



KEMENTERIAN
PENDIDIKAN DASAR
DAN MENENGAH



Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin

Amin Wahyono
Feviana Idarrani
Zainul M. Pulungan

SMK/MAK Kelas XII

Hak Cipta pada Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah 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 Dasar dan Menengah. 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@kemendikdasmen.go.id diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini.

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin untuk SMK/MAK Kelas XII**Penulis**

Amin Wahyono
Feviana Idarrani
Zainul M. Pulungan

Penelaah

Tatyantoro Andrasto
Eka Cahya Prima

Penyelia/Penyelarass

Supriyatno
Putri F. Wijayanti
Faiz Alfian Ilmi
Ria Triyanti

Kontributor

Rachman Mutaqim Fazri
Chudhori
Didik Harjogi

Ilustrator

Marsha Krisandari

Editor

Christina Tulalessy
Ina Maria Muhammadiyah

Editor Visual

Sonson Nurusholih

Desainer

Wella Nangin

Penerbit

Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah
Jalan Jenderal Sudirman, Senayan, Jakarta Pusat 10270

Dikeluarkan oleh

Pusat Perbukuan
<https://buku.kemendikdasmen.go.id>

Cetakan Pertama 2025

ISBN 978-634-00-0042-9 (no. jil. lengkap)
ISBN 978-634-00-3330-4 (jil.2)

Isi buku ini menggunakan huruf Noto Sans 10/16 pt, SIL Open Font License & Apache License.
xiv, 242 hlm, 21 x 27 cm.



Kata Pengantar

Pusat Perbukuan; Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan; Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah memiliki tugas dan fungsi mengembangkan buku pendidikan pada satuan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah, termasuk Pendidikan Khusus. Sebagai sumber belajar utama dalam pembelajaran, buku dirancang untuk mendukung proses pembelajaran yang terarah, sistematis, dan relevan dengan kebutuhan zaman. Dalam rangka mendukung terciptanya pembelajaran yang bermutu, Pemerintah mengembangkan buku teks utama yang terdiri atas buku siswa dan panduan guru. Buku ini merupakan sumber belajar utama dalam pembelajaran bagi murid dan menjadi salah satu referensi atau inspirasi bagi guru dalam merancang dan mengembangkan pembelajaran sesuai karakteristik, potensi, dan kebutuhan murid. Keberadaan buku teks utama ini diharapkan dapat menumbuhkan generasi yang beriman dan bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, dan berakhlak mulia; berpengetahuan luas; mandiri; kritis; kreatif; mampu bekerja sama; serta berdaya saing di tingkat nasional maupun global.

Buku teks utama, sebagai salah satu sarana membangun dan meningkatkan budaya literasi masyarakat Indonesia, perlu mendapatkan perhatian khusus. Pemerintah perlu menyiapkan buku teks utama yang mengikuti kebutuhan zaman untuk semua mata pelajaran wajib maupun mata pelajaran peminatan sehingga dapat dimanfaatkan oleh semua jenjang dan jenis pendidikan, termasuk Pendidikan Khusus.

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkolaborasi dalam upaya menghadirkan buku teks utama ini. Semoga buku teks utama ini dapat menjadi tonggak perubahan yang menginspirasi, membimbing, dan mengangkat kualitas pendidikan kita ke puncak keunggulan.

Jakarta, November 2025
Kepala Pusat Perbukuan,

Supriyatno, S.Pd., M.A.



Prakata

Hai, kamu yang sedang belajar menjadi calon teknisi energi masa depan!

Pernahkah kamu membayangkan, bagaimana rasanya melihat lampu menyala di desa terpencil yang sebelumnya gelap gulita? Atau, membayangkan listrik yang kamu gunakan di rumah ternyata berasal dari air sungai, sinar matahari, atau tiupan angin? Nah, melalui buku ini, kamu akan diajak memahami bagaimana semua itu bisa terjadi — bagaimana energi alam di sekitar kita dapat diubah menjadi listrik yang bermanfaat bagi kehidupan.

Buku Teknik Energi Hidro, Surya, dan Angin ini disusun khusus untuk kamu, murid SMK kelas XII jurusan Energi Terbarukan. Buku ini dirancang agar kamu tidak hanya memahami teori, tetapi juga terampil dan percaya diri saat mengoperasikan berbagai sistem pembangkit listrik kecil — dari PLTS di atap rumah, PLTMH di pedesaan, turbin angin di pesisir, hingga sistem hibrida yang menggabungkan energi surya dan diesel.

Struktur buku ini dibuat agar mudah kamu ikuti. Setiap bab dimulai dengan tujuan pembelajaran, diikuti dengan penjelasan konsep dasar, contoh penerapan di lapangan, dan aktivitas praktik yang menantang sekaligus menyenangkan. Ada juga pengayaan yang memperluas wawasanmu tentang energi terbarukan, serta refleksi agar kamu dapat menilai sendiri sejauh mana kamu sudah memahami materi. Buku ini tidak hanya mengajarkan cara mengoperasikan peralatan, tetapi juga membentuk karakter profesional — disiplin, tangguh, beretika, dan berjiwa hijau.

Keunggulan buku ini terletak pada pendekatannya yang kontekstual dan berbasis proyek nyata, sesuai dengan kondisi pembelajaran vokasi saat ini. Setiap contoh dan studi kasus diambil dari pengalaman lapangan di berbagai daerah di Indonesia. Dengan demikian, kamu akan belajar dari situasi yang benar-benar terjadi — bukan hanya dari teori saja.

Harapan kami, buku ini menjadi teman belajarmu yang inspiratif — membantu kamu berpikir kritis, bekerja dengan empati, dan memahami betapa pentingnya peranmu dalam menjaga bumi melalui energi bersih. Jadilah generasi energi hijau yang membawa perubahan nyata untuk negeri ini. Ingatlah, masa depan energi Indonesia ada di tanganmu.

Selamat belajar dan berpetualang dalam dunia energi terbarukan!



Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Prakata	iv
Daftar Isi	v
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	xi
Petunjuk Penggunaan Buku	xiii

BAB 1 Teknik Energi Surya	1
A. Pengoperasian PLTS	4
1. Pengoperasian Sistem PLTS	4
2. Mengaktifkan dan Menonaktifkan Sistem PLTS	20
3. Pengoperasian Rutin Sistem PLTS	26
B. Pemeliharaan PLTS	30
1. Prosedur Pemeliharaan PLTS	31
2. Perawatan dan Pencegahan Kerusakan PLTS	36
3. Penyusunan Laporan dan Rekomendasi Perbaikan	44
Uji Kompetensi	53

1



BAB 2 Teknik Energi Hidro	61
A. Pengoperasian PLTMH	64
1. Persiapan Pengoperasian PLTMH	64
2. Pengoperasian Peralatan Bantu PLTMH	71
3. Pengoperasian Unit PLTMH	75
4. Monitoring Pengoperasian PLTMH.....	81
B. Pemeliharaan PLTMH	86
1. Pemeliharaan Konstruksi Sipil PLTMH	86
2. Pemeliharaan Sistem Mekanik PLTMH	88
3. Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTMH	91
Uji Kompetensi	96

61





103



BAB 3 Teknik Energi Angin	103
A. Pengoperasian PLTB	105
1. Persiapan Pengoperasian PLTB	106
2. Pengoperasian Sistem PLTB	124
3. Mengevaluasi Kinerja PLTB	148
B. Pemeliharaan PLTB	156
1. Perawatan PLTB	156
2. Perbaikan PLTB	160
Uji Kompetensi	165

173



BAB 4 Teknik Energi Hibrida	173
A. Pengoperasian PLTH	176
1. Persiapan Pengoperasian PLTS	176
2. Persiapan Pengoperasian PLTD	181
3. Pengoperasian Unit PLTH	186
4. Penonaktifan (Shutdown) Unit PLTH	192
B. Pemeliharaan PLTH	196
1. Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTD	204
2. Perawatan Sistem Hibrida	209
Uji Kompetensi	216

Glosarium	223
Daftar Pustaka	226
Daftar Sumber Gambar	228
Indeks	229
Profil Pelaku Perbukuan	231





Daftar Gambar

Gambar 1.1	Pengoperasian PLTS Desa Temajuk, Kecamatan Paloh Kabupaten Sambas Provinsi Kalimantan Barat	3
Gambar 1.2	Tahapan Persiapan Pengoperasian PLTS	4
Gambar 1.3	Penggunaan Alat Pelindung Diri Pengoperasian PLTS	6
Gambar 1.4	Perkakas Tangan dan Alat Ukur	7
Gambar 1.5	Pengukuran Tegangan Baterai	8
Gambar 1.6	Parameter Modul Surya	11
Gambar 1.7	Pengecekan Parameter SCC	12
Gambar 1.8	Parameter Inverter	16
Gambar 1.9	Parameter Baterai Beberapa Baterai	17
Gambar 1.10	Komponen Sistem Proteksi	18
Gambar 1.11	Menyalakan MCB di Panel Distribusi	20
Gambar 1.12	Prosedur Mengaktifkan Sistem PLTS	21
Gambar 1.13	Prosedur Menonaktifkan Sistem PLTS	24
Gambar 1.14	Pemantauan Pengoperasian Sistem PLTS	27
Gambar 1.15	Pemeliharaan Sistem PLTS	30
Gambar 1.16	Perawatan Modul Surya	37
Gambar 1.17	Perawatan Inverter	38
Gambar 1.18	Pengujian dengan Alat Ukur	42
Gambar 2.1	Saluran Pembawa PLTMH	63
Gambar 2.2	Alat Pelindung Diri	65
Gambar 2.3	<i>Single Line Diagram</i> PLTMH	66
Gambar 2.4	Area dan Komponen Utama PLMTH	66
Gambar 2.5	<i>Circuit Breaker</i>	67
Gambar 2.6	<i>Flowmeter</i>	68
Gambar 2.7	Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTMH	69
Gambar 2.8	Pintu Air	71
Gambar 2.9	Saringan Sampah	72
Gambar 2.10	Diagram Alir Pengoperasian Peralatan Bantu PLTMH	73
Gambar 2.11	<i>Guide Vane</i> pada Turbin	76
Gambar 2.12	Sistem Kontrol Otomatis Frekuensi	76





Gambar 2.13	Diagram Alir Menyalakan (<i>Turn On</i>) PLTMH	77
Gambar 2.14	Diagram Alir Mematikan (<i>Turn Off</i>) PLTMH	80
Gambar 2.15	Pengukuran Putaran Turbin dengan <i>Tachometer</i>	82
Gambar 2.16	Sistem Monitoring Tegangan dan Frekuensi	82
Gambar 2.17	Sistem Mekanik PLTMH	89
Gambar 2.18	Panel Sistem Kontrol	92
Gambar 2.19	Kontraktor, MCCB, & MCB	93
Gambar 3.1	Perbandingan Kecepatan Angin m/s (meter per detik) dan Daya Listrik kW (kilowatt)	106
Gambar 3.2	Daerah Penempatan Titik PLTB yang Ideal	107
Gambar 3.3	Model <i>Wind Rose Diagram</i>	108
Gambar 3.4	Perbandingan Penyangga PLTB dan Kecepatan Angin	109
Gambar 3.5	Bagian Mekanis PLTB Skala Kecil	112
Gambar 3.6	Posisi PLTB Normal	113
Gambar 3.7	Kondisi PLTB Saat Angin Kencang dan Mengaktifkan <i>Furling</i>	114
Gambar 3.8	Peralatan Uji Tegangan, Ampere, dan Watt	116
Gambar 3.10	Peralatan Ukur <i>Grounding</i>	118
Gambar 3.11	Kipas PLTB yang Rusak	121
Gambar 3.12	PLTB yang Dibangun untuk Sebuah Komunitas Nelayan	122
Gambar 3.13	Keamanan Pengoperasian PLTB	125
Gambar 3.14	Posisi Kipas Tidak Menerima Angin 90°	128
Gambar 3.15	Posisi Kipas Menerima Angin 4°	128
Gambar 3.16	Sistem Pengatur <i>Pitch Control</i> Sistem Elektrik	129
Gambar 3.17	(A) Kondisi Pengaman <i>Furling</i> Aktif, PLTB Berhenti (B) Kondisi Pengaman <i>Furling</i> Tidak Aktif, PLTB Bekerja	130
Gambar 3.18	PLTB Skala Kecil Tanpa Pengaman	131
Gambar 3.19	Urutan Pengoperasian PLTB	133
Gambar 3.20	Mengoperasikan PLTB melalui Monitor	134





Gambar 3.21	Sensor Pembaca Kecepatan Angin	135
Gambar 3.22	Sensor Pembaca Arah Angin	136
Gambar 3.23	Sensor RPM	136
Gambar 3.24	Sensor Pembaca Tegangan Listrik	137
Gambar 3.25	Sensor Pembaca Arus listrik	137
Gambar 3.26	Bagan Sistem SCADA pada PLTB Skala Kecil	138
Gambar 3.27	Tampilan Layar pada Terminal Utama	139
Gambar 3.28	Beberapa Sensor Tambahan pada PLTB	140
Gambar 3.29	Jangan Menghentikan PLTB dengan Mengganjal Bilah	144
Gambar 3. 30	(a) Posisi Pitch 0°; (b) Posisi Pitch 90°	146
Gambar 3.31	Pengukuran Tegangan Hasil Generator PMG	150
Gambar 3.32	Diagram Pengkabelan Pengukuran Arus Listrik	152
Gambar 3.33	Monitoring Daya Listrik	152
Gambar 3.34	Langkah Perbaikan Baling-Baling dengan Alat Bantu	161
Gambar 3.36	Bilah Erodinamis Model DU dan NACA	162
Gambar 3.37	Pengamatan Bilah Turbin Saat Perbaikan	163
Gambar 3.38	Diagram Blok Sistem PLTB	165
Gambar 4.1	Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida	175
Gambar 4.2	Kotak Kombiner pada PLTS	177
Gambar 4.3	Inverter PLTS	178
Gambar 4.4	Panel Proteksi	179
Gambar 4.5	Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTS	179
Gambar 4.7	Dipstick, Alat Pemeriksa Sistem Pelumas	182
Gambar 4.8	Alat Pemeriksa Sistem Bahan Bakar	182
Gambar 4.10	Baterai pada PLTD	184
Gambar 4.11	Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTD	185
Gambar 4.12	Diagram Alir Pengoperasian PLTH	191
Gambar 4.13	Diagram Alir Penonaktifan PLTH	194





Gambar 4. 14	Generator Set Berbahan Bakar Bensin	196
Gambar 4.15	Bagian Generator Set Berbahan Bakar Solar	198
Gambar 4.16	Generator Set Berbahan Bakar Gas	201
Gambar 4.17	Bagian Kelistrikan PLTD	205
Gambar 4.18	Perawatan Berkala pada Kelistrikan	206
Gambar 4.19	Sistem Kerja PLTH	210
Gambar 4.20	Beban dalam Berbagai Kondisi	211
Gambar 4.21	<i>Single Line Diagram</i> PLTH	213





Daftar Tabel

Tabel 1.1	Parameter SCC <i>Maximum Power Point Tracking</i> dengan Baterai	13
Tabel 1.2	Komponen-Komponen dan Jenis Pemeliharaannya	31
Tabel 1.3	Contoh Jadwal Pemeliharaan	32
Tabel 1.4	Perbandingan Frekuensi Pemeliharaan	34
Tabel 1.5	Perawatan Komponen PLTS	39
Tabel 1.6	Hasil Pemeriksaan dan Pengukuran	46
Tabel 1.7	Contoh Format Rekomendasi Perbaikan	50
Tabel 2.1	<i>Logbook</i> Penonaktifan PLTMH	79
Tabel 2.2	Standar Parameter Teknis Sistem Kelistrikan PLTMH	83
Tabel 2.3	<i>Logbook</i> Kinerja Pengoperasian PLTMH	84
Tabel 2.5	Pemeliharaan Komponen Konstruksi Sipil PLTMH	87
Tabel 2.6	Pemeliharaan Komponen Sistem Mekanik PLTMH	90
Tabel 2.7	Pemeliharaan Komponen Konstruksi Sipil PLTMH	94
Tabel 3.1	Pemeriksaan Lokasi dan Potensi PLTB Skala Kecil	109
Tabel 3.2	Tabel Pemeriksaan Pengaman Mekanis	114
Tabel 3.3	Tabel Kegiatan Pemeriksaan Kelistrikan	118
Tabel 3.4	Kebersihan Area Turbin	122
Tabel 3.5	Tabel Identifikasi dan Mitigasi Risiko	125
Tabel 3.6	Rekaman Kecepatan Angin Harian	149
Tabel 3.7	Cara Pengukuran pada Beberapa Jenis Generator	151
Tabel 3.8	Contoh Evaluasi Biaya dan Manfaat PLTB	154
Tabel 3.9	Jadwal Kegiatan Perawatan PLTB Skala Kecil	156
Tabel 3.10	Rencana Perawatan	157
Tabel 3.11	Tabel Perawatan Harian	158
Tabel 3.12	Temuan di Lapangan	158
Tabel 3.13	Peralatan Perbaikan dan Fungsinya	160
Tabel 3.14	Parameter dan Spesifikasi PLTB Skala Kecil	170





Tabel 4.1	<i>Logbook</i> Pengoperasian PLTH	190
Tabel 4.2	<i>Logbook</i> Penonaktifan PLTH	194
Tabel 4.3	Tabel Perawatan PLTD Berbahan Bakar Bensin	197
Tabel 4.4	Pemeliharaan PLTD Berbahan Bakar Solar	200
Tabel 4.5	Keterangan Gambar 4.16	201
Tabel 4.6	Pemeliharaan PLTD Berbahan Bakar Gas	202
Tabel 4.7	Keterangan Gambar 4.17	205
Tabel 4.8	Pemeliharaan Kelistrikan PLTD	207
Tabel 4.9	Pemeliharaan Sistem PLTH	213





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 kamu 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 pemahamanmu 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 DASAR DAN MENENGAH
REPUBLIK INDONESIA, 2025

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin
Jenjang SMK/MAK Kelas XII

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

ISBN 978-634-00-0042-9 (no. jil. lengkap)

ISBN 978-634-00-3330-4 (jil.2)

BAB 1

Teknik Energi Surya



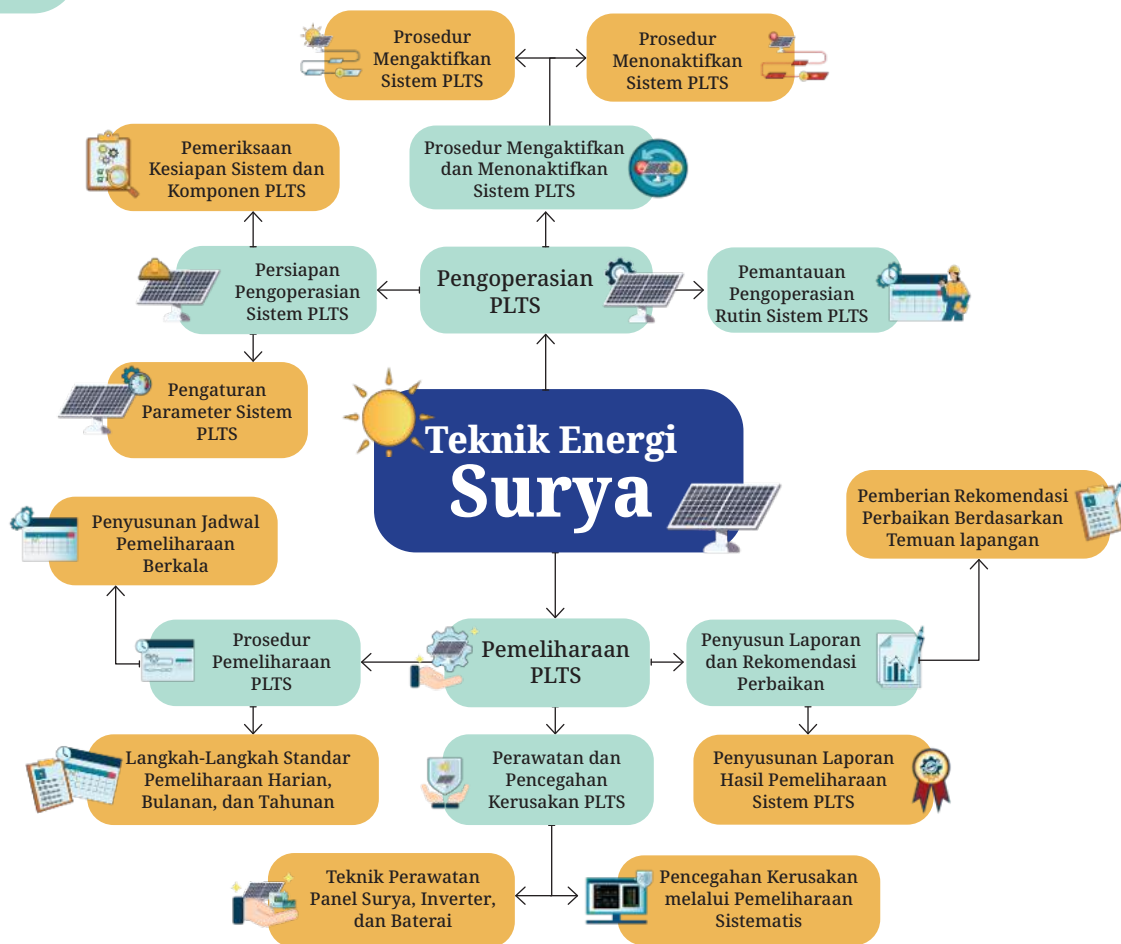
Tujuan Pembelajaran

Pada bab ini, kamu akan mempelajari prosedur mengoperasikan dan memelihara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang sesuai dengan keselamatan dan kesehatan kerja.

Kata Kunci

1. pengoperasian
2. pemeriksaan
3. pemeliharaan
4. PLTS

Peta





Gambar 1.1 Pengoperasian PLTS Desa Temajuk, Kecamatan Paloh
Kabupaten Sambas Provinsi Kalimantan Barat
Sumber: PLN (2023)

Energi surya menjadi salah satu sumber energi bersih yang makin banyak dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari rumah tangga hingga industri. Melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sinar matahari dapat diubah menjadi energi listrik secara ramah lingkungan dan berkelanjutan. Namun, agar sistem ini dapat bekerja dengan optimal dan memiliki umur pakai yang panjang, diperlukan pengoperasian yang tepat dan pemeliharaan yang rutin. Gambar 1.1 memperlihatkan teknisi yang sedang melakukan pemeriksaan dan pengaturan sistem PLTS—menunjukkan bahwa setiap komponen, seperti panel surya, inverter, baterai, dan konektor, perlu dikontrol secara berkala untuk memastikan kinerjanya tetap efisien dan aman.

Sebelum mempelajari lebih lanjut, jawablah beberapa pertanyaan berikut.

1. Mengapa pengoperasian awal sistem PLTS tidak boleh diabaikan?
2. Apa saja langkah penting dalam tahap pengoperasian PLTS?
3. Komponen apa saja yang harus dipelihara secara rutin?
4. Apa risiko yang dapat terjadi jika sistem PLTS tidak dirawat secara berkala?



A. Pengoperasian PLTS

Di era teknologi dan energi terbarukan seperti sekarang, PLTS menjadi salah satu solusi cerdas untuk memenuhi kebutuhan listrik yang ramah lingkungan dan hemat biaya. Bayangkan, hanya dengan memanfaatkan sinar matahari yang kita terima setiap hari, kita dapat menghasilkan energi listrik untuk berbagai kebutuhan. Agar PLTS dapat berfungsi secara optimal, efisien, dan tahan lama, tidak cukup hanya dengan melakukan pemasangan saja. Diperlukan pengoperasian yang tepat dan sistematis, mulai dari persiapan awal, proses menghidupkan dan mematikan sistem (*turn on–turn off*), hingga pemantauan rutin saat sistem berjalan. Sebagai calon teknisi profesional, kamu akan belajar bagaimana mengelola sistem PLTS agar bekerja dengan baik dan aman. Semua proses ini mengacu pada standar internasional IEC 62446-1:2016, yang mengatur inspeksi, pengujian, dan dokumentasi sistem fotovoltaik, serta SNI IEC 60364, yang mengatur instalasi listrik tegangan rendah di Indonesia. Dengan mengikuti standar ini, pengoperasian PLTS tidak hanya akan menghasilkan listrik secara efisien, tetapi juga memperpanjang umur sistem dan memberikan manfaat berkelanjutan bagi lingkungan dan masyarakat.

1. Persiapan Pengoperasian Sistem PLTS

Pemasangan PLTS hanyalah salah satu langkah dari keseluruhan proses sistem PLTS. Setelah PLTS terpasang, pekerjaan belum selesai. Justru, ada tahapan penting yang perlu dilakukan sebelum sistem benar-benar dapat menghasilkan listrik secara optimal, yaitu tahap persiapan pengoperasian. Seperti halnya saat merakit kendaraan, sistem ini tidak dapat langsung dijalankan tanpa memastikan semua komponennya bekerja dengan baik. *Solar charge controller* (SCC) harus terhubung dengan benar, baterai harus dalam kondisi optimal, dan inverter harus dikonfigurasi sesuai kapasitas sistem. Kesalahan kecil pada tahap ini dapat berdampak besar terhadap efisiensi, keamanan, maupun umur sistem PLTS.



Gambar 1.2 Tahapan Persiapan Pengoperasian PLTS

Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)

Pikirkanlah, apa yang terjadi jika PLTS langsung dijalankan tanpa pengecekan. Apa saja komponen yang sebaiknya diperiksa terlebih dahulu agar sistem PLTS berfungsi dengan aman dan maksimal? Melalui kegiatan ini, kamu akan belajar bagaimana menyiapkan pengoperasian sistem PLTS secara sistematis dan profesional, sebagaimana yang dilakukan para teknisi di dunia kerja. Dengan memahami setiap langkah persiapan, kamu sedang membangun fondasi keterampilan yang kuat untuk menjadi tenaga ahli di bidang energi terbarukan yang andal dan kompeten.

a. Pemeriksaan Kesiapan Sistem dan Komponen PLTS

Sebelum sistem PLTS dijalankan, semua komponen perlu diperiksa secara menyeluruh dalam kondisi tanpa arus listrik. Pemeriksaan ini merupakan bagian dari *pre-commissioning check*, yaitu pemeriksaan sebelum sistem PLTS dioperasikan untuk pertama kali. Pemeriksaan ini merupakan langkah penting. Tujuan utamanya ialah memastikan bahwa semua komponen dalam kondisi baik, terpasang dengan benar, serta siap untuk dialiri listrik.

Berikut tahapan persiapan sistem PLTS.

1) Persiapan Dokumen Administratif dan Teknis

Sebelum sistem PLTS dioperasikan, perlu disiapkan dokumen administratif dan teknis sebagai dasar legalitas dan acuan teknis pengoperasian. Tujuannya ialah memastikan semua proses pemasangan, pengujian, dan pemeriksaan telah selesai serta memenuhi standar yang berlaku. Dokumen administratif mencakup surat izin operasi atau persetujuan pengoperasian PLTS, berita acara pemeriksaan dan serah terima (BAST), laporan akhir pekerjaan, dokumen keselamatan kerja (K3), manual operasional dan pemeliharaan (O&M Manual), serta dokumen garansi komponen utama seperti panel surya, inverter, dan baterai. Sementara itu, dokumen teknis meliputi gambar *as-built drawing*, *single line diagram* (SLD), *wiring diagram*, spesifikasi teknis komponen, laporan hasil pengujian (*commissioning report*), serta rencana pemeliharaan sistem. Dengan kelengkapan dokumen administratif dan teknis tersebut, sistem PLTS dapat dioperasikan secara aman, efisien, dan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.



Berikut link contoh-contoh dokumen administratif dan teknis:

<https://bit.ly/DokumenOperasionalPLTS>



2) Persiapan Peralatan APD

Keselamatan kerja merupakan prioritas utama dalam setiap tahapan pengoperasian PLTS. Selama proses ini, keselamatan kerja harus menjadi prioritas dengan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) seperti sarung tangan isolasi (*insulating gloves*), sepatu pelindung (*safety shoes*), helm pelindung (*safety helm*), dan kacamata keselamatan (*safety glasses*).

APD harus dalam kondisi baik, bersih, dan sesuai standar K3. Sebelum digunakan, teknisi wajib memeriksa kelengkapan serta fungsi setiap APD untuk memastikan perlindungan maksimal selama kegiatan pemeriksaan dan pengujian sistem dilakukan.



Gambar 1.3 Penggunaan Alat Pelindung Diri Pengoperasian PLTS
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



3) Persiapan Peralatan Kerja

Tahapan berikutnya ialah menyiapkan peralatan kerja dan instrumentasi yang akan digunakan selama proses pemeriksaan dan pengujian PLTS. Peralatan yang dimaksud antara lain perkakas tangan seperti obeng, tang, dan kunci pas, serta alat ukur seperti multimeter, *clamp meter*, dan *insulation tester*.

Setiap alat harus diperiksa fungsinya sebelum digunakan untuk memastikan keakuratan hasil pengukuran. Jika alat ukur telah melewati batas kalibrasi, perlu dilakukan kalibrasi ulang agar hasil pemeriksaan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.



Gambar 1.4 Perkakas Tangan dan Alat Ukur

Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)

4) Persiapan Komponen dan Sistem Koneksi

Sebelum sistem PLTS dijalankan, semua komponen perlu diperiksa secara menyeluruh dalam kondisi tanpa arus listrik. Pemeriksaan ini termasuk dalam kegiatan *pre-commissioning check*, yaitu pemeriksaan awal untuk memastikan bahwa semua komponen dalam kondisi baik, terpasang dengan benar, dan siap dialiri listrik.



Berikut langkah-langkah pemeriksaan.

a) Pemeriksaan Visual Komponen

Periksa kondisi fisik komponen utama seperti modul surya, dudukan panel, inverter, baterai, kabel, dan konektor. Pastikan tidak ada kerusakan, karat, atau sambungan longgar.

b) Pemeriksaan Sambungan dan Polaritas

Periksa kekencangan sambungan kabel serta pastikan polaritas positif dan negatif sudah sesuai. Koneksi ke baterai, inverter, dan *grounding* harus benar dan aman.

(1) Pengukuran Tegangan

Ukur tegangan modul surya (Voc) saat siang hari dan tegangan baterai untuk memastikan nilainya masih dalam batas normal.



Gambar 1.5 Pengukuran Tegangan Baterai

Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



(2) Pemeriksaan Proteksi

Pastikan MCB, sekering, dan ELCB terpasang dengan baik dan berfungsi secara mekanis. Sistem *wiring* juga harus rapi dan siap diuji saat PLTS dioperasikan.

(3) Pengecekan Akhir

Pastikan semua komponen terpasang rapi dan aman. Lakukan simulasi awal tanpa beban berat untuk memastikan sistem siap dioperasikan.

Aktivitas 1.1 Pemeriksaan Kesiapan Sistem dan Komponen PLTS

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memahami fungsi dan kesiapan awal komponen utama sistem PLTS serta merefleksikan pentingnya pemeriksaan sistem PLTS untuk menjamin performa dan keamanan instalasi.

Langkah-Langkah:

Ayo, pelajari kasus berikut.

Studi Kasus

Kelompokmu ditugaskan untuk memeriksa kesiapan sistem PLTS di sebuah bangunan sekolah sebelum sistem diaktifkan. Sistem terdiri komponen berikut.

1. 2 unit Panel Surya
2. *Solar Charge Controller* (SCC)
3. Baterai 12 V 100 Ah
4. Inverter
5. Kabel konektor dan MCB

Sistem belum menyala. Tugas kelompokmu ialah memastikan semua komponen dalam kondisi baik dan siap digunakan.

1. Lakukan pemeriksaan langsung pada setiap komponen yang disediakan.
2. Gunakan tabel berikut untuk mencatat hasil pemeriksaan.



Komponen	Apa yang Diperiksa	Temuan Kelompokmu
Panel Surya	Posisi, kotoran, retak	
Kabel dan Konektor	Koneksi kencang, tidak longgar	
Baterai	Kondisi fisik, tegangan terminal	
SCC	Indikator menyala atau <i>off</i>	
Inverter	Terhubung, tidak <i>error</i>	
MCB/Pemutus Arus	Posisi ON/OFF, koneksi kabel	

3. Diskusikan hasil pemeriksaan bersama kelompokmu. Kemudian, jawab pertanyaan berikut.
 - a. Mengapa pemeriksaan kesiapan setiap komponen PLTS penting dilakukan sebelum sistem diaktifkan?
 - b. Bagaimana langkah pemeriksaan yang benar untuk memastikan panel surya, baterai, dan inverter dalam kondisi siap digunakan?
 - c. Nilai disiplin dan tanggung jawab apa yang perlu kamu tunjukkan selama melakukan pemeriksaan sistem PLTS bersama tim?
 - d. Jika kamu menemukan indikator SCC tidak menyala, apa langkah konkret yang harus kamu lakukan untuk menelusuri penyebabnya?
 - e. Bagaimana kamu memastikan bahwa semua hasil pemeriksaan telah sesuai dengan prosedur keselamatan kerja?
 - f. Apa pelajaran paling penting yang kamu peroleh dari aktivitas pemeriksaan ini, terutama terkait ketelitian, tanggung jawab, dan kerja sama tim?

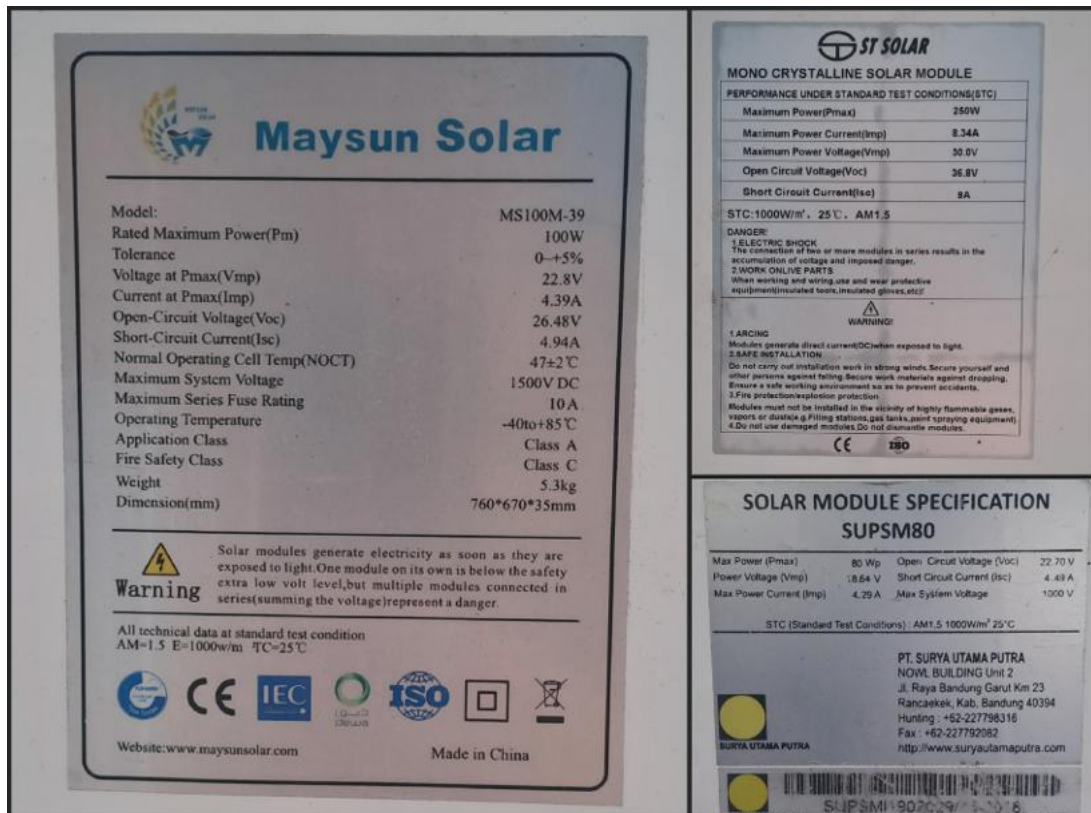
b. Pengaturan Parameter Sistem PLTS

Setelah semua komponen sistem PLTS dipastikan siap melalui proses pemeriksaan dan pengecekan awal, langkah selanjutnya ialah melakukan pengaturan parameter pada setiap komponen utama. Pengaturan ini bertujuan agar semua perangkat bekerja secara optimal, saling terintegrasi, serta menjamin efisiensi dan keamanan operasi PLTS. Setiap komponen mulai dari modul surya, SCC, inverter, baterai, hingga sistem proteksi memiliki parameter tersendiri yang harus disesuaikan dengan data teknis pabrikan dan rancangan sistem PLTS.



1) Modul Surya

Pada komponen modul surya, parameter utama yang perlu diperhatikan ialah tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), serta daya maksimum (P_{max}). Ketiga parameter ini menunjukkan kemampuan modul menghasilkan energi listrik pada kondisi tertentu. Pengaturan dilakukan dengan memastikan konfigurasi seri dan paralel modul sesuai dengan tegangan kerja sistem dan kapasitas inverter. Selain itu, orientasi dan sudut kemiringan modul juga merupakan bagian dari pengaturan sistem karena memengaruhi intensitas radiasi matahari yang diterima.



Gambar 1.6 Parameter Modul Surya
 Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Berikut ini link *datasheet* untuk modul surya:
<https://bit.ly/Datasheetmodulsurya>



2) *Solar Charge Controller (SCC)*

SCC berfungsi mengatur aliran daya dari modul surya ke baterai agar proses pengisian berlangsung aman dan efisien. Parameter yang harus diatur pada SCC meliputi tegangan pengisian (*charging voltage*), tegangan pemutusan (*cut-off voltage*), dan tegangan pemeliharaan (*float voltage*). Pengaturan ini harus sesuai dengan jenis baterai—misalnya baterai timbal-asam, gel, atau litium—karena setiap jenis memiliki batas tegangan yang berbeda. Selain itu, arus pengisian maksimum juga diatur agar tidak melebihi kapasitas baterai untuk menghindari kerusakan sel akibat suhu berlebih.



Gambar 1.7 Pengecekan Parameter SCC
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Tabel 1.1 Parameter SCC *Maximum Power Point Tracking* dengan Baterai

Tegangan (Voltage)	Tipe Baterai			Pengguna (User)
	Sealed	Gel	Flooded	
Tegangan Putus-Hubung Tegangan Lebih (<i>Over Voltage Disconnect Voltage</i>)	16,0 V	16,0 V	16,0 V	9~17 V
Tegangan maksimum di mana baterai otomatis terputus untuk mencegah <i>overcharge</i> .				
Tegangan Batas Pengisian (<i>Charging Limit Voltage</i>)	15,0 V	15,0 V	15,0 V	9~17 V
Tegangan maksimum yang diizinkan saat proses pengisian baterai.				
Tegangan Sambung-Ulang Tegangan Lebih (<i>Over Voltage Reconnect Voltage</i>)	15,0 V	15,0 V	15,0 V	9~17 V
Tegangan di mana pengisian dapat dilanjutkan kembali setelah kondisi <i>overvoltage</i> teratasi.				
Tegangan Pengisian Penyeimbang (<i>Equalize Charging Voltage</i>)	14,6 V	—	14,8 V	9~17 V
Tegangan khusus untuk menyamakan sel-sel baterai agar kapasitasnya seimbang.				
Tegangan Pengisian <i>Boost</i> (<i>Boost Charging Voltage</i>)	14,4 V	14,2 V	14,6 V	9~17 V
Pengisian cepat/pendorong untuk mengisi baterai hingga mendekati penuh ($\pm 80-90\%$).				
Tegangan Pengisian <i>Float</i> (<i>Float Charging Voltage</i>)	13,8 V	13,8 V	13,8 V	9~17 V
Maksud: Pengisian pemeliharaan untuk menjaga baterai tetap penuh dengan aman tanpa <i>overcharge</i> .				



Tegangan (Voltage)	Tipe Baterai			Pengguna (User)
	Sealed	Gel	Flooded	
Tegangan Sambung-Ulang Pengisian <i>Boost (Boost Reconnect Charging Voltage)</i> .	13,2 V	13,2 V	13,2 V	9~17 V
Maksud: Tegangan ketika mode pengisian cepat diaktifkan kembali setelah turun di bawah ambang tertentu.				
Tegangan Sambung-Ulang Tegangan Rendah (<i>Low Voltage Reconnect Voltage</i>)	12,6 V	12,6 V	12,6 V	9~17 V
Maksud: Tegangan ketika beban boleh disambungkan kembali setelah kondisi baterai cukup.				
Tegangan Peringatan Tegangan Rendah (Sambung-Ulang) (<i>Under Voltage Warning Reconnect Voltage</i>)	12,2 V	12,2 V	12,2 V	9~17 V
Maksud: Tegangan peringatan rendah yang memungkinkan sambungan ulang beban.				
Tegangan Peringatan Tegangan Rendah (<i>Under Voltage Warning Voltage</i>)	12,0 V	12,0 V	12,0 V	9~17 V
Maksud: Tegangan peringatan baterai lemah agar pengguna mengetahui kapasitas hampir habis.				
Tegangan Putus-Hubung Tegangan Rendah (<i>Low Voltage Disconnect Voltage</i>)	11,1 V	11,1 V	11,1 V	9~17 V
Maksud: Tegangan minimum di mana baterai otomatis memutus beban untuk mencegah kerusakan.				



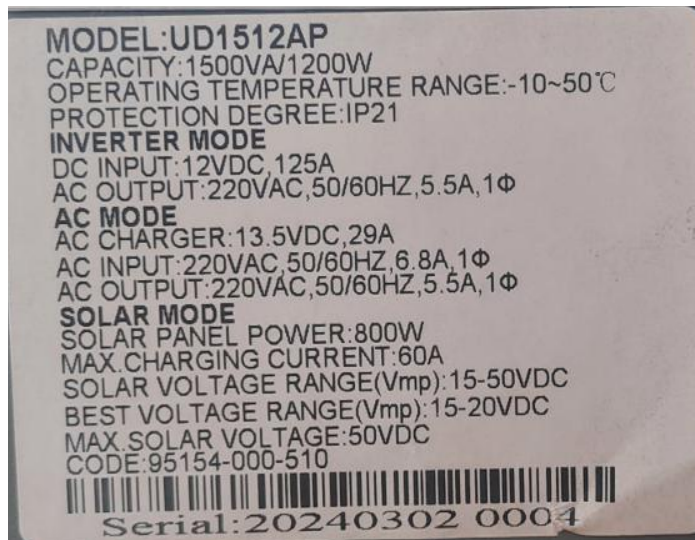
Tegangan (Voltage)	Tipe Baterai			Pengguna (User)
	Sealed	Gel	Flooded	
Tegangan Batas Pengosongan (<i>Discharging Limit Voltage</i>)	10,6 V	10,6 V	10,6 V	9~17 V
Maksud: Tegangan terendah yang diizinkan selama pengosongan baterai.				
Durasi Penyeimbangan (<i>Equalize Duration</i>)	120 menit	—	120 menit	0~180 menit
Lama waktu pengisian penyeimbang untuk menyamakan semua sel baterai.				
Durasi <i>Boost</i> (<i>Boost Duration</i>)	120 menit	120 menit	120 menit	10~180 menit
Lama waktu pengisian cepat untuk mengisi baterai hingga mendekati penuh.				

Sumber: *Datasheet SCC MPPT Epever*

3) Inverter

Inverter berfungsi mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Parameter penting yang harus diatur pada inverter meliputi tegangan keluaran (biasanya 220 VAC untuk sistem rumah tangga), frekuensi keluaran (50 Hz), serta mode operasi (*off-grid*, *hybrid*, atau *grid-tied*). Pengaturan ini memastikan bahwa daya listrik dari PLTS dapat digunakan langsung oleh beban atau diintegrasikan dengan jaringan PLN. Selain itu, inverter juga memiliki sistem proteksi internal seperti *overvoltage*, *overcurrent*, dan *overtemperature protection* yang harus diaktifkan sesuai rekomendasi pabrikan.





Gambar 1.8 Parameter Inverter
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Berikut link untuk *datasheet* solar inverter:
<https://bit.ly/Datasheetsolarinverter>

4) Baterai

Pada komponen baterai, parameter utama yang perlu diperhatikan ialah kapasitas penyimpanan (Ah), tegangan nominal, serta batas pengisian dan pengosongan. Tegangan pengisian maksimum dan tegangan pemutusan diatur melalui SCC atau melalui inverter agar baterai tidak mengalami *overcharge* maupun *overdischarge*. Selain itu, suhu kerja baterai perlu dipantau karena kinerja penyimpanan energi sangat dipengaruhi oleh kondisi temperatur lingkungan. Pemeriksaan nilai *state of charge* (SoC) juga dilakukan untuk memastikan baterai beroperasi dalam rentang kapasitas yang aman dan efisien.





Gambar 1.9 Parameter Beberapa Baterai
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Berikut link untuk *datasheet* baterai:
<https://bit.ly/Datasheetbaterai>

5) Sistem Proteksi

Sistem proteksi berfungsi menjaga keselamatan operator dan mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan listrik. Parameter yang diatur mencakup nilai arus nominal MCB atau sekering, sensitivitas ELCB, serta urutan sistem *grounding*. Semua perangkat proteksi harus disesuaikan dengan arus dan tegangan kerja sistem PLTS agar dapat memutus arus secara cepat saat terjadi gangguan. Selain itu, jalur kabel harus diberi label polaritas dan arah aliran daya agar mudah dilakukan inspeksi serta perawatan di kemudian hari.





Gambar 1.10 Komponen Sistem Proteksi
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Berikut link untuk *datasheet* komponen *circuit breaker*:
<https://bit.ly/Datasheetcircuitbreaker>

Cara Mengatur Parameter Sistem PLTS

Cara melakukan pengaturan parameter seperti berikut.

- a) Baca buku panduan dari alat yang digunakan. Setiap merek dapat memiliki cara yang berbeda.
- b) Nyalakan alat dan masuk ke menu pengaturan.
- c) Pilih parameter yang ingin diubah seperti tegangan *charging*, LVD, atau jenis baterai.
- d) Gunakan tombol atau layar sentuh untuk mengubah nilai.
- e) Simpan pengaturan dan lakukan pengecekan ulang.
- f) Pada beberapa perangkat modern, pengaturan dapat dilakukan melalui aplikasi di HP atau laptop dengan koneksi Bluetooth atau Wi-Fi.



Aktivitas 1.2 Pengaturan Parameter Sistem PLTS

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu mengatur parameter sistem PLTS berdasarkan data spesifikasi komponen, serta merefleksikan hubungan antara pengaturan parameter dengan efisiensi dan keamanan sistem secara keseluruhan.

Langkah-Langkah:

1. Pilih salah satu *datasheet* SCC dari link berikut ini.



https://bit.ly/Datasheet_SCC

2. Tentukan nilai parameter berikut berdasarkan *datasheet* SCC dan spesifikasi baterai AGM VRLA:
 - a. Tegangan pengisian (*charging voltage*): _____ V
 - b. Tegangan *float*: _____ V
 - c. Tipe baterai: _____
3. Jawab pertanyaan berdasarkan pemahaman dan pengalamanmu saat melakukan pengaturan.
 - a. Mengapa *charging voltage* tidak boleh terlalu tinggi atau terlalu rendah untuk baterai AGM VRLA?
 - b. Apa fungsi tegangan *float*? Apa yang akan terjadi jika nilainya tidak sesuai standar?
 - c. Mengapa penting memilih tipe baterai yang tepat dalam pengaturan SCC? Jelaskan kaitannya dengan otomatisasi parameter.
 - d. Apa tantangan terbesar yang kamu temui saat membaca *datasheet* dan mengatur parameter? Bagaimana kamu mengatasinya?
 - e. Bagaimana cara memastikan nilai parameter pada SCC sudah sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan?
 - f. Jika kamu bertugas sebagai teknisi, parameter mana yang paling awal kamu pastikan sudah benar? Mengapa itu penting?



2. Prosedur Mengaktifkan dan Menonaktifkan Sistem PLTS

Pengoperasian sistem PLTS tidak cukup hanya dengan menekan tombol “on” atau “off”. Terdapat urutan dan prosedur teknis yang harus dilakukan secara sistematis agar sistem berfungsi optimal dan aman bagi pengguna maupun peralatan. Pernahkah kamu berpikir, apa yang dapat terjadi jika inverter diaktifkan sebelum baterai atau modul surya terpasang dengan benar? Atau bagaimana cara mematikan sistem tanpa merusak komponen? Prosedur mengaktifkan dan menonaktifkan sistem PLTS harus mengacu pada standar keselamatan internasional. Ada beberapa standar seperti IEC 60364-7-712, yang menetapkan ketentuan pemutusan dan pengamanan rangkaian PV. Ada juga standar seperti IEC 62109-1 dan IEC 62109-2, yang secara khusus membahas keamanan perangkat konversi daya seperti inverter yang digunakan dalam sistem PLTS. Dengan memahami prosedur ini, kamu akan mampu menjalankan sistem PLTS secara profesional, mencegah potensi kerusakan, dan menjamin keselamatan kerja di lingkungan nyata.

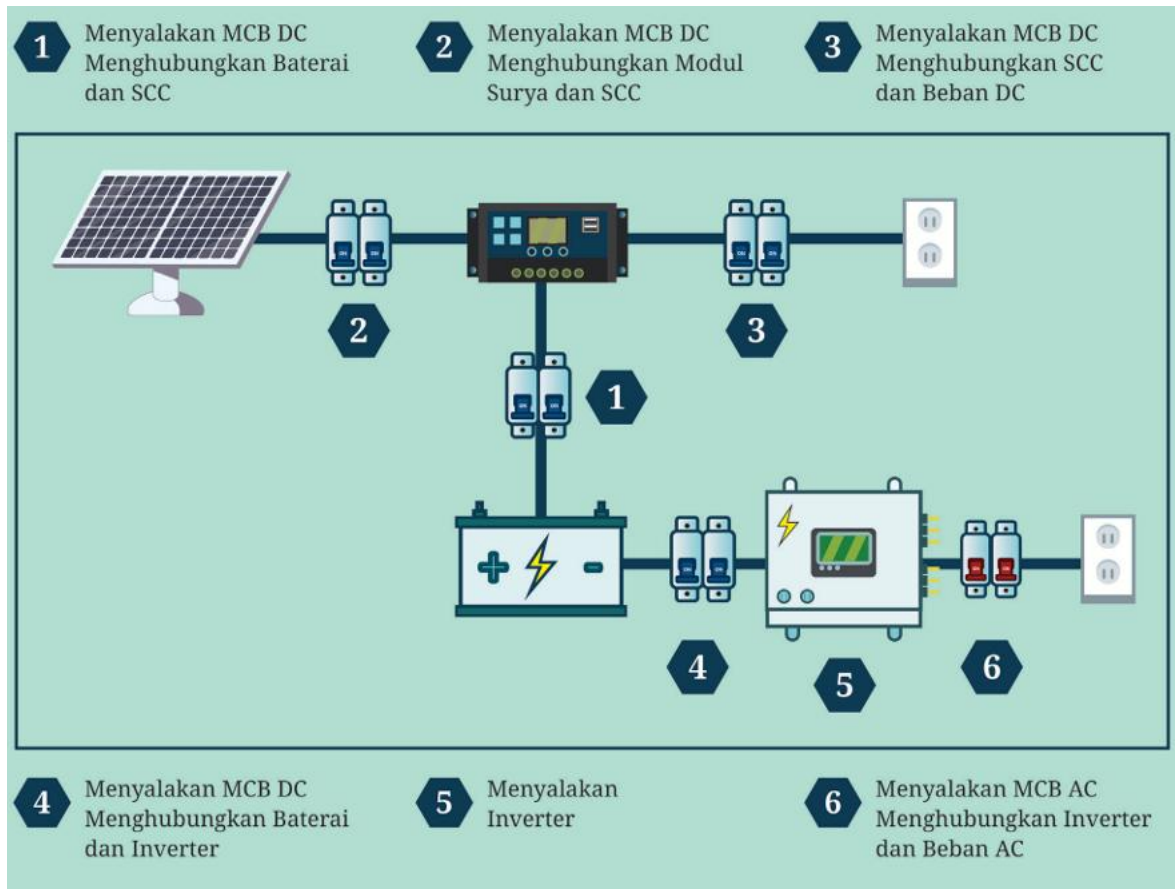


Gambar 1.11 Menyalakan MCB di Panel Distribusi
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



a. Prosedur Mengaktifkan Sistem PLTS

Setelah proses instalasi dan pengujian selesai, sistem PLTS tidak dapat langsung dinyalakan secara sembarangan. Sama seperti saat menyalakan komputer, ada urutan yang harus diikuti agar sistem aman dan komponen tidak rusak. Jika prosedur diabaikan, dapat terjadi kerusakan inverter, korsleting, atau bahkan bahaya bagi pengguna.



Gambar 1.12 Prosedur Mengaktifkan Sistem PLTS

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Prosedur mengaktifkan sistem PLTS dilakukan secara bertahap untuk memastikan keamanan dan kinerja optimal. Adapun langkah-langkahnya seperti berikut.

- 1) Nyalakan MCB DC yang menghubungkan baterai dan SCC agar SCC mendapatkan daya awal.
- 2) Nyalakan MCB DC antara modul surya dan SCC untuk memungkinkan pengisian daya dari panel surya.
- 3) Aktifkan MCB DC yang menghubungkan SCC dan beban DC agar beban dapat menerima energi langsung.



- 4) Nyalakan MCB DC antara baterai dan inverter sebagai sumber daya untuk inverter.
- 5) Nyalakan inverter untuk mengubah arus DC menjadi AC.
- 6) Aktifkan MCB AC yang menghubungkan inverter dan beban AC agar beban rumah tangga atau industri yang menggunakan arus bolak-balik dapat digunakan.

Setiap langkah harus dilakukan sesuai urutan untuk mencegah kerusakan komponen dan memastikan sistem berjalan stabil.



PERHATIKAN KESELAMATAN

- **Jangan menyentuh konektor saat sistem aktif.**
- **Gunakan APD.**
- **Hindari area lembap atau basah saat bekerja.**
- **Sediakan APAR di sekitar instalasi.**

Aktivitas 1.3 Prosedur Mengaktifkan Sistem PLTS

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

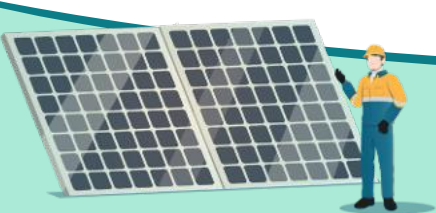
Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan urutan prosedur mengaktifkan sistem PLTS secara benar berdasarkan masalah operasional yang muncul, serta merefleksikan pentingnya prosedur yang sistematis untuk keamanan dan efisiensi sistem.

Langkah-Langkah:

Ayo, simak kasus berikut.

Studi Kasus

Sebuah sekolah akan mulai mengoperasikan sistem PLTS baru. Namun, saat dihidupkan, inverter tidak menyala dan indikator SCC tidak menunjukkan pengisian dari panel. Belum diketahui prosedur mana yang telah atau belum dilakukan.



Bekerjalah dalam kelompokmu. Diskusikan dan jawab pertanyaan di bawah ini.

1. Mengapa penting memahami dan mengikuti urutan prosedur pengaktifan sistem PLTS sebelum sistem dioperasikan, terutama untuk mencegah gangguan seperti inverter tidak menyala?
2. Bagaimana urutan langkah pengaktifan sistem PLTS yang benar agar SCC dapat mendeteksi pengisian dari panel surya dan inverter dapat berfungsi normal?
3. Nilai tanggung jawab dan kehati-hatian apa yang perlu diterapkan oleh teknisi saat menghadapi kondisi seperti pada kasus inverter tidak menyala dan indikator SCC tidak aktif?
4. Berdasarkan kasus tersebut, langkah pemeriksaan teknis apa yang dapat kamu lakukan untuk mengetahui penyebab inverter tidak menyala dan SCC tidak menunjukkan pengisian?
5. Setelah menemukan penyebab masalah, bagaimana kamu menyusun kembali prosedur pengaktifan sistem PLTS yang benar agar kejadian serupa tidak terulang?
6. Apa pelajaran penting yang kamu peroleh dari kasus ini tentang pentingnya mengikuti prosedur pengaktifan secara sistematis untuk menjaga keamanan dan efisiensi sistem PLTS?

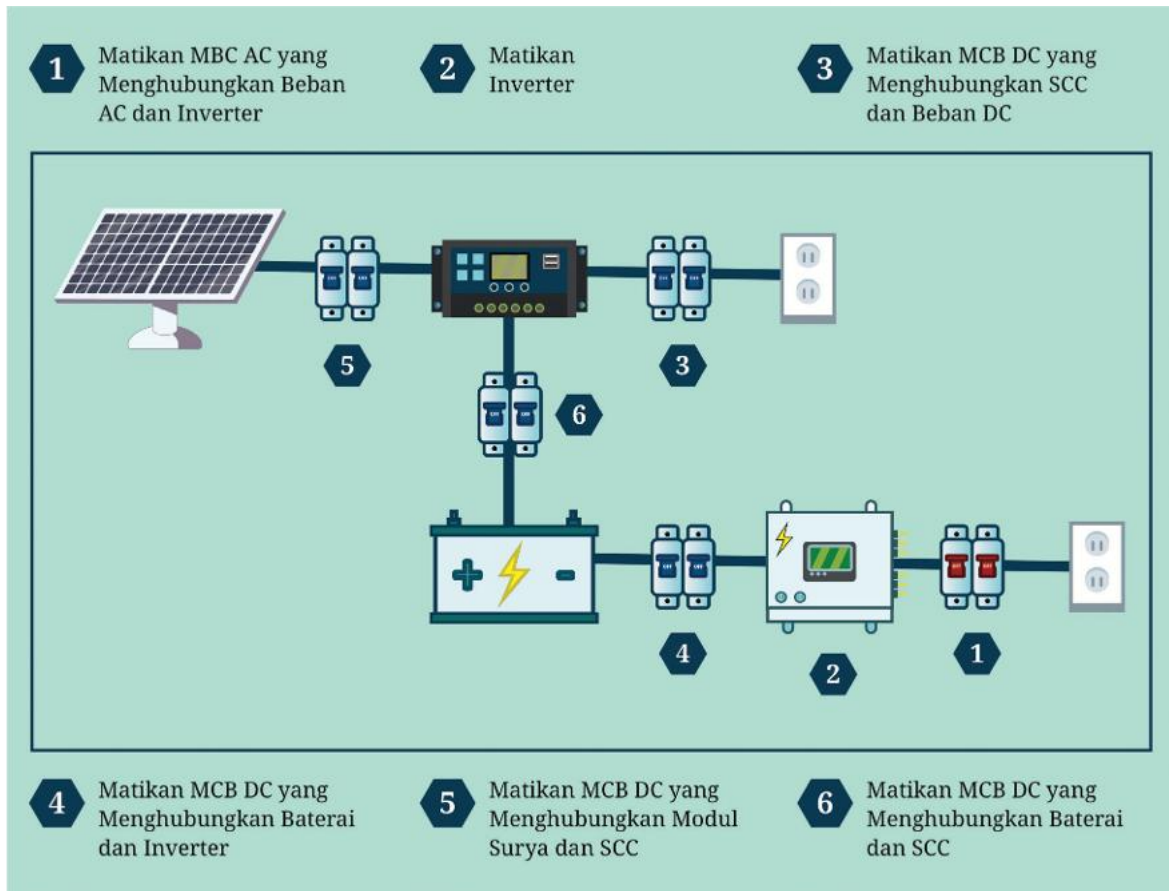
b. Prosedur Menonaktifkan Sistem PLTS

Menonaktifkan sistem PLTS harus dilakukan dengan urutan yang benar agar aman dan tidak merusak peralatan. Tidak boleh asal cabut kabel karena dapat menyebabkan percikan listrik, korsleting, atau kerusakan alat.

Ada beberapa kondisi di mana sistem PLTS harus dinonaktifkan. Kondisi tersebut seperti berikut.

- 1) Saat perawatan atau perbaikan sistem.
- 2) Jika ada gangguan atau kerusakan komponen.
- 3) Ketika akan *upgrade* sistem.
- 4) Dalam kondisi darurat (banjir, petir, kebakaran).





Gambar 1.13 Prosedur Menonaktifkan Sistem PLTS

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Prosedur menonaktifkan sistem PLTS harus dilakukan secara bertahap untuk mencegah kerusakan dan bahaya listrik. Berikut ini langkah-langkahnya secara berurutan. Urutan ini memastikan semua aliran listrik dihentikan dengan aman.

- 1) Matikan MCB AC yang menghubungkan inverter dan beban AC.
- 2) Matikan inverter.
- 3) Matikan MCB DC yang menghubungkan SCC dengan beban DC.
- 4) Matikan MCB DC antara baterai dan inverter.
- 5) Matikan MCB DC dari modul surya ke SCC.
- 6) Matikan MCB DC yang menghubungkan baterai ke SCC.

Aktivitas 1.4 Prosedur Menonaktifkan Sistem PLTS

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan prosedur menonaktifkan sistem PLTS secara tepat dalam situasi darurat atau pemeliharaan, serta merefleksikan risiko apabila prosedur dilakukan tidak sesuai urutan.

Langkah-Langkah:

Ayo, bacalah kasus di bawah ini.

Studi Kasus

Saat hujan deras dengan kilat, operator mematikan sistem PLTS dengan langsung mencabut kabel baterai. Akibatnya, inverter rusak dan indikator SCC mati total.

Berdasarkan kasus di atas, jawablah soal-soal berikut.

1. Apa tujuan utama dari prosedur penonaktifan sistem PLTS? Mengapa urutan langkahnya harus diperhatikan terutama pada kondisi cuaca ekstrem?
2. Bagaimana cara menonaktifkan sistem PLTS dengan urutan yang benar agar tidak menimbulkan lonjakan arus atau kerusakan pada inverter dan SCC?
3. Sikap apa yang seharusnya ditunjukkan seorang operator ketika menghadapi kondisi darurat seperti hujan dan petir agar tetap menjaga keselamatan kerja?
4. Jika kamu berada dalam situasi yang sama, tindakan apa yang sebaiknya dilakukan sebelum memutuskan koneksi baterai dari sistem PLTS? Jelaskan alasannya.
5. Buatlah langkah-langkah menonaktifkan sistem PLTS yang lebih aman dan efisien berdasarkan pengalaman kasus di atas. Jelaskan alasan teknis di balik urutan tersebut.
6. Apa pelajaran yang kamu peroleh dari kasus ini tentang hubungan antara kedisiplinan mengikuti prosedur dan upaya menjaga keandalan serta keselamatan sistem PLTS?



3. Pemantauan Pengoperasian Rutin Sistem PLTS

Sebelum kamu mengoperasikan sistem PLTS setiap hari, penting untuk memahami prosedur rutin yang aman dan sesuai standar. Pengoperasian rutin ini tidak dapat asal-asalan karena menyangkut keselamatan, efisiensi, dan umur peralatan. Kamu perlu mengikuti pedoman dari standar internasional IEC 61724 tentang pemantauan kinerja sistem fotovoltaik, serta SNI IEC 60364-7-712 yang mengatur instalasi listrik tenaga surya di Indonesia. Dengan mengikuti standar ini, kamu dapat memastikan bahwa sistem berjalan stabil dan tidak membahayakan pengguna. Sebelum belajar lebih jauh, pikirkan: Apa saja yang perlu kamu periksa setiap kali sistem PLTS akan dijalankan? Mengapa kamu harus mengikuti standar seperti IEC dan SNI?

Pemantauan pengoperasian sistem PLTS dilakukan untuk memastikan semua komponen bekerja dengan baik dan sesuai perencanaan. Pemantauan ini penting agar sistem dapat beroperasi dengan aman, efisien, dan tidak mengalami kerusakan sejak awal. Beberapa aspek utama yang harus diperiksa meliputi hal-hal berikut.

- 1) Tegangan dan Arus Panel Surya
Pastikan panel menghasilkan tegangan dan arus sesuai spesifikasi, misalnya 17–20 V untuk panel 100 Wp saat matahari penuh. Tegangan dapat sedikit turun jika cuaca mendung, tetapi tetap dalam batas normal.
- 2) Status *Solar Charge Controller*
Periksa apakah SCC sudah aktif dan menunjukkan mode pengisian seperti *bulk*, *absorption*, atau *float*. Catat jika ada indikator *error* sebagai tanda adanya gangguan.
- 3) Level Pengisian Baterai
Amati kapasitas pengisian baterai melalui indikator pada SCC atau alat monitoring lainnya. Hindari kondisi baterai kosong atau terlalu penuh. Idealnya kapasitas awal berada di kisaran 50–80%.
- 4) Kinerja Inverter
Pastikan inverter aktif dan mengeluarkan tegangan AC yang stabil, misalnya 220 V. Perhatikan adanya bunyi tidak normal, panas berlebih, atau lampu indikator kesalahan.
- 5) Jumlah Beban yang Terpasang
Cek beban yang disambungkan tidak melebihi kapasitas inverter atau baterai. Beban berlebih dapat menyebabkan sistem mati mendadak.



6) Pencatatan Data Awal (Log Aktivasi)

Catat semua data penting seperti tegangan, arus, status SCC, kondisi baterai, dan *output* inverter. Pencatatan ini dapat dilakukan secara manual di buku log atau menggunakan sistem digital.



Gambar 1.14 Pemantauan Pengoperasian Sistem PLTS

Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)

Pemantauan pengoperasian sistem PLTS bersifat wajib saat sistem PLTS diaktifkan untuk memastikan tidak ada kesalahan instalasi dan semua fungsi berjalan normal. Jika ditemukan kejanggalan, segera hentikan sistem dan lakukan pengecekan ulang sebelum pengoperasian lebih lanjut.



Aktivitas 1.5 Pemantauan Pengoperasian Rutin Sistem PLTS

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memahami indikator penting dalam pemantauan sistem PLTS serta mengaplikasikan prosedur pemantauan rutin secara tepat untuk memastikan sistem berjalan normal dan efisien.

Langkah-Langkah:

Ayo, pelajari kasus berikut.

Studi Kasus

Kamu diberi tugas sebagai teknisi pemula untuk memantau sistem PLTS sekolah setiap hari. Suatu pagi, kamu melihat indikator pengisian (*charging*) di SCC tidak menyala, sementara indikator beban menyala normal. Panel surya tampak bersih dan cuaca cerah.

Diskusikan soal-soal berikut, kemudian presentasikan hasilnya.

1. Apa fungsi utama kegiatan pemantauan sistem PLTS? Bagaimana kegiatan ini berperan dalam menjaga efisiensi energi serta umur peralatan?
2. Jika indikator pengisian tidak menyala, informasi atau data apa yang perlu kamu kumpulkan sebelum menentukan penyebab masalah?
3. Bagaimana sikap tanggung jawab dan kejujuran berperan penting dalam pelaporan hasil pemantauan sistem PLTS kepada atasan atau tim?
4. Sebutkan langkah-langkah pemeriksaan lapangan yang dapat kamu lakukan untuk memastikan sumber masalah berasal dari panel surya, SCC, atau koneksi sistem.
5. Usulkan satu metode sederhana yang dapat digunakan untuk membuat catatan pemantauan harian sistem PLTS agar teknisi berikutnya dapat dengan mudah melanjutkan pemeriksaan.
6. Apa manfaat jangka panjang dari penerapan pemantauan rutin terhadap keandalan sistem PLTS dan sikap kerja seorang teknisi energi?



Aktivitas 1.6 Evaluasi Pengoperasian Sistem PLTS

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu mengevaluasi pemahaman, keterampilan teknis, dan nilai-nilai profesional yang diperoleh selama mempelajari pengoperasian sistem PLTS.

Langkah-Langkah:

1. Bacalah kembali semua aktivitas sebelumnya (1.1–1.5) tentang pemeriksaan, pengaturan, aktivasi, penonaktifan, dan pemantauan sistem PLTS.
2. Nilai sejauh mana kamu telah memahami konsep, menerapkan langkah teknis, dan menunjukkan sikap kerja profesional.
3. Jawablah soal-soal berikut.
 - a. Jelaskan secara singkat bagaimana hubungan antara pemeriksaan, pengaturan, aktivasi, dan pemantauan PLTS dalam membentuk sistem yang beroperasi secara efisien dan aman.
 - b. Berdasarkan pengalamanmu di aktivitas sebelumnya, bagaimana cara memastikan sistem PLTS tetap berfungsi normal meskipun terjadi gangguan kecil seperti indikator mati atau koneksi longgar?
 - c. Nilai atau sikap apa yang paling penting dimiliki seorang teknisi energi terbarukan dalam menjaga keamanan dan tanggung jawab kerja? Jelaskan penerapannya.
 - d. Buatlah contoh rencana kerja sederhana yang berisi langkah-langkah pengawasan dan pemeliharaan rutin sistem PLTS selama satu minggu.
 - e. Usulkan satu ide atau inovasi yang dapat kamu terapkan untuk meningkatkan efisiensi kerja atau keselamatan sistem PLTS di lingkungan sekolah atau masyarakat.
 - f. Dari semua proses pembelajaran pengoperasian PLTS, bagian mana yang paling menantang bagimu dan bagaimana kamu mengatasinya?



“Mengoperasikan PLTS bukan sekadar menyalakan sistem, tetapi memastikan setiap sinar matahari diubah menjadi daya yang bermanfaat secara aman dan efisien.”

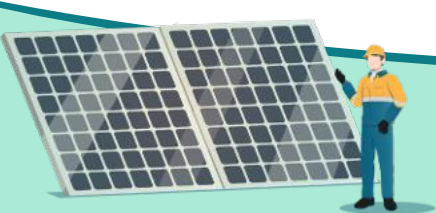


B. Pemeliharaan PLTS

Pemeliharaan merupakan bagian penting dari siklus kerja sistem PLTS agar tetap beroperasi secara optimal dan efisien. Sistem ini, meskipun dirancang untuk bekerja secara otomatis dan minim perawatan, tetap membutuhkan perhatian rutin untuk memastikan tidak terjadi gangguan yang dapat memengaruhi kinerjanya. Beberapa faktor lingkungan seperti debu, hujan, suhu tinggi, serta kelembapan dapat memengaruhi kondisi fisik dan elektrik komponen. Oleh karena itu, pemeliharaan menjadi langkah preventif untuk menghindari kerusakan dini dan menjaga kontinuitas pasokan energi dari sumber terbarukan.



Gambar 1.15 Pemeliharaan Sistem PLTS
Sumber: Kemendikdasmen (2025)



1. Prosedur Pemeliharaan PLTS

Langkah-langkah pemeliharaan dilakukan secara sistematis dan bertahap sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan. Aktivitas ini mencakup pemeriksaan visual modul surya dan semua instalasi, pembersihan permukaan panel dari debu atau kotoran, pengencangan sambungan kabel, pengecekan performa inverter dan baterai, serta pencatatan hasil pemantauan sistem. Untuk menjamin keakuratan dan keselamatan kerja, kegiatan pemeliharaan sebaiknya dilakukan mengacu pada standar internasional seperti IEC 62446 terkait inspeksi dan pengujian sistem fotovoltaik serta IEC 61724 tentang pemantauan kinerja. Selain itu, standar nasional seperti SNI 04-6507-2000 dan SNI IEC 61730 memberikan panduan teknis keselamatan pada sistem dan modul surya yang digunakan.

a. Penyusunan Jadwal Pemeliharaan Berkala

Agar kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara konsisten, perlu disusun jadwal pemeliharaan berkala sesuai kondisi lingkungan dan intensitas penggunaan sistem. Jadwal ini mencakup frekuensi inspeksi, waktu pembersihan modul, pengecekan komponen kelistrikan, serta evaluasi sistem secara menyeluruh. Sebagai contoh, pembersihan panel surya dapat dilakukan setiap satu hingga tiga bulan bergantung pada tingkat polusi atau debu di lokasi pemasangan. Dengan memiliki jadwal yang terencana, pelaksanaan pemeliharaan menjadi lebih teratur, efisien, dan mencegah terjadinya kerusakan besar yang dapat berdampak pada kinerja dan keselamatan instalasi PLTS secara keseluruhan.

Tabel 1.2 Komponen-Komponen dan Jenis Pemeliharaannya

Komponen	Kegiatan Pemeliharaan	Frekuensi
Panel Surya	Bersihkan permukaan dari debu/kotoran.	1 bulan sekali
Konektor MC4 dan Kabel	Periksa kekencangan dan kondisi fisik.	3 bulan sekali
SCC & Inverter	Bersihkan dari debu, cek indikator/ <i>error</i> .	3–6 bulan sekali
Baterai	Cek tegangan, kebocoran, level elektrolit.	1 – 3 bulan
Rangka/Dudukan Panel	Periksa baut dan kekokohan struktur.	6 bulan – 1 tahun
Sistem <i>Grounding</i>	Cek sambungan <i>grounding</i> dan tahanan tanah.	6 bulan – 1 tahun



Berikut langkah-langkah menyusun jadwal pemeliharaan.

- 1) Melakukan Identifikasi Komponen
Buat daftar rinci semua perangkat dalam sistem PLTS, seperti modul surya, SCC, inverter, baterai, sistem proteksi, dan instalasi kabel.
- 2) Menentukan Interval Pemeliharaan
Tentukan frekuensi pemeliharaan berdasarkan rekomendasi pabrikan, tingkat paparan lingkungan (debu, hujan, kelembapan), serta pengalaman penggunaan sebelumnya.
- 3) Menyusun Format Jadwal
Rancang jadwal pemeliharaan dalam bentuk tabel terstruktur yang mencakup periode mingguan, bulanan, atau triwulan, baik dalam versi digital (Excel, Google Sheets) maupun cetak.
- 4) Menetapkan Penanggung Jawab
Tentukan personel atau tim yang diberi wewenang untuk melaksanakan kegiatan pemeliharaan pada setiap jenis komponen.
- 5) Menyiapkan Formulir Catatan
Sediakan kolom pencatatan yang mencakup tanggal pelaksanaan, kondisi temuan, tindakan yang dilakukan, serta identitas pelaksana untuk keperluan dokumentasi dan evaluasi.

Tabel 1.3 Contoh Jadwal Pemeliharaan

Tanggal	Komponen	Kegiatan	Hasil	Petugas
2 Jan 2025	Panel Surya	Bersihkan permukaan.	Baik	Asep
2 Jan 2025	Inverter	Cek indikator dan fan.	Normal	Dwi
2 Jan 2025	Baterai	Ukur tegangan.	12,8 V	Dwi
2 Jan 2025	Konektor MC4	Periksa kekencangan.	OK	Asep

Jadwal pemeliharaan bukan sekadar kewajiban administratif, melainkan langkah nyata untuk menjaga keandalan dan efisiensi operasional sistem PLTS. Dengan perencanaan yang teratur dan pelaksanaan yang konsisten, potensi gangguan dapat dicegah lebih awal, biaya perbaikan dapat ditekan, dan suplai energi dari matahari tetap stabil tanpa hambatan.



Aktivitas 1.7 Penyusunan Jadwal Pemeliharaan Berkala Sistem PLTS

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menyusun jadwal pemeliharaan berkala untuk sistem PLTS berdasarkan karakteristik komponen dan refleksi pentingnya pencegahan gangguan sistem melalui pemeliharaan yang terencana.

Langkah-Langkah:

Baca informasi ringkas tentang komponen PLTS dan potensi gangguan yang umum terjadi. Kemudian, jawablah soal-soal berikut.

1. Apa tujuan utama dari pemeliharaan berkala pada sistem PLTS? Bagaimana kegiatan ini berpengaruh terhadap efisiensi dan umur peralatan?
2. Berdasarkan karakteristik komponen PLTS (panel surya, baterai, inverter, SCC, kabel, dan MCB), bagaimana cara menentukan jenis perawatan dan interval waktu yang tepat untuk setiap komponen tersebut?
3. Mengapa disiplin, tanggung jawab, dan kerja sama penting diterapkan dalam menyusun serta menjalankan jadwal pemeliharaan sistem PLTS secara berkelanjutan?
4. Buatlah contoh tabel jadwal pemeliharaan berkala untuk sistem PLTS sekolahmu yang mencakup komponen, jenis pemeriksaan, frekuensi, dan penanggung jawab kegiatan.
5. Berdasarkan jadwal yang telah kamu susun, jelaskan langkah-langkah yang perlu dilakukan jika ditemukan salah satu komponen tidak berfungsi normal saat pemeliharaan.
6. Bagaimana perasaan dan pemahamanmu setelah menyusun jadwal pemeliharaan ini? Apa manfaat kegiatan ini terhadap kesiapanmu menjadi teknisi energi yang teliti dan bertanggung jawab?

b. Langkah-Langkah Standar Pemeliharaan Harian, Bulanan, dan Tahunan

Merawat sistem PLTS tidak cukup hanya dilakukan saat terjadi gangguan. Agar kinerja sistem tetap efisien dan aman, pemeliharaan harus dirancang berdasarkan interval waktu tertentu yang disesuaikan dengan tingkat kebutuhan serta kompleksitas



pemeriksaan. Setiap periode memiliki fokus kegiatan yang berbeda, mulai dari pengamatan sederhana hingga pemeriksaan mendalam. Salah satu aspek penting yang sering diabaikan ialah kondisi lingkungan sekitar, seperti keberadaan bayangan pohon, bangunan, atau benda lain yang dapat menghalangi sinar matahari ke panel surya. Pemantauan dan pemangkasan pohon secara berkala perlu dilakukan agar tidak menurunkan efisiensi sistem dan memastikan PLTS beroperasi secara optimal sepanjang waktu.

1) Pemeliharaan Harian

Hal ini dilakukan untuk memastikan sistem berjalan normal setiap hari. Kegiatan ini meliputi pengecekan indikator pada SCC dan inverter, pemantauan *output* harian, serta memastikan tidak ada gangguan fisik pada kabel, konektor, atau boks kontrol. Selain itu, kondisi cuaca juga dicatat untuk membantu analisis performa sistem. Pemeriksaan visual terhadap bayangan di sekitar panel, seperti dari pohon, antenna, atau bangunan, juga perlu dilakukan, karena bayangan yang berubah seiring waktu dapat menurunkan efisiensi penyerapan energi surya dan memengaruhi kestabilan daya keluaran sistem.

2) Pemeliharaan Bulanan

Pemeliharaan bulanan berfokus pada kebersihan dan keamanan sambungan serta kesehatan komponen utama. Kegiatan yang dilakukan antara lain membersihkan permukaan modul, mengecek konektor MC4, mengukur tegangan baterai (jika ada), memeriksa kipas pendingin, dan memastikan tidak ada kerusakan fisik seperti karat atau retakan.

3) Pemeliharaan Tahunan

Pemeliharaan tahunan mencakup pemeriksaan menyeluruh untuk mengevaluasi efisiensi dan daya tahan sistem jangka panjang. Langkah-langkahnya termasuk pengujian performa total sistem, kalibrasi alat ukur, pengukuran tahanan *grounding*, pengecekan struktur penopang, inspeksi mendalam kabel dan konektor, serta pembaruan sistem perangkat lunak jika tersedia. Semua hasilnya dicatat sebagai bagian dari dokumentasi teknis tahunan.

Tabel 1.4 Perbandingan Frekuensi Pemeliharaan

Harian	Pemantauan Visual dan <i>Output</i> Energi	Operator/Teknisi Lapangan
Bulanan	Kebersihan kabel dan baterai	Teknisi pemeliharaan
Tahunan	Evaluasi performa dan penggantian komponen	Teknisi senior/profesional



Merawat sistem PLTS itu bukan soal “kalau sempat”, tetapi wajib dilakukan dengan jadwal dan langkah yang jelas. Mulai dari kegiatan harian ringan sampai tahunan yang menyeluruh, semua punya peran penting dalam menjaga efisiensi dan keselamatan sistem.

Aktivitas 1.8 Langkah-Langkah Standar Pemeliharaan Sistem PLTS

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memahami dan mengaplikasikan langkah-langkah standar pemeliharaan sistem PLTS sesuai periode waktu (harian, bulanan, dan tahunan) dan menyesuaikannya dengan kondisi lapangan.

Langkah-Langkah:

Bacalah deskripsi tugas teknisi pemeliharaan PLTS yang berbeda-beda tiap periode (harian, bulanan, dan tahunan). Kemudian, jawablah soal-soal berikut.

1. Apa perbedaan utama antara pemeliharaan harian, bulanan, dan tahunan pada sistem PLTS? Bagaimana tiap periode pemeliharaan berkontribusi terhadap keandalan sistem secara keseluruhan?
2. Berdasarkan karakteristik sistem PLTS di lingkungan sekolah, bagaimana kamu menentukan tindakan teknis yang sesuai untuk setiap periode pemeliharaan tersebut? Berikan contoh nyata.
3. Mengapa sikap disiplin, ketelitian, dan kerja sama tim sangat penting dalam menjalankan SOP pemeliharaan sistem PLTS yang berkelanjutan? Jelaskan kaitannya dengan keselamatan kerja dan tanggung jawab profesional.
4. Buatlah tabel SOP pemeliharaan sistem PLTS yang memuat periode (harian, bulanan, tahunan), jenis kegiatan teknis, dan tujuan kegiatan.
5. Jika terjadi kondisi cuaca ekstrem, komponen rusak, atau akses lokasi sulit, bagaimana kamu akan menyesuaikan SOP pemeliharaan tanpa mengurangi keselamatan dan kualitas hasil kerja?
6. Dari pengalaman belajar dan diskusi dengan rekan, apa yang kamu pelajari tentang pentingnya perencanaan pemeliharaan yang sistematis dalam menjaga keberlanjutan sistem PLTS?



2. Perawatan dan Pencegahan Kerusakan PLTS

Setelah memahami jadwal dan prosedur pemeliharaan rutin, kini kamu mempelajari aspek teknis yang lebih mendalam, yaitu pemeliharaan komponen utama sistem PLTS. Penjadwalan tidak akan efektif tanpa pemahaman tentang apa saja yang harus dirawat dan bagaimana cara merawatnya dengan benar. Setiap bagian, mulai dari panel surya, inverter, hingga baterai, memiliki karakteristik unik dan perlakuan pemeliharaan yang berbeda sesuai fungsinya dalam sistem. Jika salah satu komponen mengalami gangguan, hal tersebut dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Oleh karena itu, penting bagi kita untuk mengetahui cara merawat setiap komponen agar tetap dalam kondisi prima dan mampu menghasilkan energi secara optimal setiap hari.

a. Teknik Perawatan Panel Surya, Inverter, dan Baterai

Sistem PLTS terdiri atas komponen-komponen utama yang bekerja sama untuk menghasilkan dan menyuplai energi listrik secara terus-menerus. Agar sistem tetap andal dan efisien, perawatan teknis terhadap komponen utama perlu dilakukan secara teratur dan sesuai prosedur. Tiga komponen kunci yang harus mendapat perhatian khusus dalam perawatannya ialah modul surya, inverter, dan baterai. Setiap komponen memiliki fungsi dan karakteristik yang berbeda sehingga metode perawatannya pun tidak dapat disamakan. Berikut ini teknik perawatan yang disesuaikan dengan kebutuhan setiap komponen.

1) Teknik Perawatan Modul Surya

Sebagai bagian yang langsung menerima sinar matahari, permukaan panel harus selalu bersih agar proses konversi energi berjalan optimal. Bersihkan modul secara berkala minimal sebulan sekali menggunakan air bersih dan kain lembut, tanpa menggunakan bahan kimia keras atau alat yang dapat menggores permukaannya. Waktu terbaik untuk pembersihan ialah pagi atau sore hari saat panel tidak panas. Selain itu, lakukan inspeksi visual untuk memastikan tidak ada retakan, perubahan warna, atau benda asing yang menempel. Struktur penopang juga perlu dicek, pastikan baut tidak longgar dan rangka tidak mengalami karat. Hindari menginjak atau menindih panel karena dapat merusak sel surya di dalamnya.





Gambar 1.16 Perawatan Modul Surya
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

2) Teknik Perawatan Inverter

Inverter merupakan komponen pengubah arus yang sangat vital dalam sistem PLTS. Pemeriksaan indikator dan log sistem harus dilakukan secara rutin untuk memastikan tidak ada kode kesalahan atau tanda peringatan. Bersihkan bagian ventilasi dan kipas menggunakan kuas lembut atau alat tiup udara untuk mencegah penumpukan debu. Pastikan ruang di sekitar inverter tidak terhalang untuk menjaga sirkulasi udara. Pada inverter yang dilengkapi sistem digital, periksa apakah ada pembaruan *firmware* dari pabrik. Kabel AC dan DC juga perlu diperiksa untuk memastikan koneksi tetap kencang dan tidak mengalami pemanasan berlebih. Sediakan ruang bebas minimal 15–20 cm di sekeliling inverter untuk mencegah *overheat*.

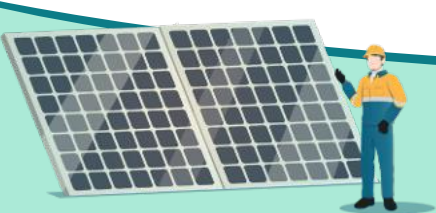




Gambar 1.17 Perawatan Inverter
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

3) Teknik Perawatan Baterai

Sebagai penyimpan energi, baterai harus dijaga kestabilan tegangan dan temperaturnya. Gunakan alat monitoring untuk memantau kondisi baterai. Pastikan SCC berfungsi dengan baik agar tidak terjadi pengisian atau pengosongan berlebih. Periksa secara berkala kondisi fisik baterai—jangan sampai ada kebocoran, pembengkakan, atau korosi pada terminal. Bersihkan terminal dengan sikat kawat dan larutan pembersih ringan jika diperlukan. Ruang penyimpanan baterai harus memiliki ventilasi memadai, terutama untuk jenis timbal-asam yang dapat mengeluarkan gas. Pada sistem dengan beberapa bank baterai, lakukan rotasi penggunaan agar beban pemakaian merata. Saat melakukan pemeriksaan, gunakan alat pelindung diri untuk keselamatan dan hindari menyentuh baterai dengan tangan basah.



Tabel 1.5 Perawatan Komponen PLTS

Komponen	Harian	Bulanan	Tahunan
Modul Surya	Cek visual	Bersihkan permukaan panel.	Cek kekuatan dudukan dan struktur.
Inverter	Pantau indikator	Bersihkan kipas dan ventilasi.	<i>Update firmware</i> dan cek kabel.
Baterai	Cek tegangan dan suhu	Bersihkan terminal dan cek fisik.	Evaluasi kapasitas dan performa.

Aktivitas 1.9 Teknik Perawatan Panel Surya, Inverter, dan Baterai

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

Setelah mengikuti aktivitas ini, kamu mampu menerapkan teknik perawatan panel surya, inverter, dan baterai secara tepat melalui penyelesaian masalah teknis yang umum terjadi, serta merefleksikan pentingnya perawatan untuk efisiensi PLTS.

Langkah-Langkah:

Pelajari kasus berikut. Presentasikan hasil diskusinya.

Studi Kasus

Sebuah sistem PLTS sekolah tidak menghasilkan daya maksimal. Panel tampak kusam, inverter sering panas, dan baterai cepat habis. Tim teknisi diminta memeriksa dan melakukan perawatan.

Berdasarkan studi kasus, diskusikan pertanyaan berikut dengan temanmu.

1. Bagaimana kamu mengidentifikasi dan menjelaskan masalah perawatan pada panel surya, inverter, dan baterai dalam menjaga efisiensi serta umur sistem PLTS?
2. Berdasarkan gejala pada kasus, bagaimana cara mengidentifikasi masalah teknis dan pengaruhnya terhadap kinerja sistem PLTS secara keseluruhan?
3. Mengapa sikap tanggung jawab, ketelitian, dan kerja sama penting diterapkan dalam kegiatan perawatan sistem PLTS?



4. Susun langkah-langkah perawatan yang tepat untuk setiap komponen (panel surya, inverter, dan baterai).
5. Jika kamu menjadi bagian dari tim teknisi, tindakan teknis apa yang akan kamu lakukan untuk memperbaiki masalah tersebut?
6. Setelah melakukan kegiatan perawatan, apa yang kamu pelajari tentang pentingnya pemeliharaan rutin terhadap keandalan sistem PLTS dan profesionalisme kerja?

b. Pencegahan Kerusakan melalui Pemeliharaan Sistematis

Dengan memahami cara kerja sistem PLTS, langkah penting selanjutnya ialah mengetahui bagaimana mencegah kerusakan sebelum terjadi. Di sinilah peran pemeliharaan sistematis menjadi sangat krusial. Pemeliharaan sistematis merupakan serangkaian tindakan yang dilakukan secara terjadwal dan terencana untuk memastikan semua komponen PLTS—seperti panel surya, inverter, dan baterai—tetap bekerja dalam kondisi optimal. Pendekatan ini bukan menunggu kerusakan muncul, melainkan mencegahnya sejak awal. Dengan melakukan pemeliharaan secara konsisten, risiko gangguan besar dapat ditekan, efisiensi energi tetap terjaga, usia pakai peralatan menjadi lebih panjang, dan biaya operasional pun lebih hemat dengan perbaikan mendadak yang sifatnya darurat.

1) Prinsip Utama Pemeliharaan Sistematis

Ada beberapa prinsip utama pemeliharaan sistematis, yaitu sebagai berikut.

- a) Terjadwal
Kegiatan pemeliharaan dilakukan secara rutin dengan frekuensi tertentu, seperti harian, mingguan, bulanan, hingga tahunan, sesuai kebutuhan sistem.
- b) Terdokumentasi
Setiap aktivitas dicatat secara lengkap, termasuk tanggal, tindakan, hasil temuan, dan nama pelaksana, untuk keperluan evaluasi dan pelacakan historis.
- c) Terukur
Setiap langkah memiliki parameter yang jelas dan dapat dinilai, seperti pengukuran tegangan baterai, efisiensi inverter, atau kebersihan panel.
- d) Terkoordinasi
Pemeliharaan dilakukan oleh tim atau teknisi yang memahami prosedur, dengan pembagian tugas yang jelas dan penggunaan alat kerja yang sesuai standar.



2) Langkah Pencegahan Kerusakan melalui Pemeliharaan

Berikut ini beberapa langkah pencegahan kerusakan melalui pemeliharaan sistematis.

a) Pemeriksaan Visual Rutin

Langkah awal dalam mencegah kerusakan sistem PLTS ialah melakukan pemeriksaan visual secara rutin. Perhatikan kondisi fisik panel surya—apakah ada retakan, goresan, atau penumpukan debu tebal di permukaannya. Selain itu, penting juga untuk melihat sambungan kabel dan terminal baterai secara langsung, serta memperhatikan bagian luar inverter. Suara aneh, bau gosong, atau bahkan percikan api kecil dapat menjadi tanda awal adanya masalah serius yang harus segera diatasi sebelum menyebabkan kerusakan lebih besar.

b) Pembersihan Komponen

Membersihkan komponen secara teratur ialah bentuk perawatan paling sederhana, tetapi sangat krusial. Panel surya sebaiknya dibersihkan menggunakan air bersih dan kain halus agar tidak merusak permukaannya. Di sekitar inverter, gunakan vakum kecil atau semprotan udara untuk menghilangkan debu yang dapat menghambat ventilasi. Terminal baterai juga perlu dilap secara berkala untuk mencegah korosi yang dapat menyebabkan koneksi listrik terganggu atau bahkan menimbulkan panas berlebih.

c) Pengujian Kinerja

Setelah visual dan kebersihan terjaga, pengujian teknis menjadi langkah penting berikutnya. Gunakan alat ukur seperti voltmeter untuk mengetahui tegangan input dan *output* pada inverter, serta arus dari panel surya. Level pengisian baterai pun harus dicek secara berkala. Selain itu, bandingkan data harian dari *output* energi dengan hari-hari sebelumnya untuk melihat apakah ada penurunan performa yang tidak wajar. Langkah ini membantu mendeteksi dini adanya kerusakan atau ketidakseimbangan sistem.

d) Pencatatan dan Evaluasi

Semua hasil pemeriksaan dan pengujian perlu dicatat secara rapi dalam *logbook* pemeliharaan. Catatan ini tidak hanya berguna sebagai dokumentasi, tetapi juga sebagai bahan evaluasi. Jika memungkinkan, buatlah grafik sederhana dari data yang dikumpulkan agar tren performa sistem dapat terlihat jelas. Evaluasi secara berkala apakah ada penurunan efisiensi dari panel, penurunan daya simpan baterai, atau ketidakwajaran dari kinerja inverter.

e) Tindak Lanjut Cepat

Jika dari pemeriksaan atau pengujian ditemukan hal-hal abnormal, jangan ditunda—lakukan tindak lanjut segera. Contohnya, jika kamu menemukan



kabel atau terminal yang longgar, segera kencangkan. Jika ada kode *error* pada inverter, bacalah panduan kode kesalahan dan lakukan penyesuaian tindakan yang sesuai. Keterlambatan dalam penanganan masalah kecil dapat berubah menjadi kerusakan besar yang mengganggu semua sistem.



Gambar 1.18 Pengujian dengan Alat Ukur
Sumber: Feviana/Kemendikdasmen (2025)



Aktivitas 1.10 Pencegahan Kerusakan melalui Pemeliharaan Sistematis

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah mengikuti aktivitas ini, kamu mampu menyusun langkah sistematis pencegahan kerusakan sistem PLTS berdasarkan pemeriksaan rutin dan evaluasi kinerja, serta memahami pentingnya tindakan cepat dan pencatatan dalam menjaga keandalan PLTS.

Langkah-Langkah:

Bacalah kasus berikut. Kemudian, kerjakan soal-soal terkait kasus tersebut.

Studi Kasus

Pada sebuah sistem PLTS rumah tangga, inverter tiba-tiba rusak dan baterai membengkak. Setelah ditelusuri, tidak pernah dilakukan pencatatan performa harian dan kabel baterai sering dibiarkan longgar.

1. Apa yang dimaksud dengan pemeliharaan sistematis pada sistem PLTS? Bagaimana penerapannya dapat membantu mencegah kerusakan komponen seperti inverter dan baterai?
2. Berdasarkan kasus di atas, kegiatan pemeriksaan dan pemeliharaan rutin apa yang seharusnya dilakukan untuk mencegah masalah seperti kabel longgar, baterai membengkak, dan inverter panas berlebih?
3. Bagaimana sikap kerja seperti disiplin, ketelitian, dan tanggung jawab harus diterapkan oleh teknisi saat melakukan pemeriksaan dan pencatatan performa sistem PLTS agar pekerjaan berjalan aman dan hasilnya andal?
4. Susun langkah-langkah pemeliharaan sistematis yang dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan seperti pada kasus tersebut, mulai dari pemeriksaan visual, pembersihan, pengujian, hingga tindak lanjut jika ditemukan gangguan.
5. Buat contoh sederhana format pencatatan performa sistem PLTS yang berisi parameter penting (tegangan, arus, suhu inverter, dan kapasitas baterai) serta jadwal pemeriksaannya (harian, mingguan, atau bulanan).
6. Setelah mempelajari kasus ini, apa pelajaran yang kamu peroleh tentang pentingnya pemeriksaan rutin, pencatatan performa, dan sikap kerja profesional dalam menjaga keandalan serta umur panjang sistem PLTS?



3. Penyusunan Laporan dan Rekomendasi Perbaikan

Setelah melakukan pemeliharaan terhadap berbagai komponen sistem PLTS—dari panel surya, inverter, hingga baterai—tentu kita tidak dapat hanya berhenti pada tahap pengecekan dan perbaikan saja. Langkah berikutnya yang tak kalah penting ialah *mendokumentasikan hasilnya*. Mengapa? Karena tanpa catatan yang rapi dan sistematis, akan sulit melacak histori perawatan dan mengambil keputusan teknis yang lebih baik ke depan.

Pernah terpikir bagaimana sebuah laporan pemeliharaan dapat menjadi dasar perbaikan, peningkatan efisiensi, bahkan mencegah kerusakan serius di kemudian hari?

a. Menyusun Laporan Hasil Pemeliharaan Sistem PLTS

Setelah melakukan kegiatan pemeliharaan seperti membersihkan modul surya, memeriksa sambungan kabel, mencatat performa inverter, atau mengevaluasi kondisi baterai, langkah terakhir yang tidak boleh dilewatkan ialah menyusun laporan hasil pemeliharaan. Laporan ini memiliki peran penting dalam mendokumentasikan kondisi sistem PLTS secara berkala. Melalui laporan, kondisi terkini sistem dapat diketahui dengan jelas, performa dari waktu ke waktu dapat dianalisis, dan riwayat perawatan tersimpan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis pada masa mendatang. Kegiatan pencatatan ini juga menjadi bagian dari standar kerja profesional yang harus dibiasakan sejak dini dalam dunia kerja di bidang energi terbarukan.

1. Manfaat Laporan Pemeliharaan

Berikut ini beberapa manfaat laporan pemeliharaan.

a) Dokumentasi Resmi

Laporan menjadi bukti bahwa sistem PLTS telah dirawat secara rutin dan sesuai prosedur.

b) Analisis Kinerja

Informasi dalam laporan dapat menunjukkan tren penurunan efisiensi panel, kondisi baterai, hingga kestabilan *output* inverter yang akan sangat berguna dalam evaluasi berkala.

c) Dasar Pengambilan Keputusan

Data yang tercantum dalam laporan membantu teknisi atau pemilik sistem menentukan kapan perlu dilakukan penyesuaian sistem, penggantian komponen, atau peningkatan kapasitas.



2) Struktur Laporan Pemeliharaan Sistem PLTS

Berikut ini struktur laporan pemeliharaan sistem PLTS.

a) Identitas Sistem

Berisi informasi dasar seperti lokasi instalasi, kapasitas sistem dalam kWp, jenis sistem (*on-grid*, *off-grid*, atau hibrida), tanggal pelaksanaan pemeliharaan, serta nama teknisi atau tim yang bertugas.

b) Ringkasan Kegiatan Pemeliharaan

Bagian ini menjelaskan secara singkat kegiatan yang dilakukan selama proses pemeliharaan. Contoh kegiatan yang dicantumkan dapat berupa pembersihan panel surya dari debu atau kotoran, pengecekan sambungan kabel dan konektor, pengukuran *output* normal, pemantauan kapasitas baterai, hingga pencatatan data harian yang mendukung analisis kinerja sistem secara menyeluruh.

c) Hasil Pemeriksaan dan Pengukuran

Disajikan dalam bentuk tabel yang merinci setiap komponen yang diperiksa, parameter yang dicek, hasil temuan di lapangan, dan status kondisi komponen.

d) Temuan Masalah

Di bagian ini, dijelaskan adanya kerusakan ringan atau potensi masalah, seperti kabel yang mulai longgar, permukaan panel yang agak kotor, atau catatan *error* dari inverter.

e) Tindakan Perbaikan

Berisi langkah perbaikan atau penyesuaian yang telah dilakukan di lapangan berdasarkan hasil temuan, seperti pengencangan konektor, pembersihan modul, atau kalibrasi ulang *setting* pengisian baterai.

f) Rekomendasi

Merupakan saran teknis lanjutan, seperti frekuensi pembersihan panel yang lebih sering saat musim kemarau, evaluasi kapasitas baterai dalam waktu tertentu, atau pemantauan berulang pada inverter jika pernah muncul *error*.

g) Lampiran

Meliputi foto kegiatan pemeliharaan, grafik performa sistem dalam periode tertentu, serta catatan log harian atau mingguan.

3) Tips Menyusun Laporan yang Baik

Berikut ini beberapa tips menyusun laporan yang baik.

a) Gunakan bahasa yang jelas dan lugas.

b) Tambahkan bukti visual seperti foto atau grafik hasil pengukuran.

c) Susun laporan segera setelah kegiatan selesai agar datanya akurat.

d) Simpan laporan dalam bentuk digital dan cetak jika diperlukan untuk dokumentasi fisik.



Contoh Laporan Pemeliharaan Sistem PLTS

A. Identitas Sistem

Lokasi Instalasi : SMK Energi Terbarukan, Gedung Laboratorium Surya
Kapasitas Sistem : 5 kWp
Jenis Sistem : *On-Grid* dengan *back up* baterai
Tanggal Pelaksanaan : 20 Mei 2025
Pelaksana : Tim Teknik Surya A (Teknisi: Agam, Reivalda, dan Delia)

B. Ringkasan Kegiatan Pemeliharaan

Pemeliharaan berkala dilakukan sesuai jadwal dua mingguan. Kegiatan yang dilaksanakan hal-hal berikut.

1. Pembersihan panel surya dari debu dan kotoran menggunakan air bersih dan kain *microfiber*.
2. Pengecekan sambungan kabel dan konektor di sisi DC dan AC.
3. Pengukuran tegangan *output* inverter dan memeriksa *log error*.
4. Evaluasi kapasitas baterai cadangan.
5. Pencatatan performa harian sistem dalam *data logger*.

Tabel 1.6 Hasil Pemeriksaan dan Pengukuran

Komponen	Parameter Dicek	Hasil Temuan	Status Kondisi
Panel Surya	Kebersihan, fisik	Debu tipis, tanpa retak	Baik
Kabel DC dan AC	Kekencangan koneksi	Koneksi rapat, isolasi utuh	Baik
Inverter	Tegangan dan <i>log error</i>	Tegangan <i>output</i> : 230 V, log normal	Baik
Baterai	Tegangan dan terminal	48 V, terminal mulai berkarat	Perlu perhatian
Struktur Penyangga	Kekencangan baut	Baut kencang, tidak ada korosi	Baik



C. Temuan Masalah

Terminal baterai ditemukan mulai berkarat ringan pada kutub positif.

D. Tindakan Perbaikan

1. Terminal baterai dibersihkan menggunakan larutan pembersih khusus dan dilap kering.
2. Pemberian lapisan tipis *grease* pelindung pada terminal untuk mencegah karat kembali.

E. Rekomendasi

1. Pembersihan panel dilakukan setiap dua minggu sekali selama musim kemarau.
2. Penggantian pelindung kabel luar (*conduit*) disarankan dalam tiga bulan karena mulai menunjukkan tanda aus.
3. Pemeriksaan ulang kondisi terminal baterai pada kunjungan pemeliharaan berikutnya.

F. Lampiran

1. Foto Kegiatan Pemeliharaan (pembersihan panel, pemeriksaan kabel, dan perbaikan terminal baterai).
2. Hasil Pengukuran (tegangan inverter, kapasitas baterai, dan PR sistem harian).
3. Grafik Performa Harian selama 7 hari terakhir:
 - a) PR berkisar 84–88%
 - b) *Output* energi harian rata-rata: 21–23 kWh

Aktivitas 1.11 Pencegahan Kerusakan melalui Pemeliharaan Sistematis

Kegiatan Kelompok

Tujuan:

Setelah menyelesaikan aktivitas ini, kamu mampu memahami struktur laporan hasil pemeliharaan PLTS dan menyusun laporan yang lengkap berdasarkan data kegiatan lapangan atau simulasi pemeliharaan, untuk mendokumentasikan kondisi sistem secara profesional.



Langkah-Langkah:

1. Lakukan kegiatan pemeliharaan sistem PLTS berikut di ruang praktik.
 - a. Mengecek panel surya.
 - b. Membersihkan debu.
 - c. Mengukur tegangan baterai.
 - d. Memeriksa inverter.
2. Setelah kegiatan pemeliharaan, susunlah laporan hasil kegiatan. Tuliskan secara runtut mulai dari identitas sistem, ringkasan aktivitas, hasil pemeriksaan, masalah yang ditemukan, tindakan perbaikan, hingga saran ke depan. Sertakan foto, data pengukuran, atau catatan tambahan jika ada.
3. Kemudian, diskusikan pertanyaan-pertanyaan berikut ini.
 - a. Apa tujuan utama dari penyusunan laporan hasil pemeliharaan sistem PLTS? Mengapa laporan tersebut penting untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem?
 - b. Berdasarkan hasil kegiatan praktik, bagaimana cara menerapkan konsep pemeliharaan sistematis dalam menyusun laporan agar menggambarkan kondisi aktual dari sistem PLTS?
 - c. Saat bekerja dalam tim penyusun laporan, bagaimana kamu menerapkan sikap kerja seperti komunikasi yang baik, tanggung jawab terhadap bagian tugas masing-masing, dan ketelitian dalam menulis agar laporan menjadi lebih akurat dan profesional?
 - d. Apa saja langkah-langkah penyusunan laporan hasil pemeliharaan PLTS mulai dari pengumpulan data lapangan hingga penyusunan rekomendasi perbaikan berdasarkan temuan di lapangan?
 - e. Jika dalam pemeriksaan ditemukan kerusakan pada inverter atau penurunan kapasitas baterai, bagaimana kamu akan mencatat, melaporkan, dan memberikan saran penanganannya dalam laporan akhir kelompokmu?
 - f. Setelah menyusun laporan hasil pemeliharaan, apa pembelajaran yang kamu peroleh tentang pentingnya dokumentasi teknis dalam pekerjaan pemeliharaan dan bagaimana kegiatan ini meningkatkan profesionalisme sebagai calon teknisi energi?



b. Memberikan Rekomendasi Perbaikan Berdasarkan Temuan Lapangan

Setelah proses pemeriksaan atau pemeliharaan dilakukan, sering kali muncul berbagai temuan di lapangan seperti penurunan performa, kerusakan kecil, atau indikasi gangguan yang berpotensi memburuk. Oleh karena itu, memberikan rekomendasi perbaikan merupakan langkah penting yang tidak boleh dilewatkan. Rekomendasi ini tidak hanya menjadi catatan tambahan, tetapi berfungsi sebagai panduan teknis untuk tindakan selanjutnya agar sistem PLTS tetap aman dan bekerja secara optimal.

1) Manfaat Rekomendasi

Berikut ini beberapa manfaat rekomendasi perbaikan berdasarkan temuan lapangan.

- a) Rekomendasi sangat penting untuk mencegah masalah yang sama terulang kembali. Misalnya, jika hari ini ditemukan kabel DC yang longgar dan hanya dikencangkan tanpa solusi permanen, besar kemungkinan masalah serupa akan muncul lagi. Dalam hal ini, rekomendasi dapat berupa penambahan pengikat kabel atau penggunaan pelindung khusus agar koneksi lebih aman dan tahan lama.
- b) Sistem PLTS akan tetap efisien dan stabil apabila setiap temuan di lapangan ditindaklanjuti dengan solusi yang sesuai. Menjaga performa sistem bukan hanya soal perbaikan langsung, tetapi juga tentang upaya mencegah gangguan di masa depan melalui rekomendasi yang tepat sasaran. Contohnya, ketika inverter menunjukkan suhu berlebih, tidak cukup hanya mematikan sistem—tetapi harus disarankan agar ventilasi diperbaiki atau ditambahkan kipas pendingin.
- c) Rekomendasi yang dibuat akan menjadi acuan dalam evaluasi berikutnya, termasuk pertimbangan untuk penggantian komponen, penyesuaian beban, atau penjadwalan inspeksi lanjutan. Laporan rekomendasi yang jelas dan realistis juga membantu tim manajemen atau pemilik sistem dalam membuat keputusan teknis secara tepat dan efisien.

2) Langkah-Langkah Memberikan Rekomendasi

Berikut ini langkah-langkah memberikan rekomendasi.

- a) Mencatat Temuan Secara Rinci

Setiap temuan yang terjadi di lapangan harus dideskripsikan secara jelas, termasuk jenis gangguan, waktu kejadian, serta komponen yang terdampak. Contohnya, inverter mengalami pesan *error* “*Over Temperature*”, sebagian panel tertutup bayangan pohon, atau tegangan baterai turun drastis saat malam.



b) Menganalisis Penyebab Masalah

Langkah selanjutnya ialah mencari tahu akar penyebab dari masalah yang ditemukan. *Overheating* pada inverter dapat terjadi karena ventilasi buruk. Bayangan pada panel biasanya disebabkan oleh pohon atau bangunan yang menghalangi cahaya matahari. Jika tegangan baterai menurun, bisa jadi disebabkan oleh usia baterai yang sudah tua atau beban listrik yang terlalu besar.

c) Menilai Risiko Jika Tidak Ditindaklanjuti

Setiap masalah yang tidak diperbaiki dapat berdampak serius pada sistem. Kerusakan kecil yang dibiarkan dapat menyebabkan kerugian besar, mulai dari penurunan efisiensi energi, kerusakan lanjutan pada komponen, hingga potensi bahaya seperti hubungan pendek atau kebakaran.

d) Merumuskan Rekomendasi yang Spesifik dan Masuk Akal

Rekomendasi harus disampaikan secara langsung dan mudah diterapkan. Beberapa contoh antara lain: memindahkan inverter ke ruang dengan sirkulasi udara lebih baik, memangkas dahan pohon yang menutupi panel surya secara berkala, atau melakukan pengujian ulang kapasitas baterai dalam waktu satu bulan untuk memastikan kemampuannya masih sesuai kebutuhan.

Tabel 1.7 Contoh Format Rekomendasi Perbaikan

No	Temuan Lapangan	Dampak Potensial	Rekomendasi Perbaikan
1	Terminal kabel di <i>combiner box</i> kendur.	Korsleting, efisiensi menurun	Kencangkan terminal, pasang pengaman, cek ulang dalam 1 minggu.
2	Debu tebal di modul surya.	Penurunan daya keluaran	Jadwalkan pembersihan panel mingguan, beri edukasi pengguna.
3	<i>Error "Low Voltage"</i> di inverter.	Gangguan <i>output</i> sistem	Lakukan uji baterai, ganti jika $SoH < 70\%$.

3) Tips Membuat Rekomendasi

Berikut ini beberapa tips membuat rekomendasi.

- Spesifik: Hindari kata-kata umum seperti “perbaiki” tanpa penjelasan.
- Jelas waktu pelaksanaannya: Misal, segera, 1 minggu ke depan, 3 bulan lagi.
- Sesuai kondisi lapangan: Jangan memberi saran yang tidak mungkin dilakukan (misalnya minta ganti sistem total padahal hanya masalah kabel).
- Tulis dengan bahasa teknis, tetapi tetap mudah dipahami.



Memberikan rekomendasi perbaikan itu tanda kamu peduli terhadap kualitas kerja dan keberlanjutan sistem PLTS. Dengan rekomendasi yang tepat, kita dapat mencegah kerusakan lebih lanjut, menghemat biaya perbaikan, dan menjaga keandalan sistem untuk jangka panjang.



Video Pemeliharaan PLTS
<https://youtu.be/2PpgPyLL-lo>



Dokumen Pemeliharaan PLTS
https://bit.ly/Dokumen_OnM_PLTS

Aktivitas 1.12 Rekomendasi pada Pemeliharaan PLTS

Kegiatan Individu

Tujuan:

Setelah mengikuti aktivitas ini, kamu mampu memberikan rekomendasi pemeliharaan sistem PLTS secara tepat berdasarkan hasil pemeriksaan lapangan, serta menunjukkan sikap profesional, bertanggung jawab, dan reflektif terhadap keberlanjutan sistem energi terbarukan.

Langkah-Langkah:

Tuliskan jawaban dari soal-soal berikut berdasarkan pengalamanmu saat melakukan pemeliharaan sistem PLTS.

1. Apa indikator utama yang menunjukkan bahwa sistem PLTS memerlukan pemeliharaan segera? Mengapa penting memahami dasar kerja sistem sebelum memberikan rekomendasi perbaikan?



2. Berdasarkan hasil pemeriksaan atau laporan pemeliharaan sebelumnya, bagaimana kamu menentukan prioritas tindakan pemeliharaan untuk setiap komponen PLTS agar sistem kembali bekerja optimal?
3. Bagaimana kamu menunjukkan sikap profesional, tanggung jawab, dan kejujuran dalam memberikan rekomendasi pemeliharaan PLTS agar hasil analisis dapat dipercaya dan mendukung keberlanjutan PLTS?
4. Buatlah satu contoh rekomendasi pemeliharaan nyata untuk salah satu komponen PLTS (misalnya inverter, panel surya, atau baterai) berdasarkan kondisi hasil pemeriksaan lapangan.
5. Jelaskan bagaimana rekomendasi yang kamu berikan dapat meningkatkan efisiensi kerja sistem PLTS, mencegah kerusakan berulang, dan memperpanjang umur peralatan.
6. Setelah melakukan analisis dan memberikan rekomendasi pemeliharaan, apa pembelajaran yang kamu peroleh tentang pentingnya berpikir kritis, ketelitian, dan tanggung jawab dalam pengambilan keputusan sebagai calon teknisi energi terbarukan?



Uji Kompetensi

A. Pilihan Ganda

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat dari lima pilihan jawaban yang tersedia (A, B, C, D, atau E) dengan memberi tanda silang (×) pada huruf yang sesuai!

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 500 kWp di kawasan industri sedang menjalani tahap uji operasional setelah dilakukan pemeliharaan rutin. Tim teknisi melakukan pemeriksaan kesiapan sistem sebelum diaktifkan, meliputi pengecekan kondisi modul surya, koneksi kabel, pengukuran tegangan *open circuit* (Voc), serta pengaturan parameter inverter agar sesuai dengan spesifikasi sistem.

Setelah semua komponen dinyatakan siap, sistem PLTS diaktifkan secara bertahap mulai dari pembukaan *isolator* DC, penyambungan inverter, hingga sinkronisasi ke panel distribusi utama. Data pemantauan menunjukkan bahwa nilai *Performance Ratio* (PR) bervariasi dari 82% hingga 90% bergantung pada kondisi cuaca harian. Berdasarkan hasil tersebut, tim teknisi melakukan analisis terhadap kestabilan performa sistem untuk memastikan PLTS beroperasi secara optimal dan aman.

1. Langkah pertama yang harus dilakukan sebelum mengaktifkan sistem PLTS ialah
 - A. menyalakan inverter secara langsung
 - B. memeriksa kesiapan semua komponen sistem
 - C. menghubungkan beban ke panel distribusi
 - D. mengatur ulang sistem monitoring
 - E. menyalakan panel AC utama
2. Pemeriksaan nilai *open circuit voltage* (Voc) pada modul surya bertujuan untuk
 - A. menentukan nilai arus maksimum modul surya
 - B. mengetahui kapasitas inverter yang digunakan
 - C. memastikan modul surya menghasilkan tegangan sesuai spesifikasi
 - D. mengatur urutan aktivasi inverter
 - E. mengukur efisiensi beban AC
3. Urutan yang benar dalam mengaktifkan sistem PLTS agar aman dan sesuai prosedur ialah
 - A. menyalakan inverter – membuka isolator DC – sinkronisasi ke panel utama
 - B. membuka isolator DC – menyambungkan inverter – sinkronisasi ke panel utama
 - C. sinkronisasi ke panel utama – membuka isolator DC – menyalakan inverter



- D. membuka isolator AC – menyalakan inverter – sinkronisasi ke panel utama
 - E. menyambungkan inverter – menyalakan beban – membuka isolator DC
4. Penurunan nilai *Performance Ratio* (PR) dari 90% menjadi 75% paling mungkin disebabkan oleh
- A. kegagalan inverter
 - B. cuaca berawan yang menurunkan iradiasi matahari
 - C. modul surya yang terputus hubungannya
 - D. gangguan pada sistem monitoring
 - E. kesalahan parameter inverter
5. Analisis kestabilan performa PLTS dilakukan dengan tujuan untuk
- A. meningkatkan kapasitas inverter
 - B. mengidentifikasi gangguan dan menjaga kinerja sistem tetap optimal
 - C. mengganti semua modul surya setiap hari
 - D. mengurangi beban sistem distribusi
 - E. menurunkan daya keluaran agar hemat energi

B. Pilihan Ganda Komplek MCM

Pilihlah satu atau lebih jawaban yang benar dari beberapa pernyataan yang tersedia dengan memberi tanda centang (✓) pada kotak di depan pernyataan yang menurut kamu benar!

Sebuah sistem PLTS berkapasitas 100 kWp yang terpasang di gedung perkantoran mengalami penurunan kinerja selama dua minggu terakhir. Berdasarkan hasil pemantauan, produksi energi harian turun dari rata-rata 420 kWh menjadi 340 kWh. Tim teknisi kemudian melakukan pemeliharaan bulanan dengan langkah-langkah meliputi inspeksi visual modul surya, pembersihan permukaan panel, pengecekan *tightness* konektor MC4, pengukuran arus dan tegangan keluaran *string*, serta pemeriksaan kondisi inverter.

Selama inspeksi, ditemukan beberapa modul surya tertutup debu tebal dan konektor MC4 yang longgar. Setelah dilakukan pembersihan dan pengencangan ulang, performa sistem meningkat kembali mendekati kondisi normal. Tim teknisi kemudian menyusun laporan pemeliharaan yang mencakup hasil pemeriksaan, tindakan perbaikan, serta rekomendasi teknis untuk mencegah masalah serupa pada periode berikutnya.



1. Langkah yang tepat dalam menyusun jadwal pemeliharaan PLTS secara berkala ialah
 - A. pemeriksaan visual harian terhadap modul dan kabel sistem
 - B. pembersihan panel surya minimal dua minggu sekali
 - C. penggantian inverter setiap dua bulan
 - D. pemeriksaan menyeluruh setiap tahun
 - E. menunda pemeliharaan sampai terjadi gangguan
2. Tujuan utama dari pemeliharaan preventif pada sistem PLTS ialah
 - A. mencegah kerusakan sebelum terjadi
 - B. menjaga efisiensi dan kestabilan performa sistem
 - C. menghemat biaya operasional dalam jangka panjang
 - D. menghindari aktivitas pemeriksaan rutin
 - E. memperpanjang umur pakai komponen
3. Berdasarkan kasus di atas, permasalahan utama yang menyebabkan penurunan performa sistem PLTS ialah
 - A. modul surya tertutup debu tebal
 - B. konektor MC4 longgar
 - C. cuaca berawan selama dua minggu
 - D. gangguan pada jaringan AC gedung
 - E. kesalahan pengaturan parameter inverter
4. Langkah terbaik untuk mencegah permasalahan serupa di kemudian hari ialah
 - A. meningkatkan frekuensi pembersihan panel
 - B. melakukan inspeksi konektor MC4 secara rutin
 - C. menonaktifkan sistem setiap akhir pekan
 - D. membuat catatan laporan hasil pemeliharaan
 - E. menambah kapasitas sistem tanpa perhitungan beban
5. Bagian penting yang harus tercantum dalam laporan pemeliharaan PLTS ialah
 - A. data hasil pemeriksaan lapangan
 - B. langkah tindakan perbaikan dan pembersihan
 - C. rekomendasi teknis untuk pencegahan
 - D. kondisi cuaca harian tanpa analisis
 - E. nama teknisi pelaksana dan tanggal pemeriksaan



C. Pilihan Ganda Komplek Kategori

Bacalah setiap pernyataan di bawah ini, kemudian tentukan kategori yang sesuai dengan memberi tanda centang (✓) pada kolom yang benar sesuai kategori!

1. Sebuah PLTS atap berkapasitas 10 kWp di laboratorium sekolah akan dioperasikan setiap pagi. Sebelum diaktifkan, teknisi melakukan pemeriksaan konektor MC4, mengukur tegangan *output* panel, dan memastikan inverter dalam kondisi *standby*.

No.	Pernyataan	Benar	Salah
A	Pemeriksaan komponen wajib dilakukan sebelum inverter dinyalakan.		
B	Tegangan <i>output</i> panel tidak perlu diperiksa sebelum sistem diaktifkan.		
C	Pemeriksaan ini membantu mencegah gangguan dan menjaga keselamatan sistem.		

2. Sebuah PLTS Hibrida berkapasitas 25 kWp terhubung dengan jaringan PLN dan baterai penyimpanan. Saat sistem diaktifkan, teknisi memastikan inverter hibrida bekerja dalam mode otomatis agar mampu berpindah sumber daya dengan aman.

No.	Pernyataan	Benar	Salah
A	Inverter hibrida dapat mengatur prioritas sumber daya dari PV, baterai, dan PLN.		
B	Mode otomatis berfungsi untuk menjaga kontinuitas suplai daya ke beban.		
C	Sistem hibrida tidak memerlukan pengaturan sinkronisasi dengan jaringan PLN.		

3. Pada sistem PLTS 50 kWp, teknisi melakukan aktivasi sistem secara bertahap. Prosedur standar ialah membuka isolator DC, menyalakan inverter, lalu melakukan sinkronisasi dengan panel distribusi utama.

No.	Pernyataan	Benar	Salah
A	Inverter boleh dinyalakan sebelum isolator DC dibuka.		
B	Urutan aktivasi harus dimulai dari pembukaan isolator DC.		
C	Sinkronisasi dilakukan setelah inverter aktif dan parameter stabil.		



4. Tim teknisi memantau performa sistem PLTS selama lima hari dan mencatat nilai *Performance Ratio* (PR) yang menurun dari 88% ke 74%. Setelah diperiksa, tidak ditemukan kerusakan fisik, namun cuaca mendung selama tiga hari.

No.	Pernyataan	Benar	Salah
A	Penurunan PR dapat disebabkan oleh rendahnya intensitas iradiasi matahari.		
B	Penurunan PR selalu menandakan adanya kerusakan pada sistem inverter.		
C	Analisis PR penting untuk mengetahui kestabilan performa sistem PLTS.		

5. Sebuah PLTS *off-grid* 15 kWp digunakan untuk menyuplai daya ke peralatan laboratorium di lokasi terpencil. Pada hari tertentu, sistem tidak mampu mencukupi beban karena energi baterai cepat habis meskipun modul surya berfungsi normal.

No.	Pernyataan	Benar	Salah
A	Penurunan performa sistem disebabkan inverter tidak menerima daya dari PLN.		
B	Kemungkinan penyebabnya ialah kapasitas baterai yang tidak mencukupi beban.		
C	Solusi yang dapat dilakukan ialah menambah kapasitas baterai atau mengatur ulang prioritas beban.		

D. Esai

Bacalah setiap soal dengan cermat, kemudian jawablah secara jelas, logis, dan mendalam berdasarkan pemahaman kamu terhadap konsep yang telah dipelajari. Gunakan penalaran kritis, analisis yang runtut, serta sertakan contoh, data, atau argumen ilmiah yang relevan untuk memperkuat jawaban.

1. Sebuah PLTS berkapasitas 30 kWp di laboratorium teknik mengalami penurunan daya keluaran setiap minggu. Berdasarkan laporan monitoring, efisiensi sistem menurun hingga 10% akibat kurangnya pemeriksaan rutin pada konektor dan kebersihan panel. Setelah dilakukan pemeriksaan, ditemukan banyak debu menempel di permukaan modul dan satu konektor MC4 longgar.

Jelaskan bagaimana penyusunan jadwal pemeliharaan preventif yang tepat dapat mencegah penurunan efisiensi seperti kasus di atas?



2. Sebuah PLTS di pabrik logam menunjukkan hasil produksi energi lebih rendah daripada perhitungan teoretis. Pemeriksaan lapangan menunjukkan tegangan keluaran dari salah satu *string* lebih rendah 15% dibandingkan dengan *string* lainnya. Saat dilakukan pengukuran, ditemukan bahwa permukaan modul kotor akibat debu dan asap industri. Analisislah penyebab utama penurunan performa pada kasus di atas. Berikan dua solusi teknis untuk mengatasinya!
3. Selama musim hujan, produksi energi PLTS 100 kWp di kantor pemerintahan menurun. Tim teknis menganggap hal tersebut normal karena cuaca mendung. Namun, ketika cuaca cerah, performa sistem tidak kembali normal. Data monitoring menunjukkan tegangan salah satu *string* lebih rendah dari normal meskipun iradiasi sudah tinggi. Bagaimana cara mengidentifikasi apakah penurunan performa tersebut disebabkan oleh gangguan teknis atau faktor cuaca?
4. Tim teknis melakukan inspeksi bulanan pada PLTS 75 kWp. Hasil pemeriksaan menunjukkan dua modul surya retak dan satu inverter sering mengalami *overheating*. Setelah perbaikan, sistem kembali berfungsi normal. Supervisor meminta laporan lengkap hasil pemeliharaan untuk arsip dan evaluasi. Susunlah format laporan pemeliharaan PLTS yang sesuai berdasarkan kasus di atas!
5. Dalam evaluasi tahunan, sebuah PLTS 200 kWp memiliki laporan pemeliharaan yang tidak lengkap dan tidak terdokumentasi dengan baik. Akibatnya, tim kesulitan menelusuri riwayat perbaikan dan pola kerusakan sistem. Jelaskan mengapa dokumentasi dan pelaporan hasil pemeliharaan sangat penting bagi efisiensi jangka panjang sistem PLTS!

Pengayaan

Perkembangan teknologi digital telah memberikan dampak besar terhadap dunia energi terbarukan, khususnya dalam sistem PLTS. Saat ini, banyak perusahaan penyedia sistem PLTS yang telah menyertakan fitur monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Melalui teknologi ini, pengguna dapat memantau kinerja sistem PLTS secara *real-time* menggunakan *smartphone*, *tablet*, atau komputer di mana pun dan kapan pun.



Sistem monitoring ini bekerja dengan cara menghubungkan sensor-sensor pengukuran seperti tegangan, arus, suhu, dan kapasitas baterai ke perangkat pengirim data (*data logger*) yang terhubung ke internet. Data tersebut dikirim ke server atau aplikasi berbasis *cloud*, lalu ditampilkan dalam bentuk grafik, tabel, atau laporan digital yang mudah dibaca oleh pengguna. Dengan cara ini, teknisi dapat melakukan analisis performa sistem, mendeteksi gangguan lebih cepat, dan melakukan perawatan secara efisien.

Oleh karena itu, seorang teknisi lapangan tidak cukup hanya memiliki kemampuan mengoperasikan dan merawat sistem PLTS secara manual, tetapi juga harus mampu memahami dan menganalisis data digital dari sistem monitoring berbasis *IoT*. Kedua kemampuan ini sangat penting agar dapat menyesuaikan diri dengan tuntutan industri energi terbarukan yang semakin modern.

Carilah lebih banyak lagi informasi tentang sistem monitoring PLTS dengan menggunakan *IoT* melalui buku, *link website*, YouTube, atau media lainnya agar memiliki pengetahuan yang lebih mendalam tentang topik pembelajaran tersebut.

Refleksi

Kamu telah selesai mempelajari tentang prosedur mengoperasikan dan memelihara sistem PLTS. Ayo, refleksikan kemampuanmu dengan menjawab pertanyaan berikut.

1. Apa hal paling penting yang kamu pelajari dari materi pengoperasian PLTS? Mengapa menurutmu hal tersebut penting?
2. Bagaimana cara kamu memastikan bahwa sistem PLTS dapat beroperasi dengan aman dan efisien?
3. Apa perbedaan utama antara pengoperasian dan pemeliharaan sistem PLTS? Bagaimana keduanya saling mendukung?
4. Apa yang terjadi jika pemeliharaan rutin tidak dilakukan pada sistem PLTS? Jelaskan dengan contoh sederhana.
5. Menurut kamu, apa hubungan antara pengoperasian dan pemeliharaan dalam menjaga kinerja dan keamanan PLTS?
6. Jika kamu menemukan gangguan sistem PLTS di lapangan, langkah apa yang akan kamu ambil terlebih dahulu? Mengapa?



7. Dari materi pengoperasian PLTS dan pemeliharaan PLTS, mana yang menurutmu lebih menantang? Bagaimana kamu akan belajar lebih dalam untuk menguasainya?
8. Sejauh ini, apa kekuatan dan kelemahanmu dalam memahami dan menerapkan materi tentang pengoperasian dan pemeliharaan PLTS?
9. Apa perubahan cara pandangmu terhadap profesi teknisi energi terbarukan setelah mempelajari materi ini?
10. Bagaimana kamu akan mengembangkan sikap disiplin, teliti, dan tanggung jawab, agar siap bekerja di bidang energi terbarukan?
11. Apa komitmen pribadi yang ingin kamu pegang agar dapat menjadi tenaga kerja yang andal dan beretika di industri energi bersih?





KEMENTERIAN PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH
REPUBLIK INDONESIA, 2025

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin

Jenjang SMK/MAK Kelas XII

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

ISBN 978-634-00-0042-9 (no. jil. lengkap)

ISBN 978-634-00-3330-4 (jil.2)

BAB 2

Teknik Energi Hidro



Bagaimana cara memastikan PLTMH yang telah kita bangun dapat beroperasi dengan efisien dan memiliki umur pakai yang panjang?



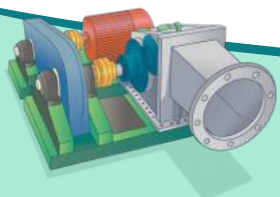
Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu menerapkan pengoperasian dan pemeliharaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

Kata Kunci

1. PLTMH
2. pengoperasian
3. pemeliharaan

Peta





Gambar 2.1 Saluran Pembawa PLTMH

Sumber: Envanto (2025)

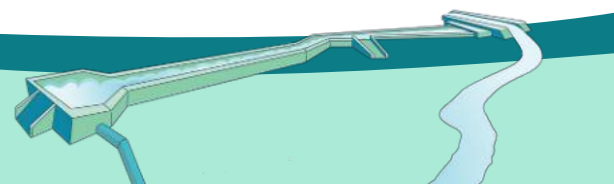
Bayangkan jika suatu hari, sistem PLTMH yang sudah dibangun berhenti beroperasi secara tiba-tiba—apa saja kemungkinan penyebabnya? Bagaimana dampak kegagalan sistem ini terhadap pasokan listrik di wilayah terpencil? Jika kamu bertugas sebagai operator di lapangan, langkah apa yang harus segera kamu ambil untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah tersebut? Hal yang lebih penting, tindakan pemeliharaan seperti apa yang dapat dilakukan agar kejadian serupa tidak terulang kembali?

Sebelum kita belajar lebih lanjut, selesaikanlah soal-soal berikut.

Soal 1 – Pertanyaan Tertulis

Jawablah soal-soal berikut secara singkat, tetapi jelas.

1. Sebutkan 3 komponen utama dalam sistem PLTMH yang berperan dalam menghasilkan listrik.
2. Apa yang akan terjadi jika pintu air (*penstock valve*) dibuka terlalu cepat saat *start-up* PLTMH?
3. Jelaskan secara singkat aliran energi dari air hingga menjadi listrik dalam PLTMH.
4. Pernahkah kamu mengamati sistem kelistrikan berbasis air (mikrohidro) di sekitar tempat tinggalmu? Jika ya, ceritakan secara singkat.



Soal 2 – Aktivitas Praktik Awal (Simulatif/Observasi Lingkungan)

Instruksi: Lakukan observasi di sekitar lingkungan sekolah atau rumah.

Identifikasi sumber air yang berpotensi digunakan sebagai tenaga penggerak turbin.

Catat:

1. Nama sumber air
2. Debit air (perkiraan)
3. Elevasi atau beda tinggi potensial (perkiraan)
4. Hambatan potensial (limbah, sedimentasi, dan vegetasi)

Hasil pengamatan dicatat dalam tabel sederhana dan dibawa untuk didiskusikan bersama.

Soal 3 – Refleksi Singkat

Jawablah dengan jujur dan reflektif.

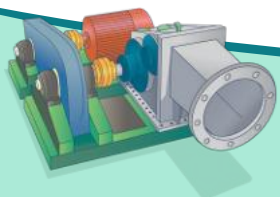
1. Apa yang kamu rasakan ketika membayangkan menjadi operator pembangkit listrik mikrohidro di daerah terpencil?
2. Hal apa yang paling membuatmu tertarik dalam pembelajaran PLTMH?
3. Sikap apa yang kamu rasa paling penting dimiliki seorang teknisi pengoperasian PLTMH? Jelaskan alasannya.
4. Apa yang menjadi tantangan terbesar dalam pembelajaran berbasis praktik seperti ini menurutmu?

A. Pengoperasian PLTMH

Setelah mempelajari dasar-dasar PLTMH, mulai dari prinsip kerja, tahapan perencanaan, hingga proses pembangunan dan pemasangan sistem PLTMH, kini saatnya kita memahami bagaimana sistem tersebut dioperasikan agar dapat menghasilkan energi listrik secara optimal dan berkelanjutan. Pengetahuan tentang komponen dan alur sistem yang telah dipelajari sebelumnya akan menjadi landasan penting dalam memastikan setiap bagian PLTMH bekerja sesuai fungsi dan standar operasional yang aman serta efisien. Lalu, bagaimana cara mengoperasikan PLTMH agar sistem berjalan stabil, aman, dan mendukung kebutuhan energi masyarakat sekitar?

1. Persiapan Pengoperasian PLTMH

Sebelum PLTMH dijalankan, diperlukan proses persiapan yang cermat untuk memastikan bahwa semua komponen sistem dalam kondisi aman, layak, dan siap beroperasi. Tahapan persiapan ini sangat penting karena berfungsi sebagai langkah awal dalam menjamin efisiensi dan keamanan operasional. Kegagalan dalam tahap persiapan dapat berdampak



serius pada kinerja sistem bahkan menyebabkan kerusakan permanen. Tahapan yang dilakukan dalam persiapan pengoperasian ialah sebagai berikut.

a. Memahami Persiapan dan Prinsip Keselamatan Kerja

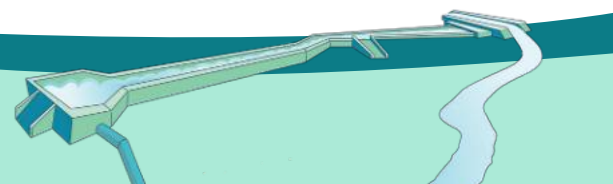
Langkah pertama dalam mempersiapkan pengoperasian PLTMH ialah memahami dan mengikuti prosedur standar operasional (SOP) yang mencakup pengamanan lokasi, penggunaan alat pelindung diri (APD), serta identifikasi risiko bahaya. SOP mencakup tahapan yang harus dilakukan secara berurutan dan sesuai standar teknis—mulai dari pengecekan kondisi air, sistem mekanik, kelistrikan, hingga kesiapan kontrol dan distribusi. Misalnya, sebelum masuk ke area turbin, operator wajib mematikan sumber listrik utama dan memastikan tidak ada tekanan air dalam sistem pipa pesat. Alat pelindung diri yang harus digunakan ialah helm, rompi reflektor, kaca mata pelindung, sarung tangan kerja, sepatu keselamatan (*safety shoes*), pelindung telinga.



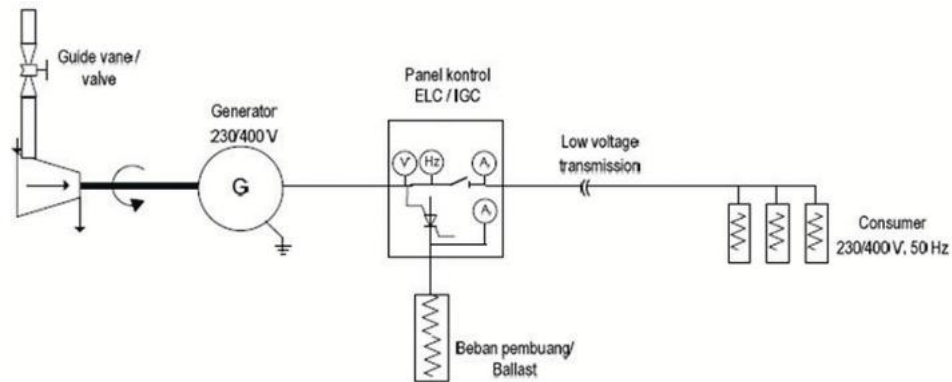
Gambar 2.2 Alat Pelindung Diri
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

b. Memeriksa Visual Awal (Inspeksi Lapangan)

Langkah awal dalam pengoperasian PLTMH ialah melakukan pemeriksaan visual menyeluruh terhadap area dan komponen utama sistem. Saluran air harus dipastikan bebas dari penyumbatan, erosi, atau kerusakan struktural, baik pada bagian *intake*, saluran pembawa, maupun bak penenang. Pipa pesat (*penstock*) perlu diperiksa untuk mendeteksi kebocoran, karat, atau endapan yang dapat mengganggu aliran air

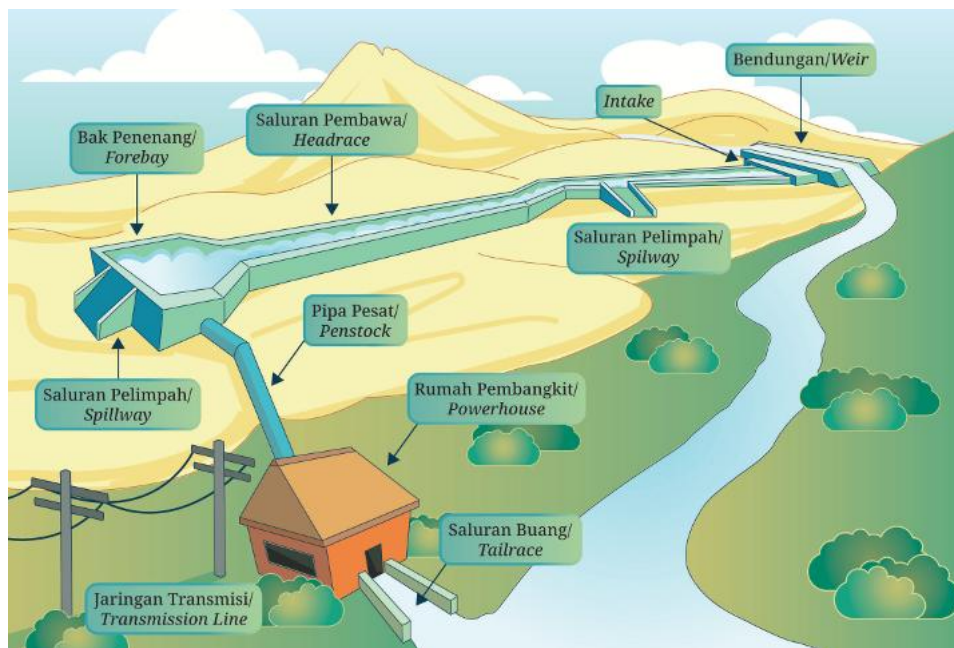


bertekanan. Kondisi turbin dan rumah turbin juga harus diamati, termasuk kelengkapan pelumasan bantalan dan kebersihan dari benda asing yang dapat mengganggu putaran. Pada bagian generator, penting untuk memastikan kabel dalam keadaan terpasang dengan baik, serta lingkungan di sekitarnya kering dan bebas dari debu atau kelembapan dengan pemeriksaan secara visual. Terakhir, panel kontrol diperiksa dari segi sambungan kelistrikan, kondisi pengaman seperti MCB dan *fuse*, serta tampilan indikator instrumen untuk memastikan kesiapan sistem secara keseluruhan sesuai dengan petunjuk *single line diagram*.



Gambar 2.3 *Single Line Diagram* PLTMH

Sumber: Kemdikbudristek (2024)



Gambar 2.4 Area dan Komponen Utama PLMTH

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

c. Memeriksa Sistem Keselamatan dan Proteksi



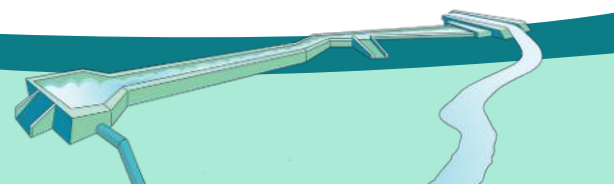
Gambar 2.5 *Circuit Breaker*

Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

Sebelum PLTMH dijalankan, penting untuk memastikan semua alat pelindung dan sistem keselamatan berfungsi dengan baik guna mencegah potensi bahaya. Pemeriksaan meliputi kondisi saklar pemutus (*circuit breaker*) dan sistem pentanahan (*grounding*) yang harus terpasang dengan benar dan dalam kondisi operasional. Selain itu, pelindung terhadap tegangan lebih (*surge arrester*) dan perangkat pengaman dari arus hubung singkat perlu diperiksa untuk menjamin sistem tidak mengalami kerusakan akibat gangguan listrik. Tak kalah penting, papan tanda keselamatan dan jalur evakuasi juga harus tersedia dan terlihat jelas agar siap digunakan jika terjadi situasi darurat.

d. Memeriksa Sumber Daya Air

Pastikan bahwa debit air yang mengalir mencukupi sesuai kapasitas desain PLTMH. Pengukuran debit dapat dilakukan secara manual dengan metode pengukuran penampang aliran atau menggunakan alat ukur *flowmeter* otomatis untuk hasil yang lebih akurat dan berkelanjutan. Debit air yang terlalu sedikit akan menyebabkan turbin tidak berputar pada kecepatan optimal sehingga menghasilkan listrik yang rendah atau tidak stabil. Sebaliknya, debit yang terlalu besar tanpa sistem pengendalian seperti bak pelimpah (*spillway*) dapat menimbulkan tekanan berlebih pada sistem pipa pesat dan merusak komponen turbin, seperti *runner* dan poros. Debit minimum sangat bergantung pada desain *head* dan kapasitas. Dalam kasus *head* 12 m dan daya 50 kW, debit minimum operasional ± 70 liter/detik dengan mengacu ke rumus dasar PLTMH $P = \eta \times \rho \times g \times Q \times H$.





Gambar 2.6 *Flowmeter*

Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

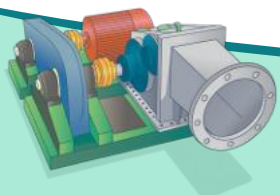
Lebih dari itu, kualitas air sangat berpengaruh terhadap umur teknis turbin. Air yang mengandung sedimen, pasir, lumpur, atau kerikil dapat menyebabkan abrasi pada sudu-sudu turbin, khususnya jenis turbin impuls seperti Pelton. Partikel keras yang terbawa air dengan kecepatan tinggi akan menabrak permukaan logam turbin dan menyebabkan erosi. Jika terus berlangsung, hal itu dapat merusak keseimbangan turbin dan menurunkan efisiensi secara drastis. Air berlumpur juga dapat menyumbat *nozzle* atau saluran air, menyebabkan *overheating* atau turbulensi berlebihan di dalam rumah turbin.

e. Memeriksa Sistem Kelistrikan dan Instrumentasi

Langkah penting berikutnya dalam persiapan pengoperasian PLTMH ialah memastikan bahwa sistem kelistrikan dan instrumentasi berfungsi dengan baik. Pengecekan dilakukan pada kabel sistem kontrol untuk memastikan tidak ada sambungan yang longgar atau rusak. Selain itu, kabel distribusi, sistem *grounding*, dan isolasi harus diperiksa untuk memastikan tidak ada kerusakan fisik atau risiko korsleting. Panel monitoring juga perlu dicek secara menyeluruh untuk memastikan semua parameter teknis seperti RPM, tegangan, frekuensi, dan daya *output* dapat terbaca dengan akurat sehingga sistem dapat beroperasi secara aman dan optimal.

f. Memeriksa Beban dan Jaringan Distribusi

Sebelum sistem dijalankan, lakukan simulasi beban untuk memeriksa kesiapan jaringan distribusi. Pastikan tidak ada gangguan pada jalur distribusi listrik dan semua beban (lampu dan peralatan) telah terhubung dengan benar dan sesuai daya yang tersedia.



g. Mencatat dalam Log Awal

Sebelum *start-up*, penting untuk mencatat semua hasil pemeriksaan awal dalam *logbook* operasional. Ini termasuk tanggal, waktu, kondisi setiap komponen, serta tindakan yang dilakukan jika ditemukan masalah. Hal ini penting sebagai dasar evaluasi dan tindak lanjut dalam pemeliharaan.

Kegiatan persiapan sebelum pengoperasian PLTMH bukan hanya bersifat teknis, tetapi juga bagian dari budaya kerja profesional dan keselamatan kerja. Dengan melakukan pemeriksaan menyeluruh, kamu tidak hanya melatih keterampilan teknis, tetapi juga mengembangkan sikap tanggung jawab dan kesadaran terhadap keandalan sistem PLTMH.



Gambar 2.7 Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTMH

Aktivitas 2.1 Mempersiapkan Pengoperasian PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu mempersiapkan tahapan pemeriksaan awal sebelum mengoperasikan PLTMH.

Langkah-Langkah:

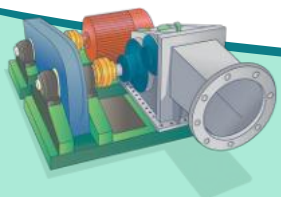
Yuk, jadi teknisi andal sejak awal! Sebelum PLTMH dioperasikan, semua komponen harus diperiksa agar sistem bekerja dengan aman dan efisien.

Studi Kasus

Sebuah PLTMH dengan kapasitas 50 kW di Desa Sumber Energi telah berhenti beroperasi selama 2 hari untuk pemeliharaan saluran air. Hari ini, debit air telah kembali normal. Sebelum turbin dinyalakan, tim operator harus melakukan pemeriksaan menyeluruh untuk memastikan pembangkit siap beroperasi dengan aman, efisien, dan berkelanjutan. Kondisi lapangan saat ini ialah: saringan (*trash rack*) terlihat sedikit tertutup daun kering, katup pengatur aliran air (*main inlet valve*) dalam posisi tertutup, oli pelumas pada *bearing* turbin terakhir diganti 3 bulan lalu, panel kontrol menunjukkan lampu indikator *overvoltage protection* masih menyala, dan saluran pembuangan (*tailrace*) terlihat agak tertutup sedimen.

Berdasarkan studi kasus di atas, kerjakanlah soal-soal berikut.

1. Sebutkan minimal 6 komponen utama PLTMH yang harus diperiksa sebelum pengoperasian. Kemudian, jelaskan fungsi utamanya.
2. Berdasarkan kondisi lapangan di studi kasus di atas, klasifikasikan komponen yang perlu diprioritaskan pemeriksaannya ke dalam kategori: krusial untuk keselamatan, operasional rutin, dan tidak mendesak. Berikan alasan teknis untuk setiap kategori.
3. Mengapa pemeriksaan *trash rack* yang terlihat tertutup daun kering tetap penting dilakukan meskipun debit air terlihat cukup besar? Jelaskan kaitannya dengan keselamatan, keberlanjutan operasi, dan tanggung jawab operator.
4. Lakukan simulasi pemeriksaan awal di *mock-up* PLTMH sekolah (atau menggunakan gambar skematik). Periksa setiap komponen yang disebut di studi kasus di atas, catat hasil temuan, dan laporkan rekomendasi tindakan sebelum *start-up*.



5. Setelah melakukan pemeriksaan simulasi, identifikasi satu kesalahan atau kelalaian yang kamu atau timmu lakukan. Jelaskan penyebabnya, dampak potensial terhadap operasi, dan langkah perbaikan yang akan kamu ambil di operasi berikutnya.

2. Pengoperasian Peralatan Bantu PLTMH

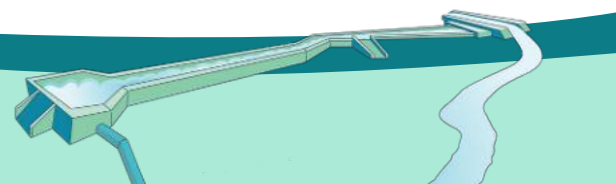
Dalam sistem PLTMH, peralatan bantu memegang peran penting dalam mendukung kelancaran, keselamatan, dan efisiensi operasi pembangkit. Peralatan bantu bukanlah komponen utama penghasil listrik, tetapi mendukung kinerja sistem utama seperti turbin dan generator agar bekerja secara optimal. Berikut ini tahapan mengoperasikan peralatan bantu.

a. Mengoperasikan Pintu Air



Gambar 2.8 Pintu Air

Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)



Pintu air (*gate valve* atau *intake gate*) merupakan komponen pertama yang perlu dioperasikan sebelum air masuk ke saluran pipa pesat (*penstock*). Pengoperasian pintu air dilakukan dengan hati-hati menggunakan tuas mekanik atau sistem katup otomatis, bergantung pada desain PLTMH. Membuka pintu air dilakukan secara bertahap agar tekanan air tidak mendadak dan merusak komponen sistem hilir. Sebelum membuka pintu air, petugas harus memastikan bahwa saluran air bebas dari sampah atau endapan yang bisa menyumbat.

b. Mengoperasikan Saringan Sampah



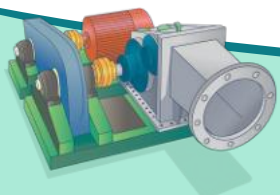
Gambar 2.9 Saringan Sampah

Sumber: Zainul/Kemdikbudristek(2024)

Operator harus memastikan bahwa alat pembersih saringan (*manual screen cleaner*) siap digunakan sebelum sistem dinyalakan. Pengoperasian saringan sampah (*trash rack* dan *manual screen cleaner*) dilakukan secara berkala, terutama saat debit air tinggi atau setelah hujan deras.

c. Mengoperasikan Katup Udara

Katup udara (*air vent valve*) ialah alat bantu yang digunakan untuk mengeluarkan udara dari dalam pipa pesat (*penstock*) sebelum air dialirkan ke turbin. Udara yang terjebak dapat menyebabkan tekanan kejut air dan menurunkan efisiensi sistem. Operator harus membuka katup udara saat pengisian awal *penstock* dan menutupnya kembali setelah aliran air stabil. Prosedur ini wajib diikuti untuk menghindari kerusakan pipa atau gangguan operasi.



d. Memeriksa dan Mengetes Sistem Pelumasan Manual

Beberapa jenis turbin PLTMH seperti *cross-flow* atau *pelton* memerlukan pelumasan pada *bearing* atau porosnya. Sistem pelumasan manual menggunakan pompa tangan atau wadah oli harus dioperasikan sebelum dan selama sistem berjalan, sesuai jadwal. Operator harus mengetahui jenis pelumas yang sesuai, titik pelumasan utama, serta frekuensi pelumasan berdasarkan jam operasi atau rekomendasi pabrikan.

e. Memeriksa dan Mengetes Sistem Peringatan dan Keselamatan

Sistem peringatan dan keselamatan (*alarm* dan *emergency stop*) merupakan bagian penting dari peralatan bantu untuk menjaga keselamatan operator dan sistem. Tombol darurat harus dites secara berkala dan berada di lokasi yang mudah dijangkau. Operator juga harus memahami kondisi apa saja yang memerlukan aktivasi tombol darurat, seperti lonjakan tegangan, getaran abnormal, atau kebocoran air besar.

Dalam praktiknya, keberhasilan pengoperasian PLTMH tidak hanya ditentukan oleh kerja turbin dan generator. Keberhasilan pengoperasian PLTMH juga ditentukan juga oleh kesiapan dan keandalan peralatan bantu yang mendukung seluruh sistem.



Gambar 2.10 Diagram Alir Pengoperasian Peralatan Bantu PLTMH

Aktivitas 2.2 Mengoperasikan Peralatan Bantu PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu mengoperasikan peralatan bantu PLTMH.

Langkah-Langkah:

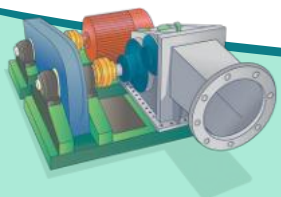
Kita jalankan peralatan bantu PLTMH dengan cermat!

Peralatan bantu seperti pintu air, saringan sampah, sistem pelumasan, dan proteksi listrik berperan penting menjaga kinerja turbin dan generator tetap optimal. Pastikan semua berfungsi sesuai SOP agar operasi PLTMH aman, efisien, dan berkelanjutan.

Studi Kasus

PLTMH Desa Sumber Jaya berkapasitas 100 kW telah beroperasi selama 5 tahun dan memasok listrik ke 80 rumah. Untuk mendukung kelancaran operasional, tersedia beberapa peralatan bantu seperti pompa pelumas, sistem peringatan dan keselamatan, pintu air, saringan sampah, dan katup udara pada turbin. Suatu pagi, operator senior memeriksa dan mengoperasikan peralatan bantu sebelum turbin dihidupkan karena malam sebelumnya terjadi hujan lebat yang menyebabkan peningkatan debit air dan banyak sampah organik masuk ke *intake*.

1. Identifikasi minimal 5 jenis peralatan bantu beserta fungsinya. Hubungkan letaknya dalam sistem (misalnya: sebelum turbin, setelah *forebay*).
2. Berdasarkan kondisi setelah hujan lebat, jelaskan peralatan bantu mana yang perlu dioperasikan lebih awal. Mengapa prioritas tersebut penting untuk kelancaran operasi?
3. Apa sikap kerja yang harus ditunjukkan saat mengoperasikan peralatan bantu, khususnya terkait keselamatan kerja, ketelitian, dan tanggung jawab? Berikan contohnya.
4. Lakukan simulasi langkah operasional untuk menghidupkan dan memeriksa pompa pelumas hingga memastikan sistem bekerja normal. Sertakan indikator keberhasilan pemeriksaan.
5. Setelah melakukan semua tahapan, apa yang akan kamu perbaiki atau tingkatkan dalam prosedur pemeriksaan peralatan bantu di masa depan? Mengapa hal itu penting?



6. Buatlah laporan hasil kerja kelompok tentang peta sistem dan peralatan bantu. Laporan dibuat dalam bentuk poster A2 atau A3. Kamu juga dapat memberikan penjelasan lisan kepada kelas lain (*gallery walk* atau *presentasi*).

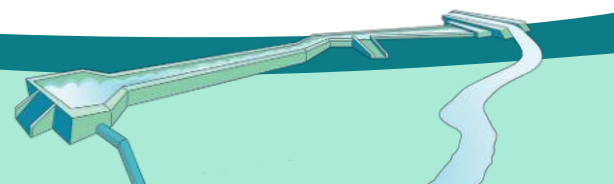
3. Pengoperasian Unit PLTMH

Pengoperasian PLTMH (*turn on & turn off*) merupakan keterampilan krusial bagi calon teknisi energi terbarukan, khususnya dalam menjamin kontinuitas dan keselamatan pasokan listrik berbasis energi air skala kecil. Pada subbab ini, kita akan mempelajari bagaimana prosedur menyalakan (*turn on*) dan mematikan (*turn off*) unit PLTMH dilakukan secara tepat dan sistematis sesuai standar operasional. Bayangkan, kamu sebagai operator utama di desa terpencil yang bergantung sepenuhnya pada listrik dari PLTMH. Keberhasilan kamu dalam menjalankan unit merupakan kunci bagi keberlanjutan energi masyarakat sekitar. Mari, kita mulai dengan memahami setiap tahapan pengoperasian, dari awal hingga akhir.

a. Menyalakan (*Turn On*) PLTMH

Proses menyalakan sebuah PLTMH bukan sekadar menekan tombol “ON”. Proses ini merupakan serangkaian tahapan sistematis yang harus dilakukan secara urut, hati-hati, dan sesuai prosedur standar operasional (SOP). Hal ini demi memastikan keselamatan operator, keandalan sistem, dan efisiensi pembangkitan energi. Berikut ini tahapan utama dalam mengoperasikan PLTMH dari kondisi mati hingga menghasilkan listrik secara stabil.

- 1) Pengisian Saluran Pesat dan Pengeluaran Udara
Setelah dipastikan sistem dapat beroperasi, proses pengisian air ke dalam pipa pesat dimulai dengan membuka pintu air secara perlahan. Dalam tahap ini, katup udara (*air vent valve*) dibuka untuk mengeluarkan udara yang terjebak di dalam pipa. Setelah aliran air stabil dan tidak ada udara, katup ditutup kembali.
- 2) Membuka *Guide Vane* Menuju Turbin
Setelah sistem siap, *guide vane* utama ke turbin dibuka secara bertahap agar turbin mulai berputar secara perlahan. Kecepatan putaran turbin harus dimonitor menggunakan *tachometer* agar sesuai dengan kebutuhan operasional. Jika putaran sudah mendekati nilai nominal, operator harus mempersiapkan sistem kelistrikan untuk menerima energi mekanik.





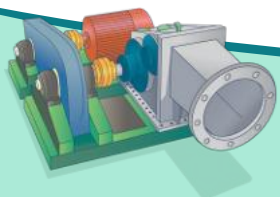
Gambar 2.11 *Guide Vane* pada Turbin
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

3) Sinkronisasi dan Penyalaan Generator

Generator PLTMH biasanya dilengkapi dengan panel kontrol dan sistem sinkronisasi. Setelah turbin mencapai kecepatan 1.500 RPM, generator dihubungkan ke panel kontrol. Sinkronisasi dilakukan agar fasa, frekuensi, dan tegangan *output* sesuai dengan sistem beban atau jaringan (biasanya 220 V/380 V dan 50 Hz). Proses sinkronisasi dapat manual atau otomatis bergantung pada teknologi panel. Setelah parameter sesuai, yaitu tegangan dan frekuensi, *breaker* utama dapat ditutup sehingga energi listrik mengalir ke beban atau jaringan lokal.



Gambar 2.12 Sistem Kontrol Otomatis Frekuensi
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)





Gambar 2.13 Diagram Alir Menyalakan (*Turn On*) PLTMH

4) Mematikan (*Shutdown*) PLTMH

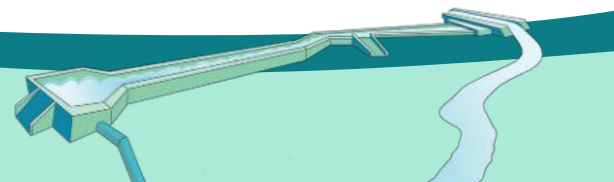
Mematikan PLTMH memerlukan ketelitian dan prosedur sistematis, sama pentingnya dengan proses menghidupkan pembangkit. Tujuannya bukan hanya untuk menghentikan pembangkitan listrik, tetapi juga untuk memastikan tidak terjadi kerusakan sistem, menjaga keselamatan personel, serta mempersiapkan unit untuk pemeliharaan atau *shutdown* jangka panjang. Berikut ini tahapan utama dalam mematikan PLTMH sampai dengan kondisi mati secara stabil.

5) Evaluasi Kebutuhan *Shutdown*

Sebelum mematikan PLTMH, operator harus mengevaluasi alasan penonaktifan. Apakah karena jadwal pemeliharaan berkala, gangguan teknis, atau permintaan penyesuaian beban? Evaluasi ini penting untuk menentukan jenis *shutdown*: rutin (terencana) atau darurat (*emergency shutdown*). Untuk *shutdown* terencana, operator harus melakukan pemberitahuan ke semua pihak terkait (operator distribusi, konsumen lokal, dan manajemen sistem).

6) Pelepasan Beban Secara Bertahap

Langkah awal dalam menonaktifkan PLTMH ialah melepaskan beban secara bertahap dari sistem, yaitu 3-5% dari kapasitas generator. Pemutusan ini dilakukan melalui panel distribusi dengan membuka *breaker* beban sekunder terlebih dahulu, kemudian beban utama. Tujuannya ialah menghindari tegangan lonjakan (*voltage spike*) dan menjaga kestabilan sistem hingga turbin benar-benar berhenti.



7) Pemutusan Breaker Generator

Setelah semua beban dilepas, operator memutus *breaker* utama yang menghubungkan generator ke jaringan distribusi. Proses ini harus dilakukan secara hati-hati dengan memperhatikan indikator arus dan tegangan agar tidak terjadi *flash* atau busur listrik. Pemutusan ini menandai bahwa generator sudah tidak lagi menyuplai daya listrik.

8) Penutupan *Guide Vane* ke Turbin

Langkah selanjutnya ialah menutup *guide vane* utama yang mengalirkan air ke turbin. Penutupan dilakukan perlahan untuk menghindari efek *water hammer* yang dapat merusak struktur pipa. Saat aliran air berkurang, putaran turbin akan menurun secara bertahap hingga berhenti sepenuhnya. Operator perlu memantau perubahan kecepatan dan getaran turbin selama proses ini.

9) Pelepasan Tekanan dan Pengamanan Sistem

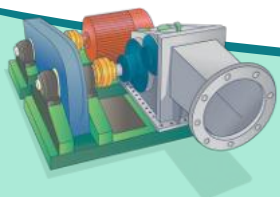
Setelah turbin berhenti, sistem harus dinetralkan dari tekanan sisa. Katup pelepas tekanan (*pressure release valve*) dapat dibuka sebentar untuk memastikan tidak ada tekanan berlebih di dalam pipa pesat. Pastikan juga air tidak tertahan di saluran air yang dapat menimbulkan masalah kelembapan atau korosi.

10) Inspeksi Pasca-*shutdown*

Setelah proses *shutdown* selesai, operator wajib melakukan inspeksi pasca-*shutdown* untuk memastikan semua komponen sistem dalam kondisi aman dan siap untuk siklus operasi berikutnya. Pemeriksaan ini mencakup evaluasi suhu dan getaran pada turbin serta generator guna mendeteksi gejala *overheating* atau keausan komponen. Selain itu, dilakukan inspeksi visual pada bagian mekanik dan kelistrikan untuk mencari adanya residu air, kelembapan berlebih, atau tanda-tanda korosi. Operator juga perlu membandingkan data performa operasional harian dengan standar yang telah ditetapkan guna mengidentifikasi kemungkinan penurunan efisiensi atau pola fluktuasi *output*. Semua hasil pemeriksaan dan kondisi akhir sistem wajib dicatat dalam *logbook* sebagai bagian dari dokumentasi teknis dan pemeliharaan.

11) Dokumentasi dan Pelaporan

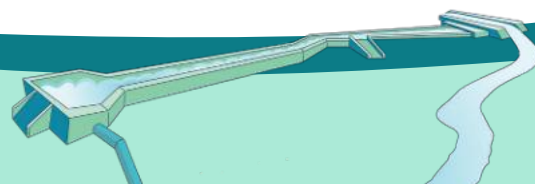
Semua proses *shutdown*, termasuk waktu penonaktifan, kondisi teknis akhir, dan hasil inspeksi harus dicatat dalam log operasi harian. Jika ditemukan indikasi anomali atau penurunan performa, dokumentasi ini akan menjadi dasar untuk evaluasi teknis dan tindakan perbaikan. Evaluasi ini memberikan informasi penyebab kemungkinan penurunan kinerja, serta rekomendasi perbaikan seperti penjadwalan ulang pemeliharaan, penggantian komponen, atau penyesuaian prosedur operasi.



Tabel 2.1 Logbook Penonaktifan PLTMH

Tanggal	Waktu Penonaktifan	Alasan Shutdown	Langkah Shutdown yang Dilakukan	Operator	Gangguan/ Anomali	Tindakan Lanjutan	Catatan Evaluasi
29/04/2025	17.05 WIB	Akhir <i>shift</i> operasi	• Menurunkan beban secara bertahap. • Menutup <i>guide vane</i> utama. • Memutus arus listrik generator. • Pemeriksaan suhu akhir dan suara.	Ahmad	Tidak ada.	-	Prosedur berjalan lancar dan aman.
30/04/2025	16.55 WIB	Pemeliharaan berkala	• Menghentikan suplai air ke turbin. • Memastikan sistem kontrol mati. • Mengunci sistem pengaman mekanik.	Siti	Suhu generator masih tinggi (65 °C).	Pemeriksaan pendinginan	Perlu evaluasi sistem pendingin.
dst	dst	dst	• Sinkronisasi penurunan beban.	dst	dst	dst	dst
			• <i>Shutdown</i> sistem kontrol dan proteksi.				
			• Catat parameter akhir.				

Dengan memahami dan menerapkan prosedur *shutdown* yang tepat, kamu tidak hanya akan menguasai aspek teknis, tetapi juga disiplin keselamatan dan tanggung jawab profesional dalam pengoperasian sistem energi terbarukan. *Shutdown* bukanlah akhir dari proses, tetapi awal dari perawatan dan keberlangsungan operasional yang andal.





Gambar 2.14 Diagram Alir Mematikan (*Turn Off*) PLTMH

Aktivitas 2.3 Pengoperasian PLTMH

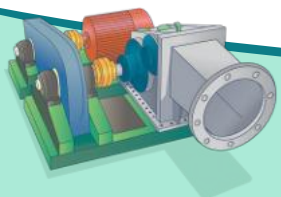
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu mengoperasikan unit PLTMH.

Langkah-Langkah:

Ayo, kita nyalakan PLTMH dengan aman! Prosedur menyalakan pembangkit mikrohidro harus mengikuti urutan agar sistem mekanik, elektrik, dan kontrol bekerja dengan aman dan efisien.



Studi Kasus

PLTMH Sungai Lestari berkapasitas 150 kW telah beroperasi selama 5 tahun. Hari ini, kamu sebagai operator mendapat tugas melakukan *start-up* dan *shutdown* unit PLTMH sesuai jadwal pemeliharaan harian. Cuaca cerah, debit air normal, dan semua peralatan bantu dalam kondisi siaga. Supervisor meminta kamu memastikan prosedur dilakukan sesuai SOP, dengan mempertimbangkan aspek teknis, keselamatan, dan efisiensi energi. Kamu juga diminta melaporkan hasil pengoperasian beserta kendala yang ditemukan.

Berdasarkan kasus di atas, kerjakan hal-hal berikut.

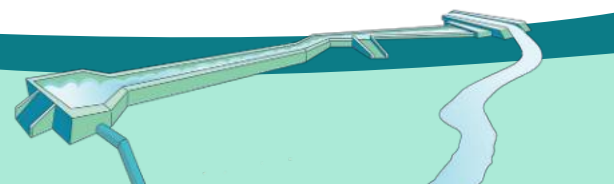
1. Jelaskan urutan umum prosedur *start-up* dan *shutdown* PLTMH sesuai standar operasional (SOP).
2. Dalam kondisi debit air normal, tetapi suhu *bearing* turbin terdeteksi sedikit di atas normal saat *start-up*, apa tindakan yang harus dilakukan? Mengapa?
3. Jelaskan pentingnya disiplin dan komunikasi tim saat *turn on* dan *shutdown* PLTMH, serta dampaknya jika diabaikan.
4. Lakukan simulasi *start-up* PLTMH di bengkel/*trainer kit*/gambar sistem sesuai SOP, termasuk pengecekan indikator. Catat langkah-langkahnya.
5. Setelah melakukan simulasi, tuliskan dua hal yang sudah dilakukan dengan baik, dua hal yang masih perlu perbaikan, dan rencana tindak lanjut untuk meningkatkan kinerja kamu.

4. Monitoring Pengoperasian PLTMH

Setelah PLTMH menyala dan menghasilkan listrik, operator harus memantau beberapa parameter penting seperti tegangan *output*, frekuensi, arus beban, getaran turbin, suhu *bearing*, dan debit air. Parameter ini harus dicatat secara berkala dan dibandingkan dengan standar performa. Monitoring ini penting untuk deteksi dini jika ada deviasi atau indikasi gangguan teknis. Parameter utama yang harus diamati meliputi hal-hal berikut.

a. Putaran Turbin (RPM)

Harus berada dalam batas normal untuk menjaga kestabilan konversi energi mekanik ke listrik misalnya 1.500 RPM.





Gambar 2.15 Pengukuran Putaran Turbin dengan *tachometer*
Sumber: Zainul/ Kemdikbudristek (2024)

b. Daya Keluaran (kW)

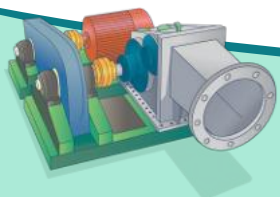
Disesuaikan dengan kapasitas pembangkit dan permintaan beban; fluktuasi daya dapat mengindikasikan masalah pada sistem hidrolik atau kelistrikan.

c. Frekuensi dan Tegangan

Kedua parameter ini sangat kritikal untuk menjaga kesesuaian dengan sistem distribusi. Biasanya, frekuensi dijaga di sekitar 50 Hz (standar Indonesia).



Gambar 2.16 Sistem Monitoring Tegangan dan Frekuensi
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)



d. Efisiensi Sistem

Dihitung dari rasio energi listrik yang dihasilkan dengan potensi energi air yang tersedia.

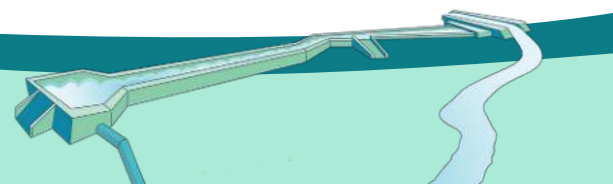
$$\text{Efisiensi} = (\text{Daya Output}) / (\text{Daya Input}) \times 100\%$$

Pengukuran parameter tersebut dapat menggunakan alat ukur teknis seperti multimeter, *clamp meter*, *tachometer*, dan *data logger* untuk mencatat data kinerja. Hasil pengamatan kemudian dibandingkan dengan spesifikasi teknis dari manual pabrikan atau standar SNI/IEC yang berlaku. Jika ditemukan deviasi, perlu dilakukan penelusuran penyebabnya, seperti kerusakan *bearing*, ketidakseimbangan aliran air, atau penurunan isolasi kabel.

Tabel 2.2 Standar Parameter Teknis Sistem Kelistrikan PLTMH

Parameter	Satuan	Nilai Standar	Rentang Toleransi	Fungsi & Penjelasan
RPM (Putaran Turbin)	RPM (rotasi/ menit)	750 - 1.500 RPM (bergantung pada jenis turbin dan generator)	± 5% dari nilai nominal	Menunjukkan kecepatan putaran turbin; harus stabil agar sinkronisasi ke generator tetap seimbang.
Tegangan	Volt (V)	220 V (fase tunggal) atau 380 V (tiga fase)	± 5% (misal: 209–231 V)	Tegangan <i>output</i> harus sesuai dengan standar sistem distribusi; fluktuasi dapat merusak peralatan.
Frekuensi	Hertz (Hz)	50 Hz (Indonesia)	± 0,5 Hz (misal: 49,5 – 50,5 Hz)	Frekuensi harus dijaga konstan agar sinkron dengan jaringan dan peralatan pengguna tidak terganggu.
Daya <i>Output</i> (<i>Power</i>)	Watt/ kW/kVA	Sesuai kapasitas desain, contoh: 50 kW untuk PLTMH kecil	90–100% dari kapasitas nominal	Menunjukkan besarnya energi listrik yang dihasilkan. Jika terlalu rendah → indikasi beban tidak seimbang atau sistem tidak efisien.

Semua tahapan pengoperasian harus dicatat dalam log harian, termasuk waktu *start*, kondisi awal, nilai parameter teknis, serta potensi kendala. Dokumentasi ini akan menjadi dasar evaluasi performa sistem dan perencanaan pemeliharaan. Jika ditemukan ketidaksesuaian, operator dapat memberikan catatan rekomendasi untuk perbaikan atau penyesuaian SOP.



Tabel 2.3 Logbook Kinerja Pengoperasian PLTMH

Tanggal	Waktu Operasi	RPM Turbin	Tegangan (Volt)	Frekuensi (Hz)	Daya Keluaran (kW)	Suhu Generator (°C)	Gangguan Ditemui	Tindakan Korektif	Catatan Evaluasi
29/04/2025	08.00–12.00	1.500	230	49.8	5,2	60	Tidak ada	-	Operasi stabil
29/04/2025	13.00–17.00	1.480	228	49.5	4,8	63	Suara getaran ringan	Pemeriksaan baut pengikat	Disarankan pemeriksaan lanjutan
30/04/2025	08.00–12.00	1.500	230	50.0	5,1	59	Tidak ada	-	Performa optimal
30/04/2025	13.00–17.00	1.495	229	49.9	5,0	62	Penurunan tegangan	Cek sambungan <i>output</i>	Stabil setelah penyesuaian
dst	dst	dst	dst	dst	dst	dst	dst	dst	dst

Aktivitas 2.4 Monitoring Operasional PLTMH

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu melakukan monitoring operasional pengoperasian PLTMH secara sistematis dan kritis.

Langkah-Langkah:

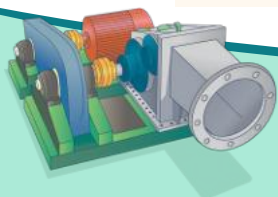
“Siapa jadi mata dan telinga PLTMH?”

Monitoring operasional adalah kunci untuk memastikan pembangkit bekerja stabil, aman, dan efisien. Catat setiap perubahan parameter dengan teliti, analisis penyebabnya, dan ambil langkah cepat sesuai SOP agar PLTMH tetap andal melayani kebutuhan energi.

Studi Kasus

PLTMH Sungai Lestari berkapasitas 150 kW sedang beroperasi dalam kondisi beban puncak. Sebagai operator magang, kamu ditugaskan untuk melakukan pemantauan parameter penting: tegangan *output*, frekuensi, arus beban, getaran turbin, suhu *bearing*, dan debit air. Data parameter harus dicatat setiap 15 menit, dibandingkan dengan batas normal yang tercantum di SOP. Pada saat pemantauan, kamu mendapati:

1. Tegangan *output* sedikit turun dari standar 400 V menjadi 392 V
2. Frekuensi stabil di 50 Hz
3. Arus beban meningkat 5% dari normal



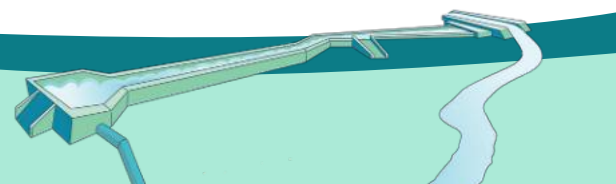
4. Getaran turbin dalam batas aman
5. Suhu *bearing* naik 7°C di atas normal
6. Debit air sedikit menurun karena pintu air tertutup sebagian akibat sampah yang menyangkut

Supervisor meminta kamu menganalisis situasi, menentukan langkah penanganan, menjaga koordinasi dengan tim, dan membuat laporan singkat. Berdasarkan kasus di atas, selesaikan hal-hal berikut.

1. Jelaskan batas normal untuk tegangan, frekuensi, arus, suhu *bearing*, dan debit air pada PLTMH 150 kW sesuai SOP.
2. Berdasarkan data di studi kasus, jelaskan analisis awal kondisi PLTMH dan potensi penyebab perubahan pada tegangan dan suhu *bearing*.
3. Mengapa koordinasi tim dan ketelitian pencatatan data sangat penting saat melakukan monitoring parameter PLTMH? Apa dampaknya jika hal ini diabaikan?
4. Lakukan simulasi monitoring parameter PLTMH (melalui *trainer kit* atau lembar data simulasi berikut), catat hasil, dan bandingkan dengan nilai normal di SOP, mana yang sesuai dan tidak? Masukkan hasilnya pada tabel berikut. Kemudian, jelaskan konsekuensi dari ketidaksesuaian tersebut.

Hari	Debit Air (L/s)	Tekanan Air (bar)	Tegangan Output (V)	Frekuensi (Hz)	Arus Beban (A)	Suhu Generator (°C)	Status Operasional
Batas Normal	≥ 80	≥ 2,0	210–230	49,5–50,5	≤ 14,0	≤ 65	Semua normal
1	85	2,1	217	49,8	13,5	60	
2	78	1,9	210	49,5	14,2	62	
3	72	1,8	202	48,9	14,9	65	
4	70	1,7	199	48,5	15,3	67	
5	69	1,6	197	48,3	15,5	69	

5. Setelah melakukan simulasi, tuliskan dua hal yang sudah dilakukan dengan baik, dua hal yang masih perlu perbaikan, dan rencana tindak lanjut untuk meningkatkan keterampilan monitoring kamu.



B. Pemeliharaan PLTMH

Tanpa pemeliharaan yang tepat dan berkala, kinerja sistem akan menurun, risiko kerusakan meningkat, dan kontinuitas suplai energi terancam. Pengetahuan sebelumnya tentang fungsi dan susunan komponen utama akan sangat membantu dalam memahami prosedur pemeriksaan, identifikasi gangguan, serta tindakan preventif dan korektif pada sistem PLTMH. Maka, siapkah kamu menjaga keandalan dan efisiensi sistem PLTMH melalui praktik pemeliharaan yang profesional?

1. Pemeliharaan Konstruksi Sipil PLTMH

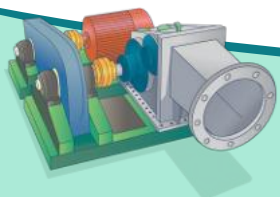
Konstruksi sipil dalam sistem PLTMH merupakan fondasi utama yang menopang keandalan dan kelangsungan operasional pembangkit. Komponen-komponen harus dijaga dalam kondisi optimal agar tidak terjadi gangguan aliran air maupun kerusakan struktural yang berisiko pada keselamatan kerja dan efisiensi pembangkitan. Oleh karena itu, pemeliharaan konstruksi sipil menjadi kegiatan rutin yang harus dilakukan secara berkala dan sistematis.

Pemeliharaan dimulai dari pemeriksaan visual terhadap bendungan atau saluran penyadap (*intake*) untuk memastikan tidak ada retakan, erosi, atau kebocoran air yang dapat mengganggu aliran ke saluran pembawa. Saluran pembawa juga harus diperiksa dari kemungkinan sedimentasi, endapan lumpur, sampah, atau tumbuhan liar yang dapat menyumbat aliran air. Kegiatan pembersihan saluran secara manual maupun mekanis menjadi bagian penting dalam menjaga keberlanjutan aliran.

Pada struktur bak penenang, pemeriksaan dilakukan untuk melihat keberadaan endapan, lumut berlebih, serta kondisi pintu air atau saringan (*trash rack*). Bak penenang yang penuh endapan dapat mengurangi kapasitas tampung dan menyebabkan air meluap sehingga perlu dibersihkan secara berkala. Sementara itu, saringan harus dibersihkan dari sampah organik dan anorganik untuk mencegah kerusakan turbin.

Pipa pesat merupakan jalur penting pengaliran air bertekanan ke turbin. Pemeriksaan dilakukan untuk mendeteksi adanya korosi, kebocoran, atau kerusakan pada sambungan. Pengecatan ulang dan perbaikan las merupakan tindakan preventif yang umum dilakukan. Selain itu, perlu dipastikan fondasi penyangga pipa masih stabil dan tidak mengalami pergeseran akibat gerakan tanah atau tekanan air.

Terakhir, rumah pembangkit sebagai pusat pengoperasian harus dipelihara dari sisi bangunan dan keamanannya. Rutin dilakukan inspeksi terhadap atap, dinding, dan lantai bangunan agar tidak ada keretakan atau kebocoran yang mengancam keselamatan peralatan



dan operator. *Drainase* sekitar bangunan juga harus dijaga berfungsi baik agar air hujan tidak menggenang dan merusak fondasi.

Melalui pemeliharaan konstruksi sipil yang disiplin, sistem PLTMH dapat beroperasi dengan stabil dan aman. Kamu diharapkan tidak hanya mampu melakukan tugas teknis pemeliharaan, tetapi juga mampu mengevaluasi risiko kerusakan serta merancang tindakan preventif yang tepat.

Tabel 2.5 Pemeliharaan Komponen Konstruksi Sipil PLTMH

Komponen Konstruksi Sipil	Kegiatan Pemeliharaan	Tujuan/Manfaat
Bendungan/Saluran Penyadap (<i>Intake</i>)	Pemeriksaan visual untuk retakan, erosi, kebocoran	Memastikan aliran air tidak terganggu dan menghindari kerusakan.
Saluran Pembawa	Pemeriksaan sedimentasi, endapan lumpur, sampah, tumbuhan liar	Menjaga kelancaran aliran air ke turbin.
Bak Penenang	Pemeriksaan endapan, lumut, kondisi pintu air dan saringan	Menghindari kapasitas bak menurun dan meluapnya air.
Pipa Pesat	Pemeriksaan korosi, kebocoran, kerusakan sambungan	Menjaga pengaliran air bertekanan ke turbin tetap optimal.
Fondasi Penyangga Pipa	Pemeriksaan stabilitas fondasi	Mencegah pergeseran akibat gerakan tanah atau tekanan air.
Rumah Pembangkit	Inspeksi atap, dinding, lantai, drainase	Menjamin keselamatan peralatan dan operator.

Aktivitas 2.5 Pemeliharaan Konstruksi Sipil PLTMH

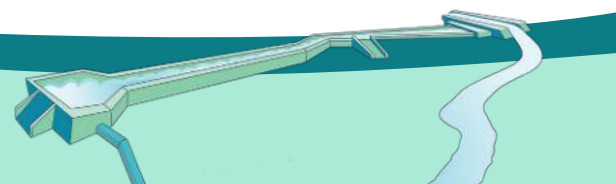
Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memelihara konstruksi sipil PLTMH.

Langkah-Langkah:

Mari, kita belajar menjaga kekuatan fisik PLTMH! Konstruksi sipil seperti bendung, saluran pembawa, bak pengendap, dan bak penenang harus rutin diperiksa agar tidak rusak atau mengganggu aliran air.



Studi Kasus

Desa Suka Maju memiliki PLTMH berkapasitas 30 kW yang sudah beroperasi selama 7 tahun. Sistem ini memanfaatkan saluran irigasi sungai kecil yang dibangun dengan konstruksi sipil sederhana: bendungan, saluran pembawa, bak penenang, pipa pesat, dan bangunan rumah pembangkit. Dalam beberapa minggu terakhir, warga mengeluhkan turunnya daya listrik saat hujan deras. Operator menemukan beberapa masalah berikut.

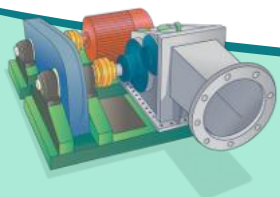
1. Lumpur dan sampah kayu menumpuk di bak penenang.
2. Beberapa bagian saluran pembawa mengalami retakan kecil dan kebocoran.
3. Pintu air di bendungan pengarah mulai aus dan sulit dibuka-tutup.
4. Saluran pembuangan air di *powerhouse* tersumbat ranting.

Operator berencana mengajak siswa SMK untuk melakukan *site visit* sebagai bagian dari pembelajaran Pemeliharaan Konstruksi Sipil. Tugas kamu sebagai berikut.

1. Identifikasi bagian-bagian konstruksi sipil utama PLTMH yang wajib diperiksa secara berkala.
2. Berdasarkan kasus di atas, identifikasi potensi penyebab penurunan kinerja PLTMH saat hujan deras dari sisi konstruksi sipil. Jelaskan hubungannya dengan aliran air.
3. Mengapa penting bagi operator dan teknisi untuk selalu melakukan pemeriksaan rutin pada konstruksi sipil, bahkan ketika PLTMH masih beroperasi normal? Kaitkan jawaban dengan sikap tanggung jawab, kepedulian lingkungan, dan keselamatan kerja.
4. Susun langkah kerja pemeliharaan untuk mengatasi masalah lumpur di bak penenang dan kebocoran di saluran pembawa agar PLTMH dapat kembali beroperasi optimal.
5. Setelah mempelajari kasus ini, apa hal paling penting yang kamu pelajari tentang pemeliharaan konstruksi sipil PLTMH? Bagaimana kamu akan menerapkannya jika menjadi teknisi lapangan di masa depan?

2. Pemeliharaan Sistem Mekanik PLTMH

Sistem mekanik merupakan jantung dari proses konversi energi air menjadi energi gerak dalam PLTMH. Kinerja optimal sistem mekanik sangat bergantung pada rutinitas pemeliharaan yang tepat dan sistematis, baik bersifat preventif (pencegahan) maupun korektif (perbaikan). Pemeliharaan turbin dimulai dari inspeksi visual terhadap sudu

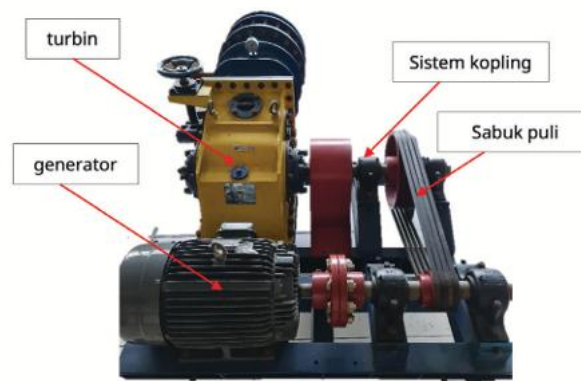


(*runner*), poros (*shaft*), rumah turbin, dan *bearing* (bantalan). Pemeriksaan ini bertujuan untuk mendeteksi adanya keausan, karat, retakan, atau endapan yang dapat mempengaruhi efisiensi turbin. Pembersihan sudu dari lumut, pasir, atau sampah yang terbawa aliran air menjadi kegiatan dasar yang harus dilakukan secara berkala. Selain itu, pelumasan *bearing* perlu dilakukan sesuai jadwal dan menggunakan pelumas yang direkomendasikan pabrikan agar gesekan minimal dan umur pakai meningkat.

Sistem transmisi mekanik, seperti kopling, *gearbox* (jika digunakan), dan sabuk puli, juga memerlukan perhatian khusus. Kopling antara poros turbin dan generator harus dipastikan selaras (*alignment*) untuk mencegah getaran atau keausan dini. *Gearbox* perlu dicek pelumasnya secara berkala, termasuk penggantian oli, penyetelan gigi, dan pembersihan ruang transmisi dari kotoran. Pada sistem sabuk puli, tegangan sabuk harus sesuai standar agar tidak selip atau putus. Perlu dilakukan inspeksi rutin terhadap kondisi fisik sabuk dan puli dari keausan atau keretakan.

Selanjutnya, pengencangan baut dan mur pada semua bagian mekanik harus menjadi bagian dari daftar periksa inspeksi. Getaran saat operasi dapat mengendurkan sambungan mekanik dan menyebabkan ketidaksejajaran poros atau bahkan kecelakaan kerja. Selain itu, kamu juga harus memahami cara menggunakan alat ukur getaran (*vibration meter*) atau termometer inframerah untuk mendeteksi adanya masalah pada bantalan atau *gearbox* sebelum kerusakan terjadi. Salah satu indikator pemeliharaan sistem mekanik yang berhasil ialah kestabilan putaran turbin dan generator (RPM), minimnya getaran, dan efisiensi daya mekanik yang tinggi.

Dengan membiasakan pemeliharaan sistem mekanik yang benar, PLTMH akan dapat beroperasi lebih efisien, aman, dan berumur panjang. Pembelajaran ini akan menanamkan sikap disiplin, teliti, serta tanggap terhadap gejala teknis di lapangan.



Gambar 2.17 Sistem Mekanik PLTMH
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

Tabel 2.6 Pemeliharaan Komponen Sistem Mekanik PLTMH

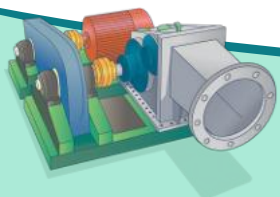
Komponen	Aktivitas Pemeliharaan	Tujuan/Manfaat
Turbin (<i>Runner, Shaft, Bearing, Housing</i>)	Inspeksi visual untuk keausan, retakan, karat, endapan	Menjaga efisiensi turbin dan mencegah kerusakan dini.
	Pembersihan sudu secara berkala	Mempertahankan performa konversi energi.
	Pelumasan <i>bearing</i> sesuai jadwal dan spesifikasi pelumas	Mengurangi gesekan dan memperpanjang umur <i>bearing</i> .
Sistem Kopling	Cek keselarasan (<i>alignment</i>) antara turbin dan generator	Mencegah getaran dan keausan mekanik.
	Inspeksi kondisi fisik kopling	Menghindari potensi kerusakan saat beban operasi tinggi.
<i>Gearbox</i> (jika digunakan)	Cek dan ganti pelumas secara berkala	Menjamin kinerja transmisi daya.
	Penyetelan gigi dan pembersihan	Mengurangi keausan gigi.
Sabuk Puli	Pemeriksaan tegangan sabuk	Mencegah selip atau putus saat beroperasi.
	Cek kondisi fisik sabuk dan puli (retak/aus)	Mencegah kegagalan sistem transmisi.
Sambungan Baut dan Mur	Pengencangan ulang semua sambungan mekanik	Menjaga integritas sistem dan keselamatan kerja.
Monitoring Getaran dan Suhu	Gunakan <i>vibration</i> meter dan termometer inframerah	Deteksi dini masalah pada <i>bearing</i> dan <i>gearbox</i> .
Parameter Operasi (RPM)	Cek kestabilan putaran turbin dan generator (RPM)	Indikator efisiensi dan keseimbangan sistem mekanik.

Aktivitas 2.6 Memelihara Sistem Mekanik PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memelihara secara rutin sistem mekanik PLTMH.



Langkah-Langkah:

Jadilah teknisi yang terorganisir! Sistem mekanik PLTMH harus dirawat secara berkala untuk mencegah kerusakan serius dan meningkatkan usia pakai.

Studi Kasus

PLTMH di Desa Sumber Energi sudah beroperasi selama 10 tahun. Dalam inspeksi bulanan terakhir, teknisi menemukan gejala sebagai berikut.

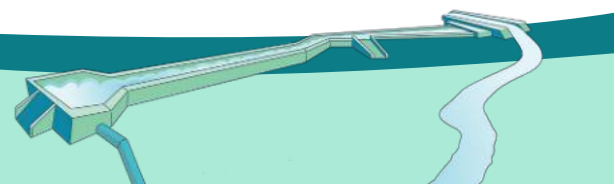
1. Terjadi getaran berlebih pada poros turbin saat beban puncak.
2. Suara abnormal terdengar dari *gearbox* ketika turbin mencapai putaran maksimum.
3. Terdapat kebocoran oli pada *bearing housing*.
4. *Output* daya listrik menurun sekitar 8% dari rata-rata bulan sebelumnya.

PLTMH ini melayani 60 rumah tangga, sekolah, dan satu puskesmas. Gangguan yang terjadi dikhawatirkan memengaruhi suplai listrik desa, terutama pada malam hari. Berdasarkan kasus di atas, kerjakan hal-hal berikut.

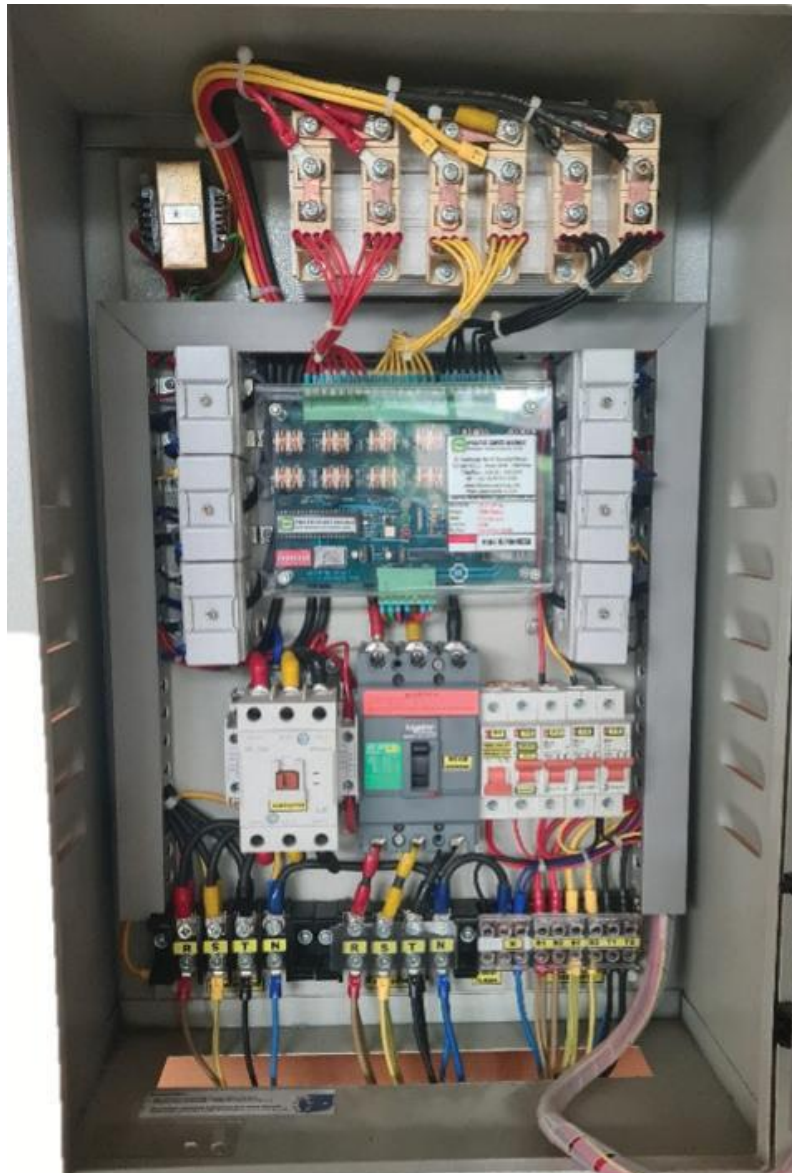
1. Jelaskan komponen utama sistem mekanik PLTMH yang perlu diperiksa secara rutin untuk memastikan kinerja optimal.
2. Berdasarkan gejala pada studi kasus, identifikasi kemungkinan penyebab penurunan *output* daya dan hubungkan dengan komponen mekanik yang relevan.
3. Bagaimana sikap yang sebaiknya ditunjukkan teknisi dalam menangani masalah ini agar selaras dengan prinsip keselamatan kerja dan keberlanjutan lingkungan?
4. Rancang langkah-langkah pemeliharaan untuk mengatasi kebocoran oli pada *bearing housing* dan mengurangi getaran berlebih pada poros turbin.
5. Setelah melakukan perbaikan, langkah evaluasi apa yang perlu dilakukan teknisi untuk memastikan masalah tidak terulang, dan apa yang bisa ditingkatkan dari prosedur pemeliharaan yang telah dilakukan?

3. Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTMH

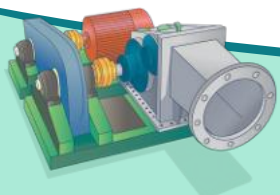
Sistem kelistrikan dalam PLTMH mencakup berbagai komponen vital yang berfungsi untuk menghasilkan, mengatur, dan mendistribusikan energi listrik secara andal dan aman. Komponen utamanya antara lain generator, panel distribusi, sistem monitoring, sistem proteksi, dan sistem kendali otomatis. Pemeliharaan sistem ini bertujuan untuk memastikan kontinuitas suplai listrik, mencegah gangguan teknis, serta meminimalisir risiko bahaya kelistrikan.



Pemeliharaan generator dimulai dengan inspeksi visual dan pengujian parameter kelistrikan. Pemeliharaan dilakukan dengan memeriksa sambungan kabel, kondisi isolasi, dan kebersihan rumah generator dari debu, oli, atau kelembapan berlebih yang dapat menyebabkan korsleting. Pengukuran tegangan *output*, arus, dan faktor daya menjadi bagian penting untuk mendeteksi apakah generator bekerja dalam rentang kinerja optimal. Selain itu, penting untuk melakukan pengukuran tahanan isolasi lilitan dengan *megger*, serta pemeriksaan terhadap sistem pendinginan generator jika tersedia.



Gambar 2.18 Panel Sistem Kontrol
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)



Panel distribusi listrik yang terdiri atas MCB (*Miniature Circuit Breaker*), MCCB (*Molded Case Circuit Breaker*), kontaktor, serta pengaman lainnya harus dicek secara berkala. Kegiatan ini mencakup pengencangan terminal, pembersihan dari debu dan karat, serta pengujian fungsional masing-masing perangkat. Sistem *grounding* juga harus diperiksa untuk memastikan tidak ada hambatan tinggi yang dapat mengganggu pengamanan sistem saat terjadi gangguan listrik.



Gambar 2.19 Kontraktor, MCCB, & MCB
Sumber: Zainul/Kemdikbudristek (2024)

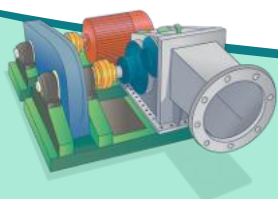
Sistem monitoring dan kontrol otomatis, seperti kontrol level air, RPM, tegangan, dan frekuensi, perlu diperiksa baik perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunaknya (*software*) jika ada. Sensor-sensor seperti sensor suhu, sensor tekanan air, dan sensor kecepatan rotasi turbin harus dikalibrasi secara berkala agar data yang dihasilkan akurat. Pemeriksaan kabel komunikasi, *display panel*, dan *logic controller* (PLC jika digunakan) penting untuk menjamin interkoneksi berjalan normal dan responsif terhadap kondisi operasi lapangan.

Dalam sistem proteksi, seperti *relay* arus lebih (*overcurrent*), tegangan lebih (*overvoltage*), dan frekuensi abnormal, dilakukan simulasi untuk menguji kecepatan dan keandalan kerja sistem ketika gangguan terjadi. Pemeriksaan *fuse* dan sistem otomatis pemutus beban juga menjadi bagian dari daftar periksa penting.

Semua kegiatan pemeliharaan harus dicatat dalam *logbook* harian, disertai temuan, tindakan koreksi, dan rekomendasi untuk pemeliharaan jangka panjang. Selain aspek teknis, prinsip keselamatan kerja kelistrikan juga menjadi fokus utama: penggunaan alat pelindung diri seperti sarung tangan isolasi, sepatu pelindung (*safety shoes*), serta alat pengukur tegangan harus menjadi prosedur wajib sebelum melakukan inspeksi.

Tabel 2.7 Pemeliharaan Komponen Konstruksi Sipil PLTMH

Komponen	Aktivitas Pemeliharaan	Tujuan / Manfaat
Generator	Inspeksi visual untuk keausan, retakan, karat, endapan.	Menjaga efisiensi turbin dan mencegah kerusakan dini.
	Inspeksi visual kondisi fisik dan kebersihan.	Mencegah korsleting akibat debu, oli, atau kelembapan.
	Cek sambungan kabel dan kondisi isolasi.	Menjamin konduktivitas dan mencegah gangguan kelistrikan.
	Ukur tegangan, arus, dan faktor daya (<i>power factor</i>).	Memastikan kinerja generator dalam batas normal.
	Ukur tahanan isolasi lilitan dengan <i>megger tester</i> .	Mendeteksi potensi kerusakan pada belitan stator.
	Periksa sistem pendingin (jika ada)	Menghindari <i>overheating</i> .
Panel Distribusi	Inspeksi dan pengencangan terminal pada MCB, MCCB, kontaktor.	Menghindari <i>loose connection</i> dan potensi panas berlebih.
	Pembersihan debu dan karat.	Menjaga keandalan saklar dan pengaman.
	Uji fungsi pengaman (<i>breaker</i> , kontaktor, dll.).	Memastikan sistem proteksi bekerja saat diperlukan.
	Pemeriksaan sistem <i>grounding</i>	Mencegah potensi bahaya saat terjadi gangguan listrik
Sistem Monitoring dan Kontrol	Kalibrasi sensor: suhu, tekanan, kecepatan (RPM), level air.	Menjamin data monitoring akurat dan respons sistem sesuai kondisi lapangan.
	Periksa komunikasi antar-perangkat (kabel, PLC, panel <i>display</i>).	Mendeteksi gangguan komunikasi antarsistem.
	Cek <i>software</i> kontrol (jika berbasis digital).	Memastikan <i>logic controller</i> bekerja sesuai skenario.
Sistem Proteksi	Simulasi proteksi <i>overcurrent</i> , <i>overvoltage</i> , <i>under/overfrequency</i> .	Menjamin respons sistem saat terjadi gangguan listrik.
	Periksa <i>fuse</i> , <i>relay</i> , dan sistem pemutus otomatis.	Mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan listrik.



Komponen	Aktivitas Pemeliharaan	Tujuan / Manfaat
Pencatatan & Dokumentasi	Catat semua hasil inspeksi, tindakan koreksi, dan rekomendasi di <i>logbook</i> harian.	Memudahkan analisis histori perawatan dan prediksi kerusakan.

Aktivitas 2.7– Pemeliharaan Sistem Elektrik PLTMH

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memelihara sistem elektrik PLTMH.

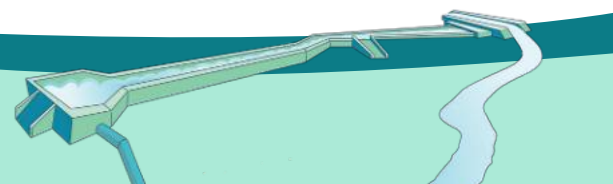
Langkah-Langkah:

Yuk, kita mulai dari *checklist* harian teknisi! Sistem elektrik pada PLTMH terdiri atas komponen-komponen vital seperti generator, kabel transmisi, panel kontrol, *grounding*, dan proteksi.

Studi Kasus

PLTMH Sumber Harapan yang berkapasitas 75 kW mengalami gangguan tegangan tidak stabil (fluktuasi $\pm 10\%$) dan sering memicu *circuit breaker* utama. Hasil inspeksi awal menunjukkan adanya indikasi kabel distribusi mulai aus, panel kontrol kotor, serta sistem *grounding* belum pernah diuji ulang sejak instalasi 5 tahun lalu. Pengelola meminta tim teknis melakukan pemeriksaan menyeluruh dan menyusun rencana pemeliharaan untuk mencegah gangguan lebih lanjut. Tugas kamu seperti berikut.

1. Jelaskan komponen utama sistem elektrik PLTMH yang perlu diperiksa secara berkala untuk menjaga kestabilan tegangan dan keandalan operasi.
2. Buatlah urutan prioritas pemeriksaan pada kasus di atas sesuai tingkat urgensinya, sertakan alasan teknis di balik urutan tersebut.
3. Jelaskan sikap kerja yang harus ditunjukkan teknisi saat bekerja di area panel listrik tegangan menengah, khususnya terkait keselamatan kerja dan etika profesional.
4. Simulasikan langkah pemeriksaan sistem *grounding* PLTMH mulai dari persiapan alat ukur hingga interpretasi hasil pengukuran.
5. Menurut kamu, apa risiko jangka panjang jika perawatan sistem elektrik PLTMH diabaikan? Bagaimana kamu sebagai teknisi akan mencegahnya di masa depan?



Uji Kompetensi

A. Menjodohkan

Pasangkan setiap komponen di kolom A dengan jawaban yang sesuai di kolom B.

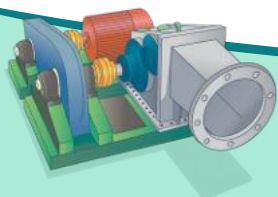
Kolom A – Komponen/Situasi	Kolom B – Fungsi/Dampak/Analisis
A. <i>Trash rack</i> tersumbat oleh ranting dan daun	1. Menyebabkan tekanan air pada <i>penstock</i> meningkat
B. Tekanan tinggi terdeteksi pada pipa pesat (<i>penstock</i>)	2. Dapat menyebabkan getaran dan kavitasi pada turbin
C. Turbin <i>crossflow</i> menerima debit air tidak merata	3. Bertugas menyaring sampah sebelum masuk ke sistem
D. Panel kontrol analog manual	4. Membutuhkan pemantauan visual dan tidak otomatis
E. Langkah awal setelah mendeteksi tekanan tidak norma	5. Hentikan aliran air dan periksa kondisi <i>intake</i>

B. Pilihan Ganda

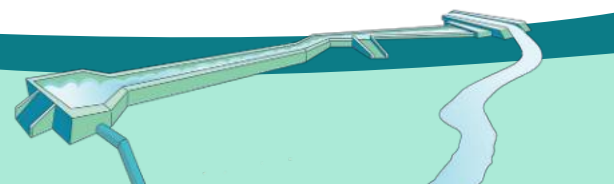
Bacalah studi kasus berikut. Kemudian, jawablah soal-soal berikut dengan cara memilih satu jawaban yang paling tepat.

Sebuah PLTMH di Desa Maju Energi memiliki kapasitas 50 kW. Sistem terdiri atas saluran *intake*, bak penenang, pipa pesat, turbin *crossflow*, generator sinkron, dan panel distribusi. PLTMH ini menggunakan sistem kontrol manual dengan panel analog. Suatu pagi, operator *shift* pagi menemukan debit air cukup stabil, namun tekanan pada *penstock* lebih tinggi dari biasanya. Setelah diperiksa, ditemukan saringan sampah pada saluran masuk (*trash rack*) sebagian tersumbat oleh ranting dan daun.

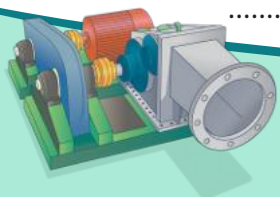
1. Apa fungsi utama dari *trash rack* dalam sistem PLTMH seperti pada kasus di atas?
 - A. Mengatur aliran air ke turbin.
 - B. Menyimpan air sementara.
 - C. Menyaring kotoran agar tidak masuk ke sistem turbin.
 - D. Menaikkan tekanan air dalam pipa pesat.
 - E. Menstabilkan tegangan *output* generator.



2. Apa tindakan pertama yang paling tepat dilakukan oleh operator saat mendeteksi tekanan pipa pesat meningkat akibat *trash rack* tersumbat?
 - A. Menurunkan beban listrik pada panel distribusi.
 - B. Menghidupkan generator secara manual.
 - C. Menambah debit air dari bendungan.
 - D. Membersihkan saringan *trash rack* secara bertahap.
 - E. Mengubah arah aliran air ke saluran pembuang.
3. Jika tekanan pada *penstock* dibiarkan terlalu tinggi, apa risiko teknis yang paling mungkin terjadi pada sistem turbin?
 - A. Komponen turbin seperti *runner* atau poros bisa rusak.
 - B. Generator mengeluarkan arus lebih stabil.
 - C. Turbin berputar lebih efisien.
 - D. Panel kontrol akan otomatis menyesuaikan beban.
 - E. Energi listrik menjadi lebih hemat.
4. Mengapa penting bagi operator untuk melakukan pemeriksaan harian terhadap kondisi *intake* dan *trash rack*?
 - A. Agar air yang masuk ke turbin lebih panas.
 - B. Agar dapat mengurangi rotasi turbin saat beban tinggi.
 - C. Supaya sistem pipa pesat tetap terisi penuh setiap saat.
 - D. Untuk menjaga daya *output* berada di atas kapasitas nominal.
 - E. Menjamin kontinuitas dan keselamatan sistem operasional.
5. Jika kamu ditugaskan membuat protokol pemeriksaan harian PLTMH, komponen mana yang harus diprioritaskan? Mengapa?
 - A. Panel distribusi karena langsung terhubung ke pengguna.
 - B. *Trash rack* dan *intake* karena menjaga kestabilan dan keamanan awal sistem.
 - C. Generator karena menghasilkan listrik.
 - D. Inverter karena mengubah arus DC ke AC.
 - E. Saklar utama karena menentukan *start/stop* sistem.
6. Situasi peningkatan tekanan pada pipa pesat (*penstock*) paling mungkin disebabkan oleh kombinasi faktor berikut ini.
 - A. Terjadinya penyumbatan pada *trash rack* yang menghambat aliran air.
 - B. Penurunan luas aliran masuk sehingga tekanan fluida meningkat.
 - C. Kelebihan beban pada generator sinkron.
 - D. Gangguan sistem kontrol otomatis.
 - E. Volume air tertahan di hulu saluran *intake*.



7. Apa konsekuensi teknis jika operator tetap menyalakan turbin tanpa membersihkan *trash rack* yang tersumbat?
- Turbin dapat beroperasi dalam kondisi kavitasi karena aliran air terganggu.
 - Tekanan tinggi bisa menyebabkan kerusakan pada sambungan pipa pesat.
 - Daya keluaran generator akan meningkat signifikan.
 - Efisiensi sistem hidrolik menurun drastis.
 - Aliran air menjadi tidak stabil dan bisa menyebabkan getaran pada turbin.
8. Langkah-langkah sistematis yang paling tepat dilakukan operator setelah menemukan tekanan tinggi dan saringan tersumbat ialah . . .
- matikan aliran air sementara dari *intake* ke bak penenang
 - menutup *guide vane* secara perlahan
 - tambahkan beban listrik agar tekanan turun otomatis
 - pantau tekanan ulang setelah pembersihan dilakukan
 - catat kondisi anomali ke dalam log harian operasi dan laporkan ke supervisor
- Jelaskan alasannya:
-
-
9. Evaluasilah alternatif berikut ini untuk mencegah kasus serupa terulang. Pilih solusi preventif yang paling sesuai untuk kondisi PLTMH manual.
- Pasang sensor tekanan dan alarm di panel analog untuk mendeteksi tekanan abnormal.
 - Lakukan inspeksi rutin harian pada *trash rack*, terutama saat musim hujan.
 - Ganti semua sistem menjadi kontrol digital otomatis.
 - Tambahkan sistem penyaring pendahulu (*pre-filter*) di hulu *intake*.
 - Tambahkan kapasitas generator agar tekanan lebih stabil.
- Jelaskan alasannya:
-
-
10. Jika kamu ditugaskan merancang prosedur SOP darurat untuk kondisi tekanan *penstock* tinggi akibat *trash rack* tersumbat, apa saja elemen penting yang wajib ada?
- Panduan identifikasi tanda visual tekanan abnormal.
 - Instruksi pembersihan cepat dan aman pada *trash rack*.
 - Panduan perhitungan ulang daya keluaran turbin.
 - Prosedur pelaporan kondisi darurat ke tim teknis.
 - Protokol penghentian sistem secara bertahap dan aman.
- Jelaskan alasannya:
-
-



C. Soal Studi Kasus

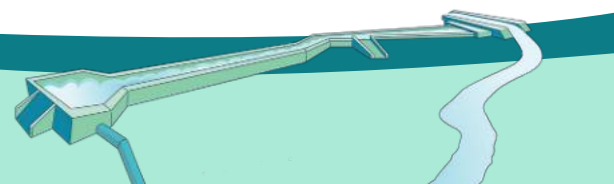
Bacalah kasus berikut untuk menjawab soal nomor 1—5.

PLTMH di Desa Tirta Lestari berkapasitas 75 kW, menggunakan turbin *crossflow*, *head* 15 meter, dan debit rancang 0,7 m³/detik. PLTMH ini dilengkapi dengan:

- saringan kasar dan saringan halus
- bak penenang
- katup utama
- pipa pesat
- turbin dan transmisi ke generator
- sistem kontrol dan proteksi otomatis

Pagi ini, operator melakukan inspeksi rutin sebelum sistem dinyalakan. Terjadi endapan lumpur di bak penenang dan suara abnormal terdengar dari *bearing* turbin saat putaran awal.

11. Operator mencatat bahwa air di bak penenang terlihat keruh dan terdapat gelembung udara dari dasar bak. Apa tujuan utama dari bak penenang dalam sistem PLTMH?
 - A. Menyaring partikel kasar dari air.
 - B. Mengurangi kecepatan air dan mengendapkan partikel halus.
 - C. Meningkatkan tekanan air menuju pipa pesat.
 - D. Menampung air hujan untuk cadangan operasi.
 - E. Mengarahkan aliran air ke *spillway*.
12. Setelah pembersihan bak penenang, operator memeriksa pipa pesat untuk memastikan tidak ada udara terperangkap. Mengapa penting memastikan pipa pesat bebas dari udara saat PLTMH akan dinyalakan?
 - A. Untuk mempercepat aliran air ke turbin.
 - B. Agar tekanan air lebih tinggi.
 - C. Untuk mencegah *water hammer* dan kerusakan mekanik.
 - D. Supaya air tetap jernih saat masuk turbin.
 - E. Untuk memperkuat tekanan di saluran distribusi.
13. Saat turbin mulai berputar, operator mendengar suara kasar dari arah rumah turbin dan suhu *bearing* naik drastis dalam waktu 5 menit. Apa kemungkinan penyebab utama dari gejala tersebut?
 - A. Debit air terlalu kecil.
 - B. Terjadi *short circuit* di generator.
 - C. Pelumasan *bearing* tidak optimal atau *bearing* aus.



- D. Saluran masuk turbin bocor.
 - E. Sistem proteksi terlalu sensitif.
14. Setelah sistem PLTMH menyala selama 30 menit, tegangan *output* tidak stabil dan cenderung turun. Apa tindakan evaluatif yang paling tepat dilakukan operator dalam kondisi ini?
 - A. Menurunkan debit air masuk.
 - B. Menonaktifkan sistem proteksi.
 - C. Membersihkan saluran *output* air.
 - D. Memeriksa putaran turbin dan sinkronisasi generator.
 - E. Meningkatkan tegangan manual pada panel kontrol.
 15. Dalam rapat evaluasi mingguan, siswa diminta membuat rekomendasi perbaikan sistem agar PLTMH dapat beroperasi lebih stabil di musim hujan dan kemarau. Apa rancangan perbaikan operasional terbaik yang bisa diusulkan oleh tim siswa?
 - A. Menambahkan pelindung air di rumah turbin.
 - B. Menyediakan sistem *bypass* otomatis dan *flow* sensor digital.
 - C. Memperkuat fondasi rumah turbin.
 - D. Mengganti sistem pelumasan dengan pelumas berbasis air.
 - E. Menutup bak penenang dengan atap.
- Jelaskan alasan pemilihan tersebut:

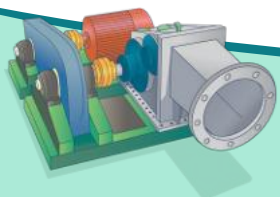
.....

.....

D. Esai

Jawablah soal-soal berikut dengan jelas.

1. Jelaskan secara runtut prosedur persiapan sebelum mengoperasikan PLTMH, mulai dari inspeksi awal hingga pengecekan sistem kelistrikan!
2. Uraikan langkah-langkah menyalakan atau menghidupkan PLTMH secara manual dari kondisi sistem nonaktif!
3. Bagaimana prosedur yang tepat untuk menonaktifkan/mematikan sistem PLTMH? Jelaskan tahapan dan alasan di balik urutan tersebut!
4. Apa saja komponen sistem mekanik pada PLTMH yang harus diperiksa dan dipelihara secara berkala? Jelaskan metode pemeliharaan yang umum dilakukan!
5. Jelaskan bentuk-bentuk evaluasi teknis yang dilakukan untuk menilai performa PLTMH saat beroperasi maupun saat dinonaktifkan!



Teknologi dan Inovasi dalam Pemeliharaan PLTMH

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memanfaatkan aliran air untuk menghasilkan listrik dalam skala kecil hingga menengah. Selain peran teknis dasar dalam pengoperasian dan pemeliharaan, perkembangan teknologi telah membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan umur pakai PLTMH.

1. Sistem Pemantauan Berbasis IoT

Internet of Things (IoT) memungkinkan pemasangan sensor-sensor cerdas pada komponen utama PLTMH seperti turbin, generator, dan sistem transmisi daya. Sensor ini dapat mengukur tegangan, arus, suhu *bearing*, getaran turbin, serta debit air secara *real-time*. Data dikirimkan ke pusat kendali melalui jaringan nirkabel, sehingga operator dapat memantau kinerja pembangkit dari jarak jauh dan mendeteksi potensi kerusakan lebih cepat.

2. Penggunaan Material Tahan Korosi

Komponen PLTMH yang terpapar air, seperti *runner* turbin dan pipa pesat, sering mengalami korosi. Inovasi material seperti baja tahan karat dengan lapisan pelindung keramik atau polimer anti-aus membantu mengurangi laju korosi, memperpanjang masa pakai, dan menurunkan biaya perawatan jangka panjang.

3. Sistem Pembersihan Otomatis Saringan (*Trash Rack Cleaning System*)

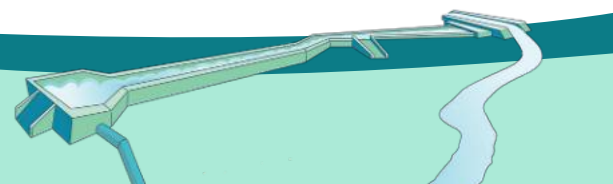
Sampah dan material organik yang terbawa aliran sungai dapat menyumbat saringan (*trash rack*) di *intake*. Sistem pembersihan otomatis menggunakan mekanisme rake hidrolik atau robotik mampu membersihkan saringan secara berkala tanpa intervensi manual. Teknologi ini membantu mempertahankan debit air optimal dan mengurangi risiko penurunan daya.

4. Penerapan Analisis Prediktif

Dengan memanfaatkan data historis dan algoritma kecerdasan buatan, sistem prediksi dapat memproyeksikan kapan suatu komponen kemungkinan mengalami keausan atau kegagalan. Analisis prediktif ini memungkinkan perencanaan perawatan yang lebih tepat waktu dan mencegah *downtime* mendadak.

5. Integrasi dengan Sumber Energi Terbarukan Lain

PLTMH dapat diintegrasikan dengan sistem pembangkit lain seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk membentuk sistem hibrida. Integrasi ini meningkatkan



keandalan suplai listrik, terutama saat debit air rendah pada musim kemarau, karena beban sebagian dapat ditopang oleh energi surya.

6. Standar Internasional untuk Operasi dan Pemeliharaan
Lembaga internasional seperti *International Electrotechnical Commission* (IEC) dan *International Renewable Energy Agency* (IRENA) telah mengeluarkan pedoman teknis untuk desain, operasi, dan pemeliharaan PLTMH. Standar ini mencakup aspek keselamatan, efisiensi, keberlanjutan lingkungan, dan interoperabilitas peralatan, yang menjadi acuan global dalam pengembangan pembangkit mikrohidro.

Refleksi

Petunjuk: Isilah jurnal refleksi berikut secara jujur dan mendalam. Tujuannya ialah untuk membantu kamu mengenali pemahaman yang telah diperoleh, kesulitan yang dihadapi, serta langkah selanjutnya untuk memperdalam pengetahuan dan keterampilan kamu.

Bagian A – Pemahaman Utama

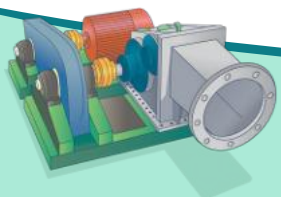
1. Apa tiga hal terpenting yang saya pelajari hari ini tentang pengoperasian dan pemeliharaan PLTMH?
2. Bagian mana dari pembelajaran hari ini yang paling menarik atau menantang bagi saya? Mengapa?

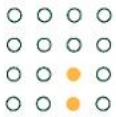
Bagian B – Aplikasi dan Pembelajaran Mendalam

1. Bagaimana saya dapat menerapkan pengetahuan ini dalam situasi nyata di lapangan atau saat praktik kerja industri?
2. Apa keterampilan teknis yang menurut saya masih perlu saya latih lebih lanjut? Bagaimana rencana saya untuk mengasah keterampilan tersebut?

Bagian C – Refleksi Diri

1. Apakah saya telah aktif dan bertanggung jawab dalam mengikuti pembelajaran hari ini? Mengapa demikian?
2. Apa satu hal yang akan saya lakukan secara berbeda jika saya mempelajari materi ini kembali?





KEMENTERIAN PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH
REPUBLIK INDONESIA, 2025

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin

Jenjang SMK/MAK Kelas XII

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

ISBN 978-634-00-0042-9 (no. jil. lengkap)

ISBN 978-634-00-3330-4 (jil.2)

BAB 3

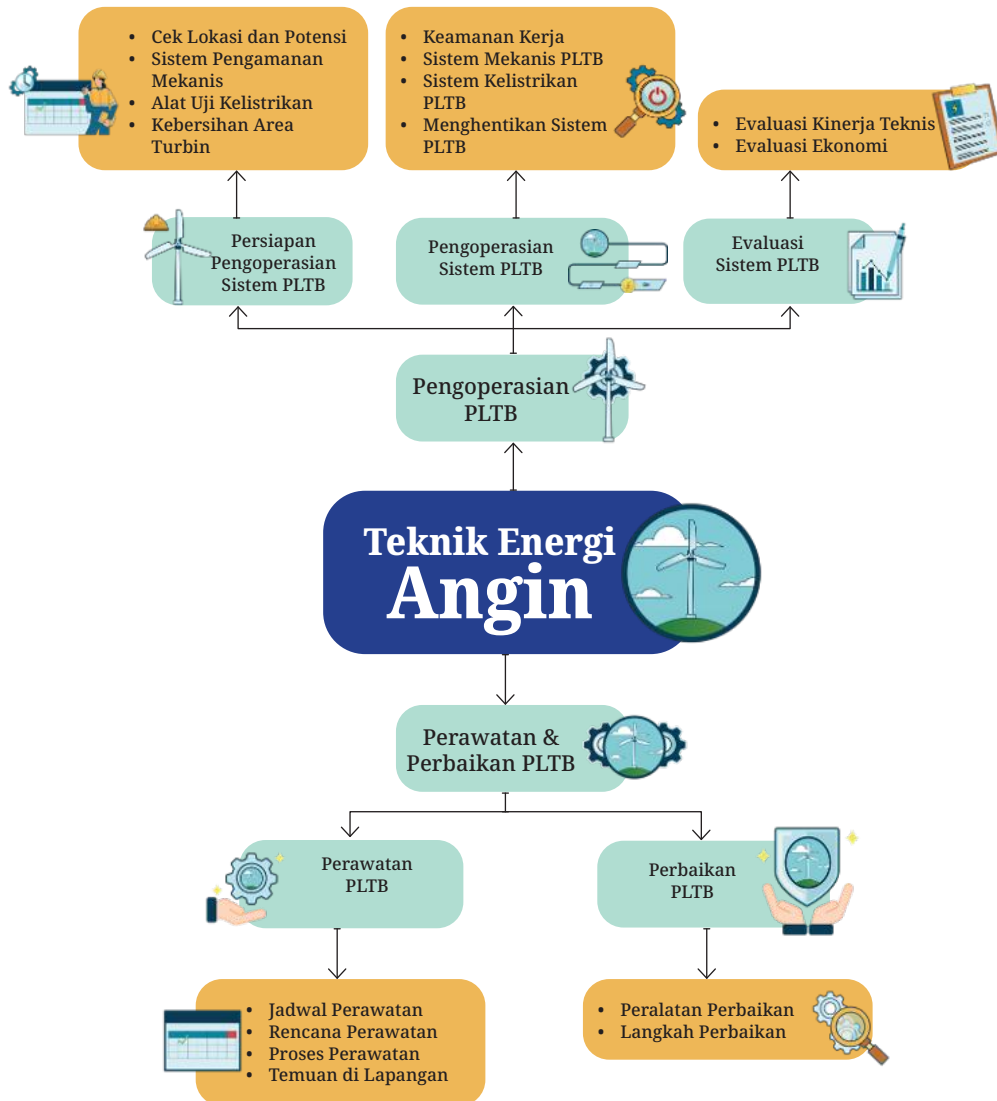
Teknik Energi Angin



Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu mengoperasikan dan merawat Pembangkit Listrik Tenaga Angin secara mandiri dan bertanggung jawab.

Peta



Kata Kunci

1. inspeksi
2. kalibrasi
3. monitoring
4. *troubleshooting*
5. efisiensi operasional

Angin merupakan salah satu bentuk energi kinetik yang tersedia melimpah di alam. Angin dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Proses konversi energi ini dimulai ketika angin mengalir dan mengenai bilah turbin, menyebabkan rotor berputar. Energi mekanik dari putaran ini kemudian diteruskan melalui sistem transmisi, seperti poros utama dan *gearbox* (jika digunakan), menuju generator. Di dalam generator, energi mekanik diubah menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Semua proses ini berlangsung secara efisien ketika desain aerodinamika bilah turbin, sistem kontrol sudut serang (*pitch control*), serta kecepatan putaran rotor (*yaw control*) diatur secara optimal untuk menyesuaikan dengan karakteristik angin.

Sebelum kita mempelajari materi ini lebih lanjut, jawablah soal-soal berikut.

1. Apa yang kamu pahami tentang prinsip kerja PLTB?
2. Menurutmu, apa tantangan yang dihadapi teknisi saat melakukan pemeliharaan PLTB di lapangan?

A. Pengoperasian PLTB

Pengoperasian PLTB merupakan tahapan krusial dalam memastikan transformasi energi angin menjadi energi listrik berlangsung secara efisien, aman, dan berkelanjutan. Proses ini tidak hanya melibatkan pengaktifan dan pengendalian sistem turbin angin, tetapi juga mencakup pemantauan *real-time* terhadap variabel operasional seperti kecepatan angin, sudut bilah, torsi poros, serta parameter kelistrikan yang dihasilkan oleh generator. Menerapkan pengoperasian PLTB memerlukan pemahaman mendalam terhadap karakteristik teknis sistem, integrasi sistem kontrol otomatis, serta standar keselamatan kerja yang berlaku. Oleh karena itu, kompetensi dalam menerapkan pengoperasian PLTB menjadi aspek fundamental bagi tenaga teknis profesional yang ingin mendukung transisi energi menuju sumber daya yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Sistem PLTB merupakan pilihan yang tepat jika kondisi di sekitar mendukung. Misalnya, apabila di sekitar tempat tinggalmu ada potensi angin dengan kecepatan minimal 7 m/s.

Sebagai contoh, data pengoperasian dari PLTB Sidrap di Sulawesi Selatan, yang merupakan PLTB Skala Besar pertama di Indonesia, menunjukkan bahwa dari total kapasitas terpasang sebesar 75 MW, pembangkit ini mampu menghasilkan sekitar 253 GWh energi listrik per tahun. PLTB ini terdiri atas 30 turbin angin yang masing-masing memiliki kapasitas 2,5 MW dan beroperasi secara optimal pada kecepatan angin rata-rata 6–9 m/s.

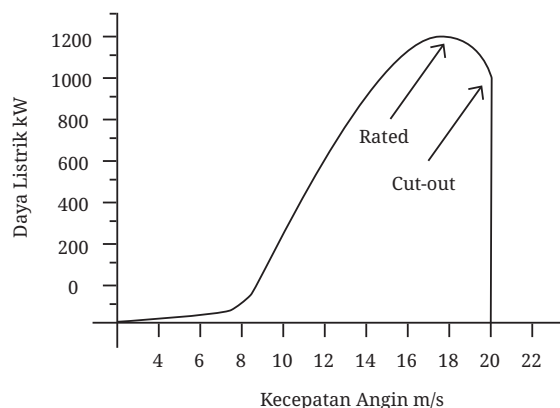
Cobalah berpikir besar. Ada beberapa tempat strategis yang belum dimanfaatkan, misalnya area sepanjang jalan tol yang memiliki ruang terbuka luas dan relatif bebas dari hambatan tinggi sehingga cocok untuk pemasangan turbin angin. Dari sisi teknis, aliran angin di daerah ini cenderung stabil karena terbebas dari kepadatan bangunan, memungkinkan turbin bekerja secara lebih efisien. Selain itu, keberadaan PLTB di sepanjang jalan tol juga dapat memanfaatkan infrastruktur akses yang sudah ada untuk keperluan instalasi, pemeliharaan, dan monitoring sistem.

1. Persiapan Pengoperasian PLTB

Persiapan pengoperasian PLTB Skala Kecil di antaranya ialah pemeriksaan cek fisik dan koneksi mekanis, pemeriksaan sistem rem dan *furling*, tes kelistrikan, dan koneksi kontroler, kalibrasi serta pengaturan awal kontroler, uji fungsi indikator proteksi, pembersihan area turbin, dan pelatihan operator atau pemilik.

a. Cek Lokasi dan Potensi Energi

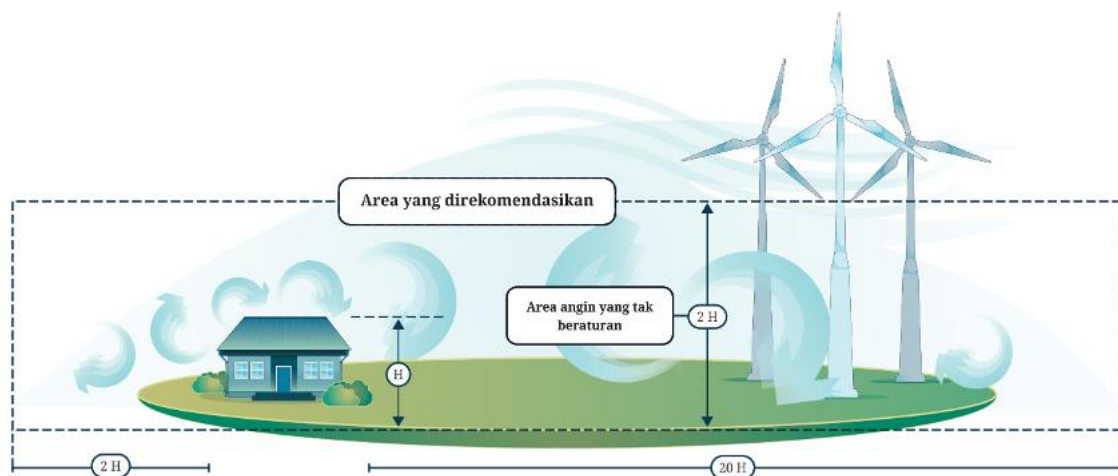
Dalam sistem PLTB, daya listrik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kubus dari kecepatan angin. Oleh karena itu, kecepatan angin secara signifikan meningkatkan potensi daya *output*. Perhatikan Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Perbandingan Kecepatan Angin m/s (meter per detik)
dan Daya Listrik kW (kilowatt)
Sumber: Manwell (2010)

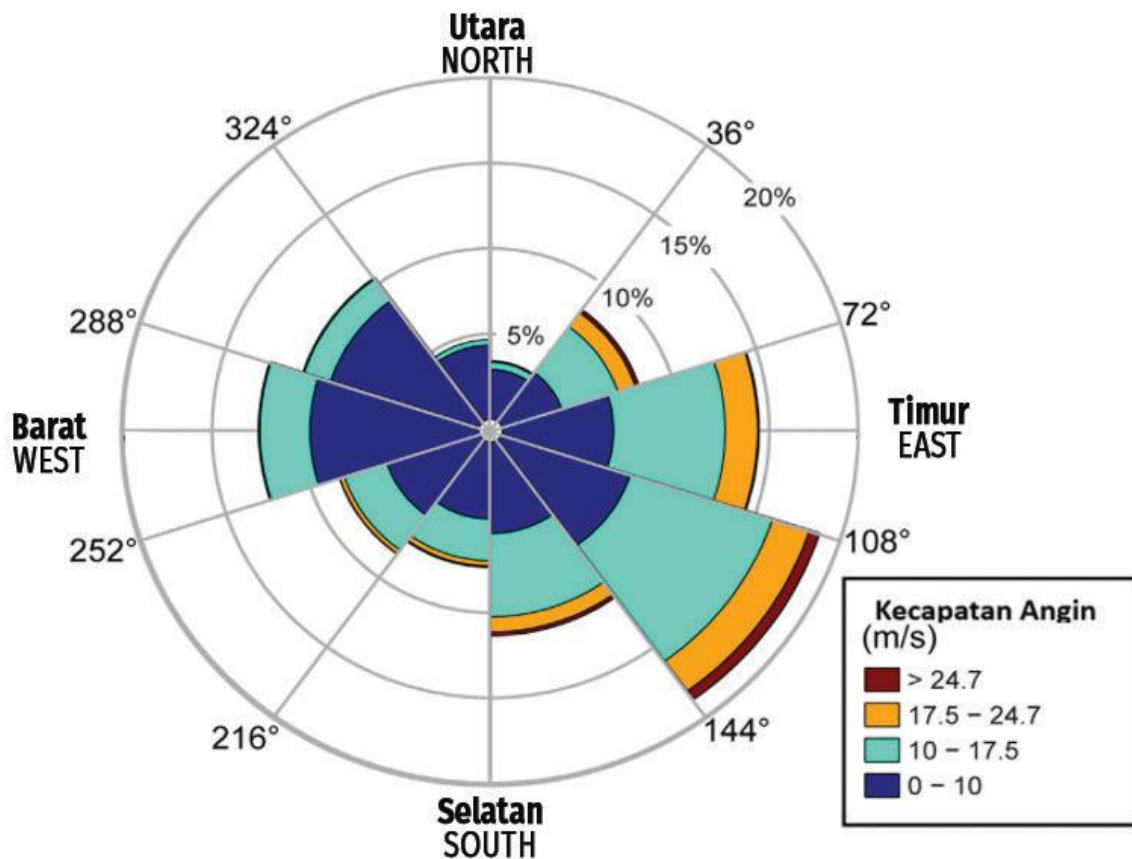
Gambar 3.1 menunjukkan *cut-in* ialah kecepatan angin minimum di mana baling-baling turbin mulai berputar cukup cepat untuk menghasilkan listrik. Di bawah kecepatan ini, energi angin tidak cukup untuk mengatasi gesekan sistem mekanis dan beban generator, minimal 6 m/s lebih. *Rated* ialah kecepatan angin di mana turbin menghasilkan daya puncaknya sesuai kapasitas yang dirancang, 18 m/s. *Cut-out* ialah kecepatan angin maksimum di mana turbin diizinkan beroperasi secara aman, 20 m/s. Jika angin melebihi kecepatan ini, turbin akan otomatis berhenti; mengunci rotor dengan sistem pengereman, *furling* sistem pengereman ekor, atau *pitching* memutar sudut bilah agar tidak menghadap angin dan mengurangi gaya aerodinamis.

Kecepatan 20 m/s sangat dipengaruhi oleh lokasi pemasangan turbin. Gambar 3.2 memperlihatkan contoh penempatan turbin dengan mempertimbangkan hambatan aliran angin yang ditimbulkan oleh bangunan atau pepohonan di sekitarnya. Sebagai contoh, jika terdapat hambatan setinggi 15 meter, jarak minimum antara hambatan tersebut dengan turbin haruslah $15 \text{ m} \times 20 = 300$ meter. Ketinggian menara turbin sebaiknya dibuat setidaknya $2 \times 15 \text{ m} = 30$ meter lebih tinggi daripada hambatan tersebut. Dengan cara ini, turbin akan mendapatkan aliran angin yang lebih lancar dan stabil tanpa banyak gangguan.



Gambar 3.2 Daerah Penempatan Titik PLTB yang Ideal
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

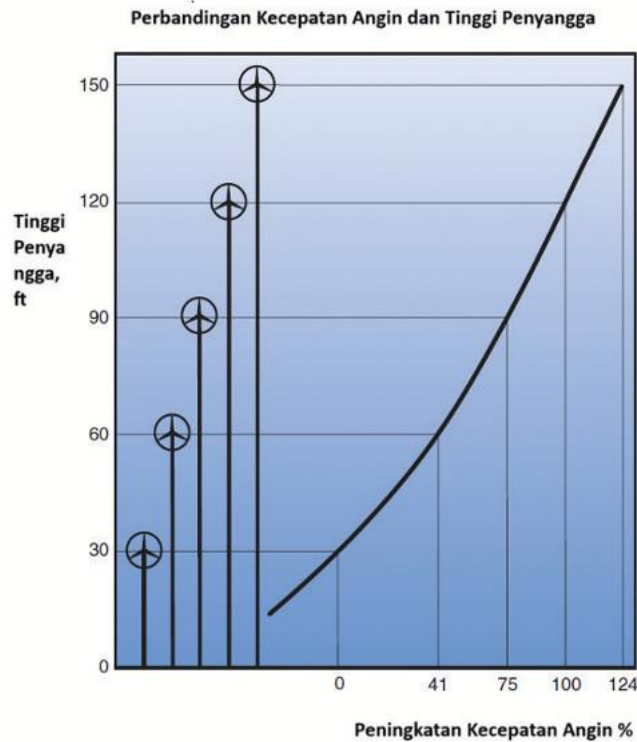
Dalam satu lokasi yang sama pun, kondisi angin dapat bervariasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kecepatan rata-rata angin menjadi salah satu faktor dalam perencanaan turbin angin. Selain mengukur kecepatan rata-rata angin tahunan, penting juga mengetahui arah angin yang paling sering terjadi, angin dominan. Ada metode *wind rose*—diagram yang berbentuk lingkaran menggambarkan frekuensi dan arah angin yang bertiup di suatu lokasi dalam periode waktu tertentu.



Gambar 3.3 Model *Wind Rose Diagram*

Sumber: Ladd and Cheng (2016)

Pada Gambar 3.3, diagram disajikan dalam bentuk menyerupai bunga mawar, dengan cabang-cabang yang memancar dari titik pusat ke berbagai arah mata angin, seperti N (utara), NE, E, SE, S, SW, W, dan NW. Setiap cabang menunjukkan asal datangnya angin, bukan arah perginya. Sebagai contoh, jika cabang yang paling panjang mengarah ke selatan (S), hal itu menandakan bahwa angin paling sering bertiup dari arah selatan. Panjang setiap cabang merepresentasikan frekuensi atau persentase kemunculan angin dari arah tersebut— makin panjang, makin sering angin datang dari arah itu. Diagram ini juga dilengkapi dengan lingkaran-lingkaran konsentris, yang menggambarkan tingkat frekuensi angin dalam bentuk persentase, seperti 5%, 10%, atau 15%. Contohnya, jika cabang yang mengarah ke timur laut (*northeast/NE*) ialah yang terpanjang dan didominasi warna oranye, ini berarti angin paling sering datang dari arah timur laut dengan kecepatan berkisar antara 17,5 hingga 24,7 m/s.



Gambar 3.4 Perbandingan Penyangga PLTB dan Kecepatan Angin

Sumber: Windxchange (2025)

Pada Gambar 3.4, ketinggian *hub* atau poros turbin angin sekitar 24 meter, kecepatan angin dapat 15% hingga 25% lebih tinggi dibandingkan dengan ketinggian 10 meter. Pada ketinggian penyangga 60 ft atau sekitar 18,288 meter, angin mengalami peningkatan kecepatan 41% dibandingkan dengan ketinggian penyangga 30 ft atau sekitar 9,144.

Kegiatan lain dalam rangka persiapan PLTB Skala Kecil pada tahap cek lokasi dan potensi dapat terangkum dalam tabel berikut.

Tabel 3.1 Pemeriksaan Lokasi dan Potensi PLTB Skala Kecil

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
1	Kondisi lokasi menara	Pastikan lokasi rata, stabil, bebas longsor/banjir.	Pengamatan visual lokasi aman dan stabil.
2	Akses menuju lokasi	Periksa jalan setapak atau akses kendaraan untuk membawa peralatan.	Akses mudah dilalui orang/peralatan, tidak ada penghalang besar di radius 50–100 m.

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
3	Tinggi dan posisi menara PLTB	Pastikan posisi menara lebih tinggi daripada bangunan/pohon di sekitarnya.	Dengan alat ukur laser, menara minimal 10 m di atas hambatan sekitar.
4	Kecepatan angin rata-rata harian	Gunakan anemometer atau data BMKG setempat.	Kecepatan rata-rata ≥ 3 m/s (sesuai spesifikasi PLTB).
5	Arah angin dominan	Catat arah angin dari hasil pengukuran atau informasi BMKG.	Arah angin konsisten, tidak terlalu berubah-ubah.
6	Data kecepatan angin bulanan/tahunan	Kumpulkan data historis minimal 1 bulan, idealnya 1 tahun.	Tersedia data kecepatan angin untuk perhitungan potensi energi.
7	Dokumentasi lokasi dan hasil cek potensi energi	Foto lokasi, catat hasil pengukuran, buat laporan singkat.	Dokumentasi lengkap sebagai bukti persiapan.

Aktivitas 3.1 Cek Lokasi dan Potensi Energi

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan kesiapan awal pengoperasian PLTB serta merefleksikan pentingnya cek lokasi dan potensi energi sehingga PLTB dapat beroperasi dengan baik.

Langkah-Langkah:

Mari, kamu periksalah kabel, fondasi, data kecepatan angin, dan sistem PLTB secara menyeluruh sehingga PLTB dapat beroperasi dengan baik dan aman.

Studi Kasus

Sebuah unit PLTB berkapasitas 1.500 watt telah selesai dipasang di halaman belakang bengkel sekolah. Semua komponen utama seperti menara, rotor, generator, kabel koneksi, *controller*, dan baterai sudah terpasang. Namun, sebelum sistem dinyalakan, tim teknisi diminta melakukan pemeriksaan kesiapan awal pengoperasian untuk memastikan sistem aman, efisien, dan siap beroperasi tanpa risiko kerusakan.



Beberapa minggu setelah pemasangan, ditemukan hal-hal berikut.

1. Kabel dari generator ke *controller* belum diberi pelindung cuaca.
2. Fondasi menara sedikit miring akibat hujan deras.
3. Data kecepatan angin harian belum diperbarui untuk memastikan potensi energi cukup.
4. Belum dilakukan pengecekan tegangan baterai sebelum koneksi sistem diaktifkan.

Tim harus melakukan langkah-langkah cek lokasi dan potensi energi, serta pemeriksaan sistem mekanik dan kelistrikan sebelum turbin di-*on*-kan pertama kali.

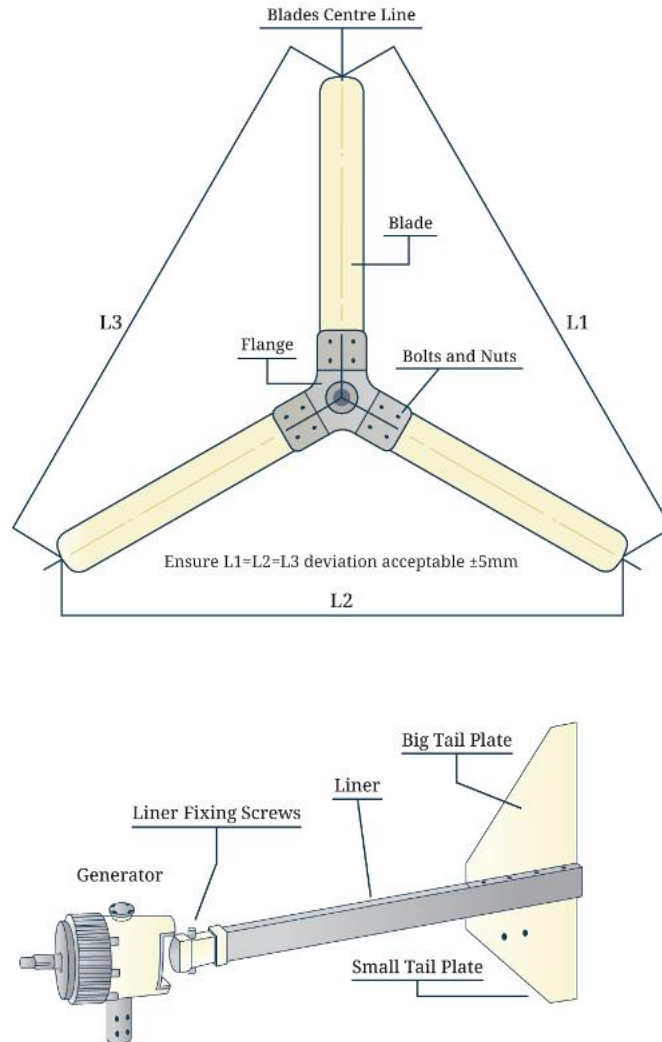
Berdasarkan kasus di atas, kerjakanlah soal-soal berikut.

1. Jelaskan mengapa pemeriksaan kesiapan awal sangat penting dilakukan sebelum PLTB dihidupkan, terutama setelah ditemukan beberapa masalah pada kabel, fondasi menara, dan baterai.
2. Jika kamu menjadi anggota tim teknisi, langkah teknis apa yang akan kamu lakukan untuk memperbaiki kondisi fondasi menara yang miring agar turbin kembali aman dan stabil saat beroperasi?
3. Bagaimana sikap tanggung jawab dan kerja sama tim dapat memengaruhi keberhasilan tahap pemeriksaan kesiapan awal PLTB sebelum di-*on*-kan?
4. Rancanglah langkah-langkah prioritas pemeriksaan yang harus dilakukan oleh tim teknisi agar sistem PLTB dapat beroperasi dengan aman dan efisien, berdasarkan masalah yang ditemukan dalam studi kasus.
5. Setelah memahami proses pemeriksaan kesiapan awal PLTB, nilai dan pelajaran apa yang dapat kamu ambil untuk diterapkan dalam kehidupan atau proyek teknis lainnya agar hasil kerja lebih aman, teliti, dan berkelanjutan?

b. Memeriksa Sistem Pengaman Mekanis

Furling merupakan sistem mekanisme pasif yang digunakan untuk membatasi frekuensi rotasi dan daya keluaran turbin angin skala kecil saat angin kencang. Rem manual *furling* pada Gambar 3.5, menggunakan ekor turbin, yang terdiri atas penyangga liner yang ujungnya diberi dua plat logam ukuran besar *big tail plate*, dan ukuran kecil *small tail plate*. Sistem pengereman *furling* dapat berfungsi jika bagian engsel *liner fixing screw* dapat bergerak atau digerakkan dengan lancar secara manual maupun elektrik.





Gambar 3.5 Bagian Mekanis PLTB Skala Kecil

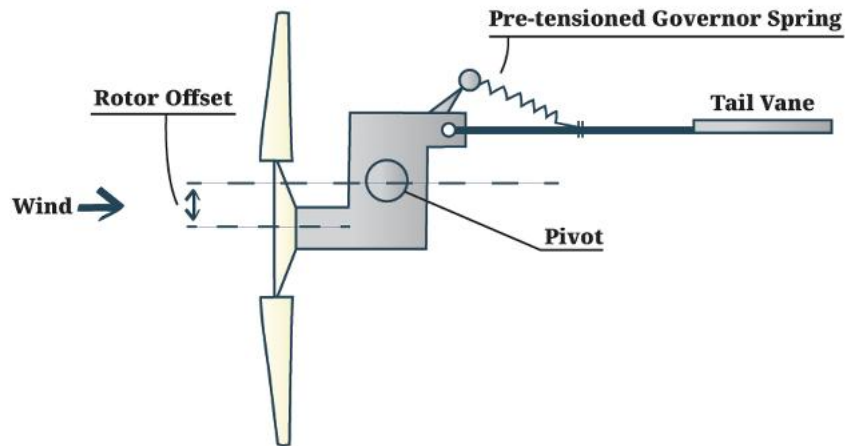
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Pemeriksaan baling-baling berfokus pada kekencangan baut *bolt and nut* pada titik pusat *flange* serta keseimbangan baling-baling *blade*. Pastikan baut terpasang kuat dan jarak antara L1, L2, dan L3 seimbang. Uji dengan memutar baling-baling secara manual. Perhatikan agar gerakannya simetris, mampu berputar penuh 360 derajat dalam posisi sejajar dan lurus.

Rem *Furling* bekerja secara otomatis untuk melindungi turbin dari kelebihan kecepatan angin.

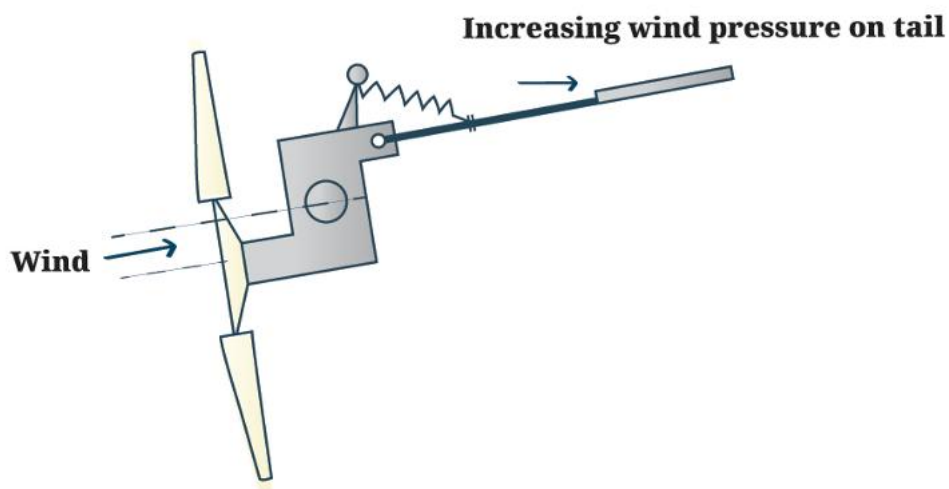
- 1) Di saat kecepatan angin (*wind*) di batas aman seperti Gambar 3.6, bilah PLTB berputar dengan normal, sistem *rotor offset* berjalan normal sejajar dengan tengah-tengah

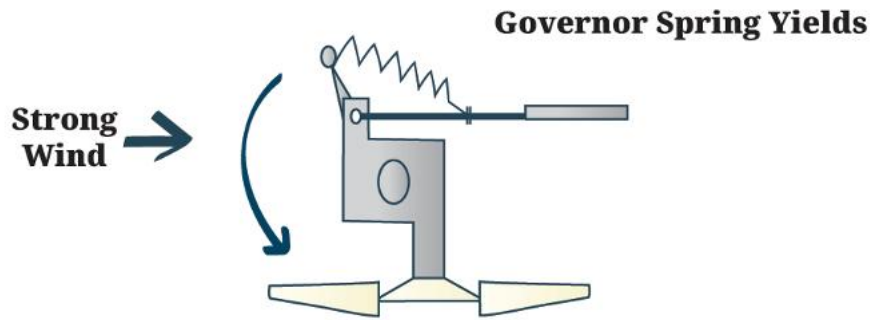
titik beban pivot yang terhubung dengan penyangga, ekor (*tail vane*) tetap sejajar dengan arah angin, pegas pengaman *pre-tension governor spring* tidak bekerja penuh, ia menjaga dari guncangan atau gerakan liar dari ekor (*tail vane*) PLTB.



Gambar 3.6 Posisi PLTB Normal
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

- 2) Saat kecepatan angin melewati *cut-out wind speed* seperti Gambar 3.7, gaya angin yang sangat besar menimbulkan momen putar pada ekor, sistem engsel membuat ekor menekuk ke samping, memutar rotor menjauh dari arah angin, sekitar 20–60 derajat. Akibatnya, mengurangi sudut serang bilah sehingga putaran rotor melambat dan turbin “menghindar” dari kecepatan angin berbahaya.





Rotor berayun ke arah angin hingga kecepatan angin turun

Gambar 3.7 Kondisi PLTB Saat Angin Kencang dan Mengaktifkan *Furling*

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

- 3) Jika angin kembali normal, ekor otomatis kembali ke posisi lurus ke angin karena gaya gravitasi atau pegas penyeimbang sehingga rotor kembali bekerja normal.

Sebelum dioperasikan pada beberapa PLTB yang menggunakan sistem *furling*, perlu persiapan dan pemeriksaan yang teliti pada area yang tercantum dalam Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Tabel Pemeriksaan Pengaman Mekanis

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
1	Ekor (<i>tail vane</i>)	Cek visual: pastikan tidak bengkok, patah, atau karatan.	<i>Tail vane</i> lurus, utuh, dan bebas karat, gunakan penggaris panjang untuk membantu pemeriksaan.
2	Engsel/sumbu <i>furling</i>	Gerakkan manual <i>tail vane</i> ke kiri/kanan.	<i>Tail vane</i> bergerak bebas tanpa macet atau seret
3	Baut dan mur <i>tail vane</i>	Periksa kekencangan dengan kunci.	Semua baut/mur kencang. Gunakan kunci yang sesuai
4	Pegas atau pemberat (jika ada)	Amati kondisi visual; tekan <i>tail vane</i> untuk uji respons.	Pegas utuh/tidak patah; <i>tail vane</i> kembali ke posisi semula
5	Pelumasan engsel	Sentuh/cek engsel.	Engsel licin, tidak kering/berkarat, gunakan pelumas yang baru.
6	<i>Offset</i> rotor	Lihat posisi rotor terhadap poros menara.	Rotor sedikit <i>offset</i> dari sumbu menara sesuai desain
7	Hambatan pergerakan <i>tail vane</i>	Periksa area sekitar <i>tail vane</i> dan sumbu.	Tidak ada kabel, <i>bracket</i> , atau benda lain yang menghalangi

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
8	Kebersihan	Amati sekitar <i>tail vane</i> dan rotor.	Bebas dari kotoran, debu tebal, sarang burung/serangga.
9	Dokumentasi pemeriksaan	Catat hasil dan kondisi setiap komponen.	Semua poin terdata untuk arsip perawatan.

Aktivitas 3.2 Pemeriksaan Sistem Pengaman Mekanis

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan fungsi dan kesiapan awal Pengoperasian PLTB serta merefleksikan pentingnya Sistem Pengaman Mekanis.

Langkah-Langkah:

Mari, kita mengenal lebih dekat pengaman mekanis yang bertugas mengamankan kinerja PLTB.

Studi Kasus

Sebuah unit PLTB tipe horizontal berkapasitas 1.000 watt telah dipasang di area terbuka belakang bengkel energi terbarukan SMK. PLTB ini dilengkapi dengan sistem *furling*—yaitu mekanisme pengaman mekanis yang berfungsi untuk mengatur posisi baling-baling terhadap arah angin agar turbin tidak rusak ketika kecepatan angin terlalu tinggi.

Setelah pemasangan selesai, tim teknisi murid diminta melakukan pemeriksaan kesiapan awal pengoperasian, termasuk uji fungsi sistem *furling*. Namun, saat dilakukan pengecekan, ditemukan beberapa kondisi berikut.

1. Engsel sistem *furling* terasa kaku dan sulit bergerak karena belum dilumasi dengan *grease*.
2. Pegas pengembali (*spring return*) tidak pada posisi ideal sehingga mekanisme tidak dapat kembali otomatis ke posisi semula.
3. Sudut *offset* antara rotor dan ekor turbin tampak tidak sesuai spesifikasi rancangan (lebih dari 15°) yang dapat mengganggu keseimbangan.
4. Saat angin kencang, turbin tidak mengubah posisi ke arah menjauh dari angin seperti yang seharusnya terjadi pada sistem *furling* yang berfungsi baik.



5. Akibatnya, terdapat risiko turbin berputar terlalu cepat (*overspeed*) dan merusak generator jika sistem dihidupkan tanpa perbaikan. Tim teknisi harus melakukan langkah-langkah cek mekanis, pelumasan, penyetelan ulang pegas dan sudut *offset*, serta melakukan simulasi uji fungsi furling sebelum PLTB di-on-kan secara resmi.

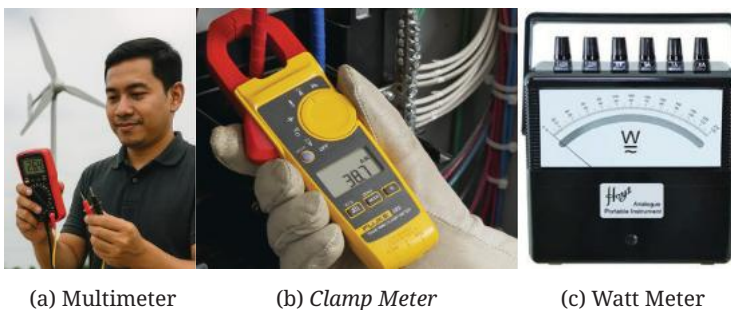
Setelah melihat permasalahan di atas jawablah soal-soal berikut.

1. Apa fungsi utama sistem pengaman mekanis *furling* pada PLTB? Bagaimana mekanisme ini bekerja untuk melindungi turbin dari kecepatan angin berlebih?
2. Berdasarkan kasus yang terjadi, jelaskan langkah-langkah teknis yang perlu dilakukan untuk memperbaiki sistem *furling* yang kaku dan tidak kembali otomatis ke posisi semula.
3. Nilai-nilai apa yang harus dimiliki oleh seorang teknisi ketika melakukan pemeriksaan sistem *furling* agar pekerjaan berjalan aman, teliti, dan sesuai prosedur? Jelaskan alasanmu.
4. Jika kamu menjadi ketua tim teknisi, bagaimana kamu akan mengatur urutan prioritas pemeriksaan pada sistem *furling* dan bagian lain PLTB agar siap dioperasikan dengan aman?
5. Setelah mempelajari fungsi dan pemeriksaan sistem *furling*, pelajaran apa yang dapat kamu terapkan dalam kehidupan atau proyek teknis lainnya agar hasil kerjamu selalu aman, berkualitas, dan berkelanjutan?

c. Menyiapkan Alat Uji Kelistrikan

Berikut ini beberapa persiapan alat uji kelistrikan.

- 1) Pastikan multimeter, *clamp meter*, dan *wattmeter portable* dalam kondisi baik dan telah dilakukan kalibrasi. Pastikan koneksi ke *charge controller* tidak terbalik polaritasnya.



Gambar 3.8 Peralatan Uji Tegangan, Ampere, dan Watt
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

- 2) Atur tegangan *charging* sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan. Sebagai contoh, jika menggunakan baterai bertegangan nominal 48 V, konfigurasi *charging cut-off* pada baterai *contoler* sebaiknya diatur pada kisaran 56–58V.

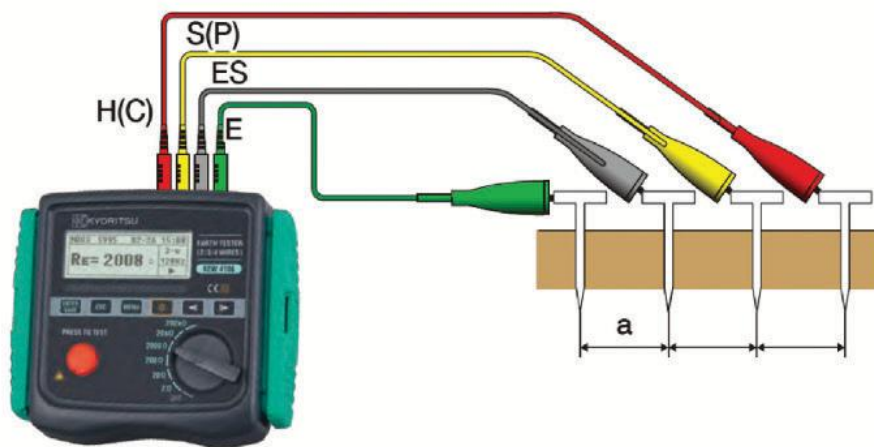


Gambar 3.9 Sistem Kelistrikan PLTB Skala Kecil
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

Apabila sistem kelistrikan PLTB dilengkapi dengan beban palsu (*dump load*) sebagai pembuangan energi berlebih, pastikan *dump load* aktif secara otomatis ketika baterai mencapai tegangan *cut-off*. *Dump load* berfungsi untuk membuang energi berlebih dari generator saat baterai penuh.

Pada baterai *controller* yang terintegrasi dengan inverter, terdapat juga beberapa fungsi indikator dan proteksi, baca buku manual secara teliti. Pastikan indikator tegangan, arus, dan status baterai di *controller* menyala normal. Kemudian, lakukan tes simulasi *overvoltage*, misalnya mematikan beban, biarkan turbin berputar kencang, lihat apakah *controller* mengaktifkan proteksi; memutuskan *charging* atau mengalihkan ke *dump load*.

Periksa kabel yang menuju pentanahan (*grounding*), turbin, dan *controller*. Mengukur *grounding* bertujuan memastikan tahanan pentanahan cukup rendah agar arus bocor atau lonjakan akibat petir dapat dialirkan dengan aman ke tanah. Hal itu untuk melindungi manusia dari sengatan listrik, mencegah kerusakan peralatan, dan memenuhi standar keselamatan instalasi kelistrikan seperti pada sistem PLTB. Tahanan ke tanah idealnya $< 5 \Omega$.



H (C) *Current*; Kabel warna merah, elektroda bantu, (a) $\pm$ 20 m dari titik E.

ES(P) *Potential*; kabel warna kuning atau abu-abu, (a) $\pm$ 10 m dari titik E.

E (*Earth*); kabel warna hijau, titik *grounding* yang diuji.

Gambar 3.10 Peralatan Ukur *Grounding*

Sumber: Kyoritsu (2025)

Setelah semua kabel dan *spike* terpasang dengan benar, putar *selector* ke posisi “EARTH” (Ω) dan pilih skala pengukuran misalnya $\times 10$. Kemudian, tekan tombol “PRESS TO TEST”; lihat jarum pada *display*. Bacalah angka yang ditunjuk jarum pada skala utama, lalu kalikan dengan faktor skala yang digunakan. Misalnya, jarum menunjuk angka 0,5 di skala $\times 10$. Maka, hasil tahanan *grounding* $0,5 \times 10 = 5$ ohm. Karena hasilnya tidak lebih dari 5 ohm, *grounding* dinyatakan baik dan aman.

Beberapa poin pemeriksaan pada alat uji kelistrikan tercantum pada Tabel 3.3. Jika ada poin penting yang perlu, dapat ditambahkan.

Tabel 3.3 Tabel Kegiatan Pemeriksaan Kelistrikan

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
1	Sambungan kabel dari turbin ke <i>rectifier</i>	Periksa koneksi, kencangkan terminal.	Dengan alat yang sesuai tidak kabel longgar, koneksi kuat dan aman.
2	Kondisi kabel (isolasi)	Lihat kondisi fisik kabel sepanjang jalur.	Tidak ada kabel terkelupas atau sobek. Gunakan multimeter dan tespen

No	Poin Pemeriksaan	Cara Memeriksa	Kriteria Lulus
3	Tegangan keluaran <i>rectifier</i>	Ukur dengan multimeter DC.	Tegangan sesuai spesifikasi turbin saat berputar.
4	Fungsi <i>charge controller</i>	Uji apakah <i>charge controller</i> menyalakan indikator saat terhubung ke baterai.	Indikator pada monitor berjalan normal, tidak <i>error</i> .
5	<i>Setting</i> tegangan <i>cut-off</i> pada <i>charge controller</i>	Baca dan set di menu <i>charge controller</i> .	<i>Setting</i> sesuai baterai (misal 56–58 V untuk 48 V bank).
6	Kondisi terminal baterai	Bersihkan terminal dari karat atau kotoran.	Gunakan kuas, Terminal bersih, baut terpasang kencang.
7	Polaritas sambungan ke baterai	Periksa dengan multimeter sebelum menghubungkan.	Polaritas positif dan negatif terpasang benar.
8	<i>Fuse</i> /MCB jalur baterai	Periksa apakah <i>fuse</i> /MCB masih bagus, tidak putus.	<i>Fuse</i> /MCB dalam kondisi baik.
9	Fungsi <i>dummy load</i>	Simulasi <i>cut-off</i> dengan tegangan eksternal (jika memungkinkan).	<i>Dump load</i> aktif saat <i>cut-off</i> , indikator menyala.
10	Sistem pentanahan <i>Grounding</i>	Ukur tahanan sistem pentanahan jika ada, atau cek koneksi ke tanah.	<i>Grounding</i> terpasang, tahanan < 5 ohm jika diukur.

Aktivitas 3.3 Pemeriksaan Alat Uji Kelistrikan

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menggunakan alat uji kelistrikan untuk pengoperasian PLTB.

Langkah-Langkah:

Mari, mengenal lebih dekat langkah memeriksa alat uji kelistrikan supaya PLTB dapat dioperasikan dengan aman.



Studi Kasus

Sebuah tim teknisi sedang melakukan persiapan pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala kecil berkapasitas 1,5 kW yang baru selesai dipasang di daerah pesisir. Sebelum turbin dioperasikan penuh, diperlukan uji kelistrikan menyeluruh untuk memastikan sistem bekerja aman dan efisien. Ketika dilakukan pemeriksaan awal, indikator pada panel kontrol menunjukkan bahwa tegangan *output* generator tidak stabil (berfluktuasi antara 200–240 V). Selain itu, lampu indikator sistem *grounding* sesekali menyala merah, menandakan potensi gangguan arus bocor.

Tim teknisi terdiri atas beberapa anggota yang memiliki tugas berbeda seperti berikut.

1. Teknisi A bertugas mengukur tegangan dan arus pada keluaran generator menggunakan volt meter dan *clamp meter*.
2. Teknisi B memeriksa daya total keluaran dan faktor daya menggunakan wattmeter.
3. Teknisi C melakukan pengukuran resistansi *grounding* untuk memastikan sistem proteksi aman dari sambaran petir dan kebocoran arus listrik.

Hasil pengukuran sementara seperti berikut.

- Tegangan fasa: 228 V
- Arus keluaran: 6,5 A
- Daya aktif: 1.300 W
- Resistansi *grounding*: 18 Ω

Padahal, menurut standar keamanan (misalnya SNI IEC 60364), nilai resistansi *grounding* yang baik seharusnya $\leq 5 \Omega$.

Setelah membaca studi kasus di atas, jawablah pertanyaan berikut.

1. Apa fungsi utama alat ukur voltmeter, *clamp meter*, *wattmeter*, dan alat ukur *grounding* dalam sistem kelistrikan PLTB?
2. Bagaimana langkah-langkah yang harus dilakukan teknisi untuk memastikan hasil pengukuran tegangan, arus, dan resistansi *grounding* sesuai standar sebelum PLTB dioperasikan?
3. Sikap apa yang harus ditunjukkan seorang teknisi ketika menemukan nilai resistansi *grounding* melebihi standar keamanan? Jelaskan alasannya.
4. Berdasarkan hasil pengukuran resistansi *grounding* sebesar 18 Ω , langkah teknis apa yang sebaiknya dilakukan agar sistem *grounding* PLTB memenuhi standar $\leq 5 \Omega$?
5. Apa arti penting pengujian sistem *grounding* dan stabilitas tegangan bagi keselamatan kerja dan keberlanjutan operasi PLTB? Bagaimana hal itu memengaruhi cara kamu berpikir tentang kualitas hasil kerja seorang teknisi?



d. Kebersihan Area Sekitar Turbin

Pastikan tidak ada ranting, kabel, atau benda lain yang dapat mengenai kipas. Area radius 1,5–2 kali panjang *blade* harus steril dari benda keras untuk mencegah kerusakan pada *blade* atau risiko keselamatan. Selain itu, pastikan tidak ada orang yang berada dalam radius tersebut saat turbin sedang berputar. Periksa secara berkala agar tidak ada benda baru yang menghalangi atau membahayakan operasi PLTB.



Gambar 3.11 Kipas PLTB yang Rusak
Sumber: Mishnaevsky (2022)

Kerusakan pada *blade* kipas PLTB umumnya terjadi akibat benturan dengan benda asing, kelelahan material, atau kualitas manufaktur yang kurang baik. Bentuk kerusakannya dapat berupa retak atau patah di ujung atau sepanjang *blade* akibat benturan (misalnya ranting, batu, atau benda terbang lain), erosi pada *leading edge* (tepi depan) karena gesekan terus-menerus dengan debu, hujan, atau pasir. Delaminasi pada *blade* berbahan komposit, yaitu terpisahnya lapisan-lapisan material yang menyebabkan kekuatan *blade* menurun drastis. Deformasi permanen yang membuat *blade* tidak seimbang menimbulkan getaran berlebih saat berputar dan dapat merusak komponen lain seperti poros atau *bearing*.

Pemeriksaan pada material pelindung dan penguatan *blade* pada PLTB yang dipasang di pinggir laut memiliki tantangan khusus karena lingkungan laut sangat keras bagi



material turbin. Udara laut yang asin mengandung garam yang bersifat korosif untuk *blade*. Meskipun *blade* biasanya berbahan komposit atau dilapisi cat pelindung, korosi tetap dapat terjadi pada sambungan logam baut, *bracket*, menembus lapisan pelindung jika ada goresan, atau merusak *blade root*. Kerusakan akibat angin kencang ekstrem *gust* akan menimbulkan kelelahan material *fatigue* dan potensi patah.



Gambar 3.12 PLTB yang Dibangun untuk Sebuah Komunitas Nelayan
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

Beberapa kegiatan yang perlu dilakukan sebelum pengoperasian PLTB dirangkum dalam tabel berikut. Apabila menemukan hal penting di lapangan, dapat ditambahkan.

Tabel 3.4 Kebersihan Area Turbin

No	Item Pemeriksaan	Langkah/Deskripsi	Keterangan
1	Area sekitar turbin	Bersihkan area radius 1,5–2 kali panjang <i>blade</i> dari ranting, kabel, batu, atau benda keras lainnya.	Area steril, tidak ada penghalang.
2	<i>Blade</i> kipas	Periksa visual: tidak ada retak, patah, erosi parah, atau deformasi.	Uji permukaan memakai tangan <i>blade</i> utuh dan seimbang.

No	Item Pemeriksaan	Langkah/Deskripsi	Keterangan
3	Baut dan koneksi mekanis	Pastikan baut-baut pada <i>blade</i> , poros, menara, dan <i>bracket</i> generator terpasang kuat.	Gunakan kunci pas atau ring yang sesuai untuk baut yang kendur atau ganti hilang.

Aktivitas 3.4 Kebersihan Area Turbin

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjaga Kebersihan Area Turbin sehingga PLTB dapat beroperasi dengan lancar

Langkah-Langkah:

Mari, menjaga area turbin bersih dari potensi halangan yang mengganggu berputarnya PLTB saat bekerja.

Studi Kasus

Desa Sumberjo Kecamatan Sudimoro Kabupaten Pacitan Jawa Timur, baru saja menyelesaikan pemasangan PLTB yang akan digunakan sebagai sarana penerangan para nelayan. Sebelum PLTB dioperasikan untuk pertama kalinya, tim teknisi dan operator perlu memastikan bahwa area sekitar turbin dalam kondisi bersih, aman, dan bebas dari hambatan fisik. Saat dilakukan pengecekan awal oleh operator, ditemukan beberapa hal berikut.

1. Beberapa ranting dan dahan pohon yang masih menjulur ke arah bilah (kipas) turbin.
2. Di sekitar area menara, terdapat daun kering, plastik bekas pembungkus komponen, dan debu akibat proses pemasangan.
3. Bekas minyak pelumas dan lem yang menempel pada bilah turbin.

Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan bilah turbin tidak dapat berputar bebas atau bahkan patah jika tertabrak dahan saat angin berhembus kencang. Oleh karena itu, kebersihan dan keamanan area turbin harus menjadi langkah persiapan utama sebelum pengoperasian awal PLTB.

Selanjutnya, jawablah pertanyaan berikut ini.

1. Apa tujuan utama menjaga kebersihan dan keamanan area sekitar turbin sebelum PLTB dioperasikan pertama kali?



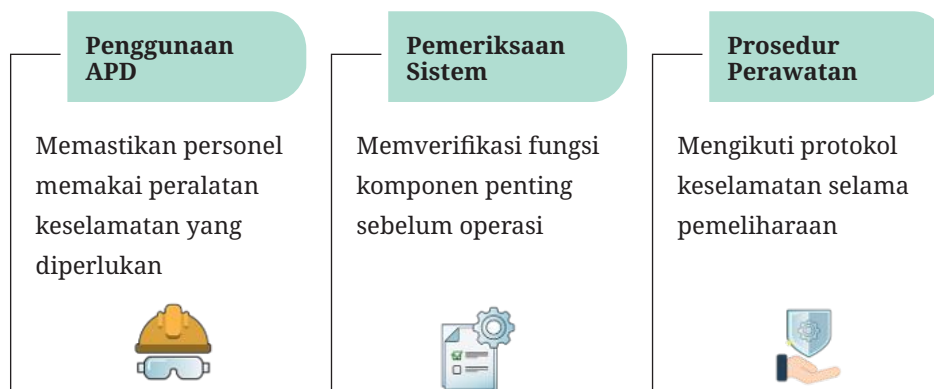
2. Sebutkan langkah-langkah yang perlu dilakukan oleh operator untuk membersihkan bilah turbin dari lem, debu, ranting, dan bekas minyak pelumas agar dapat berputar bebas saat dioperasikan.
3. Sikap apa yang harus ditunjukkan oleh tim teknisi saat menemukan area turbin masih kotor dan berpotensi mengganggu kinerja PLTB? Mengapa sikap tersebut penting dalam pekerjaan teknis?
4. Jika kamu menjadi anggota tim operator, bagaimana cara kamu memastikan tidak ada dahan atau benda asing yang dapat mengenai bilah turbin saat berputar, sesuai prosedur keselamatan kerja di ketinggian?
5. Setelah mempelajari kasus ini, apa pelajaran penting yang kamu peroleh tentang hubungan antara kebersihan, keselamatan kerja, dan keberhasilan operasional PLTB di lingkungan masyarakat?

2. Pengoperasian Sistem PLTB

Dalam pengoperasian PLTB, ada beberapa urutan kegiatan yang dilakukan dengan saksama. Urutan tersebut ialah keamanan kerja, kemudian memulai pengoperasian, sistem manajemen, dan menonaktifkan PLTB.

a. Keamanan Kerja

Keamanan kerja dalam pengoperasian PLTB bertujuan melindungi personel dan peralatan dari risiko kecelakaan. Operator wajib menggunakan alat pelindung diri (APD) seperti helm, sarung tangan, dan *body harness* saat bekerja di ketinggian.





Gambar 3.13 Keamanan Pengoperasian PLTB

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Selanjutnya, dilakukan identifikasi dan mitigasi risiko. Semua pekerja di setiap tingkatan, mulai dari teknisi, operator, hingga manajer, harus memahami dan melakukan analisis risiko secara menyeluruh untuk mengenali potensi bahaya yang dapat terjadi selama pengoperasian PLTB. Risiko tersebut meliputi kecelakaan kerja akibat jatuhnya puing saat pemasangan atau perawatan, sengatan listrik, maupun risiko terjatuh dari ketinggian.

Tabel 3.5 Tabel Identifikasi dan Mitigasi Risiko

No	Potensi Risiko	Penyebab	Dampak	Tindakan Mitigasi
1	Jatuh dari ketinggian	Pemasangan/ perawatan di <i>tower</i> atau <i>blade</i>	Cedera serius, kematian	Gunakan APD lengkap (<i>harness</i> , helm), pasang pengaman jatuh, SOP kerja di ketinggian.
2	Tertimpa puing atau alat	Reruntuhan saat pemasangan/ perawatan	Luka ringan hingga parah	Pastikan area steril, pasang rambu, gunakan helm proyek.
3	Terjepit komponen bergerak	Perawatan mekanis pada rotor/ <i>blade</i>	Luka pada anggota tubuh	Pastikan rotor diam sebelum perbaikan, gunakan kunci rotor.
4	Ledakan baterai atau bank penyimpanan	<i>Overcharging</i> , baterai rusak	Luka serius, kebakaran	Atur sistem <i>charging</i> sesuai spesifikasi, gunakan BMS, ventilasi memadai.



No	Potensi Risiko	Penyebab	Dampak	Tindakan Mitigasi
5	Cedera akibat alat berat	Kesalahan penggunaan <i>crane</i> atau peralatan angkat	Cedera pada pekerja	Operator <i>crane</i> bersertifikat, jalur kerja steril, SOP pengangkatan.
6	Tertabrak <i>blade</i> saat rotor berputar	Masuk ke area rotor saat beroperasi	Luka serius, kematian	Pasang pagar pengaman, matikan PLTB sebelum memasuki area rotor.

Aktivitas 3.5 Keamanan Kerja

Aktivitas Individu dan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan keamanan kerja, mitigasi, dan identifikasi risiko.

Langkah-Langkah:

Mari, siapkan alat pelindung diri pada pekerjaan pengoperasian PLTB.

Studi Kasus

PLTB di Desa Sukorejo Sudimoro Pacitan Jawa Timur baru saja selesai tahap pemasangan turbin angin tipe horizontal dengan kapasitas 1.500 watt. PLTB ini dirancang untuk mendukung kegiatan masyarakat dan sebagai sumber penerangan di area pertanian pada malam hari.

Setelah proses instalasi selesai, tim operator bersiap melakukan uji coba pengoperasian awal. Sebelum turbin dioperasikan, mereka diwajibkan melakukan inspeksi keselamatan kerja di area sekitar menara dan ruang kontrol listrik.

Saat tim teknisi melakukan pengecekan lapangan, ditemukan beberapa kondisi berisiko berikut.

1. Tali pengaman (*safety harness*) yang digunakan untuk naik ke menara ternyata sudah aus dan tidak memenuhi standar SNI.
2. Di sekitar area turbin, terdapat kabel penghubung yang belum dirapikan, berpotensi menjadi sumber tersandung atau korsleting saat uji tegangan.
3. Angin bertiup cukup kencang (15 m/s) saat pemeriksaan dilakukan, tetapi salah satu teknisi tetap naik ke atas menara tanpa menunggu penurunan kecepatan angin.



4. Beberapa peralatan logam diletakkan terlalu dekat dengan sistem kelistrikan tanpa *grounding* yang baik.
5. Tidak semua anggota tim memakai helm pelindung dan sepatu *safety* karena alasan terburu-buru menyelesaikan pekerjaan.

Beberapa menit setelah uji coba dimulai, bilah turbin berputar dengan cepat dan hembusan angin menerbangkan ranting kecil ke arah bilah, menimbulkan getaran tidak normal. Untungnya, operator segera mematikan sistem melalui *emergency stop* sehingga tidak terjadi kerusakan fatal.

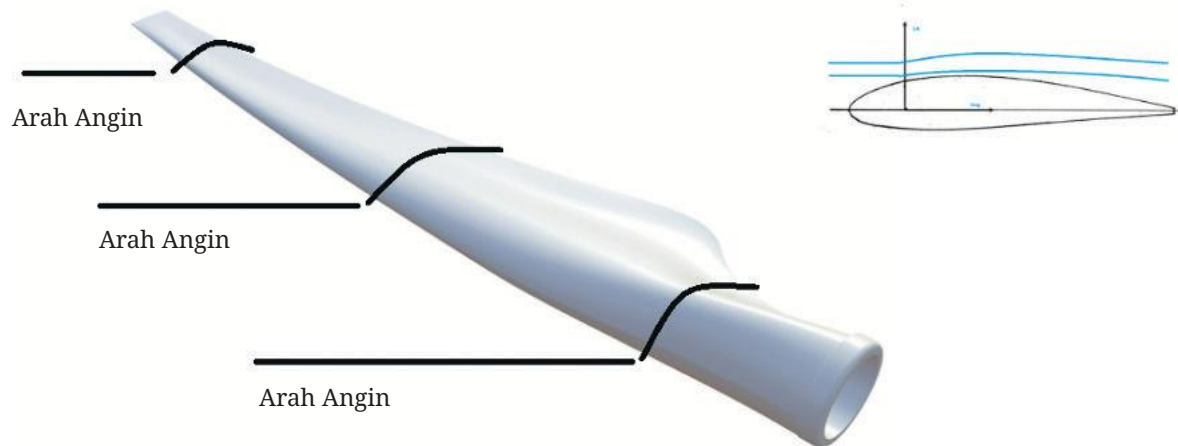
Setelah membaca studi kasus di atas, jawablah soal-soal berikut.

1. Apa tujuan utama dilakukannya inspeksi keselamatan kerja sebelum pengoperasian awal PLTB di Desa Sukorejo? Risiko apa yang dapat terjadi jika prosedur ini diabaikan?
2. Sebutkan langkah-langkah konkret yang harus dilakukan oleh tim teknisi untuk memperbaiki kondisi tidak aman yang ditemukan, seperti kabel yang belum rapi dan peralatan logam tanpa *grounding*.
3. Bagaimana seharusnya sikap seorang teknisi profesional ketika melihat rekan kerja mengabaikan penggunaan alat pelindung diri (APD) demi mempercepat pekerjaan? Mengapa sikap itu penting diterapkan dalam tim?
4. Identifikasi tiga risiko utama yang terdapat pada kasus PLTB di atas. Lalu, jelaskan langkah mitigasi yang paling tepat untuk mencegah terulangnya kejadian serupa di masa depan.
5. Setelah mempelajari kasus PLTB di Desa Sukorejo, apa makna yang dapat kamu ambil tentang hubungan antara budaya keselamatan kerja, keberhasilan operasional sistem PLTB, dan tanggung jawab sosial terhadap masyarakat sekitar?

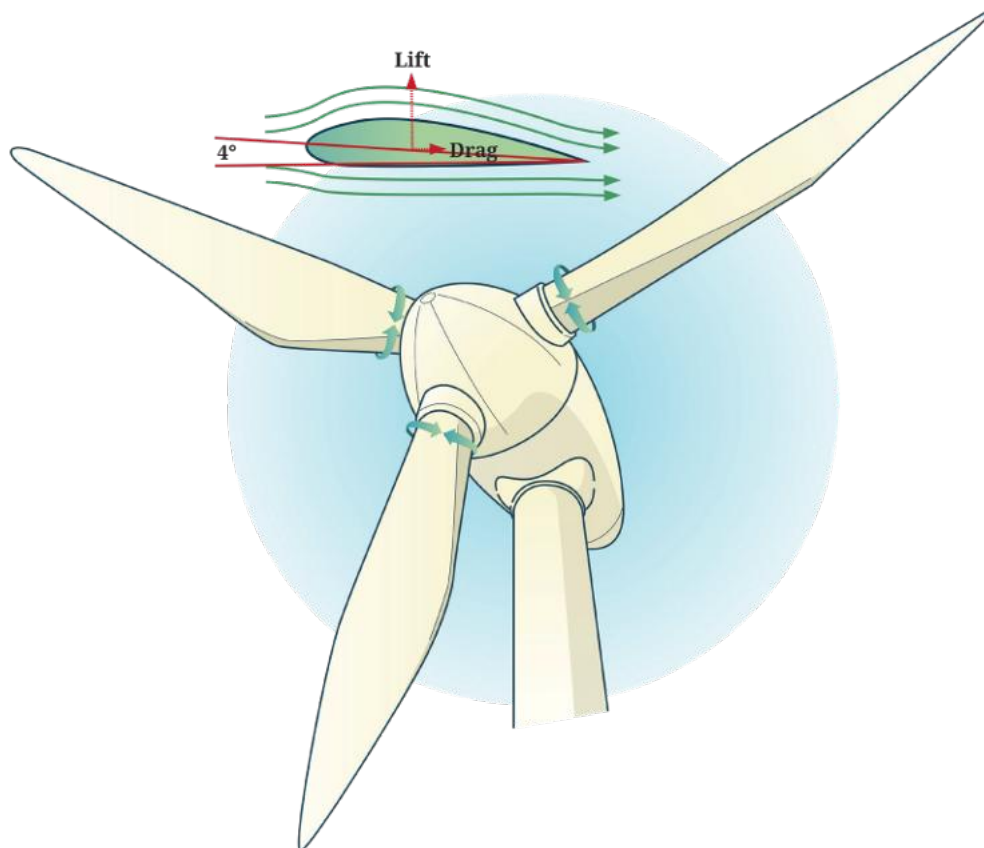
b. Pengoperasian Sistem Mekanis PLTB

Langkah pertama ialah mengaktifkan sistem mekanis. Perhatikan Gambar 3.14. Bilah kipas berhenti, *pitch control* membuang energi angin pada 90°. Perhatikan Gambar 3.14 secara bertahap, kipas *blade* diputar pada posisi *pitch control* menerima energi angin, mulai dari 10, 15, 20 derajat.



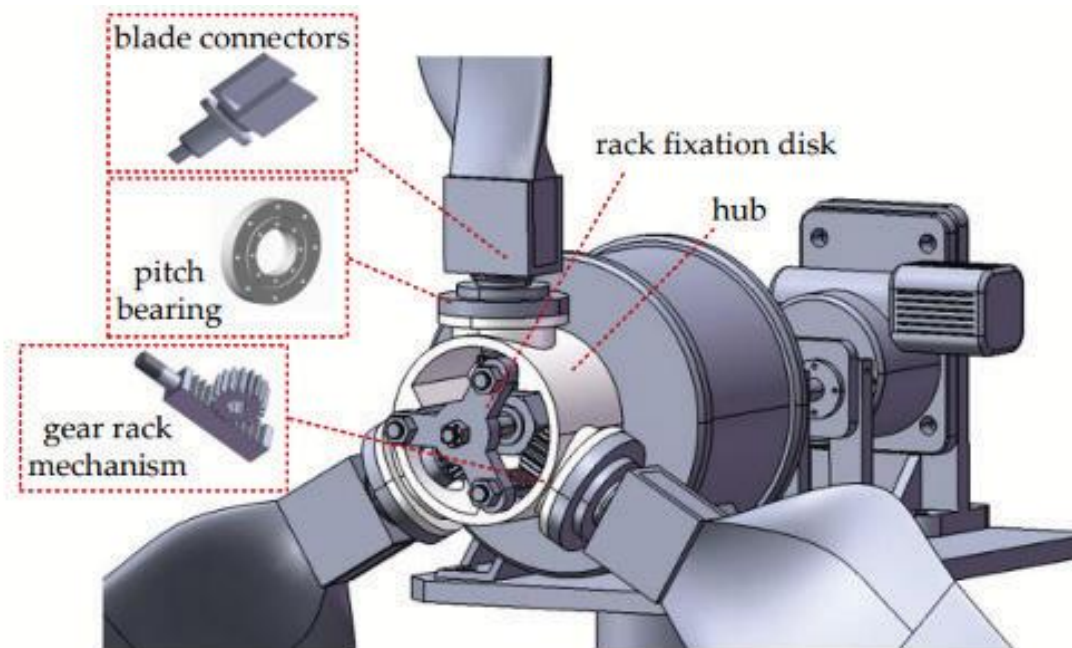


Gambar 3.14 Posisi Kipas Tidak Menerima Angin 90°
 Sumber: Amin Wahyono, Kemendikdasmen (2025)



Gambar 3.15 Posisi Kipas Menerima Angin 4°
 Sumber: wachendorff-automation (2025)

Pada turbin angin horizontal, gaya *drag* mulai bekerja saat sudut serang baling-baling lebih dari sekitar 15° . Pada sudut ini, aliran angin tidak lagi mengikuti bentuk baling-baling dengan baik sehingga gaya hambat meningkat tajam. Akibatnya, baling-baling jadi melambat karena *drag* yang besar mengurangi efisiensi. Sebaliknya, pada sudut serang antara 5° – 15° , gaya *lift* masih dominan dan *drag* tetap kecil sehingga turbin berputar dengan baik menghasilkan energi.



Gambar 3.16 Sistem Pengatur *Pitch* Kontrol Sistem Elektrik

Sumber: Wang et al. (2023)

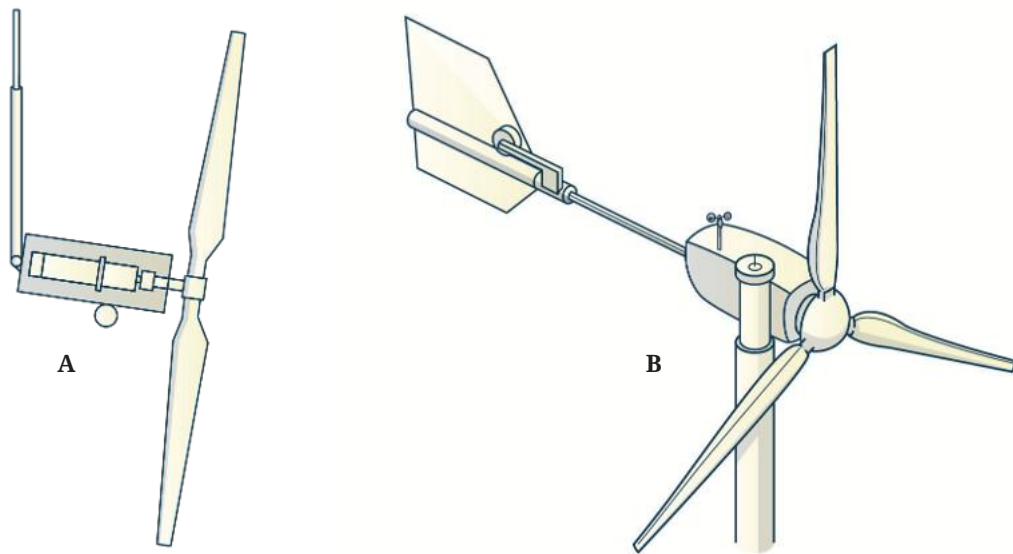
Pada sistem elektrik seperti ditunjukkan pada Gambar 3.16, *pitch control* dioperasikan menggunakan motor listrik yang menggerakkan mekanisme *gear rack* maju-mundur untuk mengatur *blade connection*. Di dalam *blade connection*, terdapat *pitch bearing* yang menyesuaikan sudut baling-baling dalam menangkap energi angin. *Pitch control* ini dapat dikendalikan melalui layar *dashboard* sistem kontrol berbasis internet maupun secara manual dengan sistem elektrik. Pengoperasian *pitch control* sangat terkait dengan batas kecepatan putaran maksimum baling-baling *cut-out* sehingga harus selalu diwaspadai agar turbin tidak berputar melebihi kapasitasnya.

Langkah kedua, lepaskan rem turbin secara perlahan kalau sebelumnya dalam keadaan terkunci supaya baling-baling dapat mulai berputar. Lakukan dengan hati-hati



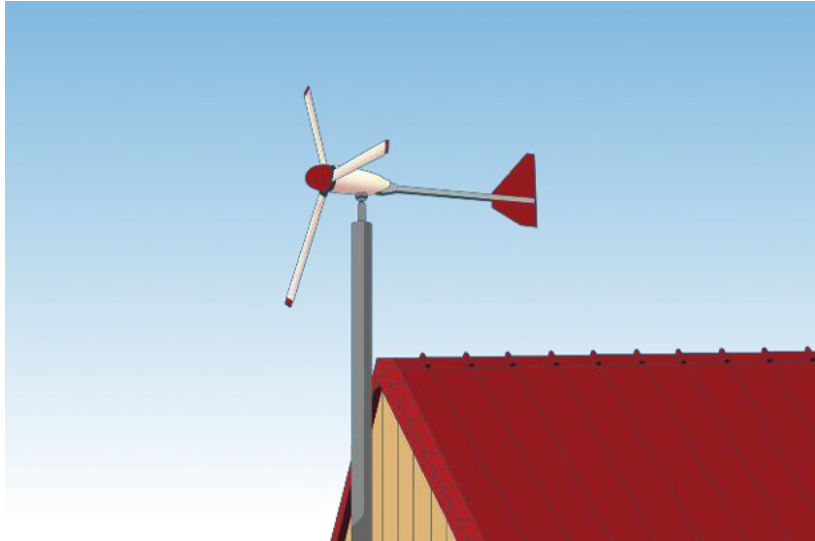
sambil memperhatikan kecepatan putaran baling-baling. Amati putaran awal, ketika baling-baling mulai berputar, perhatikan apakah putarannya halus dan tidak goyang berlebihan.

Di beberapa sistem PLTB, pengaman hanya mengandalkan mekanisme *furling* tanpa dilengkapi sistem *pitch*. Langkah awal yang perlu dilakukan ialah memastikan *furling* terarah lurus ke sumber angin agar baling-baling dapat menangkap angin secara maksimal. Setelah rotor mulai berputar, segera lanjutkan dengan pemeriksaan pada sistem kelistrikannya.



Gambar 3.17 (A) Kondisi Pengaman *Furling* Aktif, PLTB Berhenti
(B) Kondisi Pengaman *Furling* Tidak Aktif, PLTB Bekerja
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Sementara itu, pada PLTB yang tidak dilengkapi pengaman *pitch* atau *furling*, pengoperasiannya mengacu pada *wind rose* diagram angin. Perhatikan Gambar 3.18. Caranya ialah mengarahkan baling-baling secara manual ke arah datangnya angin dengan kecepatan tertinggi. Jika arah angin berubah sewaktu-waktu, posisi baling-baling juga harus disesuaikan lagi agar tetap menghadap arah angin terbaru.



Gambar 3.18 PLTB Skala Kecil Tanpa Pengaman
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Aktivitas 3.6 Mengoperasikan Sistem Mekanis

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengoperasian sistem mekanis pada beberapa model PLTB.

Langkah-Langkah:

Mari, menjadi teknisi yang teliti dalam mengoperasikan sistem mekanis PLTB.

Studi Kasus

Saat turbin mulai berputar pada kecepatan angin sekitar 7 m/s, rotor tampak berputar halus. Namun, setelah beroperasi sekitar 15 menit, tim mendeteksi munculnya getaran ringan dan suara gesekan pada bagian depan *nacelle*. Setelah diperiksa menggunakan *vibration meter*, ditemukan bahwa putaran rotor tidak lagi seimbang sempurna.

Tim kemudian memeriksa komponen utama sistem mekanis berikut.

1. Bilah (*Blade*)

Salah satu bilah menunjukkan sedikit perbedaan massa dibandingkan dengan dua bilah lainnya karena terdapat kotoran dan kerak garam laut yang menempel di permukaannya. Hal ini mengakibatkan ketidakseimbangan putaran rotor sehingga timbul gaya sentrifugal tidak merata.



2. *Hub* dan Poros Utama (*Main Shaft*)

Hub berfungsi sebagai pengikat ketiga bilah ke poros utama. Pemeriksaan menunjukkan adanya kelonggaran kecil pada baut pengikat *hub* akibat getaran berulang. Hal ini berpotensi meningkatkan beban puntir pada poros saat kecepatan putaran meningkat.

3. *Bearing* (Laher) Utama

Bearing berfungsi menopang poros rotor agar berputar halus dan menyalurkan gaya rotasi ke generator. Setelah dibongkar, ditemukan pelumasan *bearing* menurun dan terdapat jejak aus ringan pada cincin dalam *bearing*. Kekurangan pelumas menyebabkan peningkatan gesekan mekanis dan menurunkan efisiensi rotasi.

4. Kopling ke Generator

Sistem ini menggunakan kopling fleksibel yang menghubungkan poros utama dengan rotor generator permanen magnet (PMG). Karena getaran meningkat, poros generator mengalami *misalignment* sekitar 1,2 mm. Akibatnya, putaran rotor tidak sepenuhnya tersalurkan ke generator, dan *output* listrik menurun sekitar 10%.

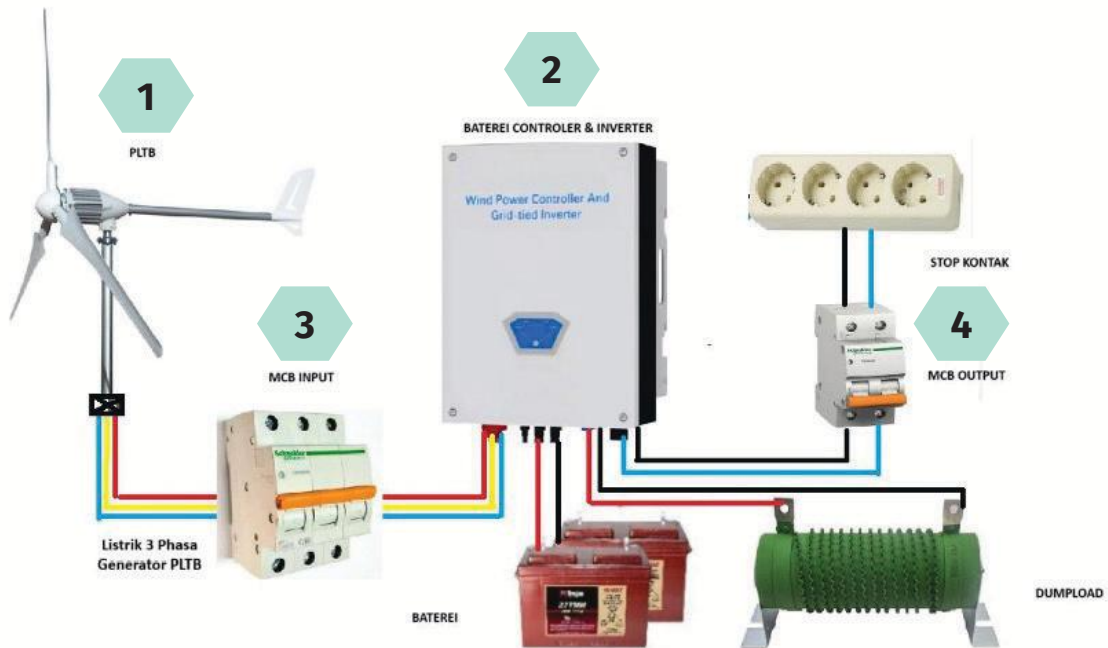
Setelah membaca permasalahan di atas, silakan jawab pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apa fungsi utama komponen *bearing*, *hub*, dan kopling dalam sistem mekanis PLTB? Bagaimana ketiganya berperan dalam menyalurkan energi dari bilah ke generator?
2. Berdasarkan kasus getaran dan gesekan pada *nacelle*, langkah-langkah pemeriksaan dan perbaikan apa yang perlu dilakukan teknisi untuk mengembalikan keseimbangan rotor dan efisiensi sistem?
3. Sikap apa yang harus ditunjukkan oleh seorang teknisi ketika menemukan gejala getaran dan keausan pada sistem mekanis turbin agar keselamatan kerja dan keberlanjutan sistem tetap terjaga?
4. Jika kamu ditugaskan sebagai anggota tim perawatan, bagaimana cara kamu menggunakan *vibration meter* dan alat *alignment* untuk memastikan poros generator sejajar dengan poros rotor setelah perbaikan?
5. Dari kasus ketidakseimbangan rotor dan kerusakan *bearing* ini, apa pelajaran penting yang dapat kamu ambil tentang hubungan antara perawatan mekanis yang rutin dan keandalan sistem PLTB secara keseluruhan?



c. Pengoperasian Sistem Kelistrikan

Berikut ini prosedur pengoperasian sistem kelistrikan PLTB. *Pertama*, saat sistem mekanis sudah mulai berputar, pastikan sistem kelistrikan dalam kondisi siap, di mana setiap peralatan dipasang secara benar sesuai buku petunjuk pemasangan. *Kedua*, hidupkan dan amati *panel controller system*. Panel ini akan membaca kondisi baterai dan mengoreksi diagram pengkabelan dan memonitor tegangan dan arus masuk. Pastikan tegangan dari turbin sesuai dengan spesifikasi sistem (misalnya 48 V untuk baterai 48 V).



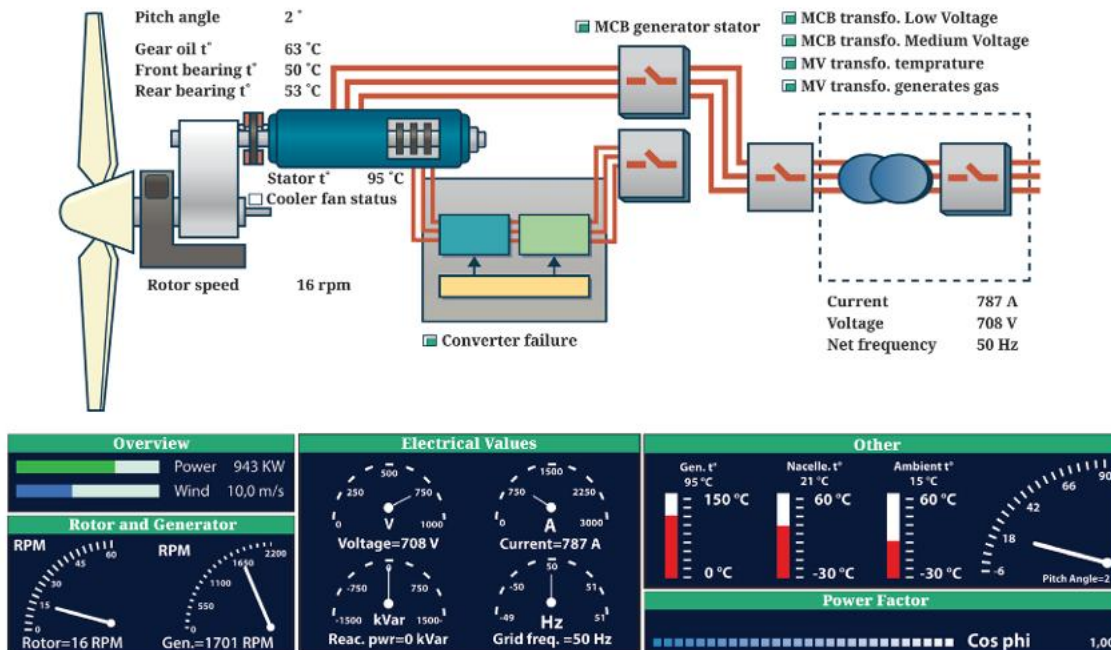
Gambar 3.19 Urutan Pengoperasian PLTB
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

Perhatikan Gambar 3.19. *Ketiga*, sambungkan listrik yang dihasilkan turbin ke sistem kelistrikan dengan mengubah posisi MCB input pada posisi *on*. Kemudian, mengaktifkan sistem penyimpanan daya jika memakai baterai. Pastikan arus *charging* mulai masuk ke baterai (lampu indikator *charging* menyala). Jika sistem *on-grid*, pastikan inverter mendeteksi sinkronisasi dengan jaringan, lalu mulai menyalurkan daya. Periksa kembali keseluruhan sistem. Pastikan tidak ada suara aneh dari *controller*, inverter, atau baterai (seperti dengungan berlebihan atau bau terbakar). Cek suhu komponen, adanya panas berlebih menandakan masalah. Catat parameter awal, meliputi tegangan, arus, kecepatan angin, dan parameter penting lainnya untuk data monitoring.

Keempat, posisikan MCB *output* ON, pastikan beban dalam menggunakan listrik tidak melebihi kapasitas maksimal. Beban pemakaian listrik yang besar seperti motor listrik dan pendingin ruangan, di aktifkan paling terakhir. Sambil terus memperhatikan arus hasil PLTB dan kondisi baterai.

Pada sistem PLTB Skala Kecil, prosedur pengoperasian dilakukan secara sederhana dan efisien. Tahap awal dimulai dengan inspeksi visual terhadap kondisi fisik komponen utama, meliputi turbin angin, struktur penyangga, dan sistem tali penahan. Selanjutnya, dilakukan verifikasi terhadap instalasi kabel, baik pada sisi input maupun *output* sistem. Pengendalian sistem PLTB ini sepenuhnya ditangani oleh unit kontroler yang telah terintegrasi dengan modul pengisian baterai dan inverter. Setelah semua elemen sistem dinyatakan dalam kondisi siap operasional, operator mengaktifkan sistem dengan mengalihkan posisi *Miniature Circuit Breaker* (MCB) pengaman ke mode ON.

Ada pengoperasian PLTB Skala Kecil yang dilengkapi peralatan sistem kontrol lengkap didukung sensor dan sistem informasi seperti pada Gambar 3.20. Perpaduan sistem kontrol *hardware* dan *software* dalam pengoperasian PLTB disebut *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Peralatan ini yang dirancang untuk memaksimalkan produksi energi, menjaga keamanan turbin, dan memastikan operasional yang baik.



Gambar 3.20 Mengoperasikan PLTB melalui Monitor

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

SCADA merupakan kumpulan komponen *software* dan *hardware* yang membentuk sebuah kesatuan yang dapat mengawasi *supervise* yang membentuk, mengendalikan *control*, dan mengakuisisi data, dalam sebuah proses kendali plants. SCADA juga berfungsi memeriksa, mengambil data dan memprosesnya secara *real-time* serta sebagai alat bantu *tools* dalam otomasi industri. SCADA terdiri atas beberapa bagian berikut.

1) Sensor atau *Actuator Field device*

Sensor ini berada di lapangan atau dekat dengan objek yang diawasi. Peralatan sensor yang digunakan di antaranya seperti berikut.

- a) *Anemometer* atau *Wind Speed Transmitter* peralatan untuk mengukur kecepatan angin. Memiliki keluaran output RS485, dengan kabel coklat *brown* (+), dan hitam *black* (-), hijau (A) dan Biru (B), membutuhkan tegangan 10-31 volt. *Output* dari peralatan ini dihubungkan pada terminal RTU



Gambar 3.21 Sensor Pembaca Kecepatan Angin

Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

- b) Sensor arah angin (*Wind Direction Transmitter*) peralatan sensor yang membaca arah angin, memiliki *output* RS 485 yang merupakan standar antarmuka komunikasi serial yang umum digunakan dalam aplikasi industri, terutama untuk jaringan multi-titik yang membutuhkan komunikasi jarak jauh dan tahan terhadap derau. Membutuhkan tegangan DC 10-30 Volt dan memiliki dua kabel keluaran berwarna A untuk hijau dan B untuk biru. Kabel sensor ini di hubungkan pada RTU.





Gambar 3.22 Sensor Pembaca Arah Angin

Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

- c) Sensor RPM (*rotation per minutes*) untuk mengukur kecepatan poros rotor atau generator. Peralatan ini mendeteksi kecepatan putaran suatu objek dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem lain, memiliki *output* RS485 yang dihubungkan dengan RTU.



Gambar 3.23 Sensor RPM

Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

- d) Sensor tegangan untuk mengetahui tegangan keluaran dari generator, ada model tegangan arus bolak balik dan arus searah DC. Karena kita mengukur keluaran generator PLTB 3 *phase*, maka menggunakan model AC, yang bekerja di tegangan 0-1000V, input 4-20 mA memiliki *output* RS-485 yang dihubungkan dengan RTU.





Gambar 3.24 Sensor Pembaca Tegangan Listrik
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

- e) Sensor arus *Current Transducer* untuk mengukur arus listrik keluaran generator. Sinyal listrik yang diukur biasanya berupa arus, tegangan, daya, dan frekuensi. Komponen sensitif mendeteksi parameter listrik dan mengirimkan sinyal tersebut ke komponen konversi, yang kemudian mengubahnya menjadi sinyal arus kecil. Kemudian, sinyal tersebut diteruskan ke sirkuit konversi, yang memproses sinyal arus kecil dan menghasilkan sinyal listrik standar, biasanya 0-5 V, 4-20 mA, RS-485 yang dihubungkan ke RTU.

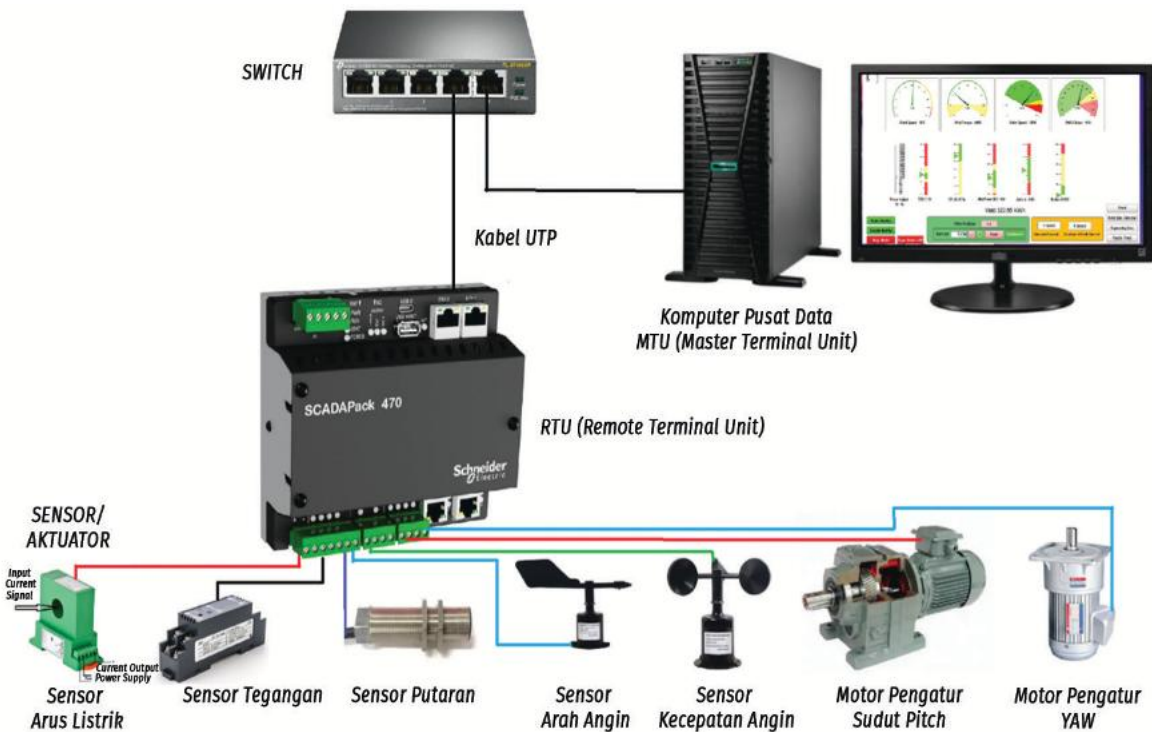


Gambar 3.25 Sensor Pembaca Arus Listrik
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)



2) *Remote Terminal Unit* (RTU)

Unit ini bertugas mengumpulkan data dari sensor yang terpasang pada PLTB, setiap unit PLTB membutuhkan satu unit RTU. Data yang diprogram pada RTU kemudian dikirimkan melalui sistem komunikasi Jaringan Komputer; kabel UTP, *fiber optic*, atau *wireless* ke *Master Terminal Unit* (MTU). Peralatan RTU secara operasional menerima perintah kendali dari MTU secara langsung *real-time*.



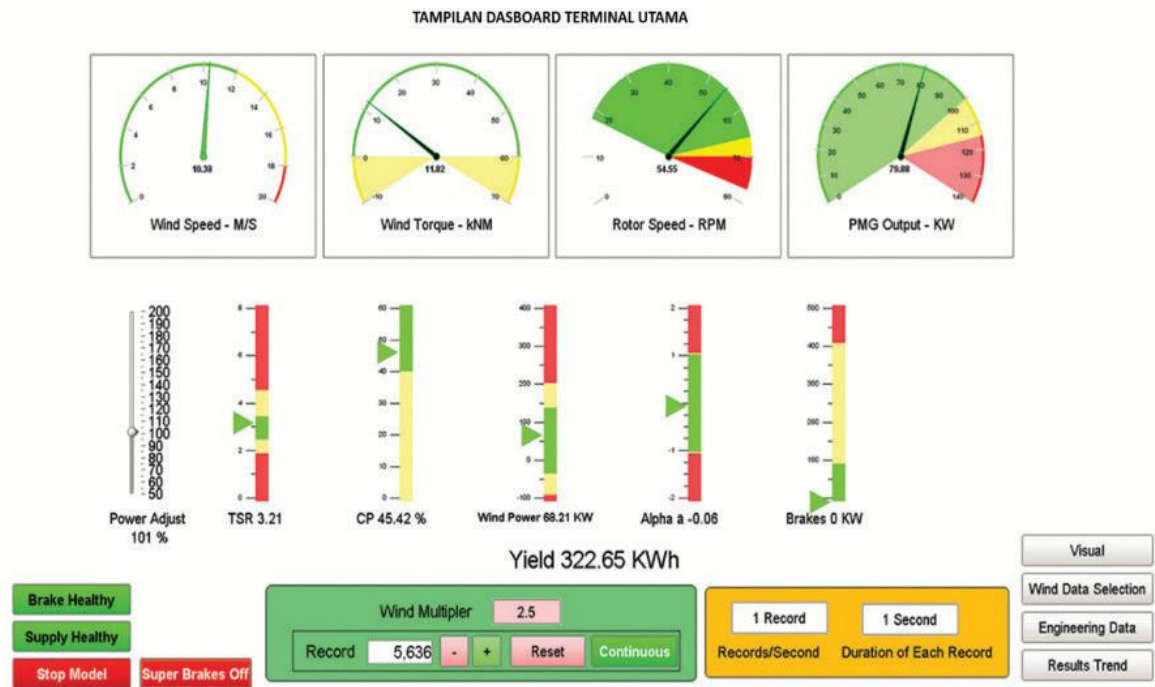
Gambar 3.26 Bagan Sistem SCADA pada PLTB Skala Kecil

Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

3) Sistem Komunikasi

Dalam sistem kontrol PLTB modern, komunikasi memegang peranan penting karena menjadi jalur utama pertukaran data antara MTU, RTU atau PLC, serta perangkat sensor dan aktuator di lapangan. Komunikasi ini dapat dilakukan melalui media kabel seperti RS-485, kabel *fiber optic*, Ethernet, Wi-Fi, atau seluler (3G/4G). Selain itu,

protokol komunikasi yang umum digunakan antara lain Modbus, DNP3, IEC 60870-5-104, dan IEC 61850, yang terintegrasi data secara *real-time* ke MTU.

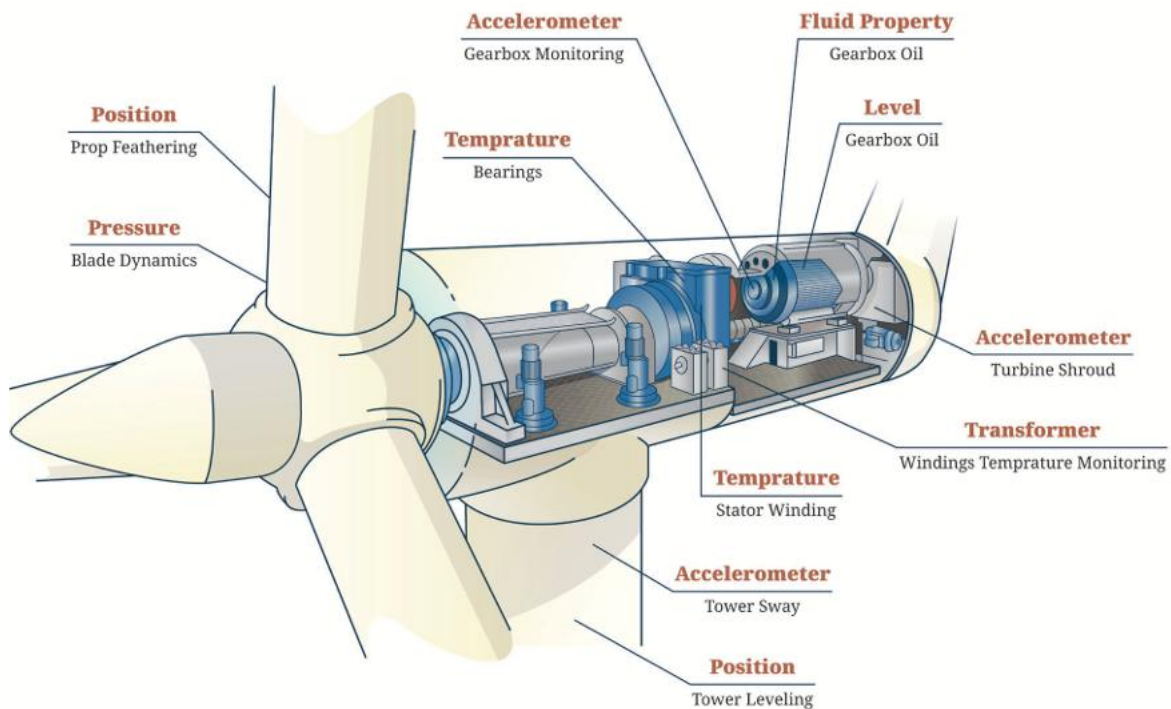


Gambar 3.27 Tampilan Layar pada Terminal Utama

Sumber: inductiveautomation (2025)

4) Terminal Pusat *Master Terminal Unit*

MTU sistem PLTB, seperti tampak pada Gambar 3.27, berfungsi sebagai pusat pengendali dan pemantau utama semua proses operasi turbin angin. MTU menerima data dari berbagai sistem RTU yang diletakkan pada setiap turbin yang tersebar di lapangan. MTU kemudian memproses dan menampilkan informasi tersebut melalui tampilan layar komputer berbasis web dan *dashboard* pengawasan yang menjadi bahan untuk pengambilan keputusan oleh operator. Selain itu, MTU juga menjalankan fungsi kontrol jarak jauh seperti *start/stop* PLTB, penyesuaian sudut *pitch*, kontrol arah *yaw*, serta pengaturan pemutus listrik.



Gambar 3.28 Beberapa Sensor Tambahan pada PLTB

Sumber: mouser (2025)

Pada PLTB vertikal (*Savonius*, *Darrieus*) yang lebih modern dilengkapi dengan berbagai macam sensor yang memiliki kesamaan, dengan model sumbu horizontal seperti pada Gambar 3.28. Berikut ini sensor-sensor tersebut.

- Position Sensor – Prop Feathering* fungsi untuk mengukur posisi sudut *blade* (*pitch angle*). Penting untuk mengatur sudut baling-baling agar optimal menangkap energi angin serta sebagai sistem proteksi (*feathering mode* saat angin kencang).
- Pressure Sensor – Blade Dynamics* berfungsi untuk mengukur tekanan aerodinamis pada *blade*. Berguna untuk memantau beban dinamis, mendeteksi kondisi turbulensi, serta mencegah kerusakan struktur *blade*.
- Accelerometer – Gearbox Monitoring* berfungsi untuk mendeteksi getaran pada *gearbox*. Dapat digunakan untuk *predictive maintenance*, mendeteksi kerusakan *gear*, *bearing*, atau ketidakseimbangan.
- Fluid Property Sensor – Gearbox Oil* berfungsi untuk memantau kualitas oli *gearbox* (viskositas, kontaminasi, suhu). Menjamin sistem pelumasan bekerja baik sehingga umur *gearbox* lebih panjang.

- e) *Level Sensor – Gearbox Oil* berfungsi untuk mengukur level (ketinggian) oli *gearbox*. Jika oli kurang bisa menyebabkan keausan dan kerusakan komponen.
- f) *Temperature Sensor – Bearings* berfungsi untuk mengukur suhu bantalan. Deteksi dini *overheating* atau gesekan berlebih.
- g) *Accelerometer – Turbine Shroud* berfungsi untuk mengukur getaran di *nacelle (shroud/penutup turbin)*. Untuk mendeteksi getaran abnormal akibat ketidakseimbangan rotor atau masalah mekanis.
- h) *Transformer Sensor – Windings Temperature Monitoring* berfungsi untuk memantau suhu belitan (*winding*) pada generator atau trafo. Suhu tinggi dapat menyebabkan degradasi isolasi dan kerusakan listrik.
- i) *Temperature Sensor – Stator Winding* berfungsi untuk mengukur suhu lilitan stator generator. Untuk mencegah *overheating* dan menjaga efisiensi konversi energi listrik.
- j) *Accelerometer – Tower Sway* berfungsi untuk mendeteksi ayunan/getaran menara (*tower sway*). Penting untuk keamanan struktur terutama saat badai atau angin kencang.
- k) *Position Sensor – Tower Leveling* berfungsi untuk mengukur posisi/kemiringan menara turbin. Digunakan untuk memantau kestabilan pondasi dan struktur tower.

Aktivitas 3.7 Mengoperasikan Sistem Kelistrikan dan Sensor

Aktivitas Individu dan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan pengoperasian sistem kelistrikan dan sensor pada beberapa model PLTB.

Langkah-Langkah:

Ayo, pelajari kasus berikut untuk memahami pengoperasian sistem kelistrikan dan sensor.

Studi Kasus

SMKN 1 Suruh Trenggalek Jawa Timur bekerja sama dengan tim teknisi dari sebuah perusahaan energi terbarukan sedang melakukan uji coba sistem PLTB Skala Kecil berkapasitas 1.500 W yang baru dipasang di pesisir selatan Kabupaten Pacitan. Sistem ini dilengkapi dengan turbin angin horizontal tiga bilah, baterai penyimpanan 48 V, serta inverter *on-grid* yang terkoneksi dengan jaringan listrik lokal.



PLTB ini juga didukung sistem kontrol berbasis SCADA, yang terdiri atas berbagai sensor (kecepatan angin, arah angin, RPM, tegangan, arus, suhu *bearing*, dan getaran *nacelle*).

Pada hari pertama pengoperasian, didapati hal-hal berikut.

1. Sistem mekanis sudah berputar dengan kecepatan rata-rata 7 m/s dan rotor berputar stabil.
2. Operator mengaktifkan sistem kelistrikan melalui panel kontrol, dan menyalakan MCB *input* untuk menyalurkan energi ke sistem penyimpanan baterai.
3. Lampu *indicator charging* menyala, menunjukkan arus mulai mengalir ke baterai.
4. Setelah sekitar 20 menit, operator mencatat bahwa tegangan baterai naik dari 47,8 V ke 51,2 V, tetapi muncul peringatan pada layar SCADA berupa pesan “*Vibration Alert – Nacelle Sensor*”.
5. Data dari *accelerometer* di *gearbox* menunjukkan adanya peningkatan getaran dari 2,8 mm/s menjadi 6,2 mm/s, dan temperatur sensor pada *bearing* juga naik dari 45 °C ke 65 °C dalam waktu 10 menit.
6. Operator segera mematikan sistem melalui MTU dan melakukan pemeriksaan.

Setelah dilakukan inspeksi, ditemukan bahwa:

1. Oli *gearbox* berkurang karena level sensor menunjukkan posisi di bawah batas minimum.
2. *Bearing* generator menunjukkan tanda *overheating* ringan akibat pelumasan yang tidak merata.
3. Tidak ditemukan kerusakan pada sistem kelistrikan, tetapi sensor getaran (*accelerometer*) memberikan alarm karena membaca perubahan amplitudo melebihi batas normal.

Setelah membaca studi kasus di atas, silakan jawab soal-soal berikut.

1. Jelaskan hubungan antara tegangan keluaran generator, sistem pengisian baterai, dan inverter *on-grid* pada PLTB. Mengapa keseimbangan nilai tegangan (misalnya 48 V pada sistem 48 V) penting untuk menjaga efisiensi dan keamanan operasi kelistrikan?
2. Berdasarkan data SCADA, tegangan baterai meningkat dari 47,8 V ke 51,2 V setelah 20 menit pengoperasian. Apa analisis kamu terhadap kondisi pengisian baterai tersebut? Langkah teknis apa yang sebaiknya dilakukan operator untuk memastikan proses *charging* tetap aman dan sesuai standar?



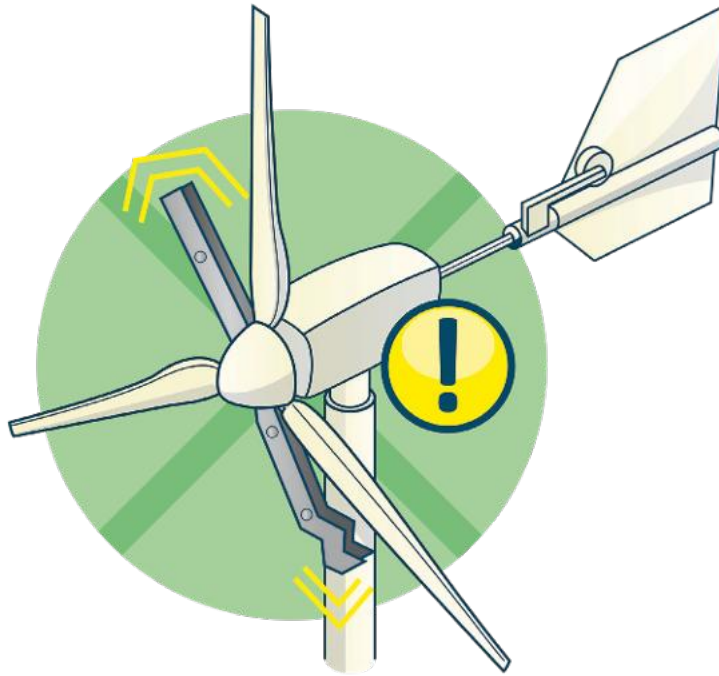
3. Operator memutuskan sistem dari MTU setelah mendeteksi peringatan getaran dan suhu tinggi meskipun listrik masih mengalir normal. Nilai-nilai karakter apa yang tercermin dari tindakan tersebut dan bagaimana hal ini mencerminkan etika kerja di bidang teknik kelistrikan?
4. Jika kamu menjadi teknisi lapangan dan sistem SCADA mengalami gangguan komunikasi, bagaimana cara kamu memastikan tegangan dan arus pada sistem PLTB tetap dalam kondisi aman secara manual? Sebutkan alat ukur yang digunakan dan prosedur pemeriksaannya.
5. Dari kasus PLTB di Pacitan ini, apa pelajaran penting yang kamu dapatkan tentang hubungan antara sistem mekanis dan sistem kelistrikan dalam menjaga keandalan dan keselamatan PLTB? Bagaimana kamu akan menerapkan pemahaman tersebut pada proyek atau praktik di sekolah?

d. Menghentikan Sistem PLTB

Langkah menghentikan Sistem pada PLTB Skala Kecil menggunakan beberapa cara, yaitu sistem pengaman putaran, *furling*, dan sistem pengaman *pitch* dan *yaw control*. Berikut ini cara menghentikan sistem PLTB Skala Kecil.

- 1) Menggunakan Sistem Pengaman Putaran
Prosedur pemadaman sistem mekanis dan kelistrikan pada PLTB Skala Kecil yang tidak menggunakan sistem pengaman putaran ialah sebagai berikut.
 - a) Persiapan Pemadaman
Pastikan kondisi cuaca (kecepatan angin) mendukung untuk penghentian, sebaiknya tidak dalam kondisi angin kencang atau badai. Pastikan operator memahami urutan prosedur dan memakai APD. Jangan paksa menahan rotor yang masih berputar cepat karena gaya inersia baling-baling dapat sangat besar, berpotensi menyebabkan cedera serius. Jangan hentikan turbin pada kecepatan tinggi secara mendadak, misalnya dengan mengganjal rotor, karena dapat merusak poros, *gearbox* atau bantalan.





Gambar 3.29 Jangan Menghentikan PLTB dengan Mengganjal Bilah
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

b) Pemadaman Sistem Mekanis (Rotor dan Turbin)

Karena turbin tidak memiliki sistem pengereman otomatis, metode manual yang dapat dilakukan seperti berikut.

- Hadapkan bilah keluar dari arah angin secara manual; mengubah arah *nacelle*/turbin agar sudut bilah tidak menangkap angin sehingga turbin mulai melambat.
- Tunggu hingga putaran menurun mendekati kecepatan nol secara alami—jangan pernah mencoba menghentikan rotor dengan tangan atau benda karena dapat membahayakan.

c) Pemadaman Sistem Kelistrikan

Setelah rotor benar-benar berhenti atau putaran sudah sangat lambat, lakukan hal-hal berikut.

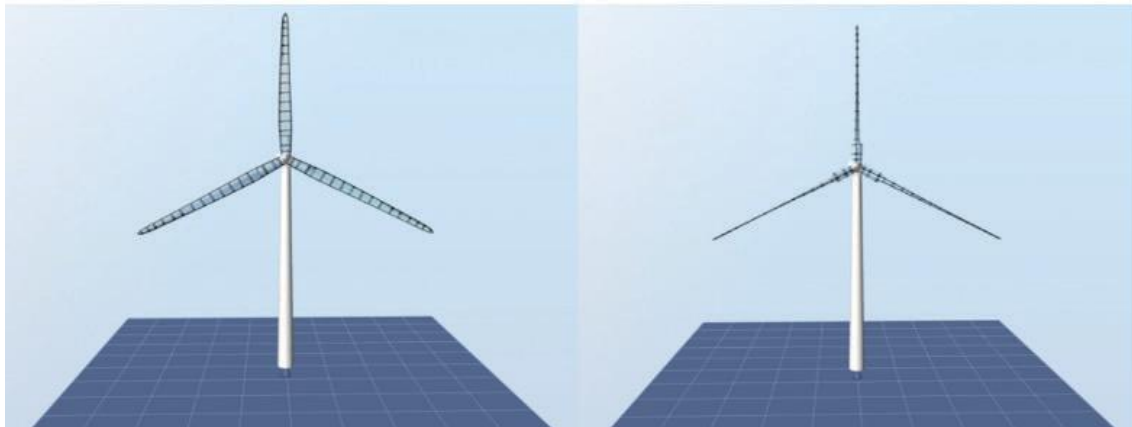
- Putuskan koneksi listrik dari turbin ke sistem beban atau inverter (biasanya melalui MCB/*disconnecter* di panel kontrol).
- Jika memakai sistem *off-grid* dengan baterai, matikan juga DC isolator ke baterai agar tidak ada energi yang tersimpan mengalir ke beban.
- Periksa tegangan *output* dari generator dengan multimeter—pastikan sudah nol volt sebelum melakukan perawatan.

- d) **Pemeriksaan Setelah Pemadaman**
Lakukan pemeriksaan mekanis berikut.
- Cek baut, baling-baling, poros, dan *bearing* untuk memastikan tidak ada kerusakan akibat pemadaman.
 - Periksa sistem kelistrikan: konektor, kabel, panel kontrol, pastikan tidak ada korsleting atau kerusakan insulasi.
- 2) **Menggunakan Sistem Pengaman *Furling***
Prosedur pemadaman sistem mekanis dan kelistrikan pada PLTB yang menggunakan sistem pengaman *furling* adalah sebagai berikut.
- a) **Persiapan Pemadaman**
Pastikan kondisi memungkinkan (tidak ada badai mendadak), operator memahami urutan pemadaman, memakai APD: helm dan sarung tangan. Sistem *furling* bukan rem total, melainkan hanya pengaman untuk memperlambat rotor. Jadi, biarkan sistem bekerja dengan biarkan sistem bekerja sampai proses selesai. Jika angin kencang masih terus bertiup, jangan lakukan perbaikan pada turbin sebelum rotor berhenti sepenuhnya.
- b) **Pemadaman Sistem Mekanis (Rotor dan Turbin)**
Caranya dengan mengaktifkan sistem *furling* secara manual pada beberapa turbin. *Furling* dapat diaktifkan dengan tuas atau mekanisme kontrol sederhana sehingga rotor secara otomatis mengarah menjauh dari angin dan putaran menurun. Sistem *furling* akan memaksa bilah keluar dari arah angin, kemudian mengurangi kecepatan rotor secara bertahap dan aman. Jangan mengganjal rotor, biarkan sistem *furling* bekerja hingga rotor melambat ke kecepatan rendah atau berhenti.
- c) **Pemadaman Sistem Kelistrikan**
Setelah rotor sudah melambat atau berhenti, lanjutkan memutuskan sakelar utama di panel kontrol untuk memutus aliran listrik dari generator ke sistem inverter atau beban. Jika sistem memiliki baterai, matikan DC isolator agar aliran dari baterai ke beban benar-benar terputus. Periksa dengan multimeter, pastikan tegangan *output* dari turbin sudah mendekati nol volt sebelum memulai perawatan.
- 3) **Menggunakan Sistem Pengaman *Pitch* dan *Yaw Control***
Prosedur pemadaman sistem mekanis dan kelistrikan pada PLTB yang menggunakan sistem pengaman *pitch* dan *yaw control* ialah sebagai berikut.



a) Persiapan Pemadaman

Pastikan kondisi cuaca mendukung. Jangan lakukan prosedur jika ada badai mendadak. Operator harus memakai APD (helm, *safety harness* jika naik *tower*). Jangan menghentikan rotor dengan cara mekanis paksa (ganjal, sabuk) — ini dapat menyebabkan kerusakan besar pada poros, *gearbox*, atau *blade*. Jalankan prosedur ini secara berurutan: 1. *pitch* 2. *yaw* 3. kelistrikan, bukan sebaliknya



(a)

(b)

Gambar 3. 30 (a) Posisi Pitch 0°; (b) Posisi Pitch 90°

Sumber: simis (2025)

b) Pemadaman Mekanis Motor

Aktifkan *pitch control* ke posisi *feathering* (sudut bilah mendekati 90° terhadap arah angin) untuk mengurangi gaya *lift* pada bilah sehingga rotor melambat secara bertahap hingga berhenti. Kemudian, aktifkan *yaw control* untuk mengarahkan *nacelle*/turbin menjauh dari arah angin (*yaw out of wind*) untuk mempercepat pengurangan kecepatan rotor karena bilah tidak lagi efektif menangkap angin. Selanjutnya, biarkan rotor melambat secara alami baru kemudian mengaktifkan sistem rem.

c) Pemadaman Sistem Kelistrikan

Setelah rotor melambat atau berhenti, putuskan koneksi listrik utama di panel kontrol MCB atau *main switch* untuk memutus aliran dari generator ke inverter/beban. Jika sistem menggunakan baterai, matikan DC Isolator untuk memutus arus dari baterai ke beban. Pastikan menggunakan multimeter untuk mengecek tegangan *output* generator harus mendekati nol volt sebelum melakukan pekerjaan perawatan.



d) Pemeriksaan Setelah Pemadaman

Periksa sistem *pitch* dengan memastikan aktuator motor/aktuator hidrolis tidak macet dan sudut bilah kembali ke posisi aman. Periksa sistem *yaw* dengan memastikan *motor yaw* dan *gearbox yaw* tidak *overheat* atau mengalami keausan. Lakukan pengecekan mekanis keseluruhan (baling-baling, poros, bantalan) dan kelistrikan (panel kontrol, inverter, kabel).

Aktivitas 3.8 Menghentikan Sistem Mekanis dan Kelistrikan PLTB

Aktivitas Individu dan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan cara menghentikan beberapa model PLTB.

Langkah-Langkah

Menghentikan sebuah sistem PLTB yang sedang berjalan memerlukan kehati-hatian dan cara yang tepat.

Studi Kasus

Desa Lorok, Pacitan berada di pinggir pantai yang memiliki area terbuka dan potensi anginnya bagus, telah melakukan instalasi PLTB Skala Kecil kapasitas 1.500 W, 220 V AC, turbin sumbu horizontal, diameter rotor 2,4 m, dengan sistem *furling* otomatis dan *pitch* manual. Pada hari pengujian, kecepatan angin meningkat dari 5 m/s menjadi 11 m/s. Operator memutuskan untuk menghentikan sistem sementara guna melakukan pemeriksaan bantalan (*bearing*) dan konektor kabel di panel kontrol. Sistem ini tidak memiliki rem mekanis otomatis sehingga semua proses penghentian dilakukan melalui kontrol aerodinamis dan kelistrikan.

Tujuan Operasional

- Menghentikan turbin secara bertahap dan aman, tanpa menimbulkan gaya kejutan pada poros dan *gearbox*.
- Memastikan tegangan keluaran generator turun ke nol volt sebelum pekerjaan dimulai.
- Melakukan pemeriksaan mekanis dan listrik pascapemadaman untuk memastikan sistem siap dioperasikan kembali.



Selanjutnya, silakan jawab pertanyaan-pertanyaan di bawah ini.

1. Mengapa turbin angin tidak boleh dihentikan secara mendadak meskipun kecepatan angin meningkat?
2. Bagaimana cara kerja sistem *furling* dan *pitch control* membantu penghentian turbin secara aman?
3. Apa langkah-langkah teknis yang harus dilakukan operator untuk menghentikan sistem PLTB agar tidak terjadi tegangan sisa pada generator?
4. Bagaimana kamu dapat menyimulasikan prosedur penghentian PLTB secara aman di lingkungan sekolah menggunakan model atau miniatur turbin angin?
5. Setelah melakukan simulasi penghentian sistem, apa pelajaran penting yang kamu peroleh tentang keselamatan, ketelitian, dan kerja tim dalam operasi PLTB?

3. Mengevaluasi Kinerja PLTB

Mengevaluasi PLTB Skala Kecil bertujuan untuk menilai kinerja teknis, kelayakan ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan dampak sosial dari sistem yang terpasang. Evaluasi ini penting untuk perbaikan desain, peningkatan efisiensi, dan pengambilan keputusan untuk replikasi atau pengembangan proyek lebih lanjut.

a. Evaluasi Kinerja Teknis

Tujuan dari evaluasi kinerja teknis ialah untuk membandingkan performa aktual dengan spesifikasi desain turbin. Langkah evaluasi kinerja teknis ialah melakukan pemasangan alat pengukur seperti anemometer, *data logger*, dan *power meter* untuk mencatat beberapa hal berikut.

1) Kecepatan Angin Harian/Bulanan

Mengevaluasi kecepatan angin penting untuk menentukan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh PLTB. Pengukuran dilakukan menggunakan anemometer pada ketinggian turbin. Data dicatat secara berkala. Dari data tersebut, dihitung kecepatan rata-rata dan dianalisis distribusinya.

Perhatikan Tabel 3.6. Tabel itu berisi catatan kecepatan angin yang direkam oleh anemometer di Desa Sukorame Kecamatan Gandusari Kabupaten Trenggalek. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan *spreadsheet*. Sumber data berasal dari rekaman harian, bulanan, dan tahunan.



Tabel 3.6 Rekaman Kecepatan Angin Harian

Tanggal	Pagi (m/s)	Siang (m/s)	Malam (m/s)	Rata-rata Harian (m/s)
01/06/2025	0.5	2.8	1.0	1.43
02/06/2025	0.4	3.0	1.2	1.53
03/06/2025	0.6	3.5	1.0	1.70
04/06/2025	0.7	3.8	1.1	1.87
05/06/2025	0.8	3.9	1.1	1.93
06/06/2025	0.6	3.2	1.0	1.60
07/06/2025	0.5	3.4	1.2	1.70

2) Daya Listrik Keluaran

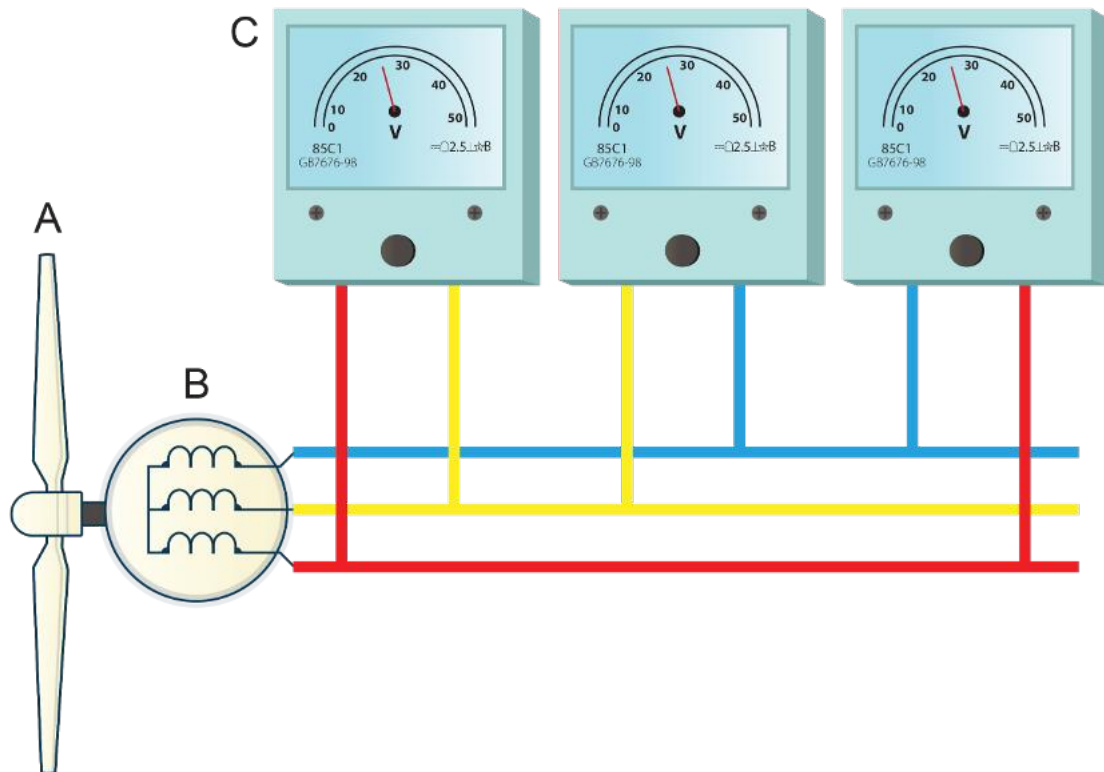
Evaluasi daya listrik keluaran (watt) pada PLTB bertujuan untuk mengetahui seberapa besar energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin. Langkah pertama dalam evaluasi ini ialah mengukur tegangan (dalam volt) dan arus listrik (dalam ampere) yang keluar dari generator. Pengukuran ini dapat dilakukan dengan menggunakan alat seperti multimeter atau wattmeter. Setelah nilai tegangan dan arus diketahui, daya listrik dapat dihitung dengan rumus: $P = V \times I$, yaitu daya (watt) sama dengan tegangan dikalikan arus. Sebagai contoh, jika generator menghasilkan 48 volt dan arus 5 ampere, daya listriknya ialah 240 watt.

Evaluasi daya ini sebaiknya dilakukan secara berkala untuk melihat perubahan produksi listrik akibat kecepatan angin yang berbeda-beda setiap waktu. Selain menghitung daya sesaat, kita juga dapat menghitung total energi yang dihasilkan dalam satuan watt-jam (Wh) atau kilowatt-jam (kWh) untuk mengetahui performa PLTB dalam jangka waktu tertentu. Dengan membandingkan daya yang dihasilkan dengan potensi teoretis berdasarkan kecepatan angin, kita juga dapat menilai efisiensi sistem.

Pengukuran daya listrik (watt) pada sistem PLTB bergantung pada jenis generator yang digunakan. Untuk generator dengan keluaran AC, pengukuran harus memperhitungkan faktor daya ($\cos \phi$) agar hasilnya akurat karena arus dan tegangan tidak selalu sefase. Sementara itu, pada generator yang menghasilkan DC seperti *permanent magnet generator* (PMG) yang telah disearahkan, perhitungan daya cukup dengan mengalikan tegangan dan arus ($P = V \times I$), tanpa memperhitungkan faktor



daya. Pengukuran sebaiknya dilakukan pada sisi *output* generator sebelum masuk ke sistem kontrol atau inverter agar mencerminkan daya murni yang dihasilkan oleh generator. Untuk sistem 3 *fasa*, diperlukan alat ukur khusus atau perhitungan per fase yang kemudian dijumlahkan seperti pada Gambar 3.31.



Keterangan Gambar

A : Turbin angin dengan desain aerodinamis

B : *Permanent Magnet Generator* (PMG)

C : Peralatan Ukur Tegangan (Volt) AC 3 Phase

Gambar 3.31 Pengukuran Tegangan Hasil Generator PMG

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

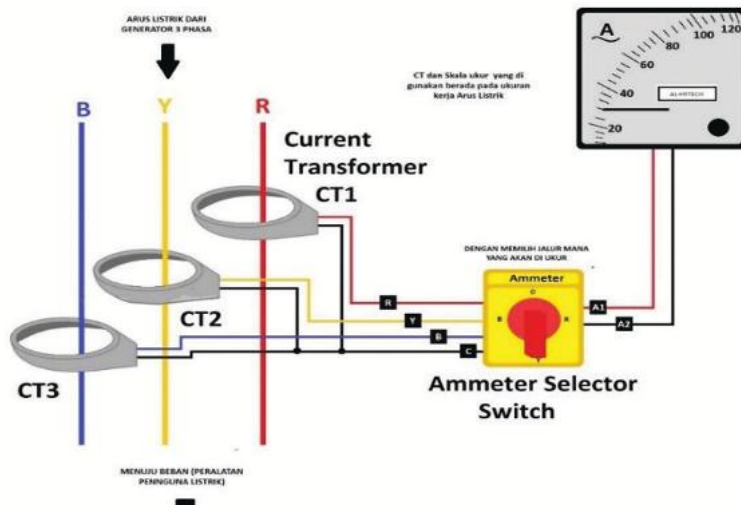
Evaluasi ini penting untuk mengetahui efisiensi dan kestabilan sistem PLTB secara menyeluruh. Tabel 3.7 menampilkan jenis generator dan cara mengukur daya.

Tabel 3.7 Cara Pengukuran pada Beberapa Jenis Generator

Jenis Generator	Cara Mengukur Daya (Watt)	Alat yang Digunakan	Keterangan Tambahan
Generator Sinkron	Ukur tegangan dan arus AC, lalu hitung: $P = V \times I \times \cos \phi$.	Multimeter, Power meter 3 fasa, Wattmeter AC	Umumnya digunakan pada PLTB besar; perhatikan faktor daya ($\cos \phi$) untuk hasil akurat.
Generator Asinkron (Induksi)	Ukur tegangan dan arus AC, hitung: $P = V \times I \times \cos \phi$.	Multimeter, Clamp meter, Wattmeter AC	Perlu koreksi faktor daya. Cocok untuk turbin skala menengah dan besar.
DFIG (<i>Doubly Fed Induction Generator</i>)	Ukur daya rotor dan stator, lalu dijumlahkan.	2 set <i>power meter</i> , sistem SCADA	Digunakan pada sistem skala besar; biasanya terintegrasi dengan sistem kontrol otomatis.
<i>Permanent Magnet Generator</i> (PMG)	Ukur tegangan dan arus DC atau AC bergantung pada sistem, hitung: $P = V \times I$.	Multimeter DC, DC Wattmeter, Clamp Meter DC	Umumnya, digunakan pada PLTB kecil dan kecepatan rendah.
<i>Axial Flux PMG</i> (AFPMG)	Sama seperti PMG; ukur V dan I pada <i>output</i> (DC atau AC).	DC Wattmeter, Voltmeter dan Ammeter	Cocok untuk turbin angin vertikal dengan kecepatan rendah.

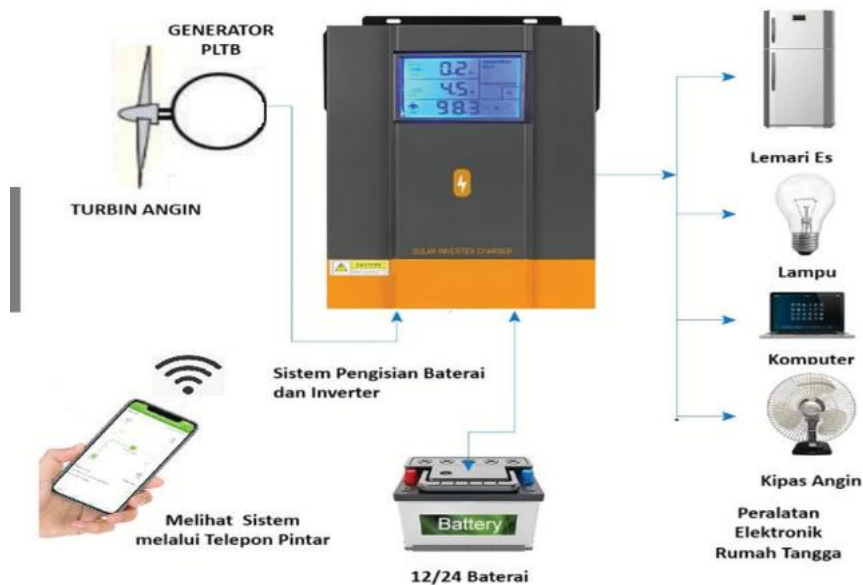
Pengukuran arus listrik pada generator dilakukan dengan menyambungkan amperemeter secara seri pada jalur kabel fase (L) untuk sistem 1 *fasa* atau pada ketiga jalur *fasa* (R, S, T) untuk sistem 3 *fasa*. Jika arus yang dihasilkan cukup besar, digunakan *Current Transformer* (CT) untuk menurunkan arus sebelum masuk ke alat ukur. CT dipasang melingkari kabel *fasa*, dan keluarannya dihubungkan ke amperemeter seperti pada Gambar 3.32.





Gambar 3.32 Diagram Pengkabelan Pengukuran Arus Listrik
Sumber: Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

Tata laksana mengukur daya listrik juga dapat dilakukan dengan cara memantau tampilan layar pada sistem kontrol pengisian baterai. Sistem ini telah dilengkapi dengan sensor tegangan, arus, dan daya. Sistem ini juga menampilkan informasi mengenai kapasitas baterai dan konsumsi listrik yang sedang digunakan.



Gambar 3.33 Monitoring Daya Listrik
Sumber: Amin Wahyono/Kemendikdasmen (2025)

b. Evaluasi Ekonomis PLTB

Evaluasi biaya dan manfaat (*cost-benefit analysis* [CBA]) pada proyek PLTB dilakukan untuk menilai kelayakan ekonominya secara menyeluruh. Langkah ini mencakup identifikasi semua biaya seperti investasi awal turbin, instalasi, perawatan, serta pelatihan operator, kemudian membandingkannya dengan manfaat ekonomi seperti penghematan biaya listrik, peningkatan akses energi, dan pengurangan emisi karbon. Ada *software* pendukung yang dapat digunakan untuk membantu pekerjaan ini, yaitu RetScreen yang pemakaian sudah cukup banyak digunakan di luar negeri khususnya untuk proyek energi terbarukan.

Semua komponen tersebut dihitung dalam nilai uang dan dianalisis selama umur proyek, misalnya 10 tahun, dengan pendekatan finansial seperti NPV, IRR, dan BCR.

1) *Net Present Value* (NPV)

NPV didefinisikan sebagai selisih antara investasi sekarang dengan nilai sekarang (*present value*) dari proyeksi hasil-hasil bersih masa datang yang diharapkan. Dengan demikian, NPV dapat dirumuskan:

NPV = PV of Benefit – PV of Capital Cost atau karena $PV = (C / (1+i)^n)$

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+i)^t}$$

Dimana

t : umur proyek

i : tingkat suku bunga

B_t : *benefit* pada tahun t

C_t : *cost* (biaya proyek) pada tahun t

Kriteria yang digunakan dalam penilaian NPV adalah sebagai berikut:

- Jika NPV = 0 (nol) hasil investasi (*return*) usaha akan sama dengan tingkat bunga yang dipakai dalam analisis, atau dengan kata lain usaha tidak untung maupun rugi (impas).
- Jika NPV = – (negatif), investasi tersebut rugi atau hasilnya (*return*) di bawah tingkat bunga yang dipakai.
- Jika NPV = + (positif), investasi tersebut menguntungkan atau hasilnya (*return*) melebihi tingkat bunga yang dipakai. (Nashar 2015)



2) *Internal Rate of Return (IRR)*

Internal Rate of Return didefinisikan sebagai besarnya suku bunga yang menyamakan nilai sekarang (*present value*) dari investasi dengan hasil-hasil bersih yang diharapkan selama usaha berjalan. Patokan yang dipakai sebagai acuan baik tidaknya IRR biasanya ialah suku bunga pinjaman bank yang sedang berlaku atau suku bunga deposito jika usaha tersebut dibiayai sendiri. Perhitungan IRR secara manual cukup kompleks karena harus menggunakan beberapa kali simulasi atau melakukan pola *try and error*. Namun demikian, untuk skenario dua nilai NPV yang telah diketahui sebelumnya, IRR dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

dimana :

NPV₁ harus di atas 0 (NPV₁>0)

NPV₂ harus di bawah 0 (NPV₂<0)

3. *Benefit Cost Rasio (BCR)*

Metode BCR pada dasarnya menggunakan data ekivalensi nilai sekarang dari penerimaan dan pengeluaran, yang dalam hal ini BCR adalah merupakan perbandingan antara nilai sekarang dari penerimaan atau pendapatan yang diperoleh dari kegiatan investasi dengan nilai sekarang dari pengeluaran (biaya) selama investasi tersebut berlangsung dalam kurun waktu tertentu.

Jika hasil menunjukkan bahwa nilai NPV positif, IRR lebih besar daripada tingkat diskonto, dan BCR lebih dari satu, proyek PLTB dinilai layak secara ekonomi untuk dilaksanakan. Sebagai contoh evaluasi biaya dan manfaat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Contoh Evaluasi Biaya dan Manfaat PLTB

Komponen	Nilai	Rumus/Penjelasan
Biaya Investasi Awal (I ₀)	Rp45.000.000	Biaya pembelian turbin, baterai, inverter, instalasi, dll.
Manfaat Tahunan (B)	Rp7.500.000/tahun	Penghematan biaya Listrik dan perawatan dari pengganti genset
Umur Proyek (n)	10 tahun	Periode analisis proyek
Tingkat Diskonto (r)	10%	Untuk memperhitungkan nilai waktu uang



Komponen	Nilai	Rumus/Penjelasan
NPV (<i>Net Present Value</i>)	Rp10.200.000	$NPV = \sum [(B / (1 + r)^t)] - I_0 \rightarrow$ Selisih nilai sekarang manfaat dan biaya
IRR (<i>Internal Rate of Return</i>)	15%	Tingkat diskonto saat NPV = 0, mencerminkan tingkat keuntungan proyek
BCR (<i>Benefit-Cost Ratio</i>)	1,25	$BCR = \sum [(B / (1 + r)^t)] / I_0 \rightarrow$ Rasio manfaat dan biaya
Keputusan	LAYAK	Karena NPV > 0, IRR > 10%, dan BCR > 1

Berdasarkan tabel Evaluasi Biaya dan Manfaat (CBA) proyek PLTB 1.500 watt, dapat disimpulkan bahwa proyek ini layak dilaksanakan karena menunjukkan nilai NPV sebesar Rp10.200.000 (positif), IRR sebesar 15% yang melebihi tingkat diskonto 10%, dan BCR sebesar 1,25 yang berarti manfaat ekonominya lebih besar dibandingkan dengan biayanya sehingga proyek ini menjanjikan pengembalian investasi yang baik dalam jangka waktu 10 tahun.

Aktivitas 3.9 Mengevaluasi PLTB

Aktivitas Individu dan Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan tata cara mengevaluasi PLTB.

Langkah-Langkah:

Mari, mengevaluasi PLTB secara teknis dan ekonomis.

Studi Kasus

Desa Sukorame, Kecamatan Gandusari, Trenggalek, Jawa Timur memasang satu unit turbin angin sumbu horizontal (1,5 kW) pada ketinggian *hub* 10 m untuk penerangan jalan dan pompa air untuk kebutuhan air minum. Setelah 12 bulan operasi, diperlukan evaluasi menyeluruh untuk mengetahui apakah sistem bekerja sesuai harapan dan apakah layak direplikasi. Kegiatan evaluasi sistem PLTB ini meliputi hal-hal berikut.

1. Menilai pola kecepatan angin harian/bulanan di lokasi dan potensi energi.
2. Mengukur daya listrik keluaran riil ($P = V \times I$ dan pembacaan kWh).
3. Menilai kelayakan ekonomi secara ringkas (*payback*/indikasi NPV/IRR/BCR).
4. Mengidentifikasi dampak lingkungan dan penerimaan sosial masyarakat.



Setelah membaca studi kasus, mari, kita jawab pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apa tujuan utama dari evaluasi sistem PLTB setelah beroperasi selama 12 bulan di Desa Sukorame?
2. Bagaimana cara menghitung daya listrik keluaran PLTB jika hasil pengukuran menunjukkan tegangan 48 volt dan arus 4,5 ampere?
3. Mengapa penting bagi tim teknisi untuk mencatat data kecepatan angin dan hasil daya listrik secara teliti dan konsisten selama proses evaluasi berlangsung?
4. Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa daya keluaran rata-rata hanya 900 watt dari kapasitas 1.500 watt, langkah teknis apa yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTB tersebut?
5. Bagaimana keberadaan PLTB di Desa Sukorame memengaruhi perilaku masyarakat terhadap penggunaan energi dan kepedulian terhadap lingkungan?

B. Pemeliharaan PLTB

Pemeliharaan PLTB terdiri atas dua bagian, yaitu perawatan dan perbaikan PLTB. Menerapkan perawatan dan perbaikan pada PLTB Skala Kecil merupakan langkah penting untuk menjaga kinerja sistem agar tetap optimal, aman, dan efisien.

1. Perawatan PLTB

Perawatan PLTB difokuskan pada baling-baling, poros, generator, kontroler, dan baterai agar tetap bekerja optimal. Pada kegiatan perawatan, perlu disediakan sistem penjadwalan seperti pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Perawatan PLTB Skala Kecil

No.	Area Komponen	Kegiatan Perawatan	Kegiatan Perbaikan	Frekuensi
1	Baling-baling	Cek retakan, karat, dan keseimbangan	Pengecatan ulang, penyesuaian posisi	3–6 bulan sekali
2	Poros dan Bantalan	Pelumasan dan cek goyangan	Ganti <i>bearing</i> atau penyetelan poros	3 bulan sekali

No.	Area Komponen	Kegiatan Perawatan	Kegiatan Perbaikan	Frekuensi
3	Generator	Periksa kabel, konektor, dan kipas	Ganti bearing, sikat karbon, atau gulung ulang	6 bulan sekali
4	Kontroler	Cek indikator, sensor, dan kipas	Reset sistem atau ganti modul rusak	3 bulan sekali
5	Baterai	Ukur tegangan, periksa suhu	Ganti baterai atau perbaiki BMS	1 bulan sekali
6	Tiang penyangga	Cek kekuatan baut & korosi	Pengencangan ulang atau pengecatan	6 bulan sekali

Setelah memiliki jadwal perawatan PLTB, langkah selanjutnya ialah menyusun dokumen pelaksanaan yang mencakup rencana perawatan, laporan harian, catatan temuan, dan evaluasi berkala, seperti pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Rencana Perawatan

No.	Komponen	Jenis Perawatan	Frekuensi	Tindakan Teknis	Penanggung Jawab
1	Turbin Angin	Pemeriksaan visual	Mingguan	Cek kondisi fisik baling-baling dan poros	Teknisi PLTB
2	Generator	Pembersihan	Bulanan	Bersihkan debu dan periksa suhu kerja	Teknisi Listrik
3	Kontroler	Pemeriksaan fungsi	Bulanan	Tes <i>output</i> dan indikator sistem kontrol	Teknisi Elektronik
4	Baterai	Pemeriksaan kapasitas	Mingguan	Cek voltase, kapasitas tersisa, dan koneksi terminal	Teknisi PLTB
5	Struktur Menara	Pemeriksaan kekuatan	Triwulan	Cek baut, pengelasan, dan karat	Mekanik PLTB

Perawatan harian pada PLTB perlu dilakukan untuk menjaga kinerja sistem tetap optimal, mencegah kerusakan dini, dan memastikan keselamatan operasional. Melalui pemeriksaan rutin terhadap komponen utama seperti turbin, generator, dan baterai, potensi masalah dapat terdeteksi lebih awal, seperti pada Tabel 3.11.



Tabel 3.11 Tabel Perawatan Harian

Tanggal	Komponen	Tindakan	Indikator ideal	Hasil Pemeriksaan	Masalah Ditemukan	Tindak Lanjut	Teknisi
21/06/2025	Turbin Angin	Pembersihan kipas	Tidak ada retak, cat baik, utuh	Normal	Tidak ada	Tidak perlu	Amin Wahyono
21/06/2025	Baterai	Cek kapasitas	Kondisi penuh 1277-12.8	12.2V	Voltase turun	Dicas ulang	Alya Wahyu

Catatan temuan lapangan bermanfaat sebagai dokumentasi langsung dari kondisi nyata di lokasi PLTB. Catatan ini membantu mengidentifikasi masalah teknis, mencatat penyebab kerusakan, serta menjadi dasar pengambilan keputusan untuk perbaikan atau penggantian komponen. Selain itu, catatan ini berperan penting dalam evaluasi berkala, analisis tren kerusakan, seperti pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Temuan di Lapangan

No	Tanggal	Komponen	Temuan Masalah	Dugaan Penyebab	Saran Perbaikan	Status
1	15/06/2025	Generator	Panas berlebih	Ventilasi tersumbat	Bersihkan kipas pendingin generator.	Selesai
2	18/06/2025	Menara Turbin	Baut longgar di sambungan atas	Getaran akibat angin kencang	Kencangkan semua baut.	Progres

Sebagai alat bantu, kita dapat menggunakan *software* manajemen perawatan yang dapat membantu menjadwalkan perawatan rutin, mencatat temuan lapangan, menyimpan histori perbaikan, serta mengevaluasi kinerja sistem secara berkala. Beberapa *software* populer yang sering digunakan antara lain *Fiix*, *UpKeep*, *Maintenance Connection*, dan *openMAINT*. Alternatif lain berbasis *Excel* atau *Google Sheets* yang lebih sederhana, tetapi efektif. Dengan *software* ini, proses perawatan menjadi lebih terstruktur, efisien, dan mudah dimonitor oleh teknisi maupun pengelola sistem.

Aktivitas 3.10 Menerapkan Perawatan PLTB

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menerapkan tata cara merawat PLTB.

Langkah-Langkah:

Mari, melakukan perawatan sistem PLTB yang rumit dari langkah-langkah yang sederhana.

Studi Kasus

Desa Tulakan, Pacitan memiliki satu unit PLTB berkapasitas 1.200 watt yang digunakan untuk penerangan jalan desa dan pengisian baterai sistem tenaga surya hibrida. PLTB ini sudah beroperasi selama 8 bulan dan mulai menunjukkan penurunan performa daya keluaran dari rata-rata 1.000 watt menjadi 700 watt. Tim teknisi muda dari Alhytech Engineering bersama perangkat desa mendapat tugas untuk melakukan pemeriksaan dan perawatan berkala terhadap sistem PLTB tersebut. Kegiatan ini bertujuan untuk memastikan turbin angin tetap bekerja optimal dan aman, serta memperpanjang umur komponen mekanis dan kelistrikan.

Permasalahan yang ditemukan seperti berikut.

1. Bilah turbin tampak berdebu dan ada karat ringan di bagian sambungan logam.
2. Bantalan (*bearing*) pada poros utama mengeluarkan suara berisik saat berputar.
3. Kabel keluaran dari generator tampak longgar dan berpotensi korslet.
4. Terdapat penumpukan debu dan pasir di sekitar kotak kontrol (*control box*).

Setelah membaca studi kasus di atas, mari, jawablah soal-soal berikut.

1. Mengapa perawatan rutin pada bilah turbin, *bearing*, kabel, dan *control box* sangat penting dilakukan untuk menjaga efisiensi dan umur panjang sistem PLTB.
2. Berdasarkan kasus di Desa Tulakan, langkah teknis apa saja yang harus dilakukan untuk mengatasi bilah turbin berkarat, *bearing* yang berisik, dan penurunan daya listrik agar turbin kembali menghasilkan daya optimal?
3. Sikap apa yang harus dimiliki seorang teknisi ketika melakukan perawatan sistem PLTB agar pekerjaan berjalan aman, teliti, dan bertanggung jawab? Jelaskan contohnya.
4. Jika kamu menjadi anggota tim teknisi, jelaskan urutan langkah kerja yang tepat dalam melakukan pemeriksaan dan perawatan sederhana terhadap komponen kelistrikan PLTB seperti kabel, konektor, dan *control box* serta sistem penyimpanan.
5. Setelah melakukan kegiatan perawatan PLTB, apa pelajaran penting yang kamu peroleh tentang hubungan antara ketelitian, disiplin, memperhatikan keselamatan, dan mendokumentasi perawatan?



2. Perbaikan PLTB

Perbaikan dilakukan sebagai langkah lanjutan setelah ditemukan kerusakan atau gangguan pada salah satu bagian sistem. Proses ini dimulai dengan menelusuri sumber permasalahan berdasarkan hasil pemeriksaan rutin atau laporan gangguan. Sebelum teknisi mengganti atau membongkar komponen yang rusak, sistem harus dihentikan operasinya secara aman sesuai prosedur. Setelah proses perbaikan selesai, sistem diuji kembali untuk memastikan kinerjanya telah kembali normal. Semua aktivitas perbaikan wajib didokumentasikan dalam laporan pemeliharaan sebagai catatan dan bahan evaluasi di masa mendatang.

a. Peralatan Perbaikan

Peralatan perbaikan yang dibutuhkan tampak pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Peralatan Perbaikan dan Fungsinya

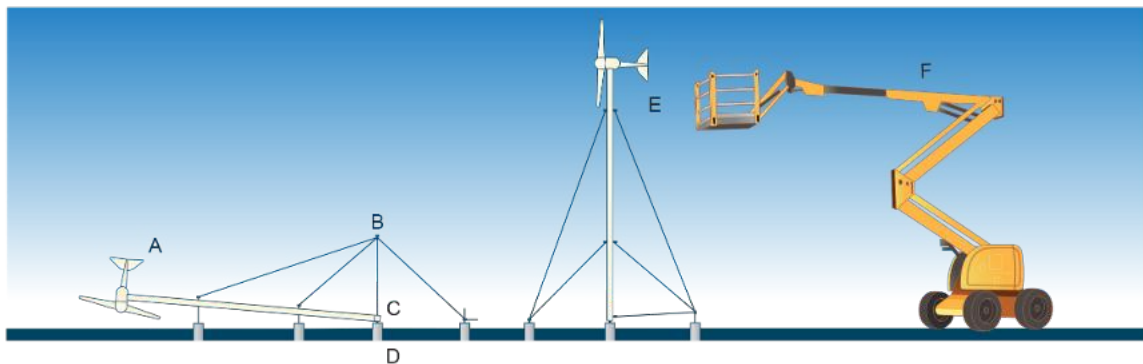
No.	Komponen PLTB	Peralatan	Fungsi Alat
1	Baling-baling (<i>blade</i>)	Kunci L, obeng	Melepas dan memasang baut penahan baling-baling.
		Ampelas, resin <i>fiberglass</i>	Memperbaiki retak kecil pada bilah.
		Alat ukur sudut	Menyesuaikan dan mengecek sudut <i>pitch</i> .
2	Generator	Kunci pas, kunci inggris	Melepas baut dudukan generator.
		Multimeter, <i>clamp meter</i>	Mengukur tegangan, arus, dan kontinuitas kabel.
		<i>Bearing puller</i>	Mengganti bantalan (<i>bearing</i>).
		<i>Grease</i> atau pelumas	Pelumasan ulang.
3	Tiang Penyangga	<i>Winch</i> tangan, dongkrak	Menurunkan dan menaikkan tiang.
		Kunci pas, <i>waterpass</i>	Melepas pengunci dan mengatur posisi vertikal.
		Mesin las (jika diperlukan)	Perbaikan sambungan struktural.
4	Sistem Kelistrikan	Multimeter	Mengukur tegangan, kontinuitas, hambatan.



No.	Komponen PLTB	Peralatan	Fungsi Alat
5	Keselamatan	Solder, timah, tang potong	Menyambung dan memperbaiki kabel.
		Kabel cadangan dan sekering	Pengganti kabel atau pelindung arus lebih.
		Alat pelindung diri (APD)	Menjaga keselamatan saat bekerja.
		Senter/lampu kerja	Penerangan area perbaikan.
		Catatan temuan, lembar <i>checklist</i>	Dokumentasi hasil perbaikan.

b. Langkah Perbaikan

Dalam laporan harian, teridentifikasi bahwa baling-baling tidak berputar dengan stabil sehingga *output* energi menjadi tidak optimal. Untuk itu, dilakukan langkah perbaikan dengan melakukan inspeksi langsung terhadap kondisi baling-baling. Proses perbaikan dilakukan dengan menurunkan baling-baling atau menggunakan alat bantu seperti tangga atau *mobile crane*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.34.



Keterangan Gambar

A : Baling-baling dan generator

B : Penyangga sebagai katrol

C : Sepatu penyanggah dengan sistem engsel

D : Fondasi

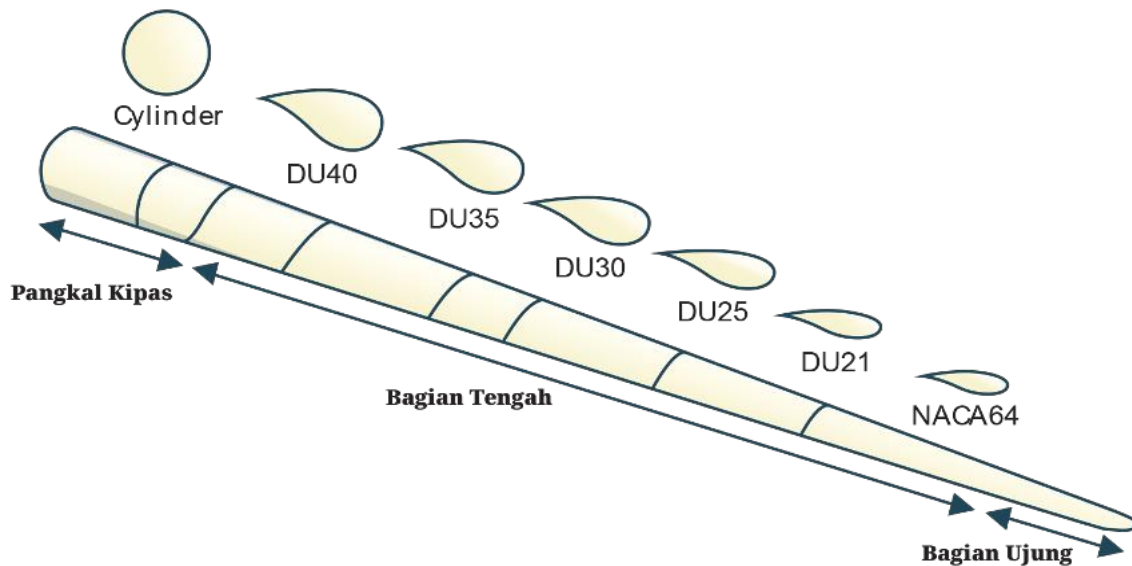
E : Saat PLTB siap bekerja

F : Alat bantu panjat

Gambar 3.34 Langkah Perbaikan Baling-Baling dengan Alat Bantu

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Langkah perbaikan pada bilah (baling-baling) diawali dengan mematikan sistem dan memastikan rotor dalam keadaan diam untuk menjamin keselamatan kerja. Setelah itu, teknisi melakukan pemeriksaan visual guna mengidentifikasi adanya retak, perubahan bentuk, keausan pada permukaan bilah, serta mengevaluasi sudut aerodinamis seperti DU40, DU35 hingga NACA64. Sudut aerodinamis ini memiliki peran penting dalam menentukan performa dan efisiensi turbin.



Gambar 3.36 Bilah Erodinamis Model DU dan NACA

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Profil aerodinamis Delft University (DU) dan National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) merupakan dua jenis bentuk penampang bilah yang umum digunakan dalam desain turbin angin. Profil DU dikembangkan oleh Delft University of Technology di Belanda dan dirancang khusus untuk bilah turbin angin, terutama pada kecepatan angin rendah hingga sedang.

Sementara itu, profil NACA berasal dari Amerika Serikat dan memiliki sistem penamaan berdasarkan angka yang menunjukkan karakteristik *camber*, ketebalan, dan posisi maksimum ketebalan. Profil NACA, seperti seri 4 dan seri 6, banyak digunakan karena mampu mengurangi hambatan udara (*drag*) dan mempertahankan aliran udara laminar sehingga meningkatkan efisiensi kerja turbin.



Gambar 3.37 Pengamatan Bilah Turbin Saat Perbaikan
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Terlihat Gambar 3.37, setelah melakukan perbaikan baling-baling PLTB, langkah selanjutnya ialah memasang kembali baling-baling ke *hub* dengan memastikan posisi dan sudut aerodinamisnya sesuai desain. Proses ini diikuti dengan pemeriksaan ulang untuk memastikan tidak ada bagian yang longgar atau terpasang tidak sempurna, sekaligus mengamati kondisi baling-baling lainnya sebagai langkah korektif. Setelah semuanya terpasang dengan benar, dilakukan uji fungsi untuk memastikan rotor dapat berputar dengan lancar tanpa getaran atau suara yang tidak normal. Selanjutnya, teknisi mencatat semua proses dan hasil perbaikan ke dalam laporan kerja harian. Kegiatan ini ditutup dengan evaluasi awal terhadap kinerja sistem serta pembersihan area kerja guna menjaga keselamatan dan kerapian di lokasi.

Aktivitas 3.11 Menerapkan Perbaikan PLTB

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu memperbaiki komponen PLTB yang mengalami kerusakan.

Langkah-Langkah:

Mari, memperbaiki komponen PLTB dengan teliti.

Studi Kasus

PLTB berkapasitas 1.500 watt di Desa Ngadirejo digunakan untuk penerangan jalan dan sistem pengisian baterai hibrida surya–angin. Setelah beroperasi selama 8 bulan, daya keluaran mengalami penurunan drastis dari 1.200 watt menjadi hanya sekitar



400 watt. Tim teknisi dari SMKN 1 Suruh bersama mitra teknis Alhytech Engineering melakukan pemeriksaan menyeluruh untuk mencari penyebabnya dan melaksanakan perbaikan sesuai standar teknis.

Dari hasil pemeriksaan lapangan, ditemukan beberapa masalah teknis sebagai berikut.

1. Koneksi baut antara turbin dan poros menuju generator longgar dan sebagian terlepas. Akibatnya, transfer energi mekanik tidak optimal dan menyebabkan getaran berlebih.
2. Bentuk bilah turbin mengalami deformasi (perubahan bentuk) akibat paparan angin kencang dan korosi ringan. Profil aerodinamis bilah tidak lagi sesuai standar NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) yang digunakan untuk desain awal sehingga efisiensi konversi energi angin menurun.
3. Permukaan bilah kotor dan terdapat retak halus di bagian pangkal.
4. Bautudukan poros menunjukkan keausan ringan pada ulir akibat getaran terus-menerus.

Setelah membaca studi kasus, kamu jawab pertanyaan-pertanyaan berikut.

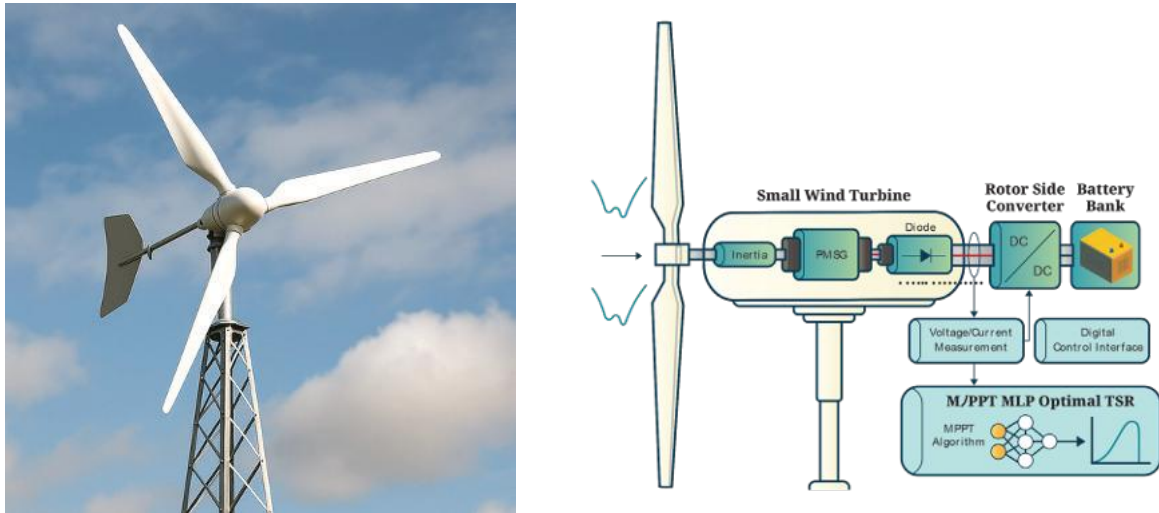
1. Mengapa deformasi bentuk bilah turbin dan longgarnya koneksi baut dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi angin pada PLTB?
2. Bagaimana langkah teknis yang harus dilakukan oleh teknisi untuk memperbaiki sambungan turbin-poros dan memulihkan bentuk bilah sesuai standar NACA?
3. Saat melakukan pembongkaran dan pemasangan ulang bilah turbin, bagaimana kamu dan tim dapat membagi tugas agar pekerjaan berjalan efisien, aman, dan sesuai K3?
4. Sikap apa yang harus dimiliki seorang teknisi ketika menemukan baut longgar dan bilah rusak agar perbaikan dilakukan secara teliti dan tidak menimbulkan bahaya operasional?
5. Setelah melakukan kegiatan perbaikan komponen PLTB yang rusak ini, apa pelajaran penting yang kamu peroleh tentang hubungan antara pemilihan bahan, alat kerja, pengalaman, ketelitian, standar teknis, dan keberhasilan?



Uji Kompetensi

A. Pilihan Ganda

Perhatikan gambar dibawah ini dan pilihlah jawaban yang tepat



Gambar 3.38 Diagram Blok Sistem PLTB

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Ada sebuah PLTB Skala Kecil yang terpasang selama beberapa tahun, terlihat diagram kerja mekanik, elektrik, dan sistem kontrol PLTB didesain sederhana dan efisien. Amatilah gambar di atas dan jawablah pertanyaan berikut.

1. Setelah 2 tahun beroperasi, turbin PLTB mengalami penurunan *output* listrik hingga 30% dari kapasitas awal. Langkah pertama yang tepat dalam evaluasi penyebab masalah ialah
 - A. mengganti langsung bilah turbin dengan yang baru
 - B. mengukur kecepatan angin rata-rata di lokasi
 - C. membongkar *gearbox* untuk perbaikan total
 - D. mengganti inverter dengan kapasitas lebih besar
 - E. mengganti baterai

2. Jika hasil inspeksi menunjukkan banyak korosi pada komponen mekanis akibat lingkungan pesisir dan baterai tidak terisi, tindakan perawatan yang paling tepat ialah
- A. mengecat ulang – memeriksa *converter* tegangan
 - B. memindahkan turbin – mengganti baterai
 - C. mengganti bilah turbin – memeriksa baterai
 - D. membatasi operasi turbin – memeriksa *voltage current measurement*
 - E. melapisi antikorosi-mengganti MPPT Algoritma
3. Saat melakukan perawatan, ditemukan getaran berlebih pada *nacelle*. Kombinasi tindakan perbaikan yang tepat ialah
- A. mengencangkan baut pondasi, mengecek keseimbangan bilah, dan melumasi *bearing*
 - B. menambah beban listrik agar turbin bekerja lebih stabil
 - C. mempercepat putaran rotor agar getaran hilang
 - D. mengganti kabel kontrol tanpa mengecek komponen mekanis
4. Pada sistem PLTB Skala Kecil, jika *rectifier* mengalami kerusakan sehingga tidak dapat mengubah AC menjadi DC, akibat yang paling mungkin terjadi ialah
- A. baterai tetap terisi tetapi lebih lambat
 - B. tegangan yang masuk ke DC-DC *converter* menjadi tidak stabil dan baterai tidak dapat terisi
 - C. kecepatan putar turbin menurun drastis
 - D. MPPT Algorithm bekerja lebih cepat dari biasanya
 - E. optimal TSR tidak lagi dibutuhkan
5. Mengapa sistem PLTB pada gambar menggunakan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) dibandingkan generator induksi?
- A. PMSG tidak memerlukan sumber eksitasi eksternal.
 - B. PMSG hanya bekerja pada kecepatan tinggi.
 - C. Generator induksi lebih boros biaya.
 - D. PMSG tidak menghasilkan panas sama sekali.
 - E. PMSG tidak memerlukan pelumasan mekanis.
6. Pada saat inspeksi, data SCADA menunjukkan bahwa kecepatan angin 9 m/s, sudut *pitch* bilah normal, tetapi daya keluaran hanya mencapai 60% dari kapasitas turbin. Analisis teknisi menunjukkan adanya getaran kecil pada *gearbox*. Tindakan yang paling tepat ialah



- A. membiarkan turbin tetap beroperasi karena masih menghasilkan daya
 - B. menghentikan operasi, memeriksa *gearbox*, dan melakukan *balancing* rotor
 - C. mengganti bilah turbin meskipun masih baik
 - D. menambah beban generator agar daya meningkat
 - E. mematikan sistem SCADA sementara
7. Seorang teknisi menemukan bahwa sistem *yaw* tidak berfungsi optimal. Turbin hanya menghadap satu arah, padahal angin sering berubah arah. Jika kondisi ini dibiarkan, dampak teknis yang paling mungkin ialah
- A. turbin menghasilkan daya rendah karena tidak selalu menghadap arah angin
 - B. *gearbox* terbakar karena poros patah
 - C. generator otomatis berhenti bekerja
 - D. menara turbin miring akibat beban angin
 - E. bilah turbin patah seluruhnya
8. Selama pemantauan, temperatur generator tercatat naik hingga 30% lebih tinggi dari normal. Ventilasi terlihat kotor oleh debu. Kombinasi perbaikan yang tepat ialah
- A. menghentikan operasi, membersihkan ventilasi, dan memeriksa sistem pendingin
 - B. menambah oli *gearbox* dan mengecat ulang generator
 - C. mengurangi jumlah bilah turbin agar beban kecil
 - D. membiarkan turbin beroperasi sampai daya menurun
 - E. mengganti kabel transmisi meskipun tidak rusak
9. Dalam perawatan prediktif, sensor getaran menunjukkan peningkatan signifikan pada bantalan utama generator, tetapi suhu masih normal. Analisis yang paling tepat ialah
- A. bilah turbin mengalami retak besar
 - B. *gearbox* terlalu panas dan harus diganti
 - C. generator terbakar karena *overcurrent*
 - D. sistem *yaw* tidak berfungsi
 - E. bantalan mengalami *misalignment* atau keausan awal
10. Sebuah turbin angin berhenti mendadak saat kecepatan angin mencapai 25 m/s. Setelah diperiksa, sistem kontrol pitch berfungsi normal. Penyebab paling mungkin ialah
- A. generator terbakar akibat beban berlebih
 - B. bantalan utama macet total
 - C. sistem *cut-out* bekerja untuk melindungi turbin dari angin berlebih
 - D. *yaw control error* sehingga turbin salah arah
 - E. kabel transmisi putus karena tegangan tinggi



B. Menjodohkan

Jodohkan pernyataan kolom A dengan jawaban pada kolom B dengan tepat.

Kolom A (Pernyataan)	Kolom B (Jawaban)
1. Mengecek indikator arah dan kecepatan angin sebelum sistem dijalankan.	A. Pemeriksaan kebersihan bilah turbin dari debu atau kotoran
2. Menganalisis efisiensi konversi energi angin menjadi energi listrik.	B. Pengoperasian PLTB
3. Memastikan semua baut dan sambungan pada menara dalam kondisi kencang.	C. Evaluasi kinerja sistem
4. Memeriksa kondisi <i>bearing</i> pada poros utama turbin.	D. Perawatan rutin
5. Mengamati tegangan dan arus keluaran dari generator.	E. Pengujian performa listrik
6. Mengganti komponen yang aus atau rusak pada generator.	F. Perbaikan sistem
7. Membersihkan permukaan sensor anemometer dan <i>vane</i> .	G. Menjaga akurasi data kecepatan angin
8. Memastikan sistem kontrol dan rem turbin berfungsi baik.	H. Keselamatan pengoperasian
9. Menghitung faktor kapasitas (<i>capacity factor</i>) dari hasil pengukuran energi keluaran.	I. Evaluasi efisiensi pembangkitan
10. Melakukan pelumasan pada bagian yang bergerak.	J. Mencegah keausan mekanik



Tertarik untuk mendalami materi ini? Bacalah teks berikut ini.

MEMBANGUN USAHA TEKNOLOGI TEPAT GUNA PLTB

Untuk mengembangkan usaha di bidang teknologi tepat guna, khususnya pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) kita perlu memahami karakteristik dan perilaku bilah turbin angin baik secara teori maupun praktik. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan perangkat lunak simulasi **QBlade**, yang dapat diunduh melalui laman <https://qblade.org/downloads/>. Melalui software ini, kita dapat melakukan berbagai analisis dan pemodelan turbin angin secara lebih mudah dan akurat.

Pemanfaatan simulator QBlade sangat membantu dalam proses perancangan profil *airfoil* bilah turbin sesuai kebutuhan. Dengan memasukkan berbagai parameter seperti panjang dan jumlah bilah, kecepatan angin rata-rata, serta kecepatan putar turbin, simulasi dapat dijalankan untuk menganalisis distribusi gaya *lift* dan *drag* di sepanjang bilah. Selain itu, QBlade juga memungkinkan evaluasi terhadap performa koefisien daya (C_p). Hasil simulasi ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh sudut serang dan bentuk bilah terhadap gaya aerodinamis yang dihasilkan.

Membangun miniatur PLTB skala kecil dapat dilakukan melalui kegiatan praktik lapangan dengan membuat prototipe turbin angin mini yang dirancang berdasarkan hasil simulasi. Prototipe ini menggunakan bahan-bahan sederhana seperti kayu atau plastik untuk bilah, motor DC kecil sebagai generator, serta rangka penyangga ringan yang mudah dirakit.

Pengamatan kinerja PLTB mini yang telah dibuat dapat dilakukan dengan melihat kecepatan putar, stabilitas bilah, serta hasil keluaran listrik yang dihasilkan. Melalui kegiatan ini, kita dapat memahami secara langsung prinsip kerja gaya *lift* (gaya angkat) yang menyebabkan bilah berputar dan gaya *drag* (gaya hambat) yang memengaruhi efisiensi putaran, sekaligus mengetahui pengaruh kedua gaya tersebut terhadap kinerja generator.

Dari hasil pengamatan di lapangan, kita dapat menyusun rangkuman kinerja PLTB dalam bentuk spesifikasi teknis. Spesifikasi ini berfungsi untuk menggambarkan performa sistem secara lebih terukur dan terstruktur. Contohnya sebagai berikut.



Tabel 3.14 Parameter dan Spesifikasi PLTB Skala Kecil

Parameter	Spesifikasi PLTB Skala Kecil
Tipe Turbin	Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)
Daya Nominal	500 – 3000 Watt
Tegangan Keluaran	12 V, 24 V, atau 48 V DC (dengan inverter ke 220 V AC)
Diameter Rotor	1,5 – 5 meter
Jumlah Bilah	3 bilah
Bahan Bilah	<i>Fiberglass</i> atau aluminium
Kecepatan Angin Mulai (Cut-in)	2 – 3 m/s
Kecepatan Angin Nominal	10 – 12 m/s
Kecepatan Angin Maksimum (Cut-out)	20 – 25 m/s
Sistem Kendali	<i>Pitch control</i> atau <i>furling system</i>
Generator	<i>Permanent Magnet Generator</i> (PMG) tipe <i>neodymium</i>
Sistem Pengereman	Rem mekanis atau rem listrik
Tower/Penopang	Baja galvanis tinggi 6 – 12 meter
Berat Total	30 – 150 kg
Umur Operasional	15 – 20 tahun dengan perawatan rutin

Salah satu pintu gerbang menuju keberhasilan dalam mengembangkan usaha teknologi tepat guna ialah dengan meyakinkan calon pelanggan melalui Business Model Canvas atau proposal penawaran pemanfaatan PLTB. Dokumen ini dapat disusun dengan mengikuti panduan struktur sebagai berikut.

A. Judul & Identitas Penjual

- 1) Nama produk: Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Skala Kecil
- 2) Nama dan kontak perusahaan/penjual

B. Deskripsi Singkat Produk

- 1) Fungsi dan tujuan pemasangan PLTB
- 2) Kapasitas daya (misal: 3000 Watt)



- C. Spesifikasi Teknis (Tabel)
 - 1) Tipe turbin (HAWT / VAWT)
 - 2) Daya nominal
 - 3) Tegangan keluaran
 - 4) Diameter rotor & jumlah bilah
 - 5) Kecepatan angin *cut-in*, nominal, *cut-out*
 - 6) Sistem kendali & pengereman
 - 7) Tinggi tower
 - 8) Jenis generator
- D. Paket Penawaran & Harga (Tabel)
 - 1) Komponen yang termasuk (turbin, tower, *controller*, inverter, baterai, kabel)
 - 2) Harga paket lengkap
 - 3) Biaya instalasi (jika terpisah)
- E. Garansi & Layanan
 - 1) Lama garansi (misal 2 tahun)
 - 2) Layanan purna jual
- F. Jadwal Pengiriman & Pemasangan
 - 1) Estimasi waktu pengerjaan
- G. Kontak Pemesanan
 - 1) Isi Alamat lengkap, nomor *handphone* dan kanal media sosial

Refleksi

JURNAL REFLEKSI PEMBELAJARAN – PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)

Petunjuk Isilah jurnal refleksi berikut secara jujur dan mendalam. Tujuannya untuk membantu kamu mengenali pemahaman yang telah diperoleh, kesulitan yang dihadapi, serta langkah selanjutnya untuk memperdalam pengetahuan dan keterampilan kamu.

Bagian A – Pemahaman Utama

1. Apa tiga hal terpenting yang saya pelajari hari ini tentang pengoperasian dan pemeliharaan PLTB?
2. Bagian mana dari pembelajaran hari ini yang paling menarik atau menantang bagi saya? Mengapa?

Bagian B – Aplikasi dan Pembelajaran Mendalam

1. Bagaimana saya dapat menerapkan pengetahuan ini dalam situasi nyata di lapangan atau saat praktik kerja industri?
2. Apa keterampilan teknis yang menurut saya masih perlu saya latih lebih lanjut? Bagaimana rencana saya untuk mengasah keterampilan tersebut?

Bagian C – Refleksi Diri

1. Apakah saya telah aktif dan bertanggung jawab dalam mengikuti pembelajaran hari ini? Mengapa demikian?
2. Apa satu hal yang akan saya lakukan secara berbeda jika saya mempelajari materi ini kembali?





KEMENTERIAN PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH
REPUBLIK INDONESIA, 2025

Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin

Jenjang SMK/MAK Kelas XII

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

ISBN 978-634-00-0042-9 (no. jil. lengkap)

ISBN 978-634-00-3330-4 (jil.2)

BAB 4

Teknik Energi Hibrida



Ketika sistem sudah terpasang dan siap digunakan, langkah penting apa saja yang harus dilakukan sebelum dan selama pengoperasian sistem PLTH? Kemudian, bagaimana cara memelihara PLTH secara aman dan efisien?



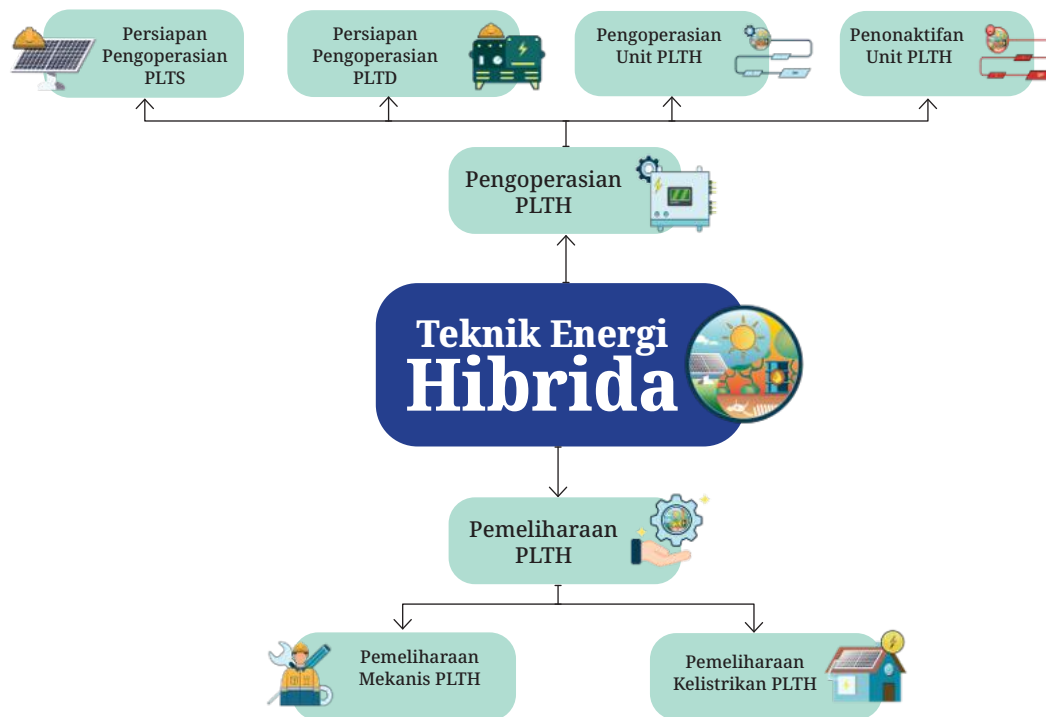
Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kamu mampu menerapkan pengoperasian dan pemeliharaan pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTH).

Kata Kunci

1. PLTH
2. pengoperasian
3. pemeliharaan

Peta Materi





Gambar 4.1 Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida
Sumber: Envanto (2025)

Bayangkan, jika suatu hari PLTH (PLTS + PLTD) yang sudah terpasang tiba-tiba tidak dapat menyediakan listrik secara stabil—apa yang kira-kira menjadi penyebabnya? Apakah karena kesalahan pengoperasian, kurangnya perawatan, atau adanya komponen yang aus dan tidak terdeteksi sebelumnya? Jika kamu menjadi teknisi di lapangan, langkah apa yang akan kamu ambil untuk memastikan pembangkit bekerja optimal setiap hari? Bagaimana cara kamu memastikan bahwa transisi daya dari PLTS ke PLTD berlangsung mulus tanpa gangguan beban? Mengapa penting bagi kita untuk memahami perbedaan penanganan operasional dan pemeliharaan pada sistem yang melibatkan dua sumber energi berbeda ini?

Lakukan pengamatan dengan berjalan di sekitar lingkungan sekolah selama 10-15 menit. Catat secara singkat jenis pembangkit listrik atau bayangan sumber energi yang terlihat, atau bayangkan sumber energi yang dapat diterapkan di sekolah. Misalnya, panel surya di atap gedung, genset/PLTD sekolah, lampu PJU tenaga surya, dan sebagainya. Kemudian, jawablah soal-soal berikut.

1. Sebutkan 3 sumber energi yang kamu temukan atau amati di lingkungan sekitar sekolah! (Petunjuk: dapat berupa panel surya, PLTD diesel, angin, dll.)
2. Apa kelebihan dan kekurangan PLTS dibandingkan PLTD menurutmu?
3. Ceritakan secara singkat bagaimana kamu memahami prinsip kerja dari sistem PLTH (PLTS + PLTD)!



4. Bayangkan, kamu bertugas mengoperasikan PLTH di sebuah desa. Apa tiga hal penting yang perlu kamu pastikan sebelum PLTH dijalankan? (Jawaban dapat berupa aspek teknis atau prosedural)
5. Apakah kamu pernah mengamati langsung sistem hibrida (PLTS + PLTD)? Jika ya, ceritakan singkat pengamatannya. Jika tidak, apa yang ingin kamu ketahui dari sistem tersebut?
6. Seberapa tertarik kamu untuk mempelajari cara kerja dan pengoperasian pembangkit hibrida (PLTS + PLTD)?
 - Sangat tertarik ► Tertarik ► Biasa saja ► Kurang tertarik
7. Menurutmu, dalam bekerja mengoperasikan sistem PLTH, sikap apa yang paling penting dimiliki seorang teknisi? Jelaskan alasannya.
8. Apa gaya belajar yang paling kamu sukai?
 - Praktik langsung ► Diskusi kelompok ► Menonton video/tutorial ► Membaca buku/manual ► Presentasi & tanya jawab
9. Apa tantangan terbesar yang kamu hadapi dalam memahami sistem energi terbarukan selama ini? (Misal: kurang praktik, sulit paham konsep teknis, dll.)
10. Tuliskan harapanmu terhadap pembelajaran tentang pengoperasian PLTH ini.

A. Pengoperasian PLTH

Setelah mempelajari dasar-dasar PLTH, mulai dari prinsip kerja gabungan antara tenaga surya dan diesel, tahapan perencanaan sistem, hingga proses pembangunan dan pemasangan komponen utama seperti panel surya, inverter, baterai, dan PLTD, kini saatnya kita memahami bagaimana sistem tersebut dioperasikan agar dapat menyediakan listrik secara efisien dan berkesinambungan. Pengetahuan sebelumnya tentang karakteristik setiap pembangkit akan menjadi dasar penting dalam memastikan integrasi sistem bekerja selaras dan responsif terhadap kebutuhan beban. Lalu, bagaimana cara mengoperasikan PLTH agar mampu menyeimbangkan antara sumber energi terbarukan dan cadangan diesel secara otomatis, aman, dan andal dalam berbagai kondisi operasional?

1. Persiapan Pengoperasian PLTS

Sebelum sebuah sistem PLTS dalam konfigurasi hibrida dengan PLTD dapat dioperasikan dengan aman dan optimal, diperlukan rangkaian persiapan teknis dan administratif yang sistematis. Persiapan ini tidak hanya bertujuan untuk memastikan semua komponen berfungsi sebagaimana mestinya, tetapi juga untuk menjamin integrasi antara PLTS dan PLTD



berjalan selaras, stabil, dan efisien. Kesalahan dalam tahapan persiapan dapat menyebabkan kerusakan alat, penurunan efisiensi, bahkan gangguan terhadap kontinuitas pasokan listrik. Berikut ini pemeriksaan yang perlu dilakukan.

a. Pemeriksaan Visual Fisik PLTS

Langkah awal dalam persiapan pengoperasian PLTS ialah melakukan pemeriksaan visual fisik terhadap semua komponen sistem. Panel surya perlu dicek agar bebas dari retakan, bayangan permanen, dan kotoran tebal seperti lumut atau debu yang dapat menghalangi cahaya matahari. Struktur penyangga harus diperiksa dari kemungkinan baut longgar, korosi, atau kerusakan akibat angin. Kabel dan konduktor diperiksa untuk memastikan tidak ada isolasi terkelupas, konektor longgar, atau bekas gigitan hewan. Pada kotak kombiner, penting untuk memastikan *fuse* dan *DC breaker* dalam kondisi baik dan tidak menunjukkan tanda-tanda kerusakan seperti terbakar atau berbau menyengat. Terakhir, sistem *grounding* harus dipastikan memiliki sambungan yang baik dan nilai tahanan tanah di bawah 5 ohm untuk menjamin keselamatan dan kestabilan sistem.



Gambar 4.2 Kotak Kombiner pada PLTS
Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)



b. Pemeriksaan Sistem Kelistrikan PLTS



Gambar 4.3 Inverter PLTS

Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)

Setelah pemeriksaan visual selesai, langkah berikutnya ialah memastikan kesiapan sistem kelistrikan PLTS melalui serangkaian pengujian fungsional. Pertama, dilakukan pengukuran tegangan panel surya, baik tegangan saat sirkuit terbuka (Voc) maupun arus hubung singkat (Isc), lalu dicocokkan dengan spesifikasi pada *datasheet* modul untuk memastikan kesesuaian performa. Selanjutnya, inverter PV harus diperiksa dalam kondisi *standby* dan tidak menunjukkan adanya indikator kesalahan atau *fault*. Jika sistem menggunakan baterai, perlu dilakukan pengecekan tegangan tiap sel serta memastikan suhu baterai tidak melebihi batas yang aman. Idealnya, baterai harus berada dalam kondisi penuh sebelum sistem hibrida PLTS–PLTD dinyalakan untuk menjamin kestabilan pasokan energi.

c. Pengecekan Sistem Monitoring dan Proteksi

Sebelum sistem PLTS dioperasikan secara penuh, penting untuk memastikan bahwa semua sistem monitoring dan proteksi berfungsi secara optimal. Data *logger* dan SCADA, jika tersedia, harus mampu mencatat data operasional dengan akurat serta dapat diakses untuk keperluan analisis performa dan evaluasi teknis. Sistem proteksi seperti MCB/MCCB, *fuse*, dan *relay* perlu diuji untuk memastikan bahwa semuanya dapat merespons gangguan arus lebih atau hubung singkat secara cepat dan tepat. Selain itu, sistem alarm, baik dalam bentuk bunyi maupun tampilan visual, harus aktif dan mampu memberikan peringatan terhadap potensi risiko seperti suhu berlebih, arus balik, atau kesalahan pada inverter, guna menjaga keselamatan dan keandalan sistem secara menyeluruh.





Gambar 4.4 Panel Proteksi
Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)



Gambar 4.5 Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTS



Aktivitas 4.1 Cek Kesiapan Sistem PLTS Sebelum Dihidupkan

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu melaksanakan tahapan prosedur persiapan pengoperasian PLTS secara aman, tepat, dan profesional dalam sistem pembangkit listrik tenaga hibrida.

Langkah-Langkah:

Ayo, kita siapkan PLTS agar siap menghasilkan energi! Sebelum PLTS mulai beroperasi, semua komponen dan kondisi lingkungan harus dicek untuk memastikan keandalan sistem.

Studi Kasus

Sebuah desa terpencil di Nusa Tenggara Barat memiliki sistem PLTH yang menggabungkan PLTS berkapasitas 50 kWp dan genset diesel 40 kW. Selama musim hujan, radiasi matahari berkurang drastis selama 3 minggu berturut-turut, sehingga pengoperasian sistem menjadi lebih menantang. Kamu merupakan teknisi junior yang ditugaskan untuk mempersiapkan pengoperasian PLTS sebelum sistem diintegrasikan ke jaringan *mini-grid* desa.

Kondisi lapangan menunjukkan seperti berikut.

- Baterai SOC (*State of Charge*) rata-rata 35%.
- Panel surya tampak kotor akibat debu bercampur lumpur hujan.
- Inverter pernah mengalami *fault* pada minggu sebelumnya.
- Genset diesel siap digunakan, tetapi biaya BBM mahal.
- Beban utama: penerangan desa, pompa air, dan fasilitas kesehatan.

Berdasarkan kasus di atas, jawablah soal-soal berikut ini.

1. Jelaskan tiga prosedur utama yang harus dilakukan untuk mempersiapkan pengoperasian PLTS pada sistem hibrida sebelum terhubung ke jaringan listrik desa.
2. Berdasarkan kondisi lapangan, tentukan urutan prioritas tindakan teknis yang harus kamu lakukan agar PLTS dapat beroperasi optimal kembali. Berikan alasan teknis untuk setiap langkah.
3. Bagaimana kamu akan mengambil keputusan terkait penggunaan genset diesel dalam situasi ini, dengan mempertimbangkan efisiensi energi, biaya, dan keberlanjutan lingkungan?



4. Buatlah rencana inspeksi lapangan singkat (maksimum 5 poin) yang mencakup pemeriksaan panel surya, sistem penyimpanan energi, dan inverter sebelum sistem dinyalakan.
5. Setelah menyelesaikan tugas ini, apa pelajaran terpenting yang kamu peroleh terkait hubungan antara perawatan preventif PLTS dan keberlanjutan pasokan listrik di desa?

2. Persiapan Pengoperasian PLTD



Gambar 4.6 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)

Dalam sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan PLTD, peran PLTD umumnya bersifat *back-up* atau pelengkap saat produksi energi dari PLTS tidak mencukupi beban. Oleh karena itu, pengoperasian PLTD harus dilakukan dengan persiapan yang tepat karena menyangkut keandalan pasokan energi, keselamatan personel, efisiensi bahan bakar, dan umur peralatan. Berikut persiapan yang perlu dilakukan sebelum mengoperasikan PLTD.

a. Pemeriksaan Visual Fisik dan Kebersihan Unit PLTD

Tahap awal dalam pemeriksaan unit PLTD ialah pengecekan visual fisik dan kebersihan untuk memastikan semua komponen dalam kondisi baik dan siap digunakan. Mesin diesel harus diperiksa dari kemungkinan kebocoran oli, solar, atau cairan pendingin,



serta dibersihkan dari debu dan sisa oli guna mencegah risiko *overheating* atau kebakaran. Alternator dan panel kontrol perlu diamati untuk memastikan tidak ada kabel yang longgar, terminal yang berkarat, maupun indikator kesalahan yang menyala. Struktur fondasi juga harus kokoh, dengan mesin terpasang di atas dudukan anti-getar dan semua baut pengikat dalam keadaan kencang. Selain itu, sistem ventilasi dan ruang mesin harus memiliki aliran udara yang cukup agar panas dan gas buang dapat keluar dengan aman

b. Pemeriksaan Sistem Pelumas dan Pendingin



Gambar 4.7 *Dipstick*, Alat Pemeriksa Sistem Pelumas

Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2025)

Sistem pelumas dan pendingin memegang peranan penting dalam menjaga keandalan dan umur pakai mesin diesel. Pemeriksaan dimulai dengan mengecek level oli mesin menggunakan *dipstick*; jika level oli berada di bawah batas minimal, tambahkan oli sesuai spesifikasi pabrik. Kondisi oli juga harus diamati—warna yang sangat gelap dan kekentalan yang menurun menandakan oli perlu diganti. Selanjutnya, periksa volume air radiator atau *coolant* untuk memastikan sistem pendingin bekerja optimal. Penting untuk diingat, tutup radiator tidak boleh dibuka saat mesin dalam keadaan panas guna menghindari risiko semburan uap panas yang berbahaya.

c. Pemeriksaan Sistem Bahan Bakar



Gambar 4.8 Alat Pemeriksa Sistem Bahan Bakar

Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2025)



Pemeriksaan sistem bahan bakar sangat penting untuk memastikan PLTD dapat beroperasi secara optimal dan aman. Pertama, periksa level bahan bakar dalam tangki untuk memastikan cukup tersedia sesuai dengan durasi beban puncak yang diperkirakan. Selanjutnya, pastikan kualitas solar yang digunakan bebas dari air atau kotoran karena kontaminasi dapat mengganggu proses pembakaran—penggunaan filter bahan bakar sangat dianjurkan. Tekanan pada pompa injeksi serta kondisi *nozzle* juga perlu diperiksa guna menjamin atomisasi bahan bakar yang baik dan pembakaran sempurna. Terakhir, pastikan semua selang dan sambungan dalam sistem bahan bakar tidak mengalami kebocoran dan telah terpasang dengan kencang.

d. Pemeriksaan Sistem Starter dan Kelistrikan



Gambar 4.9 *Starting Motor* pada PLTD
Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)

Pemeriksaan sistem starter dan kelistrikan sangat krusial untuk memastikan PLTD dapat dinyalakan dengan lancar. Aki atau baterai starter perlu diperiksa tegangannya, kondisi terminal, serta level air jika menggunakan aki basah—dan harus dalam keadaan terisi penuh. Kabel starter juga harus diperiksa untuk memastikan tidak ada yang longgar, aus, atau terkelupas. Pada panel kontrol, semua indikator harus berfungsi normal, tidak menunjukkan alarm aktif, dan menampilkan status sistem yang siap untuk di-start. Selain itu, mode pengoperasian—baik manual maupun otomatis—harus disesuaikan dengan kebutuhan, khususnya jika PLTD akan disinkronkan dengan PLTS dalam sistem hibrida.





Gambar 4.10 Baterai pada PLTD
Sumber: Zainul/Kemendikdasmen (2024)

Melalui tahapan persiapan yang teliti ini, kamu akan terbiasa berpikir sistematis dan mengutamakan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan dalam mengoperasikan PLTD sebagai bagian dari sistem hibrida. Ingatlah bahwa PLTD bukan hanya soal “menyalakan PLTD”, melainkan tentang memastikan bahwa pembangkit bekerja harmonis dalam satu ekosistem energi yang saling terkait dengan PLTS dan masyarakat.





Gambar 4.11 Diagram Alir Persiapan Pengoperasian PLTD

Aktivitas 4.2 - Menentukan Urutan Pengaktifan Sistem PLTD dalam Pembangkit Hibrida

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan persiapan pengoperasian PLTD.

Langkah-Langkah:

Ayo, berlatih berpikir sistematis dan kritis dalam mengaktifkan PLTD sebagai bagian dari sistem hibrida PLTS+PLTD!

Studi Kasus

Balai Listrik Desa “Energi Terpadu” memiliki PLTH yang menggabungkan PLTD berkapasitas 100 kW dan PLTS 50 kWp. PLTD digunakan sebagai pembangkit utama pada malam hari dan sebagai *backup* saat beban puncak siang hari. Menjelang musim kemarau, pihak pengelola menerima laporan bahwa daya dari PLTS menurun



akibat tingginya suhu dan berkurangnya radiasi matahari. Operator diminta untuk mempersiapkan pengoperasian PLTD sebagai sumber daya utama selama 2 minggu ke depan. Operator harus memastikan ketersediaan bahan bakar, memeriksa kondisi sistem pelumasan dan pendinginan mesin, memastikan koneksi ke panel kontrol dan sistem sinkronisasi, serta melakukan uji *no-load* sebelum dioperasikan penuh. Berdasarkan kasus di atas, jawablah soal-soal berikut.

1. Jelaskan fungsi utama PLTD dalam sistem PLTH dan sebutkan komponen utama yang perlu diperiksa sebelum pengoperasian.
2. Berdasarkan kasus di atas, buatlah daftar urutan langkah pemeriksaan awal PLTD sebelum dinyalakan. Sertakan alasan teknis mengapa setiap langkah penting.
3. Sebagai operator, bagaimana kamu menunjukkan sikap disiplin, tanggung jawab, dan peduli keselamatan kerja saat mempersiapkan pengoperasian PLTD? Berikan contoh tindakan konkret.
4. Lakukan simulasi pemeriksaan fisik pada model atau peralatan PLTD di bengkel sekolah, termasuk pengecekan bahan bakar, pelumasan, pendinginan, dan sambungan listrik. Catat hasil temuan kamu.
5. Setelah melakukan simulasi, apa tantangan terbesar yang kamu temui saat mempersiapkan pengoperasian PLTD, dan bagaimana strategimu untuk mengatasinya di lapangan?

3. Pengoperasian Unit PLTH

Pengoperasian sistem PLTH Surya-Diesel bertujuan menghasilkan dan menyalurkan energi listrik secara efisien, aman, dan berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber daya matahari sebagai sumber utama dan PLTD sebagai pendukung atau cadangan. Dalam pengoperasian ini, perlu diperhatikan urutan prosedur, kondisi cuaca, beban sistem, dan integrasi antarperangkat pembangkit. Operator atau teknisi harus memahami alur pengoperasian normal, tindakan saat kondisi darurat, serta pemantauan kinerja sistem selama beroperasi.

Pada siang hari, ketika intensitas cahaya matahari cukup tinggi, sistem PLTS berperan sebagai sumber utama pasokan listrik. Prosedur pengoperasiannya dimulai dengan pengaktifan inverter surya yang mengubah daya dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) untuk digunakan oleh beban. Selanjutnya, *Energy Management System* (EMS) akan memantau secara *real-time* tegangan dan daya yang dihasilkan oleh modul surya. Energi listrik yang dihasilkan langsung dialirkan ke beban seperti rumah tangga, sekolah, atau fasilitas umum. Apabila produksi energi melebihi kebutuhan beban, kelebihan tersebut



akan disimpan dalam baterai—jika tersedia—atau dibatasi oleh fungsi *export limiter* pada inverter, guna menjaga kestabilan sistem dan mencegah kelebihan suplai yang berpotensi merusak peralatan.

Sistem PLTS bekerja secara otomatis mengikuti iradiasi matahari. Operator hanya perlu memantau parameter sistem melalui panel monitoring atau SCADA.

Saat intensitas matahari menurun atau beban listrik melebihi kapasitas yang dapat disuplai oleh PLTS, sistem hibrida akan secara otomatis melakukan peralihan ke PLTD sebagai sumber daya tambahan. Proses ini diawali ketika EMS mendeteksi penurunan tegangan atau kekurangan daya. EMS kemudian mengirimkan sinyal otomatis untuk menyalakan PLTD melalui sistem *auto start*. Setelah mesin PLTD mencapai tegangan dan frekuensi yang stabil, proses sinkronisasi dilakukan—baik secara otomatis maupun manual—untuk memastikan kesesuaian parameter listrik antara PLTD dan sistem. Setelah sinkronisasi berhasil, *breaker* PLTD ditutup dan genset mulai menyuplai daya ke beban, baik secara paralel dengan PLTS maupun sebagai pengganti, bergantung pada kebutuhan dan kondisi sistem saat itu.

Dalam kondisi beban tinggi atau ketika PLTS dan PLTD beroperasi secara paralel, sistem secara otomatis mengutamakan PLTS sebagai sumber utama karena merupakan energi terbarukan. PLTD hanya akan digunakan untuk menyuplai kekurangan daya (*mode load following*) sehingga konsumsi bahan bakar dapat diminimalkan. EMS berperan aktif dalam menyesuaikan distribusi daya antarsumber secara *real-time* agar sistem tetap stabil dan bebas dari *overloading* atau ketidakseimbangan distribusi. Ketika beban mulai menurun atau menjelang akhir siklus operasi, seperti pada malam hari, proses pemadaman dilakukan secara bertahap. PLTS akan berhenti secara otomatis saat tidak ada iradiasi matahari, dan jika tersedia, baterai dapat menyuplai beban kritis. PLTD kemudian dimatikan setelah beban dikurangi secara bertahap, dilanjutkan dengan pembukaan *breaker* pembangkit dan pemutusan sakelar utama untuk mengakhiri operasi sistem secara aman.

Pengoperasian PLTH membutuhkan pemahaman teknis dan disiplin prosedural. Meskipun banyak sistem telah menggunakan kontrol otomatis berbasis EMS, operator tetap memegang peran penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan sistem.

Setelah PLTD berhasil dinyalakan secara otomatis oleh EMS karena sistem mendeteksi kekurangan daya dari PLTS atau dinyalakan secara manual, langkah berikutnya ialah melakukan sinkronisasi. Proses ini bertujuan untuk menyamakan parameter listrik PLTD dengan sistem jaringan internal (biasanya berasal dari inverter PLTS atau sistem *microgrid*), sebelum *breaker* PLTD ditutup agar dapat mengalirkan daya ke beban secara paralel. PLTD harus memenuhi tiga syarat utama sinkronisasi berikut.

1. Tegangan: Tegangan *output* PLTD harus mendekati atau sama dengan tegangan sistem (misal: 220 V atau 400 V bergantung pada sistem).



2. Frekuensi: Frekuensi PLTD harus disesuaikan dengan sistem, umumnya 50 Hz di Indonesia.
3. Sudut Fase: Sudut fase antara tegangan PLTD dan tegangan sistem harus sinkron (sefase) agar tidak terjadi lonjakan arus saat breaker ditutup.

Terdapat dua metode utama dalam proses ini: manual dan otomatis. Di banyak sistem hibrida modern, sinkronisasi dilakukan secara otomatis oleh sinkronizer elektronik atau fungsi bawaan EMS/inverter. Namun, pemahaman prosedur manual tetap penting sebagai dasar kompetensi teknisi lapangan.

a. Prosedur Sinkronisasi Manual (untuk Pembelajaran Dasar)

Prosedur sinkronisasi manual pada PLT Hibrida bertujuan memastikan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dapat terhubung dengan sistem secara aman dan stabil sebelum suplai daya dimasukkan. Proses ini melibatkan penyesuaian tegangan, frekuensi, dan sudut fasa agar selaras dengan parameter sistem, sehingga mencegah risiko kerusakan peralatan maupun gangguan jaringan. Adapun prosedur yang dilakukan sebagai berikut:

- 1) Pencocokan Tegangan
Operator menyesuaikan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) pada PLTD untuk menyamakan tegangan *output* dengan sistem.
- 2) Pencocokan Frekuensi
Operator mengatur kecepatan putaran mesin PLTD melalui *governor control* agar frekuensi mendekati 50 Hz.
- 3) Pencocokan Sudut Fase
Melalui alat *synchronoscope* atau lampu sinkronisasi (*synchro lamp*), operator memantau apakah sudut fase antara PLTD dan sistem sudah sejajar.
- 4) Penutupan *Breaker* PLTD
Saat jarum *synchronoscope* menunjuk arah pukul 12 (atau semua lampu sinkron padam serentak), operator segera menutup *breaker* PLTD untuk mengalirkan daya ke sistem. Dilarang menutup *breaker* jika parameter belum sinkron karena dapat menyebabkan arus hubung singkat (*short-circuit*) atau kerusakan alat.
- 5) Pemantauan Beban dan Keseimbangan Daya
Setelah sinkronisasi berhasil, operator memantau arus beban, distribusi daya antar sumber, serta memastikan tidak terjadi *overload* atau *backfeed*.



b. Prosedur Sinkronisasi Otomatis (Umum di PLTH Modern)

Prosedur sinkronisasi otomatis pada sistem PLTH modern memungkinkan perpindahan daya antara PLTS dan PLTD berlangsung cepat dan tanpa campur tangan manual. Proses dimulai saat EMS memantau parameter sistem seperti tegangan, frekuensi, dan sudut fase secara *real-time*. Modul sinkronisasi otomatis kemudian mengatur AVR dan *governor* pada PLTD untuk menyesuaikan *output* dengan sistem. Ketika parameter telah sesuai, sinkronisasi terjadi hanya dalam hitungan detik, dan *breaker* PLTD ditutup secara otomatis dengan aman. Setelah itu, EMS secara dinamis mengatur pembagian daya antara PLTS dan PLTD berdasarkan kebutuhan beban yang berlangsung saat itu, menjaga efisiensi dan kestabilan sistem secara optimal.

Sinkronisasi yang buruk dapat menyebabkan getaran, suara abnormal pada PLTD, dan kerugian daya. Operator harus terlatih dalam membaca *synchronoscope* dan pengaturan manual, meskipun sistem sudah otomatis. Sinkronisasi merupakan kompetensi kritis dalam pengoperasian pembangkit terhubung paralel, yang menggabungkan pengetahuan kelistrikan dan keterampilan praktik.

c. Monitoring Operasional

Monitoring operasional adalah proses pengamatan dan pencatatan parameter-parameter penting dalam sistem pembangkit listrik hibrida secara berkala dan sistematis. Tujuannya ialah untuk memastikan bahwa sistem berjalan efisien, aman, dan andal, serta mendeteksi lebih awal adanya gangguan atau penurunan kinerja komponen.

Dalam PLTH (PLTS dan PLTD), proses monitoring mencakup pengumpulan data secara *real-time* dan pencatatan manual/otomatis untuk kemudian dianalisis. Hasil monitoring menjadi bahan evaluasi harian, mingguan, atau bulanan, dan mendukung pengambilan keputusan dalam perawatan atau perbaikan.

Monitoring dilakukan terhadap parameter-parameter teknis berikut ini, yang dapat dikelompokkan berdasarkan sumber energi.

1) Parameter PLTS

Tegangan dan arus panel surya (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}), daya *output* inverter AC (kW), frekuensi *output* inverter (Hz), iradiasi matahari, dan temperatur modul.

2) Parameter PLTD

Tegangan *output* PLTD (V), frekuensi PLTD (Hz), arus beban (A), daya aktif dan reaktif (kW/kVAR), jam operasi dan konsumsi bahan bakar (liter/jam), suhu mesin dan tekanan oli, status sinkronisasi, dan pembagian beban.



3) Parameter Sistem Gabungan (Hibrida)

Distribusi daya antarsumber (PLTS, baterai, PLTD), total konsumsi beban (kWh), efisiensi sistem (*yield*, *Performance Ratio*), status otomatisasi, dan alarm dari EMS.

d. Pencatatan dan Evaluasi

Pencatatan parameter hasil monitoring harus dilakukan dalam *logbook* operasional harian, baik secara manual maupun digital. *Logbook* ini menjadi dokumen resmi operasional dan digunakan untuk audit teknis, evaluasi kinerja, dan dasar pelaporan. Format *logbook* mencakup hal berikut.

Tabel 4.1 Logbook Pengoperasian PLTH

Tanggal	Waktu	Tegangan PLTS (V)	Output Inverter (kW)	SOC Baterai (%)	Tegangan PLTD (V)	Frekuensi (Hz)	Beban Total (kW)	Status Sinkron	Ket.
20 Mei 2025	07:00	450	3.5	85%	-	-	3.5	-	PLTS Aktif
20 Mei 2025	18:00	0	0	25%	400	50	2.8	Sinkron	PLTD Aktif
dst									

Evaluasi sistem hibrida PLTS–PLTD bertujuan untuk menilai performa teknis dan efisiensi operasional secara menyeluruh. Evaluasi ini dapat dilakukan secara harian, mingguan, atau bulanan, bergantung pada kebutuhan dan skala sistem. Beberapa aspek utama yang dievaluasi meliputi efisiensi PLTS—apakah energi yang dihasilkan sebanding dengan potensi iradiasi matahari harian—dan efisiensi PLTD, yakni kesesuaian antara konsumsi bahan bakar dan daya yang dihasilkan. Kesehatan baterai juga perlu diperhatikan, terutama apakah proses pengisian dan pelepasannya berlangsung normal. Frekuensi jam operasi PLTD dapat menjadi indikator apakah PLTS bekerja secara optimal atau tidak. Selain itu, evaluasi juga mencakup pemantauan terhadap alarm dan *fault* yang muncul, serta identifikasi penyebab dan penanganannya. Terakhir, total konsumsi energi dan beban puncak (*peak load*) dianalisis untuk merencanakan pengembangan atau penyesuaian sistem di masa depan.

Evaluasi ini dapat diringkas dalam laporan evaluasi bulanan, yang dapat digunakan sebagai dasar perencanaan pemeliharaan dan pengembangan sistem. Melalui kegiatan monitoring dan pencatatan yang konsisten, kamu dapat memahami hubungan sebab-akibat antarparameter teknis, serta mengembangkan kebiasaan kerja yang disiplin dan bertanggung jawab. Ini merupakan salah satu keterampilan utama dalam membangun kompetensi sebagai teknisi energi terbarukan yang siap kerja dan berstandar industri.





Gambar 4.12 Diagram Alir Pengoperasian PLTH

Aktivitas 4.3 – Urutan Prosedur Operasi PLTS dan PLTD dalam Sistem Hibrida

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan prosedur menyalakan unit PLTH.

Langkah-Langkah:

Ayo, menyusun urutan operasi! Dalam sistem hibrida, pengoperasian PLTS dan PLTD harus terkoordinasi untuk menjaga kestabilan suplai listrik dan efisiensi bahan bakar.

Studi Kasus

SMK Negeri Energi Terbarukan memiliki PLTH yang menggabungkan PLTS berkapasitas 50 kWp dan PLTD berkapasitas 40 kW untuk memenuhi kebutuhan listrik laboratorium dan asrama murid. Pada suatu hari, cuaca mendung selama 3 hari berturut-turut



menyebabkan *output* PLTS turun drastis. Beban listrik meningkat karena ada kegiatan praktikum tambahan di laboratorium pada malam hari. Operator sekolah harus memastikan suplai listrik tetap stabil dengan mengatur operasi PLTD dan PLTS secara optimal agar hemat bahan bakar dan menjaga umur peralatan.

1. Jelaskan prinsip kerja sistem PLTH yang menggabungkan PLTS dan PLTD, termasuk peran setiap komponen dalam menjaga kestabilan suplai listrik.
2. Berdasarkan data cuaca mendung 3 hari berturut-turut dan kenaikan beban malam hari, jelaskan langkah-langkah yang harus dilakukan untuk mengatur operasi PLTD agar beban listrik tetap terpenuhi.
3. Dalam kondisi ini, bagaimana kamu akan mengambil keputusan pengoperasian yang mempertimbangkan efisiensi energi, penghematan bahan bakar, dan tanggung jawab terhadap lingkungan?
4. Susun jadwal operasi PLTD dan PLTS selama 3 hari tersebut untuk memastikan kebutuhan listrik terpenuhi, bahan bakar hemat, dan peralatan aman dari *overloading*.
5. Setelah kondisi cuaca kembali normal, apa evaluasi kamu terhadap strategi operasi yang sudah dilakukan? Apa yang dapat diperbaiki untuk menghadapi kondisi serupa di masa depan?

4. Penonaktifan (*Shutdown*) Unit PLTH

Penonaktifan atau *shutdown* pada sistem PLTH merupakan tahapan akhir dalam siklus operasional harian atau ketika diperlukan pemeliharaan dan inspeksi. Proses ini harus dilakukan secara bertahap, sistematis, dan mengikuti urutan yang benar untuk menghindari kerusakan peralatan, bahaya keselamatan kerja, serta menjaga kestabilan sistem kelistrikan. PLTH yang menggabungkan PLTS dan PLTD memerlukan pendekatan *shutdown* yang mempertimbangkan status beban, kondisi sistem kontrol (seperti EMS), dan prioritas sumber daya.

a. Evaluasi Beban dan Kondisi Sistem

Evaluasi beban dan kondisi sistem merupakan langkah awal yang krusial sebelum proses penonaktifan unit pembangkit dalam sistem hibrida dilakukan. Operator harus memastikan bahwa semua beban telah dialihkan ke sumber cadangan seperti baterai atau sudah dimatikan secara bertahap untuk mencegah pemutusan daya mendadak. Selain itu, pemantauan melalui EMS diperlukan untuk mengetahui status operasional sistem—apakah pembangkit masih bekerja secara paralel atau hanya salah satu unit (PLTS atau



PLTD) yang aktif. Langkah ini bertujuan untuk menjamin transisi penonaktifan berjalan aman dan tidak mengganggu kestabilan sistem.

b. Penonaktifan PLTD

Penonaktifan PLTD harus dilakukan dengan prosedur yang sistematis dan aman agar tidak menimbulkan pemadaman mendadak atau kerusakan pada sistem. Langkah pertama ialah mengurangi beban PLTD secara bertahap hingga mendekati nol, lalu membuka *breaker output* untuk memutus koneksi daya ke sistem. Setelah itu, biarkan sistem pendingin bekerja selama beberapa menit untuk mendinginkan mesin (*cooling down*). Selanjutnya, PLTD dimatikan melalui tombol stop atau melalui sistem kontrol otomatis jika tersedia. Operator juga harus mencatat parameter akhir operasi seperti jam kerja mesin, konsumsi bahan bakar, dan suhu mesin dalam *logbook* operasional. Penonaktifan hanya boleh dilakukan setelah beban berhasil dialihkan ke PLTS atau setelah semua beban dimatikan, guna menghindari gangguan daya yang tidak diinginkan.

c. Penonaktifan PLTS

Penonaktifan PLTS perlu dilakukan dengan memperhatikan kondisi operasional sistem dan prosedur keselamatan. Jika sistem masih aktif, pastikan terlebih dahulu bahwa inverter dalam kondisi normal dan tidak sedang menyuplai beban. Proses *shutdown* dimulai melalui antarmuka inverter, dengan urutan pemutusan *output* AC terlebih dahulu, diikuti dengan pemutusan input DC dari *array* PV. Jika diperlukan, koneksi dari *string* PV dapat diputus menggunakan DC isolator, terutama saat akan dilakukan pemeliharaan. Setelah sistem dinonaktifkan, operator harus mencatat parameter akhir seperti tegangan *output* dan status inverter dalam *logbook*. Meskipun sebagian inverter otomatis mati saat iradiasi matahari rendah, penonaktifan manual tetap penting sebagai bagian dari prosedur standar operasional dan pemeliharaan sistem PLTS.

d. Penonaktifan Sistem Baterai (Jika Ada)

Penonaktifan sistem baterai dalam PLTH perlu dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah risiko korsleting atau arus balik (*backfeed*). Langkah pertama ialah memutuskan semua beban yang masih terhubung ke baterai melalui *breaker* DC. Jika sistem menggunakan *Battery Management System* (BMS) manual, matikan sistem tersebut untuk menghentikan manajemen distribusi daya. Untuk penyimpanan jangka panjang, pastikan baterai disimpan dalam kondisi SoC (*State of Charge*) antara 50–70% guna menjaga kesehatan sel. Setelah semua unit pembangkit dan penyimpanan dimatikan, lakukan pemeriksaan ulang terhadap semua *breaker*, kabel, dan sambungan untuk memastikan sistem benar-benar bebas tegangan. Pastikan pula semua indikator di panel



kontrol sudah dalam posisi *off*. Terakhir, lakukan prosedur penguncian dan penandaan keselamatan (*lock out tag out*) jika akan dilanjutkan dengan pekerjaan pemeliharaan.

e. Dokumentasi *Shutdown* dalam *Logbook*

Laporkan kondisi akhir sistem dalam *logbook* atau ke supervisor. Contoh parameter yang perlu dicatat ialah seperti berikut.

Tabel 4.2 *Logbook* Penonaktifan PLTH

Tanggal	Waktu	Status PLTS	Status PLTD	Status Baterai	Keterangan
20/05/2025	18:30	OFF (manual)	OFF (auto stop)	SOC 68%	Shutdown rutin harian
dst					

Memahami dan menerapkan prosedur *shutdown* sistem PLTH ialah bagian penting dari kompetensi kerja murid SMK Jurusan Teknik Energi Terbarukan. Proses ini tidak hanya berfungsi untuk keselamatan dan efisiensi, tetapi juga melatih disiplin operasional, kesadaran risiko, dan kemampuan dokumentasi teknis, yang sangat dibutuhkan dalam dunia kerja profesional.



Gambar 4.13 Diagram Alir Penonaktifan PLTH

Aktivitas 4.4 – Susunan Prosedur Penonaktifan PLTD dan PLTS

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu menjelaskan prosedur menonaktifkan unit PLTH.

Langkah-Langkah:

Ayo, susun prosedur *shutdown*! Penonaktifan unit PLTD dan PLTS tidak dapat dilakukan sembarangan. Diperlukan langkah sistematis agar sistem tetap aman dan tidak menimbulkan kerusakan pada komponen.

Studi Kasus

Di sebuah desa pesisir, terdapat PLTH yang mengombinasikan PLTD 250 kW dan PLTS 150 kWp. Pada suatu sore, pihak operator menerima informasi bahwa akan dilakukan perawatan rutin pada sistem *switchgear* dan *battery bank* esok hari. Untuk itu, PLTH harus dimatikan secara terencana (*planned shutdown*) pada malam hari agar aman untuk dikerjakan teknisi keesokan paginya. Sebagai operator jaga, kamu bertugas melakukan prosedur *shutdown* yang aman dan sesuai SOP. Kamu harus mempertimbangkan urutan penonaktifan kedua sumber pembangkit, keselamatan kerja, dan koordinasi dengan pusat pengendalian beban (*control room*).

1. Jelaskan urutan umum *shutdown* pada PLTH (PLTD + PLTS) yang aman dan sesuai prinsip kerja sistem kelistrikan.
2. Berdasarkan data beban saat ini (total beban 120 kW, cuaca mendung, baterai pada SOC 45%), urutkan langkah penonaktifan PLTH yang tepat agar tidak terjadi *blackout* mendadak.
3. Mengapa komunikasi dan koordinasi dengan pusat pengendalian beban serta teknisi perawatan menjadi bagian penting dalam prosedur *shutdown*? Berikan contoh risiko jika hal ini diabaikan.
4. Simulasikan langkah *shutdown* PLTH di *training panel* atau simulator dengan memperhatikan: urutan pemutusan beban, penonaktifan PLTS, dan pemadaman PLTD sesuai SOP.
5. Setelah melakukan simulasi, apa kesulitan yang kamu temui saat menonaktifkan PLTH? Apa strategi yang dapat dilakukan untuk mencegah kesalahan serupa di operasi sesungguhnya?



B. Pemeliharaan PLTH

Pada bagian ini, kita akan mengenal lebih jauh tentang pemeliharaan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Pola pikir sebagai operator PLTD harus berorientasi pada keselamatan, ketelitian, dan tanggung jawab. Seorang operator dituntut untuk memiliki sikap waspada terhadap setiap perubahan kondisi mesin, memahami prosedur standar operasional, serta mampu mengambil keputusan cepat dan tepat saat terjadi gangguan. Selain itu, operator juga harus berpikir preventif, yakni menjaga dan merawat peralatan secara rutin untuk mencegah kerusakan yang lebih besar.

Beberapa jenis PLTD di pasaran juga disebut generator set. Generator ini dikategorikan berdasarkan bahan bakar yang dipakai: generator berbahan bakar bensin, solar, dan gas.



Gambar 4. 14 Generator Set Berbahan Bakar Bensin

Sumber: garudasytrain (2025)

Genset bensin pada Gambar 4.14 merupakan jenis genset yang berukuran kecil. Salah satu genset yang paling umum digunakan untuk kebutuhan rumah tangga dan bisnis ialah genset bahan bakar bensin. Genset bensin ini memiliki kapasitas rata-rata 1.000 watt.

Pemeliharaan PLTD berbahan bensin sebaiknya dijadwal harian, mingguan, dan bulanan. Penjadwalan kita simak dalam tabel berikut.



Tabel 4.3 Tabel Perawatan PLTD Berbahan Bakar Bensin

No	Jenis Perawatan	Kegiatan	Frekuensi	Keterangan
1	Pemeriksaan bahan bakar	Cek dan isi bensin sesuai kebutuhan.	Harian	Gunakan bensin berkualitas.
2	Pemeriksaan oli mesin	Cek level oli, tambahkan jika kurang.	Harian	Ganti oli tiap 50 jam operasi.
3	Pembersihan bodi genset	Bersihkan debu dan kotoran di permukaan genset.	Harian	Termasuk kipas pendingin udara.
4	Pemeriksaan kebocoran	Cek apakah ada kebocoran oli atau bensin.	Harian	Periksa selang dan sambungan.
5	Pemeriksaan suara mesin	Dengarkan apakah ada suara tidak normal saat genset menyala.	Harian	Tandai jika ada getaran berlebih.
6	Pembersihan filter udara	Lepas dan bersihkan dari debu.	Mingguan	Ganti jika sudah aus.
7	Pemeriksaan busi	Bersihkan busi dari kerak karbon.	Mingguan	Ganti tiap 100 jam kerja.
8	Pemanasan genset	Jalankan genset $\pm$ 10 menit walau tidak digunakan.	Mingguan	Untuk menjaga sirkulasi oli.
9	Pemeriksaan kabel dan konektor	Cek kondisi kabel, soket, dan terminal.	Mingguan	Pastikan tidak ada kabel mengelupas.
10	Pemeriksaan aki (jika ada)	Periksa tegangan dan kondisi terminal.	Mingguan	Bersihkan karat dan pastikan penuh.
11	Penggantian oli mesin	Buang oli lama dan isi dengan oli yang baru.	Bulanan	Atau, setiap 500 jam pemakaian.
12	Pemeriksaan baut & mur	Periksa kekencangan semua baut/mur genset.	Bulanan	Cegah getaran berlebih.
13	Pembersihan ruang genset	Bersihkan area sekitar genset dari debu, serangga, atau bahan mudah terbakar.	Bulanan	Demi keselamatan operasional.

Generator solar atau genset diesel pada Gambar 4.15 merupakan pembangkit listrik yang bekerja dengan cara membakar bahan bakar solar di dalam mesin diesel untuk menghasilkan energi mekanik, yang kemudian digunakan untuk memutar alternator guna menghasilkan listrik. Proses ini dimulai dari pembakaran solar yang mendorong piston untuk bergerak, lalu



menggerakkan poros engkol yang terhubung ke alternator. Alternator kemudian mengubah energi gerak menjadi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan.



- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1. <i>Water tank</i> | 9. <i>Oil sump</i> |
| 2. <i>Intercooler</i> | 10. <i>Lubrication oil filter</i> |
| 3. <i>Fan</i> | 11. <i>Fuel filter</i> |
| 4. <i>Diesel pump</i> | 12. <i>Basement</i> |
| 5. <i>Supercharger</i> | 13. <i>Brushless generator</i> |
| 6. <i>Air filter</i> | 14. <i>Start motor</i> |
| 7. <i>Instrument board</i> | 15. <i>Exhaust pipe</i> |
| 8. <i>Oil filling port</i> | 16. <i>Small generator</i> |

Gambar 4.15 Bagian Generator Set Berbahan Bakar Solar
Sumber: pinterest (2025)

Genset solar pada Gambar 4.15 berkapasitas mulai dari 1 kVA untuk kebutuhan rumah tangga kecil hingga ratusan kVA untuk industri besar. Bagian-bagian generator set berbahan bakar solar seperti berikut.

1. *Tangki Air*
Tangki air (*water tank*) berfungsi untuk menampung air radiator yang digunakan sebagai pendingin mesin diesel agar tidak *overheat* saat beroperasi.
2. *Intercooler*
Mendinginkan udara yang masuk setelah melalui turbo/*supercharger* agar lebih padat, meningkatkan efisiensi pembakaran.



3. Kipas
Kipas pendingin (*fan*) yang membantu mengalirkan udara melewati radiator untuk mendinginkan mesin.
4. Pompa Solar (*Diesel Pump*)
Menyuntikkan bahan bakar solar ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi sesuai kebutuhan mesin.
5. *Supercharger (Turbocharger)*
Menambah tekanan udara masuk ke ruang bakar, meningkatkan daya mesin dan efisiensi pembakaran.
6. Saringan Udara (*Air Filter*)
Menyaring udara masuk agar bebas dari debu dan partikel kotoran sebelum masuk ke ruang bakar.
7. Panel Instrumen (*Instrument Board*)
Panel kontrol yang menampilkan informasi seperti tegangan, arus, frekuensi, suhu, tekanan oli, dan status operasional genset.
8. Tutup Pengisian Oli (*Oil Filling Port*)
Tempat untuk mengisi oli mesin diesel agar sistem pelumasan berjalan dengan baik.
9. Bak Oli (*Oil Sump*)
Wadah penampung oli mesin yang berfungsi untuk melumasi semua bagian dalam mesin.
10. Filter Oli Pelumas (*Lubrication Oil Filter*)
Menyaring kotoran dan partikel dalam oli sebelum disirkulasikan ke semua bagian mesin.
11. Filter Bahan Bakar (*Fuel Filter*)
Menyaring solar dari kotoran dan air agar tidak merusak injektor atau pompa bahan bakar.
12. Rangka Dasar (*Basement*)
Dudukan utama yang menopang semua komponen genset agar kokoh dan stabil.
13. Alternator Tanpa Sikat (*Brushless Generator*)
Komponen yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik tanpa menggunakan sikat karbon (lebih awet dan efisien).
14. Start Motor (*Motor Starter*)
Motor listrik kecil yang digunakan untuk memutar mesin diesel saat awal dinyalakan.
15. Pipa Buangan (*Exhaust Pipe*)
Saluran pembuangan gas hasil pembakaran mesin keluar ke udara bebas.
16. Generator Kecil (*Small Generator*)
Umumnya, generator ini digunakan untuk sistem kontrol atau pengisian baterai internal genset.



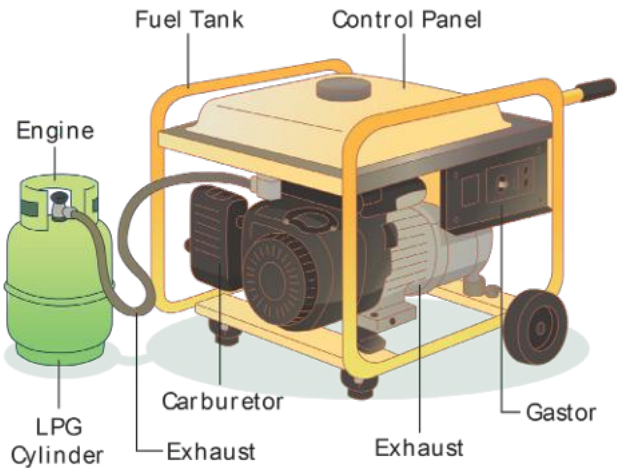
Tabel 4.4 Pemeliharaan PLTD Berbahan Bakar Solar

No	Jenis Perawatan	Kegiatan	Frekuensi	Keterangan
1	Pemeriksaan bahan bakar	Cek dan isi solar sesuai kebutuhan.	Harian	Gunakan solar bersih dan sesuai spesifikasi.
2	Pemeriksaan oli mesin	Cek dan tambahkan oli bila perlu.	Harian	Ganti oli setiap 100 jam operasi.
3	Pemeriksaan air radiator	Periksa level dan isi ulang air radiator.	Harian	Gunakan air <i>coolant</i> bila tersedia.
4	Pembersihan filter udara	Bersihkan atau ganti filter udara.	Mingguan	Pastikan tidak tersumbat.
5	Pemeriksaan sistem bahan bakar	Cek filter solar dan sistem injeksi.	Mingguan	Ganti filter bila perlu.
6	Pemeriksaan baterai	Cek tegangan dan kondisi terminal aki.	Mingguan	Bersihkan terminal dari karat.
7	Pemanasan mesin	Panaskan mesin jika lama tidak digunakan.	Mingguan	Minimal 10 menit.
8	Pemeriksaan knalpot dan asap	Amati warna asap dan suara knalpot.	Mingguan	Asap hitam pekat menandakan masalah.
9	Penggantian oli mesin	Buang oli lama dan isi oli baru.	Bulanan	Atau, tiap 100 jam operasi.
10	Pemeriksaan baut dan mur	Periksa dan kencangkan baut/mur longgar.	Bulanan	Cegah getaran dan kebisingan.
11	Pembersihan area genset	Bersihkan lingkungan sekitar genset.	Bulanan	Cegah risiko kebakaran dan debu.
12	Pengurasan tangki solar	Buang endapan di dasar tangki.	3 Bulanan	Cegah penyumbatan dan kerusakan sistem bahan bakar.

Generator set berbahan bakar gas merupakan pembangkit listrik yang menggunakan gas seperti LPG, LNG, atau biogas sebagai bahan bakar utama untuk menggerakkan mesin pembakaran dalam, yang kemudian memutar alternator guna menghasilkan listrik. Berbeda dengan genset diesel yang menggunakan solar dan mengandalkan kompresi tinggi, genset gas



menggunakan sistem pengapian dengan busi, mirip seperti mesin bensin. Genset ini dikenal lebih ramah lingkungan karena emisi gas buangnya lebih rendah, menghasilkan suara yang lebih halus, serta memiliki biaya operasional yang lebih hemat, terutama jika menggunakan biogas dari limbah organik.



Gambar 4.16 Generator Set Berbahan Bakar Gas
Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Tabel 4.5 Keterangan Gambar 4.16

No	Nama Bagian	Fungsi
1	<i>LPG Cylinder</i>	Menyimpan bahan bakar gas (LPG) yang akan dialirkan ke mesin pembakaran.
2	<i>Engine</i>	Mesin pembakaran dalam (biasanya 4 tak) yang mengubah energi kimia LPG menjadi energi mekanik.
3	<i>Carburetor</i>	Mencampurkan gas LPG dengan udara dalam perbandingan tepat sebelum masuk ruang bakar.
4	<i>Exhaust</i>	Mengeluarkan gas sisa pembakaran dari ruang bakar ke udara bebas.
5	<i>Fuel Tank</i>	(Opsional jika juga mendukung bensin) – tempat menyimpan bahan bakar alternatif.
6	<i>Control Panel</i>	Tempat pengaturan dan monitoring genset: <i>on/off</i> , voltmeter, <i>output</i> stopkontak, dan <i>breaker</i> .



7	Gastor (Roda)	Memudahkan mobilitas genset agar dapat dipindahkan dengan mudah.
8	Frame	Rangka pelindung semua komponen, menjaga stabilitas, dan keselamatan.

Seorang operator PLTD berbahan bakar gas harus memiliki pola pikir yang preventif dan bertanggung jawab, dengan menempatkan keselamatan sebagai prioritas utama. Karena bahan bakar gas mudah terbakar dan berisiko meledak, pemeliharaan harus dilakukan secara rutin dan teliti, terutama pada bagian seperti regulator, selang, dan sambungan gas. Operator juga perlu berpikir sistematis dalam menjadwalkan pemeriksaan harian, mingguan, dan bulanan untuk memastikan seluruh komponen bekerja secara optimal.

Tabel 4.6 Pemeliharaan PLTD Berbahan Bakar Gas

No	Jenis Pemeliharaan	Kegiatan	Frekuensi	Keterangan
1	Pemeriksaan tabung LPG	Pastikan tabung tidak bocor dan regulator terpasang dengan benar.	Harian	Gunakan sabun untuk tes kebocoran.
2	Pemeriksaan selang dan regulator	Periksa kekencangan dan kondisi selang gas.	Harian	Ganti jika ada retakan atau bocor.
3	Pemeriksaan oli mesin	Cek dan isi oli jika kurang.	Harian	Ganti setiap 50–100 jam kerja.
4	Pembersihan filter udara	Bersihkan filter dari debu dan kotoran.	Mingguan	Ganti jika terlalu kotor
5	Pemeriksaan busi	Bersihkan kerak pada busi dan cek celah elektroda.	Mingguan	Ganti jika aus.
6	Pemanasan genset	Nyalakan genset selama $\pm$ 10 menit.	Mingguan	Mencegah kerusakan akibat lama tidak digunakan.
7	Pemeriksaan kabel dan soket	Pastikan koneksi listrik dalam kondisi baik	Mingguan	Periksa kerusakan atau panas berlebih.



No	Jenis Pemeliharaan	Kegiatan	Frekuensi	Keterangan
8	Penggantian oli mesin	Ganti oli lama dengan yang baru.	Bulanan	Gunakan oli sesuai spesifikasi.
9	Pembersihan bodi genset	Bersihkan bagian luar dari debu, oli, dan kotoran.	Bulanan	Cegah kerusakan akibat penumpukan kotoran.
10	Pemeriksaan knalpot dan suara mesin	Pastikan knalpot tidak tersumbat dan suara mesin normal.	Bulanan	Asap berlebih menandakan masalah.

Aktivitas 4.5 – Pemeliharaan Sistem Mekanik PLTD

Aktivitas Kelompok

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu melakukan Pemeliharaan Sistem Mekanik PLTD.

Langkah-Langkah:

Mari, kita melakukan pemeliharaan sistem mekanis Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dengan cermat.

Studi Kasus

SMKN 1 Suruh mendapatkan tugas dari Dinas Energi untuk membantu melakukan pemeliharaan rutin pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) di Desa Pucangan, Trenggalek. PLTD tersebut memiliki kapasitas 60 kVA dan digunakan untuk menyuplai listrik ke beberapa fasilitas umum seperti balai desa, puskesmas pembantu, dan penerangan jalan.

Dalam beberapa minggu terakhir, operator PLTD melaporkan bahwa suara mesin terdengar lebih kasar dari biasanya, terdapat getaran berlebih, serta konsumsi bahan bakar meningkat.

Tim siswa jurusan Teknik Energi Terbarukan bersama guru pembimbing ditugaskan untuk melakukan pemeriksaan dan pemeliharaan sistem mekaniknya, meliputi:



- Sistem pelumasan
- Sistem pendinginan
- Sistem bahan bakar
- Sistem udara masuk dan buang
- Sistem transmisi daya ke generator.

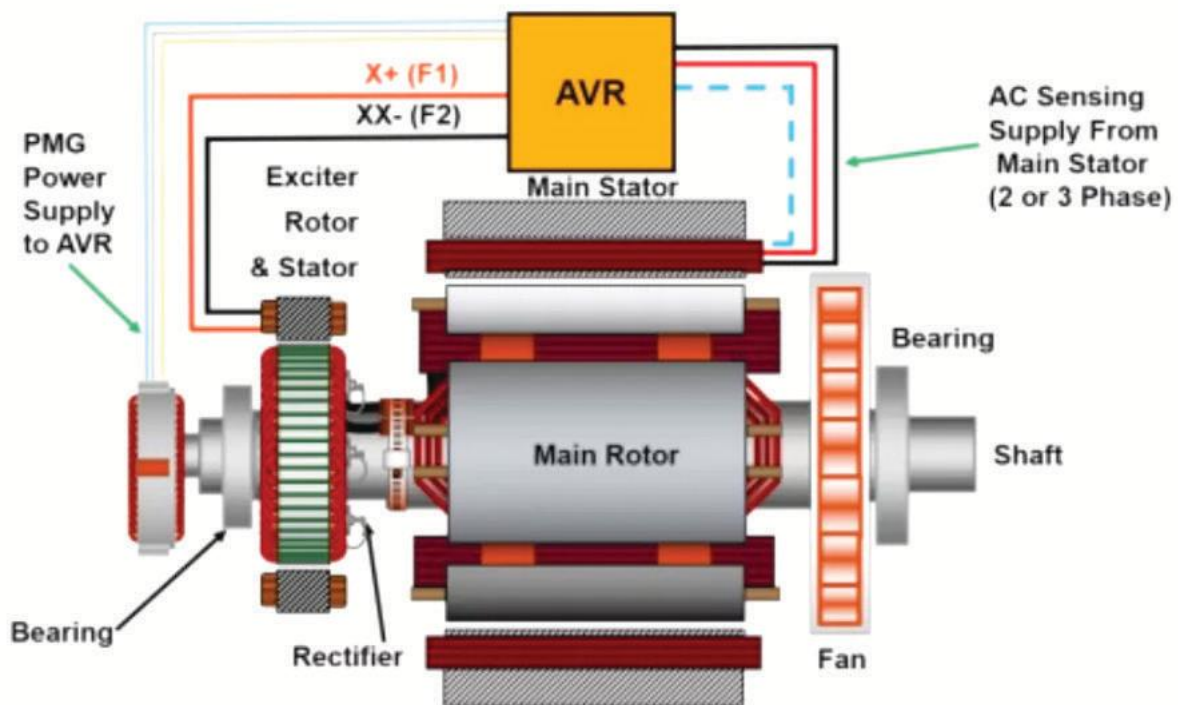
Selanjutnya, jawablah pertanyaan di bawah ini.

1. Apa fungsi utama dari sistem pelumasan, sistem pendinginan, dan sistem bahan bakar pada PLTD? Bagaimana ketiganya saling berkaitan dalam menjaga kinerja mesin diesel tetap optimal?
2. Bagaimana langkah-langkah teknis yang harus dilakukan oleh tim siswa untuk mengidentifikasi penyebab suara kasar dan getaran berlebih pada mesin diesel sebelum melakukan tindakan pemeliharaan?
3. Sikap apa yang harus ditunjukkan oleh anggota tim selama melakukan pemeliharaan sistem mekanik PLTD agar pekerjaan berjalan aman, efektif, dan mencerminkan profesionalisme seorang teknisi?
4. Jelaskan bagaimana kamu akan melakukan pemeriksaan dan perawatan pada sistem pendinginan dan pelumasan PLTD agar efisiensi bahan bakar dapat meningkat kembali setelah pemeliharaan.
5. Setelah melakukan kegiatan pemeliharaan sistem mekanik PLTD, apa pembelajaran penting yang kamu peroleh tentang hubungan antara ketelitian dalam perawatan dan keandalan operasi sistem pembangkit listrik?

1. Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTD

Pemeliharaan bukan sekadar memperbaiki kerusakan, tetapi lebih pada mencegah gangguan melalui pemeriksaan rutin, pembersihan komponen, dan pengujian fungsi kelistrikan. Pola pikir ini menuntut kesadaran bahwa arus listrik dapat berbahaya jika diabaikan sehingga semua koneksi, isolasi kabel, dan sistem *grounding* harus selalu dalam kondisi prima. Selain itu, operator harus berpikir logis dan sistematis, memahami hubungan antara komponen seperti alternator, panel kontrol, dan sistem pengisian baterai. Dengan pola pikir yang benar, pemeliharaan sistem kelistrikan genset tidak hanya menjaga kinerja alat, tetapi juga melindungi manusia dan lingkungan dari risiko kebakaran atau sengatan listrik.





Gambar 4.17 Bagian Kelistrikan PLTD

Sumber: empatpilar (2025)

Tabel 4.7 Keterangan Gambar 4.17

Bagian	Fungsi
<i>Permanent Magnet Generator (PMG)</i>	Menghasilkan listrik AC kecil untuk suplai awal ke AVR. Tidak bergantung pada medan magnet utama sehingga membantu sistem tetap stabil saat <i>start</i> awal atau beban tinggi.
<i>Automatic Voltage Regulator (AVR)</i>	Mengatur tegangan keluaran genset agar tetap stabil, meskipun terjadi perubahan beban. AVR menerima sensing dari stator utama dan memberi arus DC ke rotor <i>exciter</i> .
<i>Exciter (Rotor & Stator)</i>	Mengubah sinyal dari AVR menjadi medan magnet di rotor utama. Biasanya, berupa sistem AC yang disearahkan ke DC melalui <i>rectifier</i> .
<i>Rectifier</i>	Menyearahkan arus AC dari <i>exciter stator</i> menjadi DC, lalu dikirim ke medan magnet di <i>main rotor</i> .



Bagian	Fungsi
<i>Main Rotor</i>	Berputar bersama poros (<i>shaft</i>) dan menghasilkan medan magnet utama. Interaksi dengan <i>main stator</i> menghasilkan listrik induksi.
<i>Main Stator</i>	Bagian diam (statis) tempat terjadinya induksi listrik oleh medan magnet rotor. Hasil akhirnya ialah arus AC 3 fasa yang akan digunakan.
<i>Bearing</i>	Menopang poros (<i>shaft</i>) agar dapat berputar dengan presisi dan minim gesekan.
<i>Fan</i> (Kipas)	Mendinginkan sistem saat beroperasi, terutama bagian rotor dan stator yang menghasilkan panas.
<i>Shaft</i> (Poros)	Menghubungkan mesin penggerak (<i>engine</i>) dan sistem kelistrikan. Putaran <i>shaft</i> menghasilkan energi listrik.



Gambar 4.18 Perawatan Berkala pada Kelistrikan

Sumber: Kemendikdasmen (2025)

Beberapa komponen kelistrikan perlu perawatan yang intensif dan berkala pada bagian yang sangat penting. Komponen-komponen itu tercantum pada tabel berikut.



Tabel 4.8 Pemeliharaan Kelistrikan PLTD

No	Jenis Pemeriksaan	Langkah Perawatan	Frekuensi	Keterangan
1	Pemeriksaan Tegangan <i>Output</i>	Cek tegangan fase R, S, T pada panel kontrol.	Harian	Saat genset beroperasi
2	Pemeriksaan Frekuensi	Cek kestabilan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz.	Harian	Gunakan alat ukur <i>frequency meter</i> , <i>power analyzer</i> ,
3	Pemeriksaan Baterai Starter	Ukur tegangan baterai, minimal 12 V.	Harian	Gunakan multitester
4	Pemeriksaan Indikator Panel	Pastikan tidak ada alarm aktif.	Harian	Visual
5	Pemeriksaan Kabel dan Terminal	Cek kelonggaran, karat, dan kerusakan.	Mingguan	Bersihkan dan kencangkan dengan kunci/tang yang sesuai
6	Pengujian Fungsi ATS/AMF	Simulasi pemadaman PLN dan nyala otomatis genset.	Mingguan	Jika menggunakan ATS
7	Pembersihan Panel Kontrol	Bersihkan dari debu dan kelembapan.	Mingguan	Gunakan kuas/kain kering
8	Pemeriksaan Sistem Pengisian	Cek pengisian alternator ke baterai.	Bulanan	Saat genset hidup cek dengan AVO meter
9	Pemeriksaan MCB/ACB	Uji manual pemutus sirkuit.	Bulanan	Untuk pengaman beban test bench mekanik
10	Pengujian Proteksi Sistem	Uji proteksi <i>overcurrent</i> , <i>undervoltage</i> , dll.	Triwulanan / 250 jam	Gunakan panel kontrol
11	Pemeriksaan Isolasi Kabel	Uji tahanan isolasi menggunakan <i>megger</i> .	Triwulanan	Tahanan minimum > 1 MΩ
12	<i>Load Test</i> Genset	Uji genset pada beban maksimum.	Tahunan	Validasi performa daya
13	Pemeriksaan <i>Grounding System</i>	Ukur tahanan <i>grounding</i> (< 5 ohm).	Tahunan	Gunakan <i>earth tester</i>



No	Jenis Pemeriksaan	Langkah Perawatan	Frekuensi	Keterangan
14	Pembersihan Alternator	Bersihkan stator dan rotor dari debu, dengan kuas dan <i>vacum cleaner</i>	Tahunan	Matikan genset dulu
15	Penggantian Kabel Rusak	Ganti kabel yang aus, terbakar, atau terkelupas.	Sesuai kebutuhan	Saat ditemukan masalah

Aktivitas 4.6 – Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTD

Aktivitas Individu

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu merefleksikan Pemeliharaan Sistem Kelistrikan PLTD.

Langkah-Langkah:

Mari, kita melakukan perawatan sistem kelistrikan PLTD dengan teliti.

Studi Kasus

CV. Alhidayah Multimedia bersama tim dari Dinas Energi melakukan kegiatan pemeliharaan sistem kelistrikan pada PLTD di Desa Karanggandu, Trenggalek. PLTD berkapasitas 60 kVA ini melayani jaringan penerangan umum, kantor desa, dan beberapa rumah penduduk. Selama beberapa bulan terakhir, operator mencatat beberapa gejala berikut.

- Lampu penerangan sering redup dan berkedip.
- Nilai tegangan *output* generator tidak stabil.
- Panel kontrol menunjukkan suhu yang meningkat pada salah satu kabel fasa.
- Baterai starter cepat habis meskipun sudah sering diisi ulang.
- Tim Teknisi ditugaskan untuk melakukan pemeriksaan dan pemeliharaan sistem kelistrikan, mencakup:
 - Pemeriksaan generator dan AVR (*Automatic Voltage Regulator*).
 - Pemeriksaan panel kontrol dan sistem proteksi.
 - Pemeriksaan koneksi kabel, terminal, dan *grounding*.
 - Pemeriksaan sistem pengisian dan baterai *starter*.



Setelah membaca studi kasus di atas jawablah pertanyaan di bawah ini.

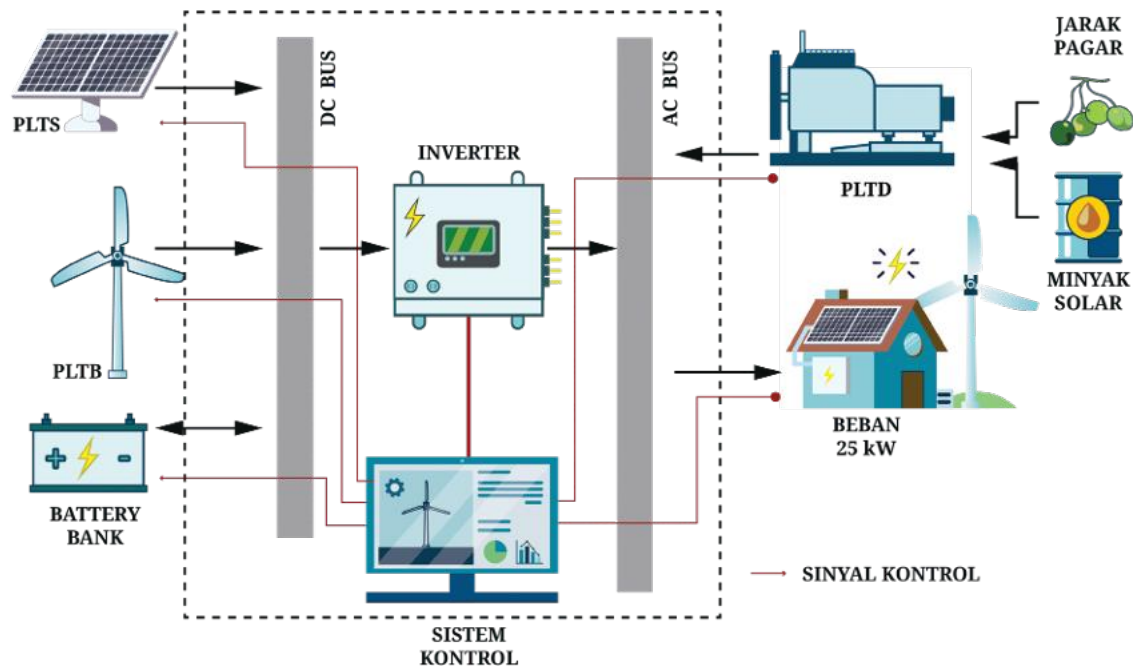
1. Apa fungsi utama dari AVR pada sistem kelistrikan PLTD? Bagaimana pengaruhnya terhadap kestabilan tegangan *output* generator?
2. Bagaimana langkah-langkah pemeriksaan yang harus dilakukan oleh teknisi untuk menemukan penyebab tegangan *output* generator yang tidak stabil dan suhu kabel fasa yang meningkat?
3. Sikap apa yang harus dimiliki oleh seorang teknisi saat melakukan pemeliharaan sistem kelistrikan PLTD agar keselamatan kerja dan keandalan sistem tetap terjaga?
4. Jelaskan bagaimana kamu akan melakukan pengujian sistem pengisian dan baterai starter untuk memastikan bahwa sistem *starting* PLTD berfungsi dengan baik setelah pemeliharaan.
5. Setelah melakukan kegiatan pemeliharaan sistem kelistrikan PLTD, apa pembelajaran penting yang kamu peroleh tentang tanggung jawab teknisi dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik bagi masyarakat?

2. Perawatan Sistem Hibrida

Langkah perawatan sistem PLTH dilakukan secara terpadu untuk memastikan setiap komponen—seperti panel surya (PLTS), generator diesel (PLTD), baterai, inverter, dan sistem kontrol—bekerja optimal dan saling mendukung. Perawatan dimulai dengan pemeriksaan harian terhadap tegangan keluaran, kondisi indikator, suhu sistem, serta koneksi kabel dan terminal.

Selanjutnya, dilakukan pembersihan panel surya dari debu atau kotoran setiap minggu, pengecekan level oli dan bahan bakar pada PLTD, serta inspeksi visual pada sistem baterai. Perawatan bulanan mencakup pengujian sistem inverter, kalibrasi pengaturan kontrol, dan uji fungsi sistem otomatisasi. Pemeriksaan baterai secara berkala juga penting untuk menghindari *overcharge* atau *overdischarge* yang dapat merusak sel.



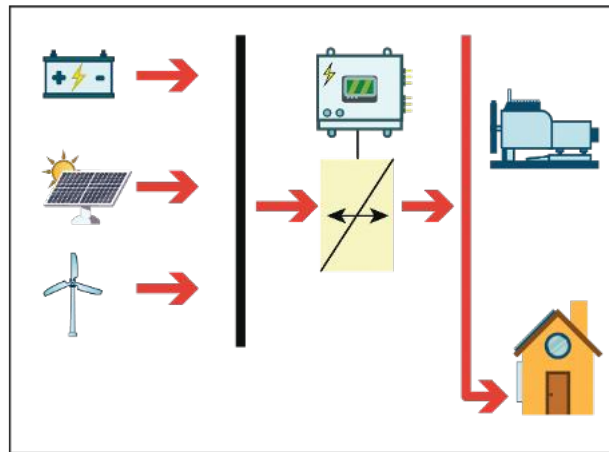


Gambar 4.19 Sistem Kerja PLTH

Sumber: Nurrohim et al. (2012)

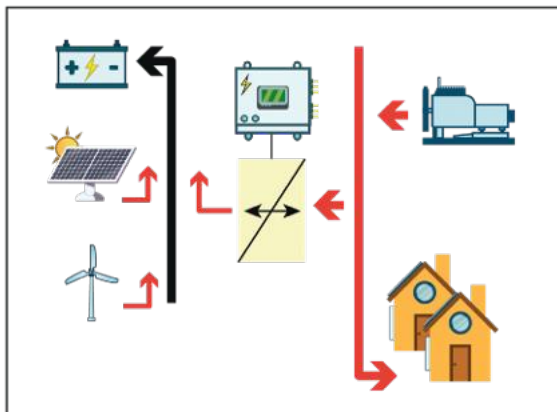
Cara kerja sistem PLTH pada Gambar 4.19 Surya-Bayu-Diesel (PLTH-SBD) sangat bergantung pada bentuk beban atau fluktuasi pemakaian energi *load profile* yang mana selama 24 jam distribusi beban tidak merata untuk setiap waktunya. *Load profile* ini sangat dipengaruhi oleh homogenitas atau faktor kebersamaan dimana pembangkit tersebut dioperasikan.

Skenario kerja PLTH, yang tergambar pada Gambar 3.17, bekerja sesuai urutan. Pada kondisi beban rendah (sesuai dengan *setting*-nya, misal selama kondisi baterai masih penuh beban disuplai 100% dari baterai, PLTS dan PLTB, sehingga diesel tidak perlu beroperasi. Ketiga jenis sumber energi tersebut bekerja secara paralel dalam menyuplai energi listrik ke beban. Aliran daya pada kondisi beban rendah diperlihatkan pada Gambar 4.20.a. Apabila beban mencapai 50% seperti di atas, tetapi baterai masih mencukupi, diesel tidak akan beroperasi dan beban disuplai oleh baterai melalui inverter yang akan mengubah tegangan DC ke tegangan AC.



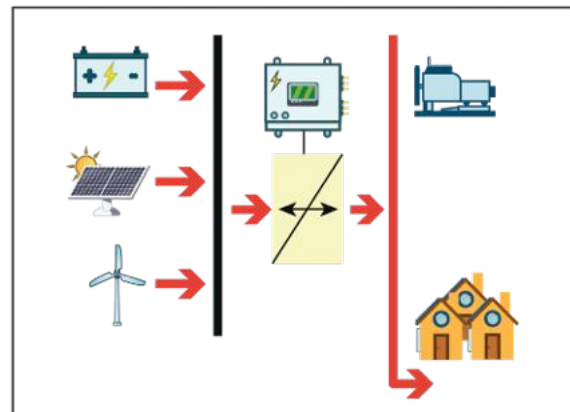
(a) Low Loads:

Diesel tidak kerja, baterai & *renewable energi* (solar & bayu) suplai beban lewat inverter



(b) Medium Loads:

Diesel beroperasi pada beban optimum, HPC mengisi baterai dari kelebihan kapasitas genset



(c) Peak Load:

Diesel beroperasi pada kondisi optimal bekerja paralel dengan baterai dan *renewable energi* (bayu dan solar) melalui inverter

Gambar 4.20 Beban dalam Berbagai Kondisi
Sumber: Nurrohim et al. (2012)



Jika beban naik sampai di atas 50%, beban puncak dan kondisi baterai sudah berada pada level bawah yang disyaratkan, diesel mulai beroperasi untuk menyuplai beban dan sebagian mengisi baterai sampai beban yang disyaratkan diesel mencapai 70-80% kapasitasnya. Pada kondisi ini, inverter bekerja sebagai *charger* (mengubah tegangan AC dari generator menjadi tegangan DC) untuk mengisi baterai fungsi *bi-directional inverter*. Aliran daya seperti terlihat pada Gambar 4.20 b, dapat terjadi selama kapasitas beban yang aktif pada saat itu lebih kecil daripada kapasitas diesel generator.

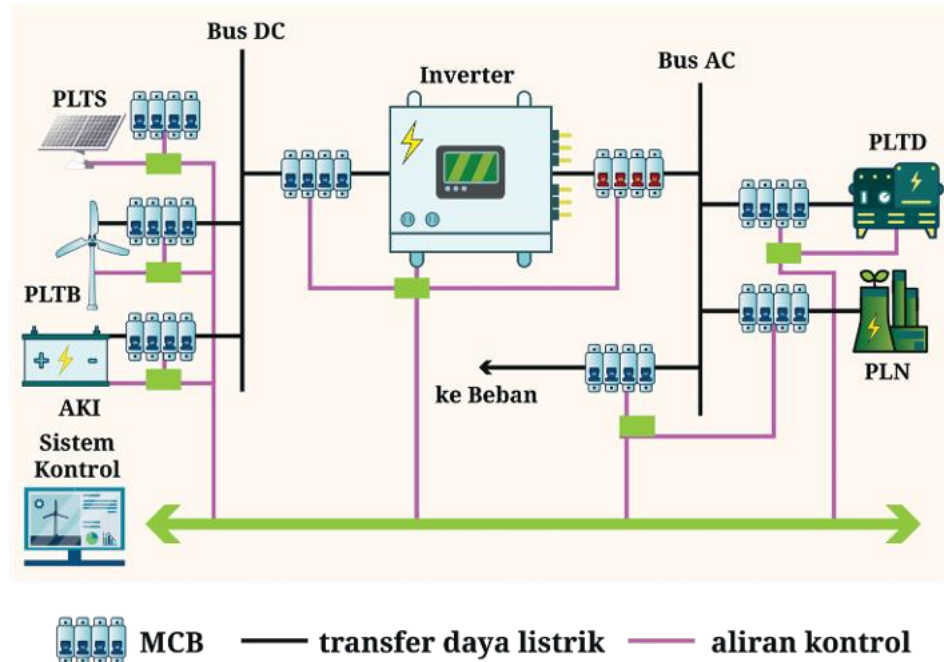
Pada kondisi beban puncak, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20.c, semua sub-sistem pembangkit beroperasi bersama-sama untuk menuju paralel sistem dan ini terjadi apabila kapasitas terpasang diesel atau inverter tidak mampu sampai beban puncak. Jika kapasitas genset cukup untuk menyuplai beban puncak, inverter tidak akan beroperasi paralel dengan genset.

Apabila energi baterai sudah mulai penuh, secara otomatis, genset akan mati dan beban disuplai dari baterai melalui inverter. Semua proses kinerja tersebut diatur oleh sistem *control power management* yang terdapat pada HPC. Proses kontrol ini bukan sekedar mengaktifkan dan menonaktifkan diesel, tetapi yang utama ialah pengaturan energi agar pemakaian BBM diesel menjadi efisien, bukan hanya sekedar paralel sistem dan atau *switch over* ke diesel atau inverter.

Produksi listrik PLTH selain dapat langsung disalurkan pada beban, dapat juga dimasukkan pada jaringan listrik PLN. Berdasarkan hasil analisis mulai dari sumber energi terbarukan skala kecil, pembangkit hibrida sampai dengan beban, dapat dibuat *single line diagram* dari sistem *microgrid* seperti pada Gambar 4.21. Ada dua jaringan dalam sistem, yaitu jaringan DC yang digunakan untuk koneksi dengan pembangkit PLTS, PLTB, dan baterai, serta jaringan AC digunakan untuk PLTD.

Dari Gambar 4.21, terlihat bahwa ada 2 aliran utama, yaitu aliran daya dari sumber energi/pembangkit listrik ke beban dan aliran informasi dari sistem kontrol ke peralatan individu. Semua peralatan sistem kerjanya diatur oleh sistem kontrol sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem serta dapat lebih mengoptimalkan penggunaan sumber energi terbarukan. Pemeliharaan pada sistem hibrida dapat kita lihat pada Tabel 4.9.





Gambar 4.21 *Single Line Diagram* PLTH

Sumber: Nurrohim et al. (2012)

Tabel 4.9 Pemeliharaan Sistem PLTH

No	Komponen Sistem	Jadwal Pemeliharaan	Langkah Pemeliharaan	Tujuan/ Keterangan
1	Panel Surya (PV)	Bulanan	- Bersihkan permukaan panel dari debu dan kotoran - Periksa sambungan kabel	Meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya.
2	Inverter PLTS	Bulanan	- Cek indikator status - Periksa koneksi <i>input/output</i>	Memastikan konversi DC ke AC berjalan baik.
4	Generator Diesel (PLTD)	Harian & Bulanan	- Periksa tegangan <i>output</i> - Cek sistem pengisian aki - Cek kabel <i>output</i> ke panel	Memastikan suplai listrik stabil saat beban puncak.
5	Baterai (Bank Baterai)	Mingguan & Bulanan	- Cek tegangan per sel baterai - Periksa terminal baterai dari korosi - Pastikan suhu baterai dalam batas aman	Menjaga umur baterai dan kapasitas penyimpanan.



No	Komponen Sistem	Jadwal Pemeliharaan	Langkah Pemeliharaan	Tujuan/ Keterangan
6	Panel Distribusi Listrik (AC & DC)	Bulanan	• Periksa MCB/MCB trip • Cek jalur kabel & sambungan • Bersihkan debu pada panel	Mencegah hubung singkat dan menjaga keamanan sistem.
7	Sistem Monitoring & Proteksi	Mingguan	• Cek indikator alarm • Uji sistem proteksi (<i>surge, overcurrent, dsb</i>)	Menjaga keamanan sistem dari gangguan.
8	<i>Grounding System</i>	3 Bulanan	• Cek tahanan tanah • Periksa kabel <i>grounding</i>	Menjaga keamanan pengguna dan alat dari petir atau bocor arus.
9	Kabel dan Konektor	Bulanan	• Periksa visual kerusakan • Pastikan isolasi tidak rusak	Mencegah kebakaran dan gangguan kelistrikan.
10	Kontrol Otomatis dan PLC	Bulanan	• Cek fungsi kontrol otomatis • Lakukan simulasi otomatisasi (<i>start/stop genset</i>)	Memastikan sistem hibrida bekerja otomatis sesuai beban.

Aktivitas 4.7 – Pemeliharaan Sistem Hibrida

Tujuan:

Setelah melakukan aktivitas ini, kamu mampu merefleksikan Pemeliharaan Sistem Kelistrikan Hibrida.

Langkah-Langkah:

Mari, kita melakukan pemeliharaan sistem kelistrikan hibrida dengan teliti.

Studi Kasus

SMKN 1 Suruh bekerja sama dengan Dinas Energi melaksanakan kegiatan pemeliharaan sistem kelistrikan hibrida (PLTH) di Desa Nglongsor, Trenggalek. Sistem ini menggabungkan tiga sumber energi berikut.



- PLTS kapasitas 10 kWp,
- PLTB kapasitas 3 kW, dan
- PLTD kapasitas 20 kVA sebagai cadangan (*backup generator*).

Sistem hibrida ini dirancang untuk menyuplai listrik ke sekolah dasar, balai desa, dan penerangan jalan di daerah yang belum terjangkau jaringan PLN. Beberapa minggu terakhir, operator melaporkan permasalahan berikut.

- Daya dari panel surya menurun meskipun cuaca cerah.
- Turbin angin berputar, tetapi arus yang dihasilkan kecil.
- PLTD sering aktif otomatis meskipun kapasitas baterai masih di atas 60%.
- Terdapat indikasi panas berlebih pada inverter dan *fuse* pada panel distribusi.

Tim teknisi yang terdiri atas guru pembimbing dan siswa jurusan Teknik Energi Terbarukan ditugaskan untuk melakukan pemeliharaan dan analisis sistem kelistrikan hibrida, mencakup hal-hal berikut.

1. Pemeriksaan koneksi antar-pembangkit (PLTS, PLTB, dan PLTD).
2. Pemeriksaan inverter, baterai, dan sistem kontrol otomatis.
3. Pemeriksaan panel distribusi, *fuse*, dan proteksi beban.
4. Pemeriksaan nilai arus dan tegangan pada setiap sumber daya.

Setelah membaca studi kasus di atas, jawablah soal-soal berikut.

1. Bagaimana sistem kontrol otomatis bekerja dalam mengatur prioritas penggunaan energi pada sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTD agar pasokan listrik tetap stabil dan efisien?
2. Bagaimana langkah-langkah yang tepat untuk memeriksa dan menganalisis penurunan daya panel surya meskipun kondisi cuaca cerah? (Sertakan alat ukur dan parameter yang perlu diperhatikan.)
3. Saat menemukan *fuse* meleleh dan panel distribusi panas, bagaimana sikap tanggung jawab dan keselamatan kerja harus diterapkan oleh tim teknisi agar pekerjaan tetap aman?
4. Apa kemungkinan penyebab PLTD aktif otomatis padahal kapasitas baterai masih di atas 60%? bagaimana cara teknisi menganalisis sistem kontrol untuk menemukan sumber masalahnya?
5. Setelah melakukan pemeliharaan sistem kelistrikan hibrida, pelajaran apa yang dapat kamu ambil tentang pentingnya kolaborasi, ketelitian, dan kepedulian terhadap keberlanjutan energi di daerah terpencil?



Uji Kompetensi

A. Menjodohkan

Pasangkan komponen/situasi pada Kolom A dengan fungsi yang sesuai pada Kolom B.

Kolom A – Komponen/Situasi	Kolom B – Fungsi/Keterangan
A. Panel surya (PV Module)	1. Mengatur prioritas suplai daya antara PLTS dan PLTD
B. Inverter hibrida	2. Mengubah energi DC menjadi AC dan mengatur sinkronisasi
C. PLTD	3. Digunakan saat suplai energi surya tidak mencukupi
D. Sistem kontrol otomatis hibrida	4. Mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik DC
E. Bank baterai	5. Menyimpan energi listrik untuk digunakan saat malam hari

B. Pilihan ganda

Bacalah kasus berikut untuk menjawab soal nomor 1-10.

Studi Kasus

PLTH di Desa Energi Mandiri memiliki kapasitas total 100 kW. Sistem ini terdiri atas:

1. PLTS 60 kWp
2. PLTD 50 kW sebagai cadangan
3. *Battery Bank* 200 Ah, 48 V
4. Inverter 80 kW
5. *Energy Management System* (EMS)

Pada siang hari, sistem memprioritaskan pasokan dari PLTS. Namun, saat terjadi awan tebal selama lebih dari 2 jam, EMS otomatis menyalakan PLTD untuk menjaga kontinuitas listrik. Suatu hari, operator mencatat bahwa inverter mengalami *overload* saat PLTD beroperasi bersamaan dengan PLTS dan *battery bank* penuh.



1. Apa fungsi utama dari EMS dalam sistem PLTH seperti dijelaskan dalam kasus di atas?
 - A. Menyimpan energi ke dalam baterai.
 - B. Mengelola pembagian beban antara PLTS, PLTD, dan baterai.
 - C. Menurunkan suhu panel surya.
 - D. Mengontrol level bahan bakar PLTD.
 - E. Menyaring sinyal inverter.
2. Apa tindakan tepat yang dilakukan operator saat inverter mengalami *overload* akibat semua sumber aktif (PLTS, PLTD, baterai)?
 - A. Menonaktifkan EMS.
 - B. Meningkatkan daya inverter.
 - C. Mengurangi beban listrik atau memutus salah satu sumber daya.
 - D. Menghidupkan PLTD tambahan.
 - E. Membuka katup saluran pembuangan.
3. Apa penyebab utama inverter mengalami *overload* dalam skenario di atas?
 - A. Daya *output* PLTS terlalu kecil.
 - B. PLTD tidak sinkron dengan baterai.
 - C. Baterai kosong dan tidak berfungsi.
 - D. Terlalu banyak sumber aktif tanpa manajemen distribusi beban.
 - E. Solar panel rusak.
4. Mengapa penting mengatur prioritas sumber energi (PLTS > baterai > PLTD) dalam sistem hibrida?
 - A. Agar PLTD dapat dihidupkan terus-menerus.
 - B. Supaya tegangan tidak melebihi batas.
 - C. Untuk efisiensi biaya, pengurangan emisi, dan daya tahan sistem.
 - D. Agar inverter tidak bekerja terlalu keras.
 - E. Untuk menghindari sinkronisasi generator.
5. Jika kamu ditugaskan merancang ulang strategi pengoperasian PLTH saat cuaca tidak menentu, solusi teknis apa yang paling efektif?
 - A. Menyalakan PLTD setiap malam secara rutin.
 - B. Menambahkan baterai cadangan dan memperkuat peran EMS untuk *switching* otomatis.
 - C. Mengurangi jumlah panel surya.
 - D. Mengganti inverter dengan PLTS biasa.
 - E. Mengubah sistem menjadi 100% diesel.



6. Berdasarkan studi kasus, apa penyebab paling mungkin terjadinya *overload* pada inverter? (Pilih lebih dari satu jawaban yang benar)
- A. Kapasitas inverter lebih kecil daripada total daya gabungan sumber listrik.
 - B. *Battery bank* penuh sehingga daya dari PLTS tidak dapat disimpan.
 - C. EMS gagal memutuskan salah satu sumber daya saat beban rendah.
 - D. PLTD menghasilkan tegangan lebih tinggi daripada batas nominal inverter.
 - E. Ada penurunan daya yang dihasilkan PLTS.
7. Jika kamu seorang teknisi lapangan, tindakan mana yang paling tepat untuk mencegah kejadian *overload* serupa di masa depan? (Pilih lebih dari satu jawaban yang benar)
- A. Mengatur EMS agar memprioritaskan pelepasan daya dari baterai sebelum menyalakan PLTD.
 - B. Menambah kapasitas inverter agar sesuai dengan potensi daya gabungan PLTS dan PLTD.
 - C. Mengatur sistem agar PLTS mati otomatis saat PLTD menyala.
 - D. Menurunkan kapasitas PLTD agar *output* total tidak melebihi inverter.
 - E. Mengurangi daya beban sehingga kerja sistem tidak berlebihan.
8. Rancang solusi optimasi operasional agar sistem PLTH tetap stabil meskipun terjadi cuaca buruk. Solusi yang tepat ialah . . . (Pilih lebih dari satu jawaban yang benar)
- A. menambahkan modul kontrol prioritas daya berbasis prediksi cuaca
 - B. mengoperasikan PLTS dan PLTD bersamaan tanpa pengaturan prioritas
 - C. mempercepat respons PLTD untuk menghindari kekurangan daya saat beban puncak
 - D. meningkatkan kapasitas *battery bank* agar surplus daya dapat disimpan
 - E. memilih peralatan listrik yang hemat energi sehingga beban lebih efisien
9. Jika kamu diminta membuat SOP (*Standard Operating Procedure*) pengoperasian PLTH, poin penting yang harus dimasukkan ialah . . . (Pilih lebih dari satu jawaban yang benar)
- A. instruksi *bypass* inverter untuk menghindari *overload*
 - B. aturan kapan PLTD boleh menyala bersamaan dengan PLTS
 - C. prosedur pengecekan kapasitas inverter sebelum sinkronisasi PLTS dan PLTD
 - D. prosedur pengisian baterai secara manual menggunakan PLTD
 - E. PLTD menyala saat PLTS diprediksi tidak mampu mensuplai energi
10. *Overload* inverter berpotensi menimbulkan konsekuensi teknis yang signifikan. Manakah konsekuensi yang paling mungkin terjadi? (Pilih lebih dari satu jawaban yang benar)
- A. Penurunan efisiensi sistem dan kerusakan komponen inverter.
 - B. Gangguan kontinuitas pasokan listrik ke konsumen.



- C. Pengurangan umur *battery bank* karena *discharge* berlebih.
- D. Kerusakan fisik pada modul PLTS akibat panas berlebih.
- E. Listrik yang dihasilkan (frekuensi) tidak sesuai kebutuhan peralatan.

Bacalah kasus berikut untuk menjawab soal nomor 11—15.

Studi Kasus

Desa Cahaya Mandiri mengoperasikan PLTH dengan kombinasi PLTS 50 kWp dan PLTD 40 kW. Sistem ini dirancang untuk melayani 120 rumah tangga dan fasilitas umum. Energi utama berasal dari panel surya, dengan dukungan PLTD saat malam hari atau saat produksi PLTS tidak mencukupi. Sistem dilengkapi *battery bank* 100 kWh, inverter 60 kW, dan EMS yang mengatur *switching* antarsumber daya.

Suatu pagi, operator mencatat bahwa produksi PLTS turun drastis, padahal beban tetap tinggi. Sementara itu, PLTD tidak dapat menyala otomatis, dan baterai hanya tersisa 15% kapasitas.

11. Panel monitoring menunjukkan tegangan *array* surya turun menjadi 200 V dari standar 300 V. Apa kemungkinan penyebab penurunan tegangan panel surya tersebut?
 - A. Baterai telah penuh.
 - B. Modul surya kelebihan beban.
 - C. Intensitas cahaya matahari menurun atau ada *shading*.
 - D. PLTD menyala terlalu cepat.
 - E. Inverter tidak terhubung ke beban.
12. Operator memeriksa genset diesel dan mendapati lampu indikator oli menyala merah, dan genset gagal menyala otomatis. Apa tindakan paling tepat yang harus dilakukan operator dalam kondisi tersebut?
 - A. Menyalakan inverter secara manual.
 - B. Mengisi ulang tangki bahan bakar.
 - C. Memeriksa dan menambah oli mesin genset.
 - D. Menyalakan kembali sistem EMS.
 - E. Menurunkan beban pada jaringan.
13. Setelah pemeriksaan lebih lanjut, diketahui bahwa suhu baterai meningkat drastis dan sistem pendingin tidak bekerja. Apa dampak dari suhu baterai yang terlalu tinggi terhadap sistem hibrida?
 - A. Daya keluaran inverter akan meningkat.
 - B. Kapasitas baterai akan bertambah.



- C. Efisiensi panel surya akan meningkat.
 - D. Umur baterai menurun dan risiko kegagalan meningkat.
 - E. PLTD akan menyala lebih cepat.
14. Dalam 3 hari terakhir, beban puncak malam hari meningkat 20% karena kegiatan desa. Sistem sering mengalami drop tegangan. Apa solusi terbaik untuk memastikan kontinuitas listrik saat beban malam hari meningkat?
- A. Mengganti PLTD dengan kapasitas lebih besar.
 - B. Memasang modul surya tambahan.
 - C. Menambah kapasitas *battery bank* atau sistem manajemen beban.
 - D. Mematikan inverter setiap malam.
 - E. Mengurangi jumlah rumah tangga yang dilayani.
15. Tim siswa ditugaskan merancang sistem notifikasi berbasis IoT agar operator mendapat peringatan dini saat salah satu komponen (PLTS, PLTD, inverter, baterai) mengalami anomali. Komponen utama apa yang sebaiknya disarankan tim untuk dipasang agar sistem dapat mengirimkan notifikasi secara *real-time* ke operator?
- A. Sensor suhu panel surya.
 - B. Modul GSM atau Wi-Fi dengan mikrokontroler dan sensor daya.
 - C. Saklar manual untuk inverter.
 - D. *Relay starter* otomatis.
 - E. Saklar *bypass* generator ke baterai.

C. Esai

Jawablah soal-soal berikut dengan jelas.

1. Jelaskan langkah-langkah pemeriksaan fisik dan visual sebelum mengoperasikan sistem PLTH!
2. Uraikan proses operasional perpindahan daya (*switchover*) dari PLTS ke PLTD saat energi surya tidak mencukupi!
3. Apa yang dimaksud dengan proses sinkronisasi dalam sistem PLTH? Mengapa hal ini penting dilakukan sebelum PLTD terhubung ke beban?
4. Jelaskan minimal lima parameter yang perlu dimonitor selama operasional PLTH!
5. Apa saja bentuk kegiatan pemeliharaan rutin dan berkala yang harus dilakukan pada sistem PLTS dan PLTD agar tetap berfungsi optimal?



Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTH (Diesel + Surya)

Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) yang menggabungkan PLTD dan PLTS makin banyak digunakan, khususnya di daerah terpencil. Sistem ini mengoptimalkan keunggulan setiap teknologi agar dapat menghasilkan listrik yang andal, efisien, dan ramah lingkungan.

1. Konsep Dasar PLTH

PLTH bekerja dengan prinsip mengombinasikan energi terbarukan (PLTS) dengan energi fosil (PLTD). Pada siang hari, listrik diprioritaskan dari panel surya. Jika beban listrik melebihi kapasitas PLTS atau kondisi cuaca mendung, PLTD akan otomatis beroperasi sebagai sumber cadangan. Sistem kontrol cerdas mengatur transisi ini agar stabil dan aman.

2. Keunggulan Sistem PLTH

- a) Efisiensi Energi: PLTS mengurangi konsumsi bahan bakar diesel sehingga biaya operasional lebih rendah.
- b) Keandalan Suplai: PLTD berfungsi sebagai *backup* ketika sinar matahari tidak mencukupi.
- c) Ramah Lingkungan: Emisi karbon berkurang karena PLTD tidak digunakan secara penuh setiap saat.
- d) Fleksibilitas Operasi: Sistem dapat diatur untuk mengikuti profil beban lokal, baik siang maupun malam.

3. Komponen Utama PLTH

- a) Panel Surya (PV *Module*): Mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik DC.
- b) Inverter dan Sistem Kontrol: Mengubah listrik DC menjadi AC, sekaligus mengatur sinkronisasi dengan PLTD.
- c) Baterai (opsional): Menyimpan energi listrik dari PLTS untuk digunakan saat malam hari atau beban puncak.
- d) Generator Diesel: Pembangkit berbahan bakar fosil sebagai cadangan atau pelengkap.
- e) Sistem Proteksi: Menjaga keamanan peralatan dan operator (*breaker, relay, grounding*).
- f) Panel Distribusi: Menyalurkan listrik ke rumah, sekolah, dan fasilitas umum.



4. Strategi Operasi
 - a) Pada siang hari cerah, beban utama disuplai oleh PLTS, sedangkan PLTD dapat dikurangi atau dimatikan.
 - b) Pada cuaca mendung atau malam hari, PLTD beroperasi untuk memastikan kontinuitas pasokan listrik.
 - c) Sistem dapat diatur paralel sinkron agar peralihan antara PLTS dan PLTD berlangsung mulus tanpa gangguan tegangan.
5. Tantangan Pemeliharaan
 - a) Panel Surya: Rentan tertutup debu, daun, atau kotoran sehingga efisiensi menurun.
 - b) PLTD: Membutuhkan pemeliharaan rutin berupa pergantian oli, filter, dan pengecekan sistem pendingin.
 - c) Sistem Kontrol & Inverter: Sangat sensitif terhadap gangguan tegangan sehingga memerlukan inspeksi berkala.
 - d) Baterai (jika ada): Harus dipantau kapasitas penyimpanan dan keseimbangan sel (*state of charge*).
7. Arah Perkembangan Teknologi
 - a) Hibrida Cerdas (*Smart Hybrid*): Menggunakan sistem kontrol berbasis IoT untuk memantau konsumsi energi secara *real-time*.
 - b) Integrasi Energi Terbarukan Lain: Beberapa sistem mulai menambahkan turbin angin skala kecil atau biomassa untuk memperluas bauran energi.
 - c) Efisiensi Emisi: Tren global mendorong PLTH untuk lebih menekan emisi melalui efisiensi *diesel engine* dan integrasi baterai berteknologi baru.

Refleksi

Jawablah pertanyaan berikut untuk merefleksi hasil belajarmu pada bab ini.

1. Apa hal baru yang kamu pelajari hari ini tentang pengoperasian dan pemeliharaan PLTH (Surya-Diesel)?
2. Bagian mana yang menurut kamu paling menantang? Mengapa hal tersebut sulit untuk kamu pahami atau praktikkan?
3. Bagaimana pengetahuan hari ini dapat kamu terapkan jika kamu bertugas di lapangan sebagai teknisi PLTH?
4. Jika kamu diberi tanggung jawab sebagai operator utama PLTH di desa terpencil, apa tiga hal terpenting yang harus selalu kamu periksa dan catat setiap hari?
5. Apa satu tindakan atau kebiasaan yang akan kamu ubah agar dapat menjadi operator energi terbarukan yang lebih profesional dan bertanggung jawab?





Glosarium

AC (<i>Alternating Current</i>)	arus listrik bolak-balik yang digunakan oleh sebagian besar peralatan rumah tangga dan industri.
<i>charging voltage</i>	tegangan yang diberikan oleh sistem pengisian untuk mengisi baterai hingga mencapai kapasitas penuhnya.
<i>circuit breaker</i>	perangkat pengaman listrik yang secara otomatis memutus aliran arus listrik ketika terjadi gangguan, seperti: korsleting (hubungan pendek), arus lebih (<i>overcurrent</i>), dan beban lebih (<i>overload</i>).
<i>cut-off voltage</i>	batas tegangan terendah yang diizinkan sebelum baterai harus berhenti digunakan untuk mencegah pengosongan berlebih.
DC (<i>Direct Current</i>)	arus listrik searah yang dihasilkan oleh panel surya sebelum diubah oleh inverter menjadi arus bolak-balik.
<i>float voltage</i>	tegangan pemeliharaan yang digunakan untuk menjaga baterai tetap penuh tanpa menyebabkan <i>overcharge</i> .
<i>flowmeter</i>	alat untuk mengukur debit air yang mengalir dalam sistem.
<i>forebay</i>	bak penenang
<i>fuse</i>	sekering
<i>grounding</i>	sistem pembumian untuk melindungi dari sengatan listrik akibat kebocoran arus.
hibrida	sistem yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi
IEC	International Electrotechnical Commission, Lembaga internasional yang menetapkan standar global di bidang kelistrikan, elektronik, dan teknologi energi, termasuk standar keamanan dan kualitas pada sistem PLTS.
inspeksi visual	pemeriksaan awal menggunakan penglihatan langsung untuk mendeteksi kondisi fisik komponen.
<i>intake</i>	saluran penyalur air dari sungai menuju sistem PLTMH.
kalibrasi	proses penyesuaian atau pengaturan ulang alat ukur agar hasil pengukuran tetap akurat.





kinerja sistem	tingkat kemampuan sistem PLTS dalam menghasilkan dan menyuplai energi secara optimal.
konektivitas	kondisi sambungan antar komponen sistem, seperti koneksi kabel atau komunikasi antar alat digital.
logbook pemeliharaan	catatan teknis harian atau berkala yang merekam aktivitas, hasil pemeriksaan, dan tindakan perbaikan sistem.
MCB/MCCB	<i>Miniature/Molded Case Circuit Breaker</i> —alat pemutus arus otomatis untuk proteksi.
<i>Net Present Value</i> (NPV)	selisih antara investasi sekarang dan nilai sekarang (<i>present value</i>) dari proyeksi hasil-hasil bersih masa datang yang diharapkan.
<i>overcharge</i>	kondisi ketika baterai terisi melebihi kapasitas maksimumnya sehingga dapat menyebabkan penurunan umur atau kerusakan baterai.
<i>overheating</i>	kondisi di mana suhu komponen (seperti inverter atau baterai) meningkat berlebih dan dapat memicu kerusakan.
<i>penstock</i>	pipa pesat
<i>pre-commissioning check</i>	proses pemeriksaan dan pengujian menyeluruh sebelum sistem dioperasikan secara resmi untuk memastikan semua komponen bekerja dengan baik.
<i>preventif</i> (perawatan)	tindakan pemeliharaan yang dilakukan untuk mencegah kerusakan sebelum terjadi.
RPM	<i>Revolutions per Minutes</i>
<i>Single Line Diagram</i> (SLD)	diagram satu garis yang menggambarkan hubungan antar komponen dalam sistem kelistrikan secara sederhana dan menyeluruh.
SCADA	sistem <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> yang digunakan untuk memantau dan mengendalikan operasional turbin angin secara <i>real-time</i> .





wind rose diagram

diagram berbentuk lingkaran yang menggambarkan frekuensi dan arah angin yang bertiup di suatu lokasi dalam periode waktu tertentu.



Daftar Pustaka

- Australian Renewable Energy Agency (ARENA). *Solar/Diesel Mini-Grid Handbook*. 2016.
- Bhattacharya, S., D. Lombardi, A. Prabhakaran, H. K. Mistry, S. Biswal, M. Aleem, S. Amani, G. Prakhya, S. Jindal, J. Macabuag, dan Z. Qiu. "Risks and Vulnerabilities in the Design, Construction, and Operation of Offshore Wind Turbine Farms in Seismic Areas." *Springer Tracts in Civil Engineering*, 1–27. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3330-1_1.
- Bihari, Shiv Prakash, Pradip Kumar Sadhu, et al. "A Comprehensive Review of Microgrid Control Mechanism and Impact Assessment for Hybrid Renewable Energy Integration." *IEEE Access*, 2021.
- Demonstration Project MENTARI, BUM Desa Hali Dewa. Standard Operasional Procedure. Hali Dewa, Indonesia: Program MENTARI, 2023.
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Kementerian ESDM. *Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*. Jakarta: Ditjen EBTKE Kementerian ESDM, 2017.
- Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTMH*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, 2020.
- Envanto.Labs. PLTMH. <https://labs.envato.com/image-gen/584ab32e-cb6c-408d-8642-8dceed62cc20>, 2024.
- Envanto.Labs. PLTMH. <https://labs.envato.com/image-gen>, 2024.
- Fisher, G. *Aplikasi dan Karakteristik Turbin*. Bandung: Entec, 2007.
- GIZ dan Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian ESDM. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta: GIZ dan Ditjen EBTKE, 2018.
- Gmc, C., dan Tuv. *Wind Turbine Generator WTD Series Instruction Manual*, n.d.
- Haning, Dedy, Amelia Buddhiman, dan Yentri Seran. *Standard Operasional Procedure Pengoperasian dan Perawatan Sistem PLTS Off-Grid 95 kWp*. Hali Dewa: Program MENTARI, 2023.





- IEA-PVPS Task 9. *A User Guide to Simple Monitoring and Sustainable Operation of PV–Diesel Hybrid Systems*. 2020.
- Kyoritsu Instrument. *Kyoritsu-4105A-User-Manual*, 2025.
- Manwell, James F., Jon G. McGowan, dan Anthony L. Rogers. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2010.
- Mishnaevsky, L. “Root Causes and Mechanisms of Failure of Wind Turbine Blades: Overview.” *Materials*. MDPI, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15092959>.
- Nashar, Muhammad. “Analisa Kelayakan Bisnis Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) di Indonesia dengan Menggunakan Software RETSCREEN.” *Jurnal Ilmiah Manajemen dan Bisnis* 1(1), 2015.
- Nurrohim, Agus, Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. *Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid sebagai Solusi Kelistrikan di Daerah Terpencil*, 2012.
- Tiwari, Praveen, Munish Manas, et al. “A Review on Microgrid Based on Hybrid Renewable Energy Sources in South-Asian Perspective.” *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 2:10, 2017.
- Troman, Simon, et al. *Design and Installation of Hybrid Power Systems (PV and Fueled Generator)*. Pacific Power Association, 2019.
- United States Patent. *US20060153672A1*, 2006.
- Wang, P., D. Bao, M. Zhao, Z. Shi, F. Gao, dan F. Han. “The Design, Analysis, and Optimization of a New Pitch Mechanism for Small Wind Turbines.” *Energies* 16(18). 2023. <https://doi.org/10.3390/en16186708>.





Daftar Sumber Gambar

- Gambar 1.1 diunduh dari <https://jurnalis.co.id/2023/08/17/tepat-di-hari-kemerdekaan-ke-78-indonesia-pln-operasikan-plts-temajuk/> pada 23 Juni 2025
- Gambar 3.11 Sumber <https://www.garudasystrain.co.id/>
- Gambar 3.12 Sumber <https://ru.pinterest.com/pin/1073545629923236915/>
- Gambar 3.13 Sumber <https://id.slongpower.com/>
- Gambar 4.14 Sumber <https://www.empatpilar.com/pengertian-genset/>





Indeks

A

angin (potensi) 229
arus bolak-balik (AC) 15, 186, 229
arus listrik 5, 7, 79, 120, 137, 149, 151, 204, 223, 229
arus searah (DC) 15, 186, 229

B

baling-baling turbin 107, 229
baterai 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 36, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 56, 57, 59, 110, 111, 117, 119, 125, 133, 134, 141, 142, 144, 145, 146, 152, 154, 156, 157, 159, 163, 166, 171, 176, 178, 183, 187, 190, 192, 193, 195, 199, 200, 204, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 222, 223, 224, 229
beban listrik 50, 97, 98, 166, 187, 192, 217, 221, 229

C

cut-in 107, 171, 229
cut-off voltage 223, 229
cut-out 106, 107, 170

D

daya listrik 15, 78, 88, 91, 106, 149, 152, 155, 156, 159, 229
distribusi listrik 68, 93, 229

E

energi listrik 3, 4, 11, 36, 64, 76, 83, 91, 105, 106, 141, 149, 168, 186, 199, 206, 210, 216, 221, 229

F

Float Charging Voltage 13
fotovoltaik 4, 26, 31, 229

G

gearbox 89, 90, 91, 105, 140, 141, 142, 143, 146, 147, 165, 166, 167, 229
grounding 8, 17, 31, 34, 67, 68, 93, 94, 95, 117, 118, 120, 127, 177, 204, 207, 208, 214, 221, 223, 229

H

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) 170

I

IEC 4, 20, 26, 31, 83, 102, 120, 139, 223, 229
instalasi 4, 9, 20, 26, 27, 31, 32, 45, 95, 106, 117, 126, 134, 147, 153, 154, 171, 229
inverter vii, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 117, 133, 134, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 150, 154, 165, 170, 171, 176, 178, 181, 186, 187, 188, 189, 193, 209, 210, 211, 212, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 223, 224, 229





isolasi 6, 46, 68, 83, 92, 93, 94, 118, 141, 177, 204, 207, 214, 229

K

keselamatan kerja 5, 6, 10, 20, 25, 31, 35, 69, 74, 86, 88, 90, 91, 93, 95, 105, 120, 124, 126, 127, 132, 162, 186, 192, 195, 209, 215, 229

konversi energi 36, 81, 88, 90, 105, 141, 164, 168, 229

L

Low Voltage Disconnect 14, 229

M

MCB vii, viii, 9, 10, 17, 20, 21, 22, 24, 33, 66, 93, 94, 119, 133, 134, 142, 144, 146, 178, 207, 214, 224, 229

modul surya 8, 10, 11, 12, 19, 21, 24, 31, 32, 36, 44, 50, 53, 54, 55, 57, 58, 186, 220, 229

monitoring sistem 106, 229

P

pemantauan 4, 26, 28, 29, 31, 34, 45, 53, 54, 84, 96, 105, 167, 186, 190, 192, 229

pemeliharaan 2, 3, 5, 12, 13, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 62, 63, 69, 70,

77, 78, 81, 83, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 95, 100, 101, 102, 105, 106, 124, 160, 171, 174, 175, 190, 192, 193, 194, 196, 202, 203, 204, 208, 209, 214, 215, 220, 222, 223, 224, 229

Pengoperasian v, vi, vii, viii, ix, xi, xii, 2, 3, 4, 6, 19, 26, 27, 28, 29, 62, 64, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 80, 81, 84, 104, 105, 106, 115, 124, 125, 127, 129, 133, 168, 174, 176, 179, 181, 185, 186, 187, 190, 191, 221, 226

perawatan rutin 158, 159, 170, 195, 229

Performance Ratio (PR) 53, 54, 57, 190, 229

S

sel surya 36, 229

sistem furling 114, 115, 116, 145, 147, 148

SNI 4, 26, 31, 83, 120, 126, 229

T

transformasi energi 105, 229

turbin angin iv, 105, 106, 109, 111, 126, 129, 134, 139, 141, 148, 149, 151, 155, 159, 162, 167, 169, 222, 224, 229



Penulis

Amin Wahyono, S.Kom., M.T.



Email : aminwahyono65@guru.smk.belajar.id
Instansi : SMKN I Suruh
Alamat Instansi : Jln. Ngusman Kecamatan Suruh
Kabupaten Trenggalek Jawa Timur 66360

Pekerjaan/Profesi:

1. Guru Mata Pelajaran Teknik Komputer dan Jaringan
2. Wakil Kepala Sekolah Bidang Mutu dan Ketenagaan
3. CEO 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

Bidang Keahlian:

1. Rekayasa Teknik dan Energi Terbarukan
2. Guru Penggerak Sekolah Menengah Kejuruan

Rekam Jejak Karya Tulis:

1. Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin, , Pusat Perbukuan, ISBN 978-634-00-0045-0
2. Pekerjaan Dasar Elektronika Kelas X , 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 978602444746-5
3. Gambar Teknik Listrik Kelas X, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447502
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. Instalasi Motor Listrik Kelas XI, 2020, Penerbit Bumi Aksara, ISBN 9786024447946



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

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)

Bidang Keahlian:

1. Teknik Energi Terbarukan
2. Teknik Elektronika
3. Teknik Ketenagalistrikan

Rekam Jejak Karya Tulis:

1. Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin untuk SMK/MAK Kelas XI, 2024, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Jakarta, ISBN 9786340000450
2. Panduan Guru Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin untuk SMK/MAK Kelas XI, 2024, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Jakarta, ISBN 9786340002003



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

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

Rekam Jejak Karya Tulis:

1. Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin untuk SMK/MAK Kelas XI, 2024, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Jakarta, ISBN 9786340000450
2. Panduan Guru Teknik Energi Surya, Hidro, dan Angin untuk SMK/MAK Kelas XI, 2024, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Jakarta, ISBN 9786340002003



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

Pekerjaan/Profesi:

2014 - sekarang : Dosen di Universitas Pendidikan Indonesia

Pendidikan Terakhir:

1. S3 : Teknik Fisika - Institut Teknologi Bandung
2. S2 : Teknik Fisika - Institut Teknologi Bandung
3. S1 : Pendidikan Fisika - Universitas Pendidikan Indonesia

Judul Buku dan Tahun Terbit:

1. Buku Pendalaman Materi PPG: Partikel Materi, Larutan dan Sifatnya, Senyawa Organik dan Anorganik, Zat Aditif dan Adiktif. Kemdikbud (2022)
2. Teori dan Implementasi Case Method dan Team Based Project di Perguruan Tinggi. UPI Press (2023)
3. STEM-ESD paad Pembelajaran IPA, Yogyakarta : Pustaka Egaliter (2024)
4. Belajar Sel Surya melalui STEM-Design Thinking, Yogyakarta: Pustaka Egaliter (2024)

Informasi Lainnya:

1. Standarisasi Fabrikasi Modul Sel Surya Lapisan Tipis Non-Silikon (Dye-Sensitized, Kesterite) Berbasis Material Lokal untuk Mencapai Standar Efisiensi Komersil, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (2024)
2. Pengembangan Material Energi Terbarukan Cu_2ZnSsS_4 Memanfaatkan Potensi Material Lokal untuk Aplikasi Sel Surya Lapisan Tipis, Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, (2020-2022)



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 Sekarang, Semarang - 50229

Pekerjaan/Profesi:

1. Koordinator Program Studi Teknik Elektro UNNES (2023)
2. Sekretaris Jurusan Teknik Elektro UNNED (2015)

Pendidikan Terakhir:

1. Magister Teknik Elektri IPB
2. Sarjana Teknik Elektro UNDIP

Bidang Keahlian:

Teknik Elektro

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 : 39YCFFYAAAAJ



Editor

Dr. Christina Tulalessy



Email : nonatula6@gmail.com

Pekerjaan/Profesi:

1. Praktisi Pendidikan dan Perbukuan

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

Bidang Keahlian:

1. Penulisan BTP
2. Pembelajaran dan Penilaian SD–SMA/K
3. Editor

Judul Buku dan Tahun Terbit:

Penelitian Tindakan Kelas: Apa, Mengapa, Bagaimana: 2020

Informasi Lainnya:

Asesor Kompetensi Penulis dan Penyunting





Editor

Ina Maria Muhammadiyah



Email : inamariamuhammadiyah@gmail.com
Instansi : Pusat Perbukuan, Kementerian
Pendidikan Dasar dan Menengah

Pekerjaan/Profesi:

1. Editor Buku di Pusat Perbukuan (2025 – sekarang)
2. Pengajar di TK IT Al – Zain (2021 – 2025)

Pendidikan Terakhir:

S1 Pendidikan Islam Anak Usia Dini, Universitas KH. Abdul Chalim - 2021



Editor Visual

Sonson Nurusholih, S.Sn., M.Sn



Blog : artsons.wordpress.com
Email : sonson@telkomuniversity.ac.id
artson_mail@yahoo.co.id

Pekerjaan/Profesi:

1. 2011 - sekarang Dosen Tetap Fakultas Industri Kreatif - Telkom University Bandung
2. 2017 - *Owner* IdeSoca Creative Design Studio
3. 2007 - sekarang Creativepreneur - *Freelance Photography*
4. 2005 - 2007 *Sr Art Director* - Blue Circle Adv
5. 2003 - 2005 *Sr Art Director* - Grey World Wide
6. 2001 - 2003 *Art Director* - Dentsu Indonesia

Pendidikan Terakhir:

1. 2022 S3 - Studi di Fakultas Ilmu Budaya Universitas Padjajaran (Unpad Bandung)
2. 2016 S2 - Institut Seni Budaya Indonesia (ISBI) Bandung
3. Bidang Kajian Seni 2000 S1 STISI Telkom (Sekolah Tinggi Seni Rupa & Desain Indonesia Telkom Bandung) – Prog Studi Desain Komunikasi Visual [DKV]

Bidang Keahlian:

1. *Photografer*
2. *Desain*

Rekam Jejak Karya Tulis:

1. Merencanakan Sendiri Jalan-jalan Keliling Dunia (2005)
2. *Travel City* Destinasi Bangkok, Penang & Saigon (2009)
3. Panduan Hemat Keliling Australia (2011)
4. *Travel City* : Review 30 Destinasi Asia Tenggara (2013)



Illustrator

Marsha Krisandari



Email : Marshakrisandari146@gmail.com
Instansi : *Visual Designer and Illustrator*

Pekerjaan/Profesi:

1. *Freelance Illustrator*
2. *Freelance Designer*

Pendidikan Terakhir:

S1 : Fakultas Seni Rupa jurusan Desain Komunikasi Visual, Institut Kesenian Jakarta, 2020.

Bidang Keahlian:

1. Desain Grafis
2. Ilustrasi
3. Komik
4. Karakter

Rekam Jejak:

1. Ilustrasi terbitan Gramedia : Novel Grafis Hujan Bulan Juni, ilustrasi cover buku 7 Seri Petualangan Enid Blyton, dan membuat aset ilustrasi buku edukasi islam untuk anak.
2. Desain buku dan media : Desainer buku Mengenal Tubuh Manusia, membuat buku, poster, dsb berbentuk digital untuk media edukasi *e-learning* di PT. Verticalabs, dan mengerjakan *project* desain lepasan dari berbagai kalangan *Customer*.
3. Pembelajaran Interaktif : Menyediakan aset ilustrasi dan mendesain tata letak elemen untuk media pembelajaran interaktif berupa game di PT. Verticalabs.
4. Desain karakter : Maskot *Learning Management Division* PT. BTN, karakter fiksi di Polaris Studio, dan mengerjakan *project* ilustrasi lepasan dari berbagai kalangan *Customer*.



Desain Grafis

Wella Nangin

Email : wellanangin23@gmail.com

Pekerjaan/Profesi:

1. Desainer Pustaka Obor Indonesia
2. *Project Manager* Rumah Uis
3. *Project Manager* Festival Film Bulanan 2024

Pendidikan Terakhir:

1. S1 : Ilmu Komunikasi Universitas Medan Area
2. D3 : Desain Grafis Politeknik Negeri Media Kreatif

Bidang Keahlian:

1. Desain Grafis
2. *Project Manager*



Catatan

Handwriting practice lines consisting of 15 horizontal wavy lines.



Catatan

Handwriting practice lines consisting of 15 horizontal wavy lines.

