <input type="checkbox"/> Siapkan peralatan penampung di lokasi potensial terjadinya tumpahan. <input type="checkbox"/> Siapkan peralatan dan material pembersih tumpahan. <input type="checkbox"/> Tutup isolasi selang jika tidak digunakan.	<input type="checkbox"/> Panaskan atau dinginkan peralatan sebelum memulai pekerjaan. <input type="checkbox"/> Pasang pembatas untuk menghindari kontak. <input type="checkbox"/> Pasang tanda peringatan. <input type="checkbox"/> Lakukan pengontrolan suhu untuk menghindari retakan. <input type="checkbox"/> Pakai sarung tangan tahan panas.	<input type="checkbox"/> Pakai PPE pendengaran yang sesuai. <input type="checkbox"/> Kendalikan waktu paparan. <input type="checkbox"/> Matikan peralatan. <input type="checkbox"/> Gunakan peralatan yang tidak bising. <input type="checkbox"/> Gunakan peredam suara. <input type="checkbox"/> Sediakan atau gunakan komunikasi/teknik yang sesuai.	<input type="checkbox"/> Sediakan tanda dan pembatas untuk membatasi akses orang ke area di mana ada pekerjaan di atasnya. <input type="checkbox"/> Gunakan peralatan pengangkat untuk mengangkat peralatan kerja ke/dari platform. <input type="checkbox"/> Amankan peralatan (ikat)	<input type="checkbox"/> Pastikan kondisi dan sertifikasi peralatan pengangkat. <input type="checkbox"/> Dapatkan izin untuk melakukan pengangkatan di atas peralatan pemroses. <input type="checkbox"/> Miliki rencana kerja pengangkatan tertulis dan telah disetujui.	<input type="checkbox"/> Diskusikan cara kerja yang aman di ketinggian. <input type="checkbox"/> Periksa sertifikasi peralatan penghalang jatuh. <input type="checkbox"/> Gunakan praktik kerja yang aman saat turun dengan tali.

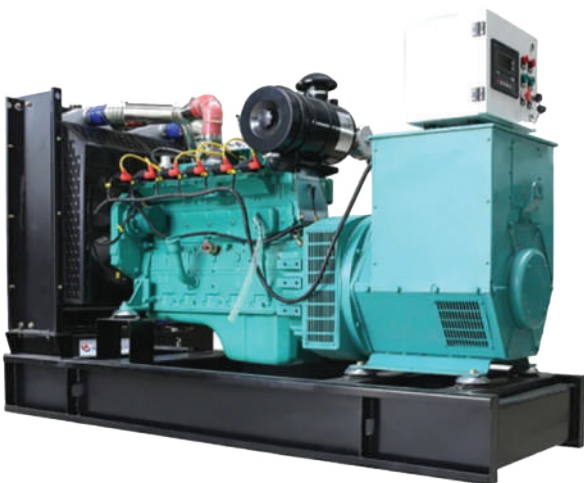
 Portable Electrical Equipment	 Bahaya Radiasi	 Benda/ Peralatan Bergerak	 Penanganan Manual	 Peralatan Kerja	 Peralatan yang Bergerak	 Terpelset/ Tersandung/ Terjatuh
<input type="checkbox"/> Periksa peralatan untuk mengetahui kondisi dan tanggal pengujian. <input type="checkbox"/> Lakukan pengujian gas secara terus-menerus. <input type="checkbox"/> Lindungi kabel listrik dari kerusakan.	<input type="checkbox"/> Batasi akses dengan pembatas dan tanda. <input type="checkbox"/> Beri tahu pekerja yang mungkin terkena dampak. <input type="checkbox"/> Terapkan control NORM. <input type="checkbox"/> Lakukan pengujian RAD.	<input type="checkbox"/> Panaskan atau dinginkan peralatan sebelum memulai pekerjaan. <input type="checkbox"/> Pasang pembatas untuk menghindari kontak. <input type="checkbox"/> Pasang tanda peringatan. <input type="checkbox"/> Lakukan pengontrolan suhu untuk menghindari retakan. <input type="checkbox"/> Pakai sarung tangan tahan panas.	<input type="checkbox"/> Amati pekerjaan yang ditangani secara manual. <input type="checkbox"/> Batasi muatan. <input type="checkbox"/> Menjaga postur tubuh. <input type="checkbox"/> Periksa kestabilan muatan dan platform kerja. <input type="checkbox"/> Cari bantuan orang lain/ bantuan mekanis – titik angkat.	<input type="checkbox"/> Periksa peralatan sebelum digunakan. <input type="checkbox"/> Dilarang menggunakan peralatan yang dimodifikasi. <input type="checkbox"/> Gunakan pelindung pada peralatan. <input type="checkbox"/> Gunakan peralatan yang sesuai dengan pekerjaan. <input type="checkbox"/> Tutup/buang ujung yang tajam.	<input type="checkbox"/> Atur lama waktu paparan pada saat menggunakannya <input type="checkbox"/> Amati dampak getaran pada peralatan. <input type="checkbox"/> Gunakan peralatan yang memiliki getaran rendah. <input type="checkbox"/> Lakukan kontrol kebisingan.	<input type="checkbox"/> Tanda/tutup permukaan yang tidak rata atau menonjol. <input type="checkbox"/> Amankan/tutup kabel, tali & pipa. <input type="checkbox"/> Bersihkan cairan. <input type="checkbox"/> Pasang pembatas/tali pada lubang terbuka.

a. Analisis Kebutuhan Listrik dan Komponen

Analisis kebutuhan listrik dan komponen melibatkan penentuan jumlah daya yang diperlukan untuk mengoperasikan semua peralatan listrik dalam suatu sistem dan pemilihan komponen yang sesuai, seperti inverter, baterai, dan sumber energi. Proses ini mencakup identifikasi jenis beban, perhitungan total konsumsi daya, dan pemilihan komponen yang dapat menangani kebutuhan daya tersebut secara efisien dan andal, memastikan sistem beroperasi dengan optimal, dan memenuhi kebutuhan energi yang diinginkan. Sebagai contoh, ada sebuah rumah sakit dengan data kebutuhan listrik seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Analisis Kebutuhan Listrik

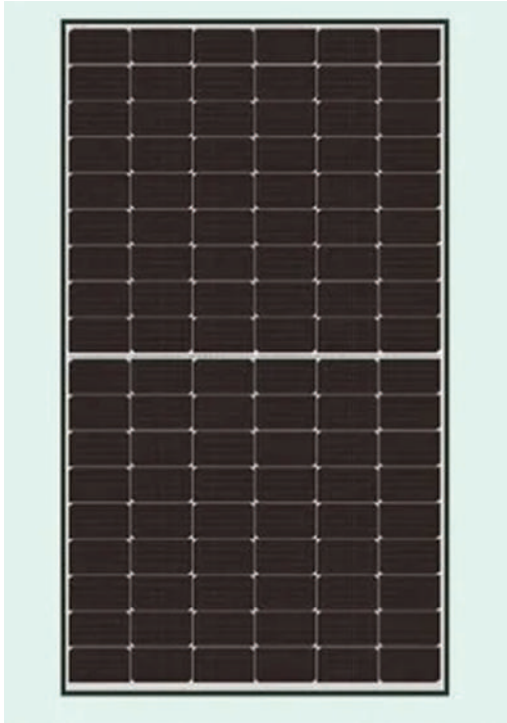
No	Sumber Daya	Spesifikasi	Kapasitas
1	Pembangkit Listrik Tenaga Diesel	Mesin Penggerak Diesel, Tenaga Kuda 60 PK, Generator 14 kW	14 kW
2	Pembangkit Listrik Tenaga Surya	5200 Wp bekerja 4 jam	16.000 Wp
3	Sistem Penyimpanan	Baterai Jenis 100 Ah × 9 Buah	900 Ah
Total			± 16.000 Watt



Gambar 4.45 Generator Set Berbahan Bakar Biogas dan Biosolar
Sumber: Shandong Pulita New Energy (2024)

Fitur tambahan panel surya ditingkatkan sebesar 20-30% dari kebutuhan energi. Selanjutnya, konfigurasi baterai dipilih berdasarkan hari otonomi atau kemampuan bertahan selama 2 hari tanpa sinar matahari. Setelah data kebutuhan listrik dikumpulkan, pengadaan alat dan bahan telah lengkap, selanjutnya, dilakukan instalasi sesuai petunjuk buku manual setiap alat.

Pemilihan panel surya dilakukan berdasarkan kebutuhan energi. Hal itu dilakukan dengan mempertimbangkan luas area yang tersedia dan kapasitas daya yang dapat dihasilkan. Panel surya yang digunakan ialah model monokristalin dengan spesifikasi seperti berikut.



Spesifikasi Solar panel yang digunakan

Lebar	: 1134 mm
Panjang	: 1722 mm
Tebal	: 40 mm
Berat	: 23 kg
Power (Pmax)	: 400 WP
Open Voltage (Voc)	: 37,07 V
Short Circuit Current (Isc)	: 13,79 A

Gambar 4.46 Solar Panel Monocrystalline

Pemilihan baterai dilakukan dengan mempertimbangkan kapasitas penyimpanan energi yang dibutuhkan, durasi otonomi atau kemampuan bertahan tanpa pengisian ulang, efisiensi, dan umur pakai. Hal penting lain yang harus diperhatikan ialah kompatibilitas dengan sistem energi lainnya, seperti panel surya dan inverter.

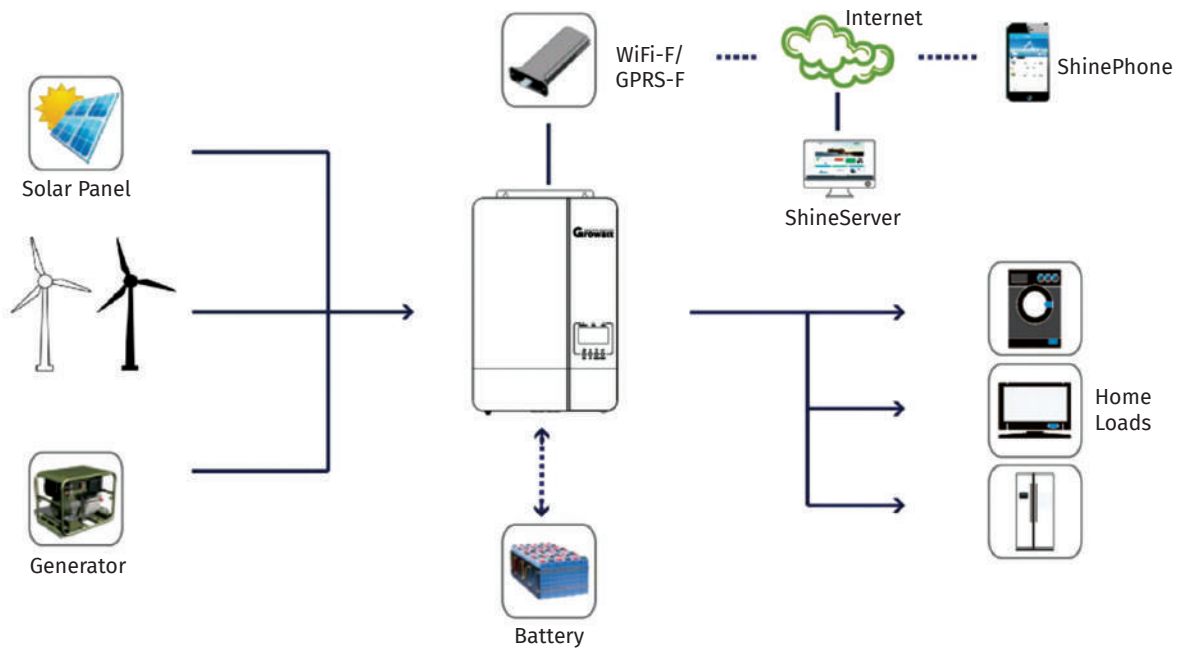


Baterai dengan spesifikasi seperti berikut.

1. Nominal Voltage (V) 12 menggunakan tegangan 12 volt. Artinya, pilihlah *output charger controller* yang menggunakan sistem 12 volt.
2. Nominal Capacity (Ah) 100. Artinya, kapasitas baterai ialah 100 Ampere Hour, dalam proyek kita membutuhkan 900 Ah. Jadi, kita perlu 9 buah. Design Life 10 years, masa hidup kerja normal ialah 10 tahun.
3. Terminal M8. Artinya, terminal konektor listrik dengan ukuran baut M8, di mana “M8” menunjukkan bahwa diameter ulir baut ialah 8 millimeter.
4. Max. Discharge Current 1.200 A (5S). Artinya, arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh suatu perangkat atau baterai ialah 1.200 ampere selama durasi 5 detik. Ini menunjukkan batas kemampuan perangkat untuk mengeluarkan arus tinggi dalam waktu singkat.

b. Diagram Pengkabelan Sistem Hibrida

Untuk mempermudah instalasi dan pemantauan, kita menggunakan peralatan yang terintegrasi seperti inverter, *charge controller*, *synchroniser*, dan monitoring dari Growatt, dengan bagan kerja sebagai berikut.



Gambar 4.47 Inverter dengan Model Integrasi

Sumber: Growatt (2024)

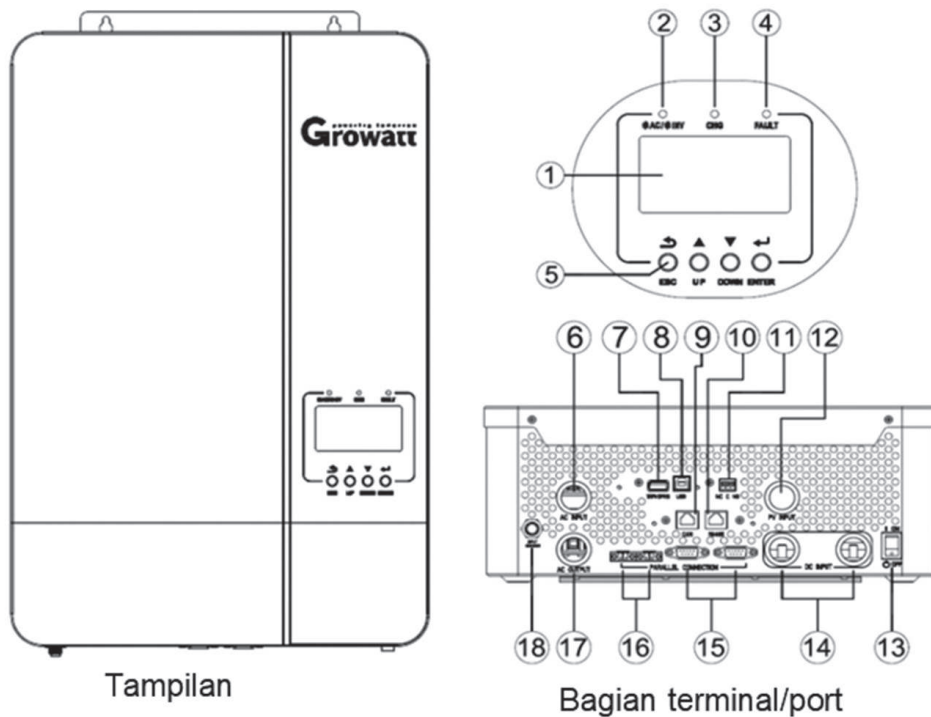
Pada Gambar 4.47, ada sebuah peralatan inverter surya *off-grid* multifungsi yang menggabungkan pengontrol muatan surya MPPT, inverter gelombang sinus murni dengan frekuensi tinggi, dan modul fungsi UPS dalam satu perangkat. Inverter ini sangat ideal untuk aplikasi cadangan daya *off-grid* dan penggunaan energi mandiri. Inverter ini dapat beroperasi baik dengan maupun tanpa baterai. Untuk pengoperasian yang lengkap, sistem ini juga dapat terkoneksi dengan modul PV, generator, atau jaringan PLN.

Spesifikasi inverter:

- ☀️ daya terukur 3,5 kW hingga 5 kW,
- ☀️ faktor daya 1,
- ☀️ rentang MPPT 120 V~430 V, dan
- ☀️ tegangan terbuka 450 Voc.

Inverter frekuensi tinggi dengan ukuran kecil dan ringan, serta *output* AC gelombang sinus murni. Dapat mengoperasikan beban baik dari tenaga surya maupun jaringan utilitas secara bersamaan. Dilengkapi dengan CAN/RS485 untuk komunikasi EMS dan mampu berfungsi tanpa baterai. Dapat dioperasikan secara paralel hingga 6 unit (hanya dengan baterai terhubung). Monitoring jarak jauh melalui WIFI/GPRS tersedia sebagai opsi, memungkinkan pengguna untuk memantau status sistem PV dari ponsel atau situs web kapan saja dan di mana saja.

Pada bagian terminal (*port*) pada inverter, terdapat terminal kabel yang memerlukan perlakuan khusus sesuai dengan peruntukannya. Hal itu dapat kita lihat seperti di bawah ini.



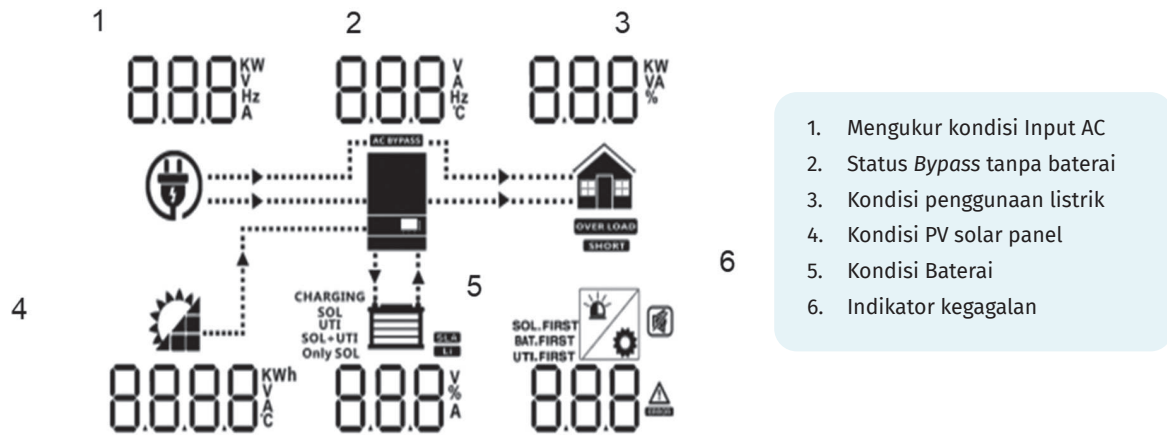
Keterangan bagian inverter Gambar 4.55:

- | | | |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1. Layar LCD | 7. Port komunikasi WiFi/GPRS | 13. Sakelar daya hidup/mati |
| 2. Indikator status | 8. Port komunikasi USB | 14. Input baterai |
| 3. Indikator pengisian | 9. Port komunikasi CAN | 15. Port komunikasi parallel |
| 4. Indikator kesalahan | 10. Port komunikasi RS485 | 16. Port berbagi arus |
| 5. Tombol fungsi | 11. Kontak kering | 17. Output AC |
| 6. Input AC | 12. Input PV | 18. Pemutus sirkuit |

Gambar 4.48 Bagian Inverter Integrasi

Sumber: Growatt (2024)

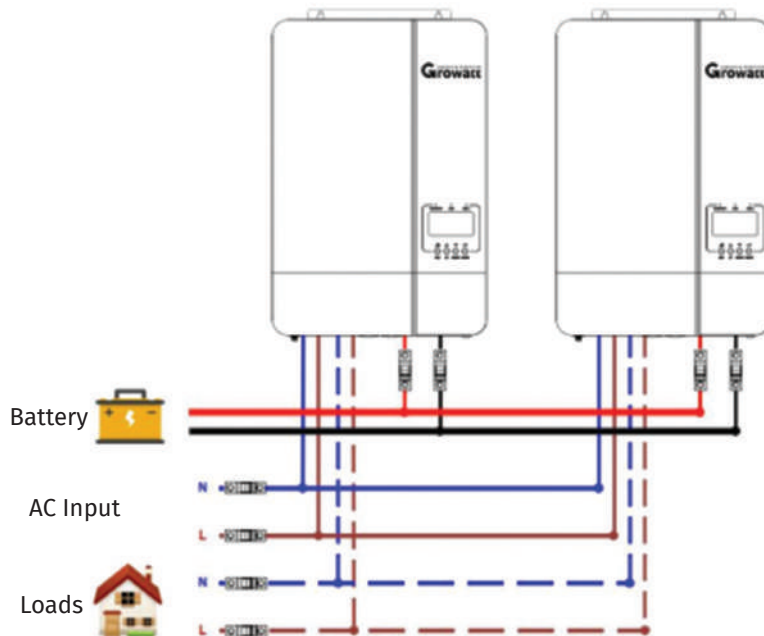
Pada layar monitor, peralatan ini dapat mengetahui kondisi tegangan masuk dari beberapa sumber energi dan penggunaan listrik dalam angka yang tepat, seperti gambar berikut.



- 1. Mengukur kondisi Input AC
- 2. Status Bypass tanpa baterai
- 3. Kondisi penggunaan listrik
- 4. Kondisi PV solar panel
- 5. Kondisi Baterai
- 6. Indikator kegagalan

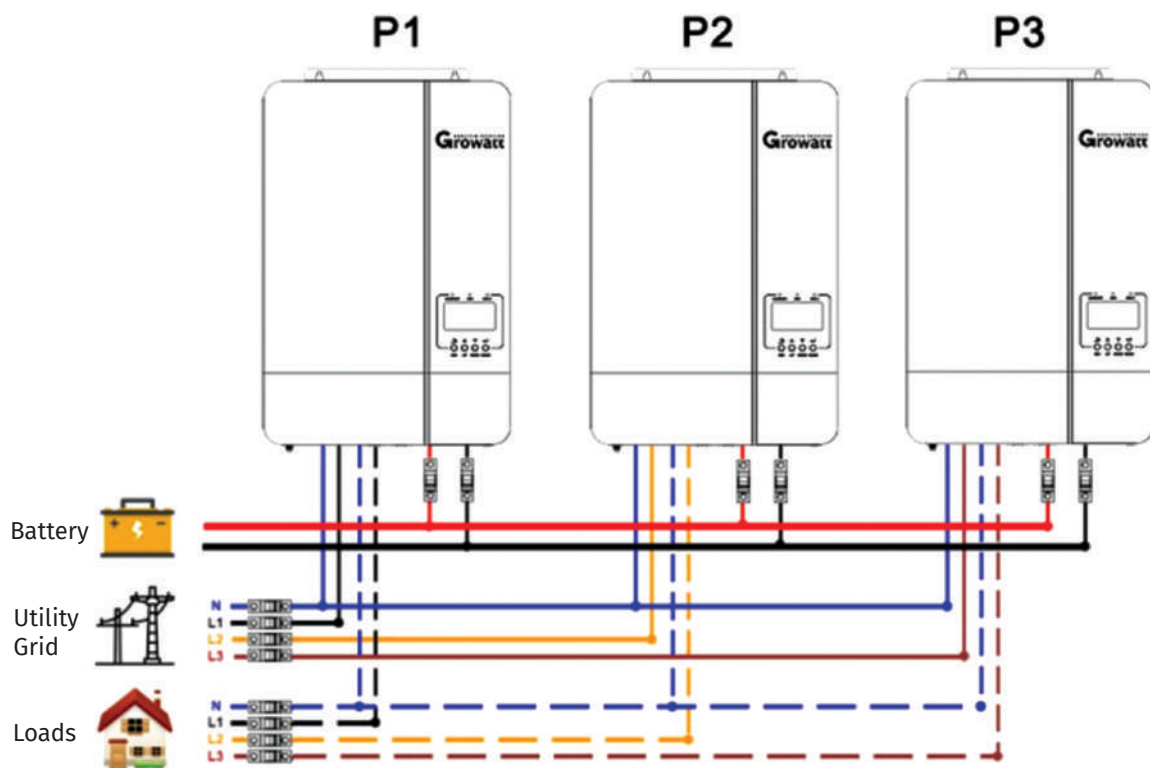
Gambar 4.49 Tampilan Layar LCD Mengukur Beberapa Titik Peralatan
 Sumber: Growatt (2024)

Memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat pada penggunaan inverter dapat dilakukan secara paralel pada sistem satu *phase* dan tiga *phase*.



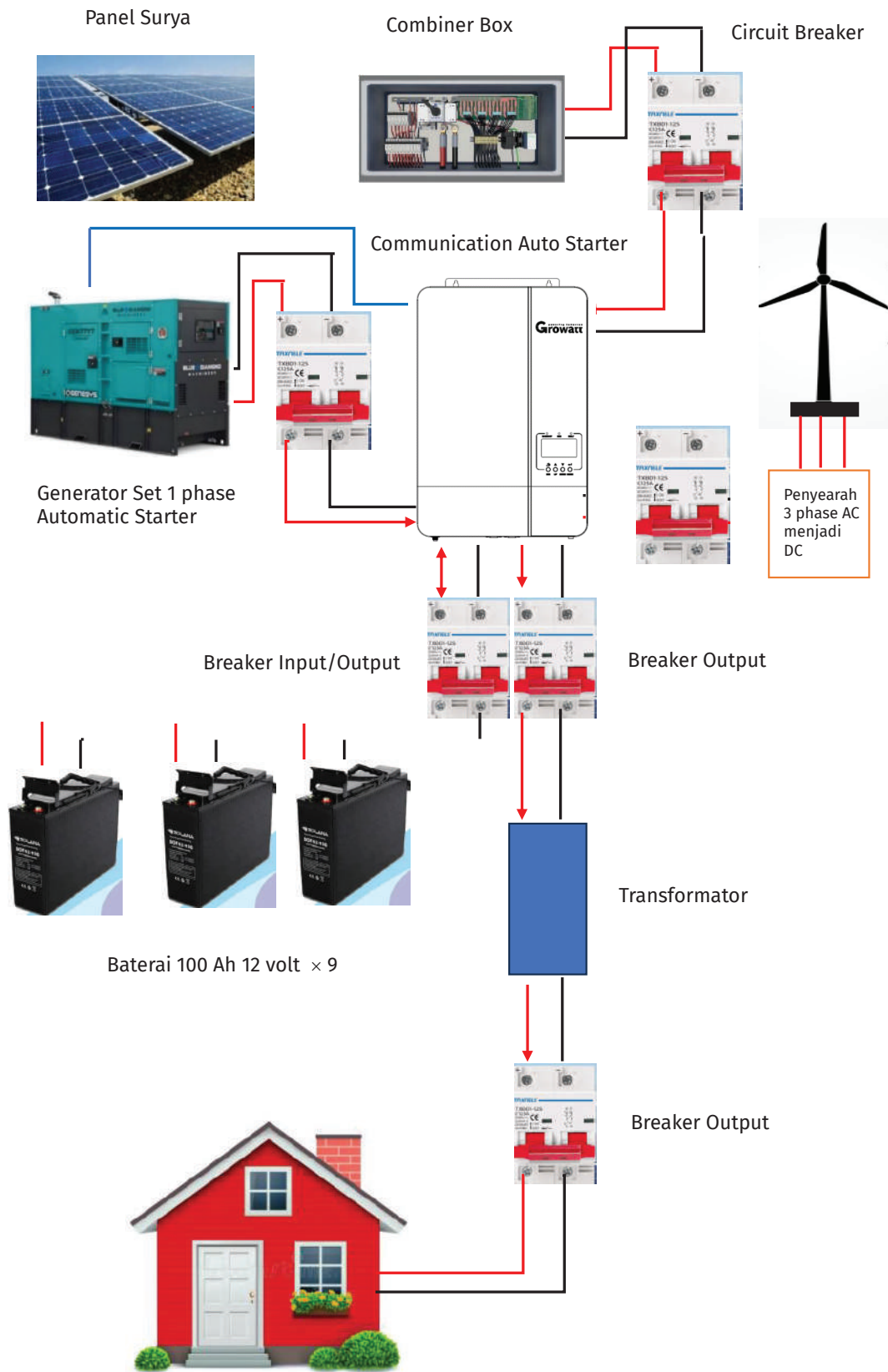
Gambar 4.50 Sistem Pengkabelan Inverter Paralel Satu Phase
 Sumber: Growatt (2024)

Pada Gambar 4.50 sistem pengkabelan inverter paralel satu *phase*, ada beberapa alasan mengapa inverter digunakan secara paralel. Pertama, meningkatkan kapasitas daya total dengan menghubungkan beberapa inverter secara paralel. Kedua, jumlah daya yang dapat disuplai ke beban menjadi lebih besar. Ini memungkinkan sistem untuk menangani beban yang lebih tinggi tanpa perlu menggunakan satu inverter berukuran besar yang lebih mahal. Ketiga, sistem paralel menawarkan redundansi: jika satu inverter mengalami kerusakan, inverter lainnya tetap dapat beroperasi, memastikan pasokan daya tetap terjaga. Keempat, sistem inverter paralel juga memungkinkan ekspansi pada penggunaan distribusi tiga (3) *phase* seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.51 Sistem Pengkabelan Inverter Paralel 3 Phase

Sumber: Growatt (2024)



Gambar 4.52 Diagram Sistem Kelistrikan Energi Hibrida
 Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada Gambar 4.52, sumber energi utama yang dirancang adalah PLTS, PLTB, dan baterai. Sementara itu, generator set berfungsi sebagai sumber energi cadangan yang dapat menyala dan mati secara otomatis (*auto on* dan *auto off*). PLTS menggunakan 13 panel surya, masing-masing berkapasitas 400 WP, yang terhubung ke *combiner* sebagai terminal untuk beberapa panel surya. Tegangan DC dari panel surya ini diarahkan ke *breaker* sebagai alat pengaman, lalu ke peralatan inverter terintegrasi yang mencakup ATS, *controller* pengisi daya, dan inverter. Inverter ini bertugas mengisi baterai dan menyediakan listrik. Jika baterai sudah penuh atau tegangan dari panel surya cukup untuk memenuhi kebutuhan inverter, sistem akan beroperasi (*bypass*) tanpa menggunakan baterai.

Ketika angin berembus, PLTB menghasilkan listrik AC tiga fase, yang kemudian dikonversi menjadi DC melalui *rectifier*. Listrik DC ini melewati *circuit breaker* untuk perlindungan, lalu menuju inverter terintegrasi untuk mengisi baterai. Jika angin berembus kencang dan tegangan dari PLTB memenuhi kebutuhan inverter, sistem akan beroperasi (*bypass*) tanpa menggunakan baterai, terutama di malam hari saat panel surya tidak aktif.

Apabila PLTB dan PLTS tidak dapat memenuhi tegangan yang dibutuhkan oleh inverter, baterai akan menyediakan listrik bagi pengguna dengan durasi otonomi hingga 2 hari. Ini berarti jika PLTS dan PLTB tidak menghasilkan listrik selama 2 hari, baterai akan mengambil alih untuk menyediakan energi.

Jika PLTB, PLTS, dan baterai tidak memenuhi tegangan minimum yang diperlukan oleh inverter, sistem akan mengirim sinyal darurat melalui kabel komunikasi, dan generator set akan otomatis menyala untuk mengisi baterai dan menyediakan listrik. Begitu PLTS, PLTB, dan baterai kembali menghasilkan listrik, generator set akan mati secara otomatis (*auto off*).

Aktivitas 4.9

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengetahuan pemasangan sistem elektrik energi hibrida secara gotong royong dan kreatif.

Langkah-Langkah:

1. Buatlah kelompok terdiri atas 3-4 orang.
2. Diskusikan dan persentasikan pembahasan berikut ini.
 - a. Dalam instalasi sistem energi hibrida melibatkan panel surya, turbin angin, baterai, dan generator set. Jelaskan peran setiap komponen tersebut dan bagaimana mereka saling berinteraksi dalam kondisi operasi yang berbeda (misalnya saat beban rendah, beban tinggi, dan kegagalan satu komponen).
 - b. Apa peran inverter dalam sistem energi hibrida? Bagaimana cara kerja inverter terintegrasi dengan komponen lain seperti pengontrol pengisian daya (*charger controller*) dan *Automatic Transfer Switch (ATS)*? Bagaimana inverter menangani kondisi beban yang berbeda dan pergantian sumber daya secara otomatis?
 - c. Sebuah desa di daerah terpencil membutuhkan sumber energi yang andal dan berkelanjutan. Desa ini tidak terhubung dengan jaringan listrik nasional PLN dan memiliki potensi energi surya dan angin yang tinggi. Kelompokmu ditugaskan untuk merancang dan memasang sistem energi hibrida yang menggabungkan PLTS, PLTB, dan baterai sebagai penyimpanan energi dengan kapasitas 30.000 watt. Sistem ini juga akan dilengkapi dengan generator set sebagai cadangan. Apa saja peralatan yang akan dibutuhkan? Buatlah laporannya.

Uji Kompetensi

1. Kamu ditugaskan untuk memasang sistem energi hibrida di daerah terpencil dengan akses terbatas terhadap layanan teknis. Komponen utama sistem telah rusak akibat badai. Bagaimana kamu akan melakukan *troubleshooting* dan perbaikan sementara sambil menunggu komponen pengganti tiba? Jelaskan langkah-langkah yang akan kamu ambil dan alat-alat apa yang mungkin kamu butuhkan.
2. Sebuah rumah tangga di daerah pantai ingin memasang sistem energi hibrida. Rumah tersebut memiliki konsumsi listrik yang tinggi, terutama untuk pendingin ruangan sebesar 10.000 watt. Bagaimana kamu akan merancang sistem energi hibrida yang optimal untuk memenuhi kebutuhan energi rumah tersebut, mempertimbangkan faktor-faktor seperti intensitas sinar matahari, kecepatan angin, dan harga komponen?
3. Bagaimana kamu akan mengintegrasikan sistem energi hibrida dengan sistem manajemen energi cerdas (*smart energy management system*) untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan mengurangi biaya operasional? Jelaskan manfaat dari integrasi tersebut dan tantangan yang mungkin muncul.
4. Bagaimana kamu akan mendidik dan melatih masyarakat setempat untuk mengoperasikan dan memelihara sistem energi hibrida yang telah dipasang? Jelaskan pentingnya partisipasi masyarakat dalam keberhasilan proyek ini.



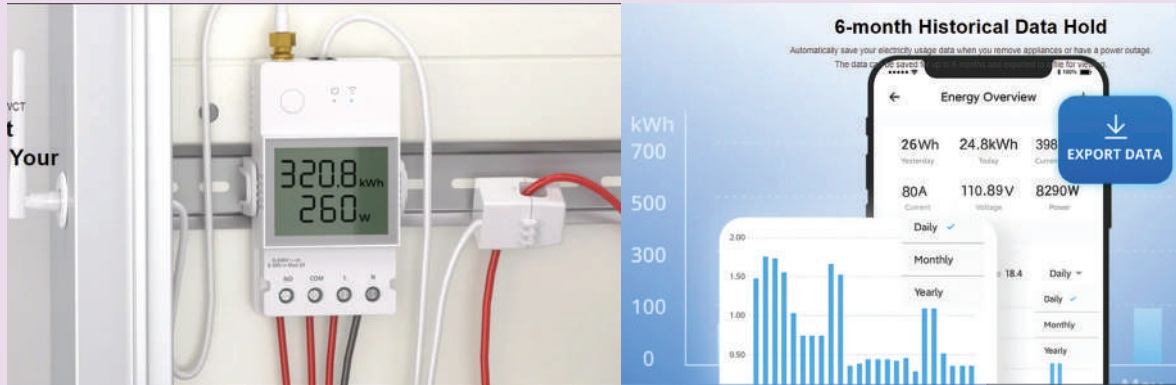
Pengayaan

Membangun Rumah Cerdas

Membangun rumah cerdas dan hemat energi melibatkan desain arsitektur yang memaksimalkan untuk pencahayaan alami dan ventilasi, penggunaan material isolasi yang efisien, serta pemasangan sistem energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin. Otomatisasi rumah dengan sensor gerak dan kontrol pintar serta penggunaan meteran cerdas dan sistem penyimpanan energi membantu memantau dan mengelola penggunaan energi secara efektif. Pengelolaan air melalui perangkat hemat dan sistem pengumpulan air hujan juga berkontribusi pada keberlanjutan dan efisiensi rumah. Peralatan yang dipakai pada rumah cerdas di antaranya seperti berikut.

1. Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik

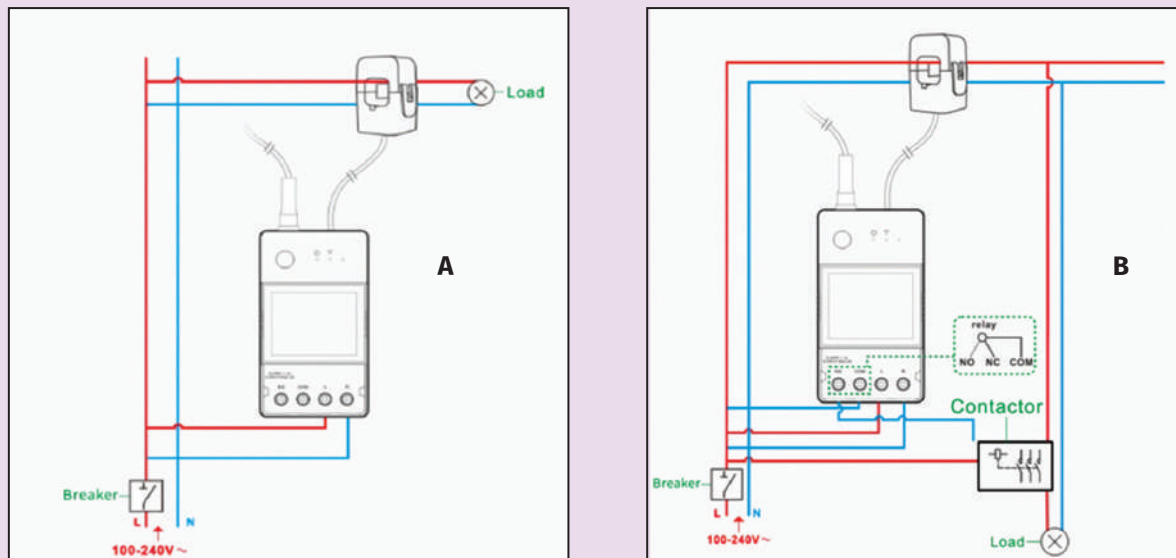
Sistem monitoring penggunaan daya listrik ini mencatat arus listrik yang dipakai, menyimpan informasi tersebut, dan menampilkan data dalam bentuk grafis yang memberikan gambaran mengenai konsumsi listrik selama periode waktu tertentu.



Gambar 4.53 SONOFF POW Ring Smart Power Meter

Sumber: Sonnof (2024)

Pada Gambar 4.53 terlihat diagram pengkabelan Ring Smart Power Meter, di mana sebuah *coil* ditempatkan pada kabel fasa AC 220 volt berwarna merah. Ketika listrik digunakan, *coil* ini mendeteksi arus yang mengalir dan mencatatnya di data logger sistem. Sistem ini dapat diatur untuk memutus aliran listrik jika konsumsi mencapai batas tertentu, dengan cara menghubungkannya ke kontaktor atau sakelar mekanik magnetik lainnya. Alat ini terhubung ke internet, memungkinkan pengoperasian *on/off* dari mana saja dan kapan saja.



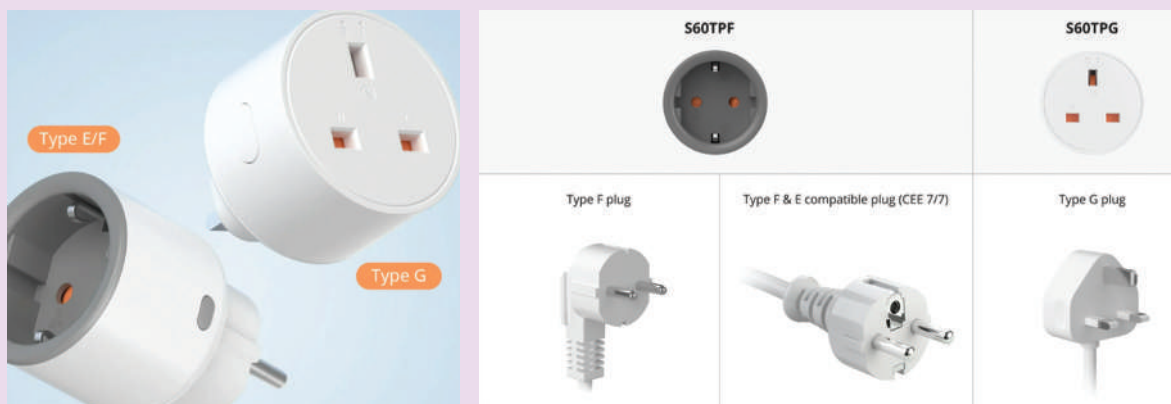
Gambar 4.54 Diagram Pengkabelan Power Meter

Sumber: Sonnof (2024)

Pada gambar 4.54 (A) peralatan IoT penghitung daya listrik yang diinstalasi pada jaringan rumah tangga, dan (B) dipadukan dengan kontaktor untuk memantau konsumsi daya peralatan rumah tangga serta dapat mengontrol sakelar daya.

2. Steker Cerdas Wifi

Sebuah peralatan atau adapter yang dipasang pada peralatan listrik misalnya lampu belajar, kulkas, AC, kipas angin dan motor aquarium, sebelum terhubung dengan stop kontak atau jaringan listrik rumah. Peralatan ini dapat kita atur waktu *on* dan *off* dan bisa terkoneksi dengan perangkat lain seperti sensor gerak dan sensor temperatur. Misalnya, saat ada orang datang, lampu akan menyala; dan saat orang pergi, lampu akan redup dan padam.



Gambar 4.55 Steker Cerdas dengan Koneksi Wireless Fidelity (Wifi)
Sumber: Sonnof (2024)

3. Smart Bridge

Perangkat ini berfungsi sebagai jembatan koneksi dari beberapa peralatan dan platform *smart home* lainnya sehingga seluruh peralatan *smart home* dapat di manajemen dalam satu *ashb ashboard*. Sebagai contoh kita menggunakan pengukuran listrik satu buah, kemudian steker cerdas wifi 10 buah dan 2 buah sensor, peralatan tersebut dapat kita manajemen secara terpusat saling terkoneksi dengan peralatan *bridge* ini.



Gambar 4.56 Bridge
Sumber: Sonnof (2024)

Perkembangan teknologi IoT pada era kini peralatan *Bridge* dapat berkomunikasi dengan peralatan yang diproduksi oleh produsen lain yang sudah memiliki stkamurisasi dengan logo berikut.



Gambar 4.57 Logo Peralatan yang Bisa Saling Terhubung
Sumber: Sonnof (2024)

Keterangan Gambar 4.57

1. Logo “Works With Alexa” berarti bahwa perangkat yang menampilkan logo ini kompatibel dengan Amazon Alexa. Artinya, perangkat tersebut dapat dikontrol atau dioperasikan menggunakan perintah suara melalui asisten virtual Alexa. Perangkat ini termasuk dalam kategori *smart home*, seperti lampu, termostat, kamera keamanan, atau perangkat elektronik lain yang dapat diintegrasikan ke dalam ekosistem rumah pintar dan dikendalikan melalui aplikasi Alexa atau dengan suara. Dengan kata lain, perangkat yang memiliki logo ini sudah diuji dan disertifikasi oleh Amazon untuk bekerja dengan platform Alexa.

2. Logo “Works with Google Home” berarti bahwa perangkat yang menampilkan logo ini kompatibel dengan Google Home atau Google Assistant. Perangkat ini dapat dikontrol atau dioperasikan menggunakan perintah suara melalui asisten virtual Google Assistant, yang biasanya terintegrasi ke dalam perangkat Google Home atau *smartphone*. Ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol perangkat seperti lampu, kamera, termostat, atau perangkat rumah pintar lainnya hanya dengan menggunakan perintah suara. Perangkat dengan logo ini telah diuji dan disertifikasi untuk berfungsi dengan ekosistem Google.
3. “Logo “Works with IFTTT” berarti bahwa perangkat atau layanan yang menampilkan logo ini dapat diintegrasikan dengan IFTTT (If This Then That), sebuah platform otomatisasi yang memungkinkan pengguna untuk menghubungkan berbagai aplikasi, perangkat, atau layanan yang berbeda. Dengan IFTTT, pengguna dapat membuat *applets* (sejenis automasi kecil) yang menjalankan tindakan tertentu berdasarkan pemicu. Contohnya, kamu dapat mengatur agar lampu pintar menyala otomatis saat matahari terbenam, atau menerima notifikasi ketika ada email penting.

Topologi Jaringan Rumah Cerdas



Gambar 4.58 Topologi Jaringan Rumah Cerdas (Smart Home)
Sumber: Amin Wahyono, Kemdikbudristek (2024)

Pada Gambar 4.58, terlihat topologi jaringan rumah pintar masa kini dan masa depan yang makin banyak digunakan untuk membantu penghuni dalam mengelola konsumsi listrik. Dalam gambar tersebut, sebuah modem internet terhubung dengan *bridge* IoT. Perangkat *bridge* ini berfungsi sebagai penghubung antara berbagai peralatan lain, seperti meteran listrik, steker yang tersambung ke mesin pembuat kopi, dan steker untuk pengisian baterai *handphone*. Pemilik rumah dapat mengatur penggunaan listrik, penjadwalan, serta sistem keamanan melalui pengaturan pada *bridge*, yang juga memungkinkan penambahan perangkat baru kapan saja. *Bridge* akan mencatat aktivitas setiap perangkat dan membuat log data yang dapat diakses melalui internet.

Refleksi

1. Bagaimana pemahaman kamu setelah mempelajari Konsep Dasar Sistem Energi Hibrida?
2. Peralatan apa saja yang menurut kamu merupakan hal baru pada saat kita belajar Menerapkan Komponen Sistem Energi Hibrida?
3. Apa saja yang kamu dapatkan pada saat belajar Pengetahuan Perancangan Konstruksi Sipil Energi Hibrida?
4. Bagaimana rasanya kamu saat belajar Perancangan Sistem Mekanik Energi Hibrida?
5. Apakah ada yang baru saat kamu belajar Perancangan Sistem Kelistrikan Energi Hibrida?
6. Bagaimana perasaanmu saat belajar Pemasangan Konstruksi Sipil Energi Hibrida?
7. Apa saja persiapan yang sudah kamu lakukan pada pemasangan sistem mekanik energi hibrida?
8. Apakah belajar Pemasangan Sistem Kelistrikan Energi Hibrida menarik? Kira-kira apa yang perlu kita perbaiki?

Glosarium

aerodinamis	prinsip dalam ilmu Fisika yang mempelajari pergerakan udara dan interaksinya dengan objek, seperti baling-baling turbin atau panel surya, untuk meningkatkan efisiensi tangkapan energi.
ampere meter	alat yang digunakan untuk mengukur arus listrik dalam suatu rangkaian listrik.
anemometer	alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin, penting dalam menentukan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh turbin angin.
array	kumpulan atau susunan beberapa rangkaian <i>string</i> modul surya yang dihubungkan untuk meningkatkan kapasitas daya sistem PLTS.
arus bolak-balik (AC)	jenis arus listrik yang arah dan besarnya berubah-ubah secara periodik, digunakan dalam sistem distribusi tenaga listrik.
arus searah (DC)	jenis arus listrik yang mengalir dalam satu arah tetap, digunakan dalam sistem PLTS sebelum dikonversi oleh inverter.
Auto Transfer Switch (ATS)	perangkat otomatis yang mengalihkan sumber daya listrik dari satu sumber ke sumber lain dalam sistem hibrida, menjaga kestabilan daya saat ada perubahan sumber energi.
beban induktif	beban listrik yang memiliki karakteristik induktif seperti motor dan transformator.
Bidirectional Converter	perangkat yang mampu mengonversi listrik dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dan sebaliknya, biasanya digunakan dalam sistem hibrida.
chamber line	garis yang membagi sama besar antara permukaan atas dan bawah dari <i>airfoil</i> , digunakan dalam desain aerodinamis baling-baling turbin angin.

<i>chord line</i>	garis lurus yang menghubungkan <i>leading edge</i> dan <i>trailing edge</i> dari <i>airfoil</i> dalam baling-baling, penting untuk desain aerodinamis turbin.
<i>combiner box</i>	kotak penghubung yang menggabungkan keluaran dari beberapa <i>string</i> modul surya dan memberikan proteksi dari arus balik pada sistem PLTS.
<i>cut-in speed</i>	kecepatan angin minimum yang dibutuhkan agar turbin angin mulai berputar dan menghasilkan listrik.
<i>cut-out speed</i>	kecepatan angin maksimum di mana turbin angin akan berhenti beroperasi untuk mencegah kerusakan akibat kecepatan angin yang terlalu tinggi.
daya reaktif	bagian dari daya listrik yang tidak menghasilkan kerja nyata tetapi dibutuhkan untuk mempertahankan tegangan sistem listrik.
<i>desilting chamber</i>	saluran dalam sistem PLTA yang digunakan untuk memisahkan pasir, kerikil, dan sedimen dari air sebelum dialirkan ke turbin, mencegah kerusakan pada komponen mekanik.
<i>dump load</i>	beban tambahan yang digunakan untuk menyerap daya berlebih dalam sistem tenaga listrik agar tetap stabil.
efisiensi hidrolis	rasio energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin air terhadap energi potensial yang dimiliki air yang jatuh pada sistem PLTA atau PLTMH.
efisiensi termal	perbandingan antara energi keluaran dan energi masukan dalam suatu sistem pembangkit listrik.
energi biomassa	energi yang dihasilkan dari bahan organik seperti kayu dan limbah pertanian untuk pembangkitan listrik.
faktor kapasitas	persentase daya yang dihasilkan oleh suatu pembangkit listrik dibandingkan dengan kapasitas maksimumnya dalam periode tertentu.
<i>fuel cell</i>	perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar, seperti hidrogen, menjadi listrik tanpa pembakaran, menghasilkan emisi yang sangat rendah.

<i>grid-tied inverter</i>	inverter yang digunakan dalam sistem tenaga surya yang langsung terhubung dengan jaringan listrik PLN.
<i>ground mount</i>	sistem pemasangan panel surya di atas tanah dengan menggunakan penyangga dan tiang untuk menyokong modul surya pada sudut optimal.
<i>harmonic distortion</i>	gangguan pada gelombang listrik akibat harmonisa yang dihasilkan oleh peralatan elektronik.
<i>head</i>	tinggi jatuh air dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTA/PLTMH), diukur dari intake hingga turbin, yang menentukan jumlah energi potensial yang dihasilkan.
<i>inrush current</i>	lonjakan arus listrik yang terjadi saat perangkat pertama kali dinyalakan, dapat menyebabkan gangguan pada sistem tenaga listrik.
<i>intake</i>	pintu masuk air pada sistem PLTA atau PLTMH yang mengarahkan air dari bendung atau sungai menuju saluran pembawa untuk menggerakkan turbin.
<i>iradiasi</i>	jumlah energi matahari yang diterima per satuan luas permukaan dalam waktu tertentu, diukur dalam kWh/m ² , penting dalam menentukan potensi energi dari panel surya.
<i>island mode</i>	mode operasi di mana sistem tenaga bekerja secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan utama.
<i>jaringan smart grid</i>	jaringan listrik yang menggunakan teknologi komunikasi dan otomatisasi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi listrik.
<i>konverter frekuensi</i>	perangkat yang mengubah frekuensi listrik, digunakan dalam pengendalian kecepatan motor listrik.
<i>load profile</i>	pola konsumsi energi suatu sistem atau pelanggan selama periode waktu tertentu.
<i>microbial fuel cell (MFC)</i>	sel bahan bakar yang menggunakan mikroorganisme untuk mengonversi energi kimia dari bahan organik menjadi listrik melalui proses biokimia.

<i>microgrid</i>	sistem jaringan listrik kecil yang dapat beroperasi secara mandiri atau terhubung dengan jaringan utama.
<i>monokristalin</i>	jenis modul surya yang terbuat dari silikon kristal tunggal, memiliki efisiensi tinggi dalam mengubah energi matahari menjadi listrik.
<i>net metering</i>	sistem yang memungkinkan pemilik PLTS menjual listrik berlebih ke jaringan listrik dan menerima kredit energi.
<i>overcurrent protection</i>	perlindungan terhadap arus berlebih yang dapat merusak peralatan listrik atau menyebabkan kebakaran.
<i>phase angle</i>	sudut perbedaan fase antara tegangan dan arus dalam sistem listrik AC.
<i>power factor</i>	rasio antara daya nyata dengan daya semu dalam suatu sistem listrik, semakin tinggi faktor daya semakin efisien penggunaannya.
<i>p-n junction</i>	area di dalam sel surya di mana lapisan tipe-P dan tipe-N bertemu, yang menciptakan medan listrik untuk menghasilkan arus listrik dari sinar matahari.
<i>pelton turbine</i>	jenis turbin impuls yang digunakan dalam PLTA atau PLTMH untuk <i>head</i> tinggi, memanfaatkan energi kinetik air dengan efisiensi tinggi.
<i>penstock</i>	pipa besar yang mengalirkan air bertekanan dari bak penenang menuju turbin dalam pembangkit listrik tenaga air.
<i>photovoltaic</i>	proses konversi energi cahaya matahari langsung menjadi listrik dengan menggunakan bahan semikonduktor seperti silikon; prinsip utama dalam sel surya.
<i>pole mount</i>	sistem pemasangan panel surya menggunakan tiang penyangga, memungkinkan pengaturan sudut dan orientasi panel agar lebih fleksibel.
<i>polycrystalline</i>	jenis modul surya yang terbuat dari potongan-potongan kristal silikon yang dilebur menjadi satu, memiliki efisiensi lebih rendah daripada monokristalin, tetapi lebih ekonomis.

<i>pump storage</i>	sistem penyimpanan energi pada PLTA yang menggunakan dua reservoir untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk energi potensial air.
<i>rectifier</i>	komponen yang mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC), digunakan dalam sistem tenaga surya.
relay proteksi	perangkat yang digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan guna mencegah kerusakan lebih lanjut.
<i>run of river</i>	sistem pembangkit listrik tenaga air yang tidak memerlukan bendungan besar, memanfaatkan aliran air sungai untuk menggerakkan turbin secara langsung.
SCC (<i>solar charge controller</i>)	alat yang mengatur pengisian daya baterai dari panel surya untuk mencegah <i>overcharging</i> dan menjaga efisiensi pengisian.
<i>state of charge (SOC)</i>	persentase kapasitas baterai yang tersedia dibandingkan dengan kapasitas penuhnya.
semikonduktor	bahan yang digunakan dalam sel surya, seperti silikon, yang memiliki sifat menghantarkan listrik saat terkena cahaya atau panas.
sinkronisasi	proses penyesuaian tegangan, frekuensi, dan fase antara dua sumber energi (misalnya PLTS dan PLN) agar dapat bekerja bersama dalam satu sistem
<i>standard ground mount</i>	sistem pemasangan modul surya tradisional di atas tanah, menggunakan penopang jangkar untuk menopang rak modul surya.
<i>string</i>	susunan modul surya yang dihubungkan secara seri untuk meningkatkan tegangan keluaran dari sistem.
tegangan nominal	tegangan standar yang diharapkan dari suatu perangkat atau sistem listrik untuk operasi normal.
<i>thin-film solar panels</i>	jenis modul surya yang terbuat dari lapisan tipis material fotovoltaiik seperti cadmium telluride atau silikon amorf, fleksibel tetapi dengan efisiensi lebih rendah.

<i>tip region</i>	bagian ujung bilah turbin angin, penting dalam desain aerodinamis untuk mengoptimalkan kinerja turbin dalam menangkap energi angin.
<i>trailing edge</i>	bagian belakang dari <i>airfoil</i> (balok-balok turbin) yang mengatur aliran udara dan meningkatkan efisiensi aerodinamis.
transmisi mekanik	sistem yang mentransfer daya dari turbin ke generator, mengubah energi mekanik menjadi listrik.
turbin	perangkat yang mengubah energi potensial air atau energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang menggerakkan generator.
<i>upscaling</i> PLTS	proses meningkatkan kapasitas sistem PLTS dengan menambahkan lebih banyak modul surya.
<i>V-Belt</i>	<i>belt</i> berbentuk V yang digunakan dalam sistem transmisi mekanik untuk menyalurkan daya dari turbin ke generator pada PLTMH.
<i>Variable Speed Drive (VSD)</i>	teknologi yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor listrik dalam sistem tenaga angin atau PLTA guna meningkatkan efisiensi.
<i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i>	jenis turbin angin dengan sumbu rotasi vertikal yang dapat menangkap angin dari segala arah tanpa memerlukan sistem orientasi.
<i>weir</i>	struktur yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga air untuk mengarahkan aliran air ke <i>intake</i> , membantu mengendalikan aliran air.

- Abdul Syafi. “Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro di Desa Tingkem.” *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology* 6 no. 1 (2022): 8-14. <https://ojs.unimal.ac.id/index.php/mjmst/article/view/7215/3806>.
- Al Kindhi, B., Aliffianto, L. R., Wicaksono, I. A., Farid, I. W., Adhim, F. I., Priambodo, J., Khothib, et al. Mesin Pengerings Hasil Pertanian Bertenaga Hybrid dan Portabel pada Pemukiman Terpencil di Desa Broto, Kecamatan Slahung, Ponorogo, Jawa Timur. *Segawati Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, 8 no. 3 (2023), 1549–1556. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v8i3.807>
- Aprialdi, Ricki. “Jenis Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Air).” 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=fepz9iq-VeA>.
- Arshad, M., & O’kelly, B. C. Offshore wind-turbine structures: A review. In *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy* 166, no. 4, (November 2013): 139–152. Thomas Telford Services Ltd. <https://doi.org/10.1680/ener.12.00019>
- Bandung, PME. “Electronic Load Controller (ELC) for Micro Hydro Power - Kontrol Wajib untuk Mikro Hidro (PLTMH).” 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=D3jOl8dgaTg>
- Baqaruzi, Syamsyarief, and Ali Muhtar. “Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi-Rugi Akibat Pengaruh Penggunaan Distributed Generation pada Sistem Distribusi Primer 20 KV”. *E-JOINT (Electronica and Electrical Journal Of Innovation Technology)* 1 no. 1 (Juni 2020): 20–26. <https://ejournal.pnc.ac.id/index.php/ejoint/article/view/216/pdf>
- BPVP Aceh, B. *SISTEM PV HYBRID DIESEL MATERI-ToT Solar hybrid*. 2023.
- Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OffGrid. Ditjen EBTKE Kementerian ESDM. 2017.
- Buku Panduan Perencanaan, Pembangunan, Operasional, dan Pemeliharaan PLTS ATAP. Yayasan Mitra Hijau. 2021.
- Chen, H., Xu, Y., Liu, C., He, F., & Hu, S. Storing Energy in China—An Overview. In *Storing Energy* (2016): 509–527. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00024-5>
- Cui, Y. F., Zhang, Y. H., He, W. D., & Dong, L. J. Temperature Prediction for 3 MW Wind-Turbine Gearbox Based on Thermal Network Model. *Machines*, 12 no. 3 (Maret 2024): 175. <https://doi.org/10.3390/machines12030175>

- Dandi dan Ayu. “Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).” 2021. https://www.youtube.com/watch?v=6wR_AcHtlWM&t=131s.
- Deny Poniman Kosasih. Pengaruh Variasi Larutan Elektrolite pada Accumulator terhadap Arus dan Tegangan. *Mesa Jurnal Fakultas Teknik Universitas Subang*, 2008.
- Elbaset,A.A.,&Ata,S. Hybrid Renewable Energy Systems for RemoteT elecommunication Stations. In *Hybrid Renewable Energy Systems for Remote Telecommunication Stations*. Springer International Publishing. 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66344-5>
- Hakim, Fauzan. “Hidrometri - Pengukuran Debit Aliran Sungai Metode Slope Area”. 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=Pm1wbTdy-2k>.
- Hayes, B. P., Shrestha, A., Hayes, B., Biswakarma, R., Chapagain, A., Banjara, S., Aryal, S., Thapa, R., et al. *Peer-to-peer energy trading in micro/ mini-grids for local energy communities: a review and case study of the Nepalese electricity system*. (Mei 2019). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34544.71684>
- ICED II. Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia. 2020.
- Ikram, A. *Techno-Economic Assessment of Pso Optimized Microgrid With Hydrogen Storage System*. 2022. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11606.42565>
- Indonesia, Labmania. “Menghitung Debit Air Sungai dengan Metode Apung”. 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=vyX6PfAeoOw>.
- Jorde, K., Hartmann, E., Unger, H. *Baik dan Buruk Dari Mini/Mikro Hidro*. Jakarta: IMIDAP. 2010.
- Kuliah Sumber Daya. Air. “Duration Curve - Debit Andalan - Mass Curve - Penentuan Volume Waduk/Bendungan”. 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=og9ThQ8Qhu4>
- Kunaifi. Desain Pembangkit Listrik Hybrid PLTS-Diesel Untuk Meningkatkan Pelayanan Kesehatan di Puskesmas Kecamatan Gema Kabupaten Kampar. *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*, 10 no. 1 (2021).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2010.
- Math. “*Trigonometri 4 Mengukur Tinggi Objek dengan Klinometer*”. 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=TqGiNwEnjVI>.
- Murphy, C. A., Schleifer, A., & Eurek, K. A taxonomy of systems that combine utilityscale renewable energy and energy storage technologies. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 139, 110711. Januari 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110711>
- Novita, Elida. “Pengukuran debit menggunakan current meter di saluran terbuka.” 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=tiquZ8x5yO8>.
- Özçelik, M. A. A MICRO HYBRID WIND-PV BASED ON GRID ENERGY SYSTEM WITH ENHANCED EFFICIENCY. *European Journal of Technic*, 7(2), 109–118. 2017. <https://doi.org/10.23884/ejt.2017.7.2.05>
- PPGT. Modul A Mengenal MHP. Bandung: PT ENTEC Indonesia. 1995.
- Prasetyo Tris Doan. Analisis Numerik Performansi Aerodinamika pada Leading Edge Tubercles Airfoil Turbin Angin Bionik Berbasis Long-Eared Owl. 2018.
- Ramadhan, Rifqi. “Fotografi Air Terjun Di Antara Pohon.” 2024. <https://www.pexels.com/id-id/foto/fotografi-air-terjun-di-antara-pohon-788200/>.
- Ramdani, Bagus. Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts. GIZ dan Ditjen EBTKE Kementerian ESDM. 2018.
- Riawan, Govinda, I Nyoman Satya Kumara, dan W. G. Ariastina. 2022. “Analisis Performansi Dan Ekonomi PLTS Atap 10 KWp Pada Bangunan Rumah Tangga Di Desa Batuan Gianyar.” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro* 21 no. 1 (2022): 63. <https://doi.org/10.24843/mite.2022.v21i01.p09>.
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9), 3425–3449. 2012.
- Share, Power Plant. “Pengukuran Head Metode Pressure Gauge PLTMH PLTA.” 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=Haj0tBODMTM>.
- Standar Kompetensi Khusus Energi Terbarukan (SKKK-ET) yang ditetapkan berdasarkan Keputusan Direktur Jenderal Pembinaan Pelatihan dan Produktivitas Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor KEP. 415/LATTAS/XII/2016 Tanggal 13 Desember 2016 tentang Registrasi Standar Khusus Bidang Energi Terbarukan Asosiasi Masyarakat Energi Terbarukan Indonesia.
- Tanya-Jawab Seputar Penggunaan Sistem PLTS Atap oleh Konsumen PT PLN (Persero), Ditjen EBTKE Kementerian ESDM, 2021.
- Teng, W., Zhang, X., Liu, Y., Kusiak, A., & Ma, Z. Prognosis of the remaining useful life of bearings in a wind turbine gearbox. *Energies*, Vol 10 No. 1 (2017): 32. <https://doi.org/10.3390/en10010032>

Yahyaoui, Imene. *Advances in renewable energies and power technologies*. Elsevier. 2018a.

Yahyaoui, Imene. *Advances in renewable energies and power technologies*. Elsevier. 2018b.

Yang, S.-Tian. *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources: New Technologies and Applications*. Elsevier Science. 2011.

Yusupa, Ade. "Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hydro (PLTMH) di Kecamatan Pageruyung 2020." <https://www.youtube.com/watch?v=8SPmrXnPbIs>

Daftar Sumber Gambar

- Gambar 1.2 diunduh dari <https://x.com/P3TKEBTKE/status/857400607522422784>
- Gambar 1.8 diunduh dari https://www.freepik.com/free-psd/solar-power-boards-roof-3d-realistic-render_28914870.htm pada 29 Agustus 2024
- Gambar 1.20 diunduh dari <https://electrek.co/2023/08/28/zinc-air-batteries-ev-industry/> pada 11-09-2024
- Gambar 1.21 diunduh dari <https://mangvapor.wordpress.com/2017/01/21/rangkaian-seri-dan-paralel-baterai/> pada 12-09-2024
- Gambar 1.44 diunduh dari <https://pixabay.com/id/photos/panel-surya-penempatan-energi-hijau-943999> pada 15 Oktober 2024
- Gambar 2.1 diunduh dari <https://www.pexels.com/id-id/foto/fotografi-air-terjun-di-antara-pohon-788200/> pada 18 September 2024
- Gambar 2.30 G.Fisher. 2007. APLIKASI DAN KARAKTERISTIK TURBIN.
- Gambar 3.1 diunduh dari <https://infopublik.id/kategori/sorot-ekonomi-bisnis/415811/belajar-energi-angin-hingga-denmark?video=> pada 5 September 2024
- Gambar 3.2 diunduh dari <https://australiaindonesiacentre.org/energy/renewable-technology/aic-research-builds-case-for-powering-java-bali-and-sumatra-with-renewable-energy/> pada 6 September 2024
- Gambar 3.10 diunduh dari <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/airfoils-where-turbine-meets-wind> pada 10 September 2024
- Gambar 3.11 diunduh dari https://www.freepik.com/free-photo/landscape-with-windmills_7972349.htm#fromView=search&page=1&position=6&uuid=cdba51e3-e5b7-46c2-a8bc-4d09069de551&query=pembangkit+listrik+tenaga+angin pada 12 September 2024
- Gambar 3.17 diunduh dari <https://waveinverter.co.nz/shop/solar/solar-charge-controllers/wind-turbine-controller-1kw-mppt-12-24-48v/> pada 15 September 2024
- Gambar 3.19 diunduh dari https://www.leonics.com/product/renewable/inverter/inverter_apollo_gwt-300_en.php pada 16 September 2024
- Gambar 3.26 diunduh dari <https://www.radius.co.id/bagaimana-mengetahui-pengaruh-internal-resistansi-pada-baterai-lead-acid-part-i-author-chandra-kharisma-sungkowo/> pada 17-09-2024

- Gambar 3.27 diunduh dari <https://id.soyan-tech.com/variable-frequency-drive-vfd/high-performance-vfd/380v-3-hp-ac-drive-frequency-inverter-3-phase.html> pada 20-09-2024
- Gambar 3.28 diunduh dari <https://www.petzl.com/INT/en/Professional/Strangulation-risk-in-a-fall-on-an-ABSORBICA-Y-lanyard-?ActivityName=Framing-and-roofing> pada 21-09-2024
- Gambar 3.53 diunduh dari https://www.theengineeringknowledge.com/permanent-magnet-synchronous-generator/#google_vignette pada 28-09-2024
- Gambar 3.62 diunduh dari <https://wiraelectrical.com/wire-color-codes/> pada 29-09-2024
- Gambar 4. 10 diunduh dari <https://katadata.co.id/infografik/6167a312b456b/agenda-indonesia-menuju-pembangunan-rendah-karbon> pada 11-09-2024
- Gambar 4.11 diunduh dari <https://www.kompasiana.com/brianawiruddin/62239696bb44862fff50f795/apa-itu-dc-coupling-dan-ac-coupling-pada-plts-off-grid-berikut-ulasannya> pada 11-09-2024
- Gambar 4.14 diunduh dari <https://how2electronics.com/iot-based-electricity-energy-meter-using-esp32-blynk/> pada 13-09-2024
- Gambar 4.15 diunduh dari <https://how2electronics.com/iot-based-electricity-energy-meter-using-esp32-blynk/> pada 15-09-2024
- Gambar 4.24 diunduh dari https://energywatch.com/EnergyNews/Policy__Trading/article15849654.ece/ pada 17-09-2024
- Gambar 4.45 diunduh dari https://id.made-in-china.com/co_pulitaenergy/product_Factory-Price-for-Sale-Small-Biogas-Generator-8kw-10kw-15kw-20kw-Generator-Set_rneehrsg.html?pv_id=1i6gnl5rn576&faw_id=1i6gnl9kqb2e/ pada 18-09-2024

Indeks

A

accu 170
aerodinamika 250, 302
alternating current 258
anemometer 148, 169
arester 216, 217
array 34, 231, 239, 250

A

baterai 7, 9, 21, 22, 23, 24, 28, 45, 47, 63, 66, 72, 77, 170, 197, 198, 199, 200, 201, 214, 236, 260, 266, 278, 279, 282, 284
baterai asam timbal 21
baterai lifepo4 170
baterai lithium-ion 22
baterai zinc-air 23
bendung 86, 102, 113, 123, 124, 140
bidirectional converter 294
bilah turbin 150, 152, 168, 186, 271
biosolar 278
blok diagram plts 10, 65, 69, 70, 72

C

cable clip 52
combiner box 26, 45, 66, 68, 70, 73, 284
crane mini 269
current meter 108

D

dc bus 263
direct current 257

E

end clamp 51, 54
energi angin 143, 144, 146, 150, 156, 162, 222
energi hidro 79, 80, 81, 85, 142
energi hibrida 223, 224, 226, 268, 274, 284
energi surya 1, 2, 3, 5, 77, 79, 143, 223, 260, 314

F

flow duration curve (fdc) 108
fondasi model truss 208

G

generator set 247, 255, 270, 278, 284
grounding lug 51, 54

I

inverter 7, 19, 20, 28, 33, 34, 36, 45, 66, 68, 70, 72, 73, 77, 158, 159, 160, 164, 171, 197, 214, 225, 231, 232, 233, 236, 238, 239, 241, 242, 244, 263, 267, 280, 281, 282, 283, 285
inverter *built-in* scc 19
inverter tanpa *built-in* scc 20
iradiasi matahari 43

J

jointing rail 51

K

kapasitas generator 252, 253

klip lok 52

koneksi penyangga 271

L

layout PLTMH 101

M

microgrid 257, 258, 259, 263, 301

mid clamp 51, 54

modul surya 10, 11, 12, 17, 27, 46, 47, 49, 50,
51, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 63, 66, 77, 78

modul surya film tipis 12

modul surya monokristalin 11

MPPT 13, 18, 35, 36, 280, 313

N

name plate generator 247

P

panel surya 13, 14, 44, 52, 244, 284

penstock 84, 102

photovoltaic 228, 313

PLTA 84, 85, 111, 225, 295, 296, 297, 298, 299,
302

PLTB 144, 145, 146, 147, 148, 149, 152, 153,
154, 155, 158, 159, 162, 163, 164, 165, 166,
167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176,
177, 178, 179, 180, 182, 183, 185, 186, 190,
194, 195, 196, 197, 198, 204, 205, 208, 209,
211, 212, 213, 214, 215, 217, 219, 222, 225,
226, 228, 229, 230, 233, 235, 239, 249, 250,
251, 258, 263, 264, 265, 266, 268, 270, 274,
285, 286

PLTD 226, 228, 229, 231, 232, 235, 237, 238,
241, 243, 244, 245, 246, 247, 251, 262, 263,
268, 269

PLTMH 80, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92,
93, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104,
105, 106, 107, 110, 111, 112, 113, 114, 115,
116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124,
125, 127, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136,
137, 139, 140, 141, 142, 233, 295, 296, 297,
299, 300, 301, 302, 303

PLTS 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 18, 19, 20, 21, 24,
25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37,
38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
54, 55, 56, 57, 58, 59, 62, 65, 66, 68, 69, 70,
71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 225, 226, 228,
229, 230, 231, 232, 233, 235, 236, 237, 238,
239, 241, 243, 244, 245, 246, 249, 251, 258,
262, 263, 264, 265, 266, 268, 270, 274, 285,
286, 294, 295, 297, 298, 299, 300, 301, 302

pump storage 83

R

rail 51, 54
refleksi 42, 77, 112, 142, 222, 293
rotor 157, 165, 166, 167, 168, 195, 196

S

saluran pelimpah 84, 86, 101, 102, 126, 128, 129
SCC 9, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 35, 37, 66, 70, 72, 241, 260, 261, 298
sinkronisasi 232, 241, 242
sinus murni 171
smart home 292
string 68, 70, 73

T

tachometer 122
tegangan AC 236, 240, 242
termometer 122
transformator 30, 109, 111, 197, 214, 225, 236, 284
transmisi mekanik 91, 92
turbin angin 210, 249, 250, 271, 302
turbin reaksi 109, 225

V

v-belt 299
vibration meter 122
VRLA 21

Penulis



Zainul M PULUNGAN

Email:

zmpulungan@gmail.com

Instansi:

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Alamat Instansi:

Jl. Poncol Raya No 39 Ciracas, Jakarta Timur

Bidang Keahlian:

Ketenagalistrikan
Energi Baru dan Terbarukan

Pekerjaan/Profesi

1. Widyaiswara Ahli Muda (2020–sekarang)
2. Subkoordinator Sarana Pengembangan SDM Bidang Listrik dan Energi Terbarukan (2021–sekarang)
3. Praktisi Mengajar Bidang Listrik dan Energi Terbarukan di Perguruan Tinggi (2022–sekarang)
4. Asesor Ketenagalistrikan (2021–sekarang)
5. Asesor Kompetensi BNSP (2017–sekarang)
6. Kepala Subbidang Perencanaan (2018–2021)
7. Analis Kerja Sama (2014–2018)

Pendidikan Terakhir

1. S2, Manajemen Energi, Institut Teknologi Bandung, 2017
2. S1, Teknik Elektro, Universitas Telkom, 2012

Bidang Keahlian

1. Ketenagalistrikan
2. Energi Baru dan Terbarukan

Penulis



Feviana
IDARRANI

Email:

suratpunyafevi@gmail.com

Instansi:

SMKN 1 Kemang

Alamat Instansi:

Jl. Kemang Limus Manggung RT. 004
RW. 002 Desa Kemang Kec. Kemang
Kab. Bogor 16310

Bidang Keahlian:

Teknik Energi Terbarukan
Teknik Elektronika

Pekerjaan/Profesi

1. Guru Teknik Energi Terbarukan SMKN 1 Kemang (2022 s.d. Sekarang)
2. Guru Fisika SMAS Citra Nusa Kab. Bogor (2013–2015)
3. Guru Teknik Audio Video SMKS Bina Warga 1 Kota Bogor (2008–2022)

Pendidikan Terakhir

S1 Teknik Elektro Universitas Gunadarma (Tahun Lulus 2006)

Penulis



Amin
WAHYONO,
S.Kom., M.T.

Email:

aminwahyono65@guru.smk.belajar.id

Instansi:

SMKN 1 Suruh

Alamat Instansi:

Jln. Ngusman Kecamatan Suruh
Kabupaten Trenggalek Jawa Timur
66360

Bidang Keahlian:

Rekayasa Teknik dan Energi
Terbarukan
Guru Penggerak Sekolah Menengah
Kejuruan

Pekerjaan/Profesi

1. Guru Mata Pelajaran Teknik Komputer dan Jaringan
2. Wakil Kepala Sekolah Bidang Mutu dan Ketenagaan
3. Guru Mata Pelajaran Teknik Audio Video
4. CIO Alhytech Engineering bidang Rekayasa Teknik dan Energi Terbarukan

Pendidikan Terakhir

Pendidikan Program S-2 Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Tahun Lulus 2016

Rekam Jejak Karya Tulis

1. Penulis Buku Teks SMK Fase F, Bidang Energi Baru dan Terbarukan, Tahun 2024
2. Pekerjaan Dasar Elektronika Kelas X , 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 978602444746-5
3. Instalasi Motor Listrik Kelas XI, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447946
4. Dasar Listrik dan Elektronika Kelas X, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447496
5. Instalasi Motor Listrik Kelas XII, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447953
6. Gambar Teknik Listrik Kelas X, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447502

Penelaah



Dr. Eka Cahya
PRIMA, S.Pd., M.T.

Email:

ekacahyaprima@upi.edu

Instansi:

Universitas Pendidikan Indonesia

Alamat Instansi:

Jl. Dr. Setiabudi No. 229 Bandung

Bidang Keahlian:

Sel Surya

Pekerjaan/Profesi

Dosen di Universitas Pendidikan Indonesia (2014–sekarang)

Pendidikan Terakhir

1. S1 Pendidikan Fisika – Universitas Pendidikan Indonesia (2007–2011)
2. S2 Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung (2011–2013)
3. S3 Teknik Fisika – Institut Teknologi Bandung (2013–2017)

Judul Buku dan Tahun Terbit

1. Buku Pendalaman Materi PPG: Partikel Materi, Larutan dan Sifatnya, Senyawa Organik dan Anorganik, Zat Aditif dan Zat Adiktif. Kemdikbud (2022)
2. Teori dan Implementasi Case Method dan Team Based Project di Perguruan Tinggi. UPI Press (2023)
3. STEM-ESD pada Pembelajaran IPA, Yogyakarta: Pustaka Egaliter (2024)
4. Belajar Sel Surya melalui STEM-Design Thinking, Yogyakarta: Pustaka Egaliter (2024)

Judul Penelitian dan Tahun Terbit

1. Standarisasi Fabrikasi Modul Sel Surya Lapisan Tipis Non-Silikon (Dye-Sensitized, Kesterite) Berbasis Material Lokal Untuk Mencapai Standar Efisiensi Komersial, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (2024)
2. Pengembangan Material Energi Terbarukan $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Memanfaatkan Potensi Material Lokal untuk Aplikasi Sel Surya Lapisan Tipis, Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, (2020–2022)

Pekerjaan/Profesi

1. Koordinator Program Studi Teknik Elektro UNNES (2023)
2. Sekretaris Jurusan Teknik Elektro UNNES (2015)

Pendidikan Terakhir

1. Sarjana Teknik Elektro UNDIP (1993)
2. Magister Teknik Elektro ITB (2005)

Judul Buku dan Tahun Terbit

1. Praktik Elektronika, 2021, DeepPublish, Yogyakarta, ISBN: 9786230221392
2. Perancangan dan Fabrikasi NMOS Menggunakan Teknologi Implantasi Ion, 2023, Mahata, Yogyakarta, ISBN: 9786236480311

Judul Penelitian dan Tahun Terbit

1. The effect of the performance of using a boost converter on the voltage of the solar panel.
2. Optimalisasi Stand-Alone Photovoltaic System dengan Implementasi Algoritma P&O-Fuzzy MPPT

Informasi Lain dari Penulis/Penelaah

SCOPUS ID : 57211337885
SINTA ID : 6041495
Google Scholar ID : 39YCFYAAAAJ

Penelaah



Tatyantoro
**ANDRASTO, S.T.,
M.T.**

Email:

tatyantoro@gmail.com

Instansi:

Teknik Elektro Universitas Negeri
Semarang

Alamat Instansi:

Gd E11, lt 2, Kampus UNNES Sekaran,
Semarang - 50229

Bidang Keahlian:

Teknik Elektro

Ilustrator



Rizki Arif MAULANA

Email:

ramarts.tiktok@gmail.com

Bidang Keahlian:

Designer

Ilustrator

Tradisional Artist

Konten Maker

Pendidikan Terakhir

1. SDN KASEMEN
2. SMPN 5 KOTA SERANG
3. SMAN 4 KOTA SERANG
4. UNSERA Universitas Serang Raya

Judul Buku yang Pernah Dibuat Ilustrasi

1. Keur Waktu Hujan Turun B2
2. Rebo Wekasan B2
3. Tugas Rahasiane Aki
4. Baling Bambu Desa Abah
5. Tsunami Sunyi
6. Sosoh Misnah
7. Sentuh Warna
8. Teman Baru Eno
9. Legenda Cikuya
10. Legenda Cisoka
11. Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin

Editor



Dr. Christina
TULALESSY

Email:

nonatula6@gmail.com

Bidang Keahlian:

Penulisan BTP
Pembelajaran dan Penilaian SD-SMA/K
Editor

Pekerjaan/Profesi

1. Pusat Perbukuan (1988–2010)
2. Pusat Kurikulum dan Perbukuan, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kemdikbudristek (2010–2021)

Pendidikan Terakhir

1. S3 Penelitian dan Evaluasi Pendidikan UNJ Tahun 2017
2. S2 Penelitian dan Evaluasi Pendidikan UHAMKA Tahun 2006
3. S1 Tata Busana IKIP Jakarta Tahun 1988

Judul Buku dan Tahun Terbit

Penelitian Tindakan Kelas: Apa, Mengapa, Bagaimana: 2020

Informasi Lain

Asesor Kompetensi Penulis dan Penyunting

Editor



Wuri PRIHANTINI

Email:

-

Instansi:

Pusat Perbukuan, Kemdikbudristek

Bidang Keahlian:

Editor Buku

Pekerjaan/Profesi

2008–saat ini, bekerja di Pusat Perbukuan di bagian Penyusunan, Pengembangan, dan Penilaian Buku SD, SMP, dan SMA. Sebelum di Pusat Perbukuan, 5 tahun (2002–2007) berkelana di perusahaan-perusahaan swasta sebagai staf di bagian engineering.

Pendidikan Terakhir

2021 Berhasil menamatkan studi pascasarjana di Fakultas Ilmu Bahasa jurusan Linguistik, Universitas Indonesia-Depok

Pengalaman Mengedit Buku dan Terbitan Lainnya

2023 Menjadi editor kedua dalam beberapa judul Buku Kurasi Pusat Perbukuan, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (*Pencurian di Rumah Bernyanyi; Pulang; Seraung untuk Pu'i; Ketika Ibu Pergi*)

Pengalaman Menulis Buku atau Terbitan Lainnya

Prihantini, W., & Kushartanti, B. (2021, November). The Meaning of takut 'fear' by Indonesian-speaking School-age Children. In *International University Symposium on Humanities and Arts 2020 (INUSHARTS 2020)* (pp. 333-340). Atlantis Press.

Prihantini, W. (2021). Peran media sosial dalam pemaknaan 'new normal'. *Jurnal Konferensi Linguistik*, 2(1), 437-443.

Pekerjaan/Profesi

1. Direktur Program Pembelajaran Selingkar (2019–2022)
2. Kepala editor Ruang Cendekia
3. Penulis

Pendidikan Terakhir

S-1 Komunikasi UIN Imam Bonjol, Padang

Judul Buku dan Tahun Terbit

1. Secara personal sudah menulis lebih dari 30 buku
2. Sebagai editor sudah merancang puluhan buku nonteks

Editor Visual



Maya LESTARI GF

Email:

mayalestarigf@gmail.com

Bidang Keahlian:

Penulisan

Editing

Penyajian Naskah

Desainer



Erwin

Email:

erwinwienk2025@gmail.com

Instansi:

Freelance

Bidang Keahlian:

Desainer

Pekerjaan/Profesi

2012–Sekarang Desainer Lepas

Pendidikan Terakhir

SMA

Pengalaman Mendesain Buku

1. Pendidikan Agama Hindu dan Budi Pekerti Kelas 5 dan 10 (Pusbuk-Kemendikbudristek, 2021)
2. Buku Panduan Guru Pendidikan Jasmani, Olahraga, dan Kesehatan Kelas 2 dan 5 (Pusbuk-Kemendikbudristek, 2021)
3. Buku Panduan Guru Seni Tari Kelas 1 dan 4 (Pusbuk-Kemendikbudristek, 2023)
4. Buku Panduan Guru Seni Tari Kelas 2 dan 5 (Pusbuk-Kemendikbudristek, 2024)