



LANGKAH HIJAU DARI **JANTUNG PLTU**

Erwan Yulianto | Haman Suhaily | Suriyan Arif W. | Fajar Dwi Saksana
Puspita Rukmi | M. Yusuf | Totok Widiyanto | Najmi Umaroh | Yuda Anggi P
Firmandhana Khrisna | Dimas Sistian A. | Donny Effendi
Erfin Budianto | Aris Dwi Wicaksono | Reska Pragusta
Galih Nurchary Adhji | Dini Pertiwi | Fian Shalihin | M. Lubab
Nurlaily Lavianti | Nina Ari W

Langkah Hijau

dari Jantung PLTU

UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Langkah Hijau dari Jantung PLTU

Erwan Yulianto | Haman Suhaily | Suriyan Arif W. | Fajar Dwi Saksana
Puspita Rukmi | M. Yusuf | Totok Widiyanto | Najmi Umaroh
Yuda Anggi P | Firmandhana Khrisna | Dimas Sistian A. | Donny Effendi
Erfin Budianto | Aris Dwi Wicaksono | Reska Pragusta
Galih Nurchary Adhji | Dini Pertiwi | Fian Shalihin | M. Lubab
Nurlaily Lavianti | Nina Ari W

LANGKAH HIJAU DARI JANTUNG PLTU

Penulis : Erwan Yulianto
Haman Suhaily
Suriyan Arif W.
Fajar Dwi Saksana
Puspita Rukmi dan 15 penulis lainnya
Editor : Annisa Nur Hidayah
Desain Cover : Ali Hasan Zein
Tata Letak : Joko
Proofreader : M. Royfan A.

Ukuran:
xiv, 154 hlm., Uk.: 15.5x23 cm

ISBN:
978-634-01-3106-2

Cetakan Pertama:
Juli 2026

Hak Cipta 2026 pada Penulis

PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)
Jl. Rajawali, Gg. Elang 6, No. 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman
Jl. Kaliurang Km. 9,3 – Yogyakarta 55581
Telp./Faks : (0274) 4533427
Website : www.penerbitdeepublish.com
www.deepublishstore.com
E-mail : cs@deepublish.co.id

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

Isi di luar tanggung jawab percetakan.

KATA PENGANTAR PENERBIT

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, buku ***Langkah Hijau dari Jantung PLTU*** dapat terwujud dan hadir di tengah-tengah masyarakat. Sebagai penerbit yang berkomitmen untuk mencerdaskan, membahagiakan, dan memuliakan umat manusia, kami merasa terhormat dapat berkontribusi dalam penyebaran ilmu pengetahuan dan pendidikan melalui penerbitan karya ini.

Buku ini adalah sebuah perjalanan transformatif yang menunjukkan bagaimana kebiasaan ramah lingkungan dapat diintegrasikan ke dalam operasional sehari-hari. Mulai dari inovasi sederhana dalam menghemat energi dan membersihkan air limbah hingga bisa dipakai kembali, hingga solusi kreatif untuk mengurangi timbunan sampah, termasuk cara mengolah popok bekas agar tidak mencemari alam. Pelajari inspirasi tentang berbagi makanan berlebih, memanfaatkan kayu bekas, dan kisah mengharukan tentang menghidupkan kembali tanaman serta hewan di lahan yang lama mati. Buku ini adalah bukti nyata bahwa *zero waste* dan kepedulian sosial bukan hanya slogan, tetapi peta jalan praktis yang menghasilkan manfaat nyata bagi alam dan sesama.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis, Sidik Purnomo, yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Kami berharap karya ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam perkembangan keilmuan di Indonesia. Semoga buku ini tidak hanya menjadi sumber informasi yang berharga, tetapi juga menginspirasi pembacanya untuk terus berkembang dan berkontribusi dalam membangun bangsa yang lebih baik.

Hormat Kami,

Penerbit Deepublish

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga berbagai upaya berorientasi keberlanjutan dapat diwujudkan dengan baik. Buku ini disusun sebagai dorongan untuk memperkuat komitmen terhadap pengelolaan lingkungan, pemberdayaan masyarakat, serta peningkatan efisiensi sumber daya secara menyeluruh.

Berbagai inisiatif yang dibahas tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga merangkum dimensi sosial, ekonomi, dan ekologis. Melalui pendekatan yang terintegrasi, setiap langkah diarahkan untuk memberikan manfaat nyata bagi lingkungan sekitar sekaligus mendukung peningkatan kesejahteraan masyarakat. Transformasi yang ditampilkan menunjukkan bahwa keterbatasan dapat menjadi peluang untuk melahirkan gagasan dan solusi yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan.

Pembahasan dalam buku ini juga menekankan pentingnya kolaborasi lintas pemangku kepentingan—termasuk komunitas, kalangan pendidikan, dan berbagai unsur masyarakat. Sinergi tersebut memungkinkan tercapainya perubahan positif berupa pengurangan limbah, peningkatan efisiensi energi dan air, perbaikan kualitas udara, serta lahirnya nilai tambah yang mendukung keberlanjutan. Keterlibatan aktif masyarakat dalam setiap proses turut memperkuat budaya keberlanjutan yang diharapkan terus berkembang di masa mendatang.

Harapannya, buku ini dapat menjadi inspirasi bagi siapa pun untuk terus mengembangkan langkah-langkah nyata dalam menjaga keseimbangan alam dan meningkatkan kualitas hidup bersama. Semoga upaya keberlanjutan yang dipaparkan dapat menjadi fondasi kuat bagi terwujudnya masa depan yang lebih hijau, inklusif, dan berdaya saing.

Probolinggo, November 2025

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT	v
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 KERANGKA KEBERLANJUTAN OPERASIONAL PLTU.....	1
A. Makna Keberlanjutan Operasional di PLTU.....	1
B. Empat Pilar Keberlanjutan: Energi, Air, Limbah, dan Keanekaragaman Hayati.....	4
C. Transisi Energi dan <i>Circular Economy</i> dalam Operasi Pembangkit.....	6
BAB 2 ENERGI TANPA PEMBOROSAN	10
A. Mengapa PLTU Harus Berubah?.....	10
B. Membersihkan <i>Boiler</i> dengan Cara Lebih Hemat Energi.....	12
C. I-Bost: Inovasi Kecil, Penghematan Besar	18
BAB 3 HEMAT ENERGI DI JANTUNG PLTU.....	23
A. Menjawab Tantangan Transisi Energi Indonesia.....	23
B. Mendorong Operasi yang Lebih Efisien dan Rendah Emisi	37
BAB 4 TRANSFORMASI HIJAU DALAM PEMURNIAN AIR	48
A. Regenerasi Resin: Tantangan dan Perubahannya	48
B. Menuju Operasi yang Lebih Bersih dan Efisien	53
C. Langkah Kecil yang Mengubah Pengolahan Air.....	56
D. Dari <i>Hydrogen Cycle</i> ke <i>Ammonia Cycle</i>	60
E. Transformasi Bersih di <i>Condensate Polisher</i>	63
BAB 5 RAHASIA DI BALIK TIMBUNAN <i>SLUDGE</i>.....	68
A. Dari Mana <i>Sludge</i> Berasal?.....	68

	B. Solusi Cerdas untuk Mengurangi <i>Sludge</i>	72
BAB 6	MEMBANGUN DENGAN SISA	76
	A. Dari Limbah Menjadi <i>Paving Block</i>	76
	B. Mengubah Masalah Lingkungan Menjadi Peluang Baru.....	82
BAB 7	MENGURANGI LIMBAH PANGAN (<i>FOOD WASTE</i>) DI PERUSAHAAN	86
	A. Manajemen Donasi Pangan (<i>Food Donation Management</i>) di Dunia Industri	86
	B. Dari Pemborosan ke Kepedulian	90
BAB 8	KAYU, POPOK, DAN PELUANG BARU BAGI MASYARAKAT	96
	A. Energi Terbarukan dari Kayu Bekas	96
BAB 9	Mengubah Popok Menjadi Solusi Pertanian	103
	A. Solusi Ramah Lingkungan dari Limbah Popok	103
	B. Transformasi Pengelolaan Limbah Popok di Tingkat Desa	104
BAB 10	BANGKITNYA FLORA DAN FAUNA DARI LAHAN TERABAIKAN	107
	A. Tantangan Konservasi di Tengah Krisis Iklim	107
	B. Kehidupan Baru: Meningkatnya Keanekaragaman Hayati.....	116
BAB 11	KOLABORASI UNTUK OPERASI YANG BERKELANJUTAN	124
	A. Peta Pemangku Kepentingan dan Perannya dalam Empat Pilar Keberlanjutan	124
	B. Mekanisme Kolaborasi dan Tata Kelola Operasional	128
	C. Dampak Sosial dan Nilai Tambah Kolaborasi.....	131
	DAFTAR PUSTAKA	136
	LAMPIRAN.....	150

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Operator Mengoperasikan Panel.....	12
Gambar 2. Bagian Logam yang Mulai Rusak.....	12
Gambar 3. Tahapan Pengembangan Sebuah Sistem.....	14
Gambar 4. Tampilan Perhitungan di Komputer.....	14
Gambar 5. Tampilan Saat Sistem Masuk ke Layar Kontrol	15
Gambar 6. Pergeseran Cara Kerja Menuju Sistem Otomatis.....	16
Gambar 7. Panel Kontrol di Ruang Operasi	17
Gambar 8. Perawatan Motor Sebelum Perbaikan.....	26
Gambar 9. Contoh Label pada Motor	27
Gambar 10. Letak Peralatan di Area Pembangkit.....	28
Gambar 11. Pengaturan Peralatan di Pembangkit	28
Gambar 12. Gerakan Penutup Udara Mengikuti Kebutuhan Beban	29
Gambar 13. Perubahan Kebutuhan Energi Saat Buka dan Udara Berubah.....	30
Gambar 14. Performa Peralatan pada Berbagai Kondisi	30
Gambar 15. Perbaikan Bagian Dalam Motor	33
Gambar 16. Pemeriksaan Bagian Motor.....	34
Gambar 17. Perawatan Bagian yang Berputar	34
Gambar 18. Perbandingan Pemakaian Energi Sebelum dan Sesudah Perbaikan.....	35
Gambar 19. Perubahan Pemakaian Energi Seiring Waktu.....	36
Gambar 20. Perubahan Kondisi Udara Sebelum dan Sesudah Perbaikan	37
Gambar 21. Perubahan Kualitas Udara di Dalam Boiler	45
Gambar 22. Alur Air dan Uap di Pembangkit.....	49
Gambar 23. Proses Penyaringan Air	50
Gambar 24. Cara Kerja Pembersihan Air Menggunakan Amonia.....	55
Gambar 25. Perubahan Cara Kerja Sistem Penyaringan Air	60
Gambar 26. Tempat Pembuatan Larutan	69
Gambar 27. Kondisi Fasilitas Sebelum Diperbaiki.....	71

Gambar 28. Kondisi Fasilitas Setelah Diperbaiki	71
Gambar 29. Area Tangki Sebelum Perbaikan.....	72
Gambar 30. Area Tangki Setelah Perbaikan.....	72
Gambar 31. Contoh Paving dari Bahan Sisa	79
Gambar 32 Masalah Pengelolaan Limbah Sebelum Perbaikan.....	80
Gambar 33. Perubahan Cara Mengelola Limbah	80
Gambar 34. Kondisi Limbah Sebelum Ditata Ulang	80
Gambar 35. Proses Pembuatan Paving	81
Gambar 36. Pemasangan Paving untuk Jalan	81
Gambar 37. Kerja Sama Pemerintah dan Perusahaan.....	82
Gambar 38. Dokumen Perjanjian dengan Pihak Luar	88
Gambar 39. Proses Pengemasan dan Pengiriman Berkatan.....	89
Gambar 40. Pembagian Berkatan kepada Masyarakat.....	89
Gambar 41. Perubahan Cara Mengelola Makanan.....	90
Gambar 42. Proses Pengolahan Serbuk Kayu	98
Gambar 43. Pengolahan Sampah Kayu Setelah Perbaikan	99
Gambar 44. Alur Pengelolaan Limbah Plastik dan Organik.....	104
Gambar 45. Perubahan Area Taman.....	111
Gambar 46. Perbaikan Tata Kelola Area Taman	112
Gambar 47. Keanekaragaman Tanaman di Area Taman	113
Gambar 48. Denah Area Tanaman Langka.....	113
Gambar 49. Denah Area Tanaman Buah dan Tanaman Hias	114
Gambar 50. Denah Area Tanaman Obat dan Hutan Campuran	115

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Perubahan Pemakaian dari Tahun ke Tahun	20
Tabel 2.	Total Penghematan Energi Motor FD Fan.....	20
Tabel 3.	Kebutuhan Energi Motor FD Fan per Posisi Damper (Sebelum).....	31
Tabel 4.	Penggunaan Daya Motor FD Fan di Berbagai Posisi Damper (Sesudah).....	36
Tabel 5.	Penurunan Energi Listrik Motor FD Fan	37
Tabel 6.	Penghematan Energi, Batu Bara, dan Biaya.....	39
Tabel 7.	Pengurangan Emisi dan Nilai Penghematan Tahun 2024	39
Tabel 8.	Pengurangan Emisi dan Dampak Penghematan Tahun 2025	40
Tabel 9.	Konsumsi Energi Motor FD Fan Sesuai Posisi Damper (Sebelum).....	43
Tabel 10.	Pemakaian Energi Listrik Motor FD Fan Berdasarkan Posisi Damper (Sesudah).....	44
Tabel 11.	Rata-Rata dan Penurunan Real Power FD Fan	45
Tabel 12.	Potensi Kerugian Hydrogen Cycle vs Ammonia Cycle.....	51
Tabel 13.	Regenerasi Condensate Polisher per Tahun	52
Tabel 14.	Keuntungan Mode Ammonia Cycle	56
Tabel 15.	Perubahan Kinerja Hydrogen Cycle dan Ammonia Cycle	57
Tabel 16.	Cara Kerja Resin di Condensate Polisher	61
Tabel 17.	Perbedaan Kerja AC dan HC.....	62
Tabel 18.	Jumlah Regenerasi dan Konsumsi Demin Water Tahunan	63
Tabel 21.	Perubahan Jumlah Limbah dan Kotoran Air	64
Tabel 22.	Penggunaan Air dan Penghematan Biayanya	65
Tabel 23.	Biaya Produksi Jenis Air.....	65

Tabel 24.	Penurunan Beban Pencemar dan Dampak Operasional Tahunan	65
Tabel 25.	Kualitas Air dan Perkiraan Biaya Pengolahan.....	66
Tabel 26.	Pengurangan Timbunan Sludge dan Dampak Ekonominya	74
Tabel 27.	Kualitas dan Kekuatan Paving block	78
Tabel 28.	Kemampuan Paving Menyerap Air.....	79
Tabel 29.	Produksi Paving dan Luas Pemasangan.....	83
Tabel 30.	Penggunaan Fly Ash per Tahun	83
Tabel 31.	Pemakaian Bottom Ash per Tahun.....	83
Tabel 32.	Penggunaan Paving dan Penghematannya	84
Tabel 34.	Pengurangan Sampah Makanan dan Keuntungannya	93
Tabel 35.	Jumlah yang Diolah dan Penghematan	101
Tabel 36.	Jumlah Limbah Popok yang Diolah per Tahun	106
Tabel 37.	Perkembangan Keanekaragaman Flora	117
Tabel 38.	Perubahan Burung yang Terlihat Setiap Tahun.....	118
Tabel 39.	Perubahan pada Layanan, Kegiatan, dan Perilaku	123

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Pemantauan Cuaca dan Lingkungan.....	150
Lampiran 2	Bukti Legal Hak Cipta	152
Lampiran 3	Aksi Hijau Bersama Masyarakat	153

BAB 1

KERANGKA KEBERLANJUTAN OPERASIONAL PLTU

A. Makna Keberlanjutan Operasional di PLTU

Keberlanjutan operasional di sektor pembangkit, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), bukan sekadar slogan hijau atau jargon pemasaran, melainkan sebuah paradigma pengelolaan yang menuntut keseimbangan antara efisiensi teknis, kepatuhan lingkungan, dan kesehatan ekosistem sosial di sekitar pembangkit. Dalam praktiknya, keberlanjutan operasional menuntut pengelolaan yang berbasis data, terukur, dan berorientasi pada perbaikan berkelanjutan, bukan sekadar mengikuti kebiasaan atau asumsi operator.

Efisiensi teknis menjadi fondasi utama keberlanjutan operasional. Dalam konteks PLTU, efisiensi ini tercermin pada indikator seperti *hate rate* dan efisiensi *boiler*. *Hate rate* yang rendah menandakan penggunaan energi yang lebih efisien untuk menghasilkan listrik, sehingga konsumsi bahan bakar dan emisi yang dihasilkan dapat ditekan. Studi komprehensif pada pembangkit termal di Italia menunjukkan bahwa pembangkit berbasis gas alam memiliki efisiensi energi bersih lebih tinggi (46,7%) dibandingkan pembangkit berbasis batu bara (32,1%), sekaligus menghasilkan emisi NOx yang jauh lebih rendah (Castelluccio *et al.*, 2025). Optimalisasi proses, seperti pengaturan tekanan dan temperatur, serta

modernisasi komponen kritis seperti *boiler*, terbukti mampu meningkatkan efisiensi hingga 6% pada berbagai konfigurasi pembangkit (Elwardany *et al.*, 2024). Bahkan, perubahan kecil yang presisi pada titik operasi kritis—misalnya pengaturan *sootblower*, efisiensi FD fan, atau siklus regenerasi resin—dapat memberikan dampak kumulatif signifikan terhadap konsumsi energi dan beban lingkungan (Eslick *et al.*, 2022; Elwardany *et al.*, 2024).

Kepatuhan lingkungan merupakan pilar kedua yang tak terpisahkan. Keberlanjutan operasional diukur melalui konsumsi air (*demin*, *cooling*, regenerasi) dan produksi limbah (FABA, *sludge*, emisi udara). Studi di China menegaskan pentingnya pendekatan terintegrasi Water-Energy-Emission Nexus (WEEN), di mana kinerja pembangkit dinilai berdasarkan konsumsi air untuk pendinginan dan pengendalian polutan, konsumsi energi, serta efektivitas pengurangan emisi (Wang *et al.*, 2020). Peningkatan kinerja WEEN dari tahun ke tahun menunjukkan bahwa kebijakan dan teknologi yang tepat dapat menurunkan emisi tanpa meningkatkan konsumsi air atau energi secara signifikan. Selain itu, pengelolaan limbah padat seperti FABA dan *sludge* harus dilakukan dengan prinsip *circular economy*, misalnya melalui pemanfaatan ulang atau daur ulang, untuk meminimalkan dampak lingkungan jangka panjang (Asif *et al.*, 2022).

Dimensi ketiga adalah kesehatan ekosistem sosial di sekitar pembangkit. Keberlanjutan operasional tidak hanya soal teknis dan lingkungan, tetapi juga menyangkut tanggung jawab sosial. Studi literatur menegaskan bahwa *triple bottom line*—ekonomi, lingkungan, dan sosial—harus menjadi kerangka evaluasi utama (Amaral *et al.*, 2020). Pengurangan emisi CO₂ dan SO₂, misalnya, terbukti menurunkan tingkat morbiditas masyarakat sekitar, sehingga inovasi teknologi yang menekan emisi tidak hanya berdampak ekologis, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup (Miśkiewicz, 2020). Keterlibatan masyarakat, transparansi data lingkungan, dan program tanggung jawab sosial perusahaan menjadi bagian integral dari keberlanjutan operasional.

Ukuran keberlanjutan di PLTU sangat terkait dengan tiga indikator inti: konsumsi energi, konsumsi air, dan produksi limbah. Pengurangan

input (bahan baku, energi, air) dan *output* negatif (emisi, limbah, penurunan kualitas lingkungan) menjadi fokus utama. Pendekatan berbasis data sangat krusial; penggunaan *predictive modeling* dan analisis energi memungkinkan identifikasi titik-titik kritis yang dapat dioptimalkan untuk menurunkan *hate rate*, mengurangi konsumsi air, dan meminimalkan limbah (Eslick *et al.*, 2022; Hossain *et al.*, 2020). Data historis operasi, pemantauan emisi *real-time*, serta audit energi dan air secara berkala menjadi alat utama untuk memastikan bahwa setiap perubahan operasional benar-benar berdampak pada peningkatan keberlanjutan.

Penting untuk ditekankan bahwa keberlanjutan operasional bukan berarti menunggu pembangkit beralih sepenuhnya ke energi terbarukan. Justru, optimalisasi proses *eksisting* melalui inovasi teknologi, perbaikan SOP, dan penerapan Best Available Technique (BAT) dapat memberikan kontribusi besar dalam menurunkan beban lingkungan dan meningkatkan efisiensi (Ramly *et al.*, 2025; Elwardany *et al.*, 2024). Studi di Malaysia menunjukkan bahwa verifikasi SOP dan penerapan BAT sangat berpengaruh terhadap efisiensi pembangkit dan pengendalian polusi udara, dengan korelasi kuat antara praktik manajemen terbaik, efisiensi teknologi, dan pengurangan emisi (Ramly *et al.*, 2025). Hal ini menegaskan bahwa perubahan kecil yang presisi, berbasis data, dan terukur di titik-titik operasi kritis jauh lebih efektif daripada perubahan besar yang belum tentu *feasible* secara teknis maupun ekonomi.

Akhirnya, keberlanjutan operasional di sektor pembangkit adalah proses dinamis yang menuntut integrasi antara teknologi, manajemen, dan kebijakan. Setiap keputusan operasional harus didasarkan pada data, bukan asumsi atau kebiasaan lama. Dengan demikian, keberlanjutan operasional menjadi fondasi transisi energi yang adil dan bertanggung jawab, memastikan bahwa kebutuhan energi terpenuhi tanpa mengorbankan lingkungan dan masyarakat sekitar (Kabeyi & Olanrewaju, 2022; Losada-Agudelo & Souyris, 2024).

B. Empat Pilar Keberlanjutan: Energi, Air, Limbah, dan Keanekaragaman Hayati

Dalam ekosistem operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), integrasi pilar energi, air, limbah, dan keanekaragaman hayati menjadi fondasi utama untuk mencapai keberlanjutan. Energi menempati posisi sentral, karena efisiensi energi secara langsung menentukan konsumsi batu bara, besaran emisi, dan volume limbah padat seperti *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA). Setiap inovasi yang meningkatkan efisiensi energi, seperti optimalisasi proses pembakaran, pemanfaatan panas buang, atau *co-firing* biomassa, akan menurunkan konsumsi batu bara dan secara otomatis mengurangi emisi gas rumah kaca serta volume FABA yang dihasilkan (Bhoi & Sarkar, 2025; Abidin & Chaerul, 2025; Yang *et al.*, 2022; Yue *et al.*, 2021; Ramly *et al.*, 2025). Studi terbaru menunjukkan bahwa penerapan *co-firing* biomassa hingga 20% dapat menurunkan produksi FABA hingga hampir 28%, sekaligus menurunkan emisi CO₂ dan SO₂ secara signifikan (Bhoi & Sarkar, 2025; Abidin & Chaerul, 2025). Selain itu, modernisasi sistem pembakaran dan pemanfaatan panas buang mampu meningkatkan efisiensi termal dan menurunkan konsumsi batu bara per satuan energi listrik yang dihasilkan (Yang *et al.*, 2022; Ramly *et al.*, 2025).

Air berperan sebagai medium vital dalam siklus operasional PLTU, mulai dari pendinginan, pembangkitan uap, hingga pemurnian. Ketidakefisienan dalam penggunaan air, seperti kebocoran, *overcooling*, atau pengelolaan air limbah yang kurang optimal, akan meningkatkan volume limbah cair (*sludge, wastewater*) dan membebani sistem pengolahan air limbah (WWTP) (Tsalas *et al.*, 2024; Liao *et al.*, 2025; Skoczko, 2025; Guo *et al.*, 2022; Chi & McCracken, 2024). Implementasi teknologi pengolahan air yang efisien, seperti *Zero Liquid Discharge* (ZLD) dan pemanfaatan air daur ulang dari WWTP, terbukti mampu menurunkan konsumsi air segar hingga 62% dan mengurangi beban limbah cair secara signifikan (Liao *et al.*, 2025; Guo *et al.*, 2022). Penggunaan sistem pendingin yang lebih efisien dan integrasi pemanfaatan air limbah domestik untuk kebutuhan PLTU juga memberikan dampak positif dalam menekan kebutuhan air baru dan

menurunkan risiko pencemaran (Guo *et al.*, 2022; Chi & McCracken, 2024).

Limbah, baik padat maupun cair, merupakan konsekuensi langsung dari konsumsi energi dan air. Volume FABA sangat dipengaruhi oleh jumlah batu bara yang dibakar, sedangkan *sludge* dan limbah cair sangat bergantung pada efisiensi proses air (Abidin & Chaerul, 2025; Wang *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2025; Putra *et al.*, 2024). Inovasi dalam pengelolaan limbah, seperti pemanfaatan FABA untuk bahan konstruksi atau pengolahan *sludge* menjadi bahan bakar alternatif, tidak hanya menurunkan beban lingkungan, tetapi juga membuka peluang ekonomi sirkular (Wang *et al.*, 2020; Putra *et al.*, 2024). Pengelolaan limbah yang baik menjadi indikator kualitas operasi PLTU, karena limbah yang dihasilkan mencerminkan seberapa efisien dan bersih proses yang dijalankan.

Keanekaragaman hayati menjadi refleksi eksternal dari dampak operasional PLTU terhadap lingkungan sekitar. Penurunan emisi, pengelolaan limbah yang baik, dan restorasi ekologis di sekitar area pembangkit, seperti pembangunan Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) dan rehabilitasi lahan bekas tambang, berkontribusi pada peningkatan kualitas habitat dan perlindungan spesies lokal (Ivanova *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2023). Studi di Asia Tenggara menunjukkan bahwa proyek PLTU yang tidak memperhatikan aspek Kehati berisiko tinggi menyebabkan deforestasi dan hilangnya habitat spesies langka, sedangkan integrasi restorasi ekologis dan pengelolaan limbah yang baik dapat menekan risiko tersebut (Ivanova *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2023). Upaya *phytoremediasi* dan reforestasi di lahan bekas tambang batu bara juga terbukti efektif dalam memulihkan fungsi ekosistem dan meningkatkan keanekaragaman hayati (Ivanova *et al.*, 2022).

Keempat pilar ini saling terkait erat dan membentuk satu sistem yang tidak dapat dipisahkan. Efisiensi energi menurunkan konsumsi batu bara dan emisi, yang pada gilirannya mengurangi volume limbah padat dan cair. Pengelolaan air yang efisien menekan produksi limbah cair dan beban WWTP, serta mendukung efisiensi energi melalui sistem

pendinginan yang optimal. Limbah yang dikelola dengan baik tidak hanya menurunkan beban lingkungan, tetapi juga mendukung upaya restorasi ekosistem dan peningkatan keanekaragaman hayati. Dampak positif pada keanekaragaman hayati menjadi indikator keberhasilan integrasi ketiga pilar sebelumnya, sekaligus memberikan umpan balik sosial berupa penerimaan masyarakat dan legitimasi operasional PLTU (Wang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2023).

Alur ideal integrasi pilar ini dimulai dari energi sebagai pusat operasi, di mana efisiensi energi menentukan kebutuhan air dan volume limbah. Pengelolaan air yang efisien menekan limbah cair dan mendukung efisiensi energi. Limbah yang dihasilkan menjadi indikator kualitas operasi dan peluang ekonomi sirkular. Seluruh proses ini bermuara pada dampak ekosistem, khususnya keanekaragaman hayati, yang menjadi tolok ukur keberlanjutan operasional PLTU. Umpan balik sosial dari masyarakat dan pemangku kepentingan akan semakin positif jika keempat pilar ini terintegrasi dalam satu sistem yang berorientasi pada keberlanjutan, bukan sekadar kumpulan proyek terpisah (Guo *et al.*, 2022; Ivanova *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2023).

C. Transisi Energi dan *Circular Economy* dalam Operasi Pembangkit

Transisi energi dan *circular economy* (ekonomi sirkular) merupakan dua pilar utama dalam upaya Indonesia mencapai target penurunan emisi dan pembangunan berkelanjutan. Keduanya saling melengkapi sebagai narasi besar yang menuntun transformasi sektor energi dan pengelolaan sumber daya menuju sistem yang lebih efisien, rendah karbon, dan berdaya tahan lingkungan. Dalam konteks Indonesia, transisi energi tidak dapat dilakukan secara drastis, terutama mengingat ketergantungan yang masih tinggi terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara. Oleh karena itu, strategi transisi yang realistis menekankan pada peningkatan efisiensi operasi PLTU, pengurangan konsumsi batu bara, serta digitalisasi proses sebagai langkah kunci menuju sistem energi yang lebih bersih dan modern.

Indonesia menghadapi tantangan besar dalam mencapai target Net Zero Emission (NZE) pada 2060, terutama karena keterbatasan anggaran,

infrastruktur, dan ketergantungan pada batu bara sebagai sumber energi utama. PLTU masih menjadi tulang punggung pasokan listrik nasional, sehingga meninggalkannya secara tiba-tiba bukanlah pilihan yang *feasible* dalam jangka pendek. Dalam situasi ini, peningkatan efisiensi operasi PLTU menjadi langkah strategis yang tidak hanya mengurangi konsumsi batu bara, tetapi juga menurunkan emisi karbon secara langsung. Implementasi teknologi digital seperti sensor, sistem monitoring biodiversitas, dan aplikasi berbasis data (misal: I-Bost) menjadi karakteristik utama pembangkit modern di masa transisi. Digitalisasi ini memungkinkan pemantauan kinerja secara *real-time*, deteksi dini potensi kerusakan, serta optimalisasi penggunaan bahan bakar dan air, sehingga efisiensi energi dan air dapat dicapai secara simultan (Zeng *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2022).

Pengurangan konsumsi batu bara di PLTU merupakan kontribusi paling nyata terhadap target penurunan emisi nasional. Kebijakan pemerintah yang mendorong *co-firing* biomassa di PLTU, misalnya, telah terbukti mampu menurunkan emisi karbon sejalan dengan peningkatan porsi energi terbarukan dalam bauran energi nasional (Kennedy *et al.*, 2024; Paiboonsin *et al.*, 2023). Namun, transisi ini juga memerlukan dukungan kebijakan, insentif finansial, dan penguatan tata kelola agar berjalan efektif dan berkelanjutan (Resosudarmo *et al.*, 2023; Sujai *et al.*, 2023; Aditya *et al.*, 2025). Selain itu, digitalisasi proses operasional tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memperkuat transparansi dan akuntabilitas dalam pengelolaan energi, yang pada akhirnya mempercepat pencapaian target transisi energi (Zeng *et al.*, 2025).

Di sisi lain, *circular economy* menawarkan paradigma baru dalam pengelolaan limbah dan sumber daya. Limbah tidak lagi dipandang sebagai beban, melainkan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali. Contoh konkret di sektor energi adalah pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) dari PLTU sebagai bahan baku *paving block*, penggunaan limbah popok sebagai media tanam, serta upaya menekan produksi *sludge* sejak hulu proses (Yang *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2024). *Circularity* di pembangkit listrik berarti memperpanjang umur material, mengurangi kebutuhan bahan baku baru, dan menutup *loop* limbah

sehingga tidak ada *output* yang terbuang sia-sia. Setiap inovasi yang diterapkan harus diposisikan sebagai contoh *loop closure*, di mana energi yang dihasilkan, limbah yang dihasilkan, dan manfaat yang diperoleh membentuk siklus yang saling terhubung (Yang *et al.*, 2022; Peters *et al.*, 2024).

Prinsip payung dari *circular economy* dapat dirangkum dalam empat proses utama: *reduce*, *reuse*, *recycle*, dan *regenerate*. Efisiensi energi berarti mengurangi input energi yang dibutuhkan dalam proses produksi. Efisiensi air berarti mengurangi penggunaan air sebagai material proses, yang sangat penting di sektor pembangkit listrik. Pemanfaatan limbah bertujuan mengurangi *output* limbah yang dihasilkan, sementara restorasi ekologis berfokus pada upaya memperbaiki daya dukung lingkungan agar siklus tetap seimbang (Yang *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2024). Semua program inovasi yang diuraikan dalam buku ini dapat dipetakan ke salah satu dari empat proses tersebut, sehingga membentuk kerangka kerja yang komprehensif dan terintegrasi.

Penerapan *circular economy* di sektor energi juga membawa dampak positif terhadap efisiensi biaya dan pengurangan ketergantungan pada teknologi mahal seperti *carbon capture*. Penggunaan limbah organik untuk produksi biogas, substitusi material primer dengan bahan baku sekunder, serta integrasi teknologi digital seperti *big data*, *artificial intelligence*, dan *Internet of Things* (IoT) telah terbukti mampu menurunkan konsumsi energi dan emisi karbon secara signifikan (Yang *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2024). Namun, keberhasilan implementasi *circular economy* sangat bergantung pada perubahan perilaku masyarakat, investasi modal, model bisnis baru, dan dukungan kebijakan yang konsisten (Yang *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2024).

Penting untuk menegaskan bahwa pendekatan teknis yang diuraikan dalam buku ini bukan sekadar inisiatif *Corporate Social Responsibility* (CSR) yang bersifat simbolis. Sebaliknya, seluruh inovasi dan program yang diadopsi merupakan bagian integral dari strategi nasional transisi energi dan *circularity*. Regulasi di Indonesia saat ini memang masih terfragmentasi antara kewajiban CSR dan prinsip *circular economy*, sehingga perlu harmonisasi kebijakan agar perusahaan tidak hanya

memenuhi tanggung jawab sosial, tetapi juga berkontribusi nyata terhadap keberlanjutan lingkungan (Sunaryo *et al.*, 2025). Integrasi *circular economy* ke dalam regulasi CSR dan sektor energi akan memperkuat fondasi hukum, memberikan insentif bagi perusahaan yang berinovasi dalam teknologi ramah lingkungan, serta mempercepat pencapaian target penurunan emisi nasional (Sunaryo *et al.*, 2025).

Dengan demikian, narasi besar transisi energi dan *circular economy* harus dipahami sebagai strategi nasional yang saling terkait dan saling memperkuat. Efisiensi energi, efisiensi air, pemanfaatan limbah, dan restorasi ekologis bukan hanya tujuan teknis, tetapi juga fondasi bagi terciptanya sistem energi dan ekonomi yang berkelanjutan. Setiap inovasi dan program yang diimplementasikan harus selalu diposisikan dalam kerangka *reduce, reuse, recycle*, dan *regenerate*, sehingga membentuk siklus yang utuh dan berkelanjutan. Pendekatan ini menuntut kolaborasi lintas sektor, penguatan regulasi, serta perubahan paradigma dari linear ke sirkular, agar Indonesia dapat mewujudkan transisi energi yang adil, inklusif, dan berkelanjutan.

BAB 2

ENERGI TANPA PEMBOROSAN

A. Mengapa PLTU Harus Berubah?

1. Tantangan Baru untuk Pembangkit Tua

PLTU Paiton, khususnya unit 3, 7, dan 8, adalah pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Dimiliki dan dioperasikan oleh PT Paiton Energy, ketiga unit ini memainkan peran penting dalam kehidupan sehari-hari masyarakat karena mampu menyumbang sekitar 7 hingga 10% dari total pasokan listrik yang mengalir ke jaringan Jawa–Bali. Keberadaan PLTU Paiton bukan hanya soal angka, tetapi juga tentang bagaimana energi yang dihasilkannya menjaga lampu tetap menyala, rumah tangga tetap hangat, dan kegiatan ekonomi berjalan lancar.

Saat ini, PLTU Paiton unit 3, 7, dan 8 menggunakan batu bara yang kualitasnya telah menurun dibandingkan dengan spesifikasi desain awal. Kondisi ini berdampak langsung pada kinerja *boiler* yang lebih rentan terhadap terbentuknya *slagging* dan *fouling*. Lapisan pengotor ini, jika menebal, akan mengurangi efisiensi perpindahan panas antara gas buang dan uap sehingga konsumsi bahan bakar harus ditingkatkan untuk mempertahankan performa. Pada situasi seperti ini, keberadaan *sootblower* menjadi sangat krusial karena fungsinya menjaga kebersihan permukaan *tube boiler*. Pengoperasian *sootblower* pun harus dilakukan secara optimal agar tercapai keseimbangan antara efisiensi dan

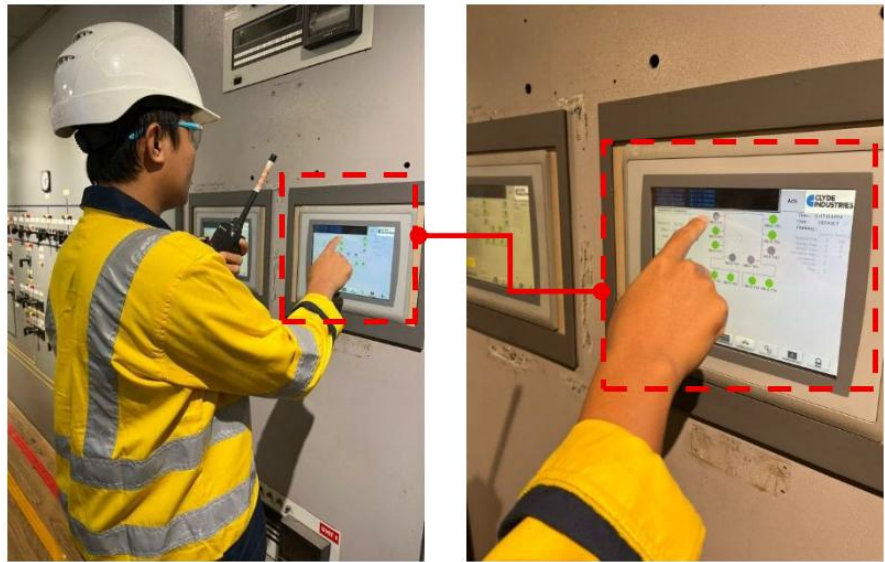
keandalan sistem. Jika *sootblower* digunakan terlalu sering, tube berisiko mengalami penipisan akibat erosi uap yang akan memperpendek umur peralatan. Sebaliknya, jika penggunaannya terlalu jarang, lapisan pengotor akan menumpuk, mengurangi penyerapan panas, menurunkan efisiensi termal, dan menyebabkan pemborosan uap yang tidak perlu.

2. Kenapa Pembersihan *Boiler* Harus Diubah?

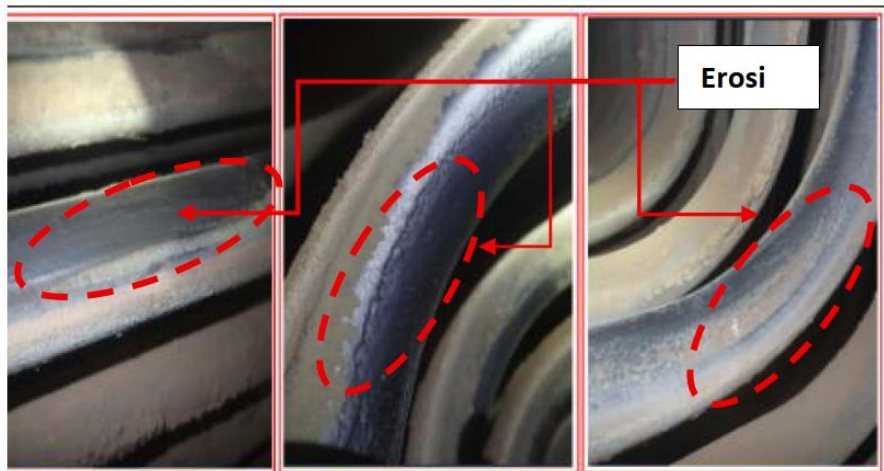
Permasalahan *slagging* dan *fouling* yang semakin sering muncul di PLTU Paiton Unit 7 & 8 telah menjadi perhatian penting yang menuntut penyelesaian segera. Temuan dari LCA 2024 menunjukkan bahwa titik paling krusial pada proses pembangkitan listrik berada pada bagian *boiler* sehingga upaya peningkatan efisiensi energi menjadi dasar kuat lahirnya program inovasi ini. Kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada kinerja komponen, tetapi juga berimbas pada kesiapan dan efisiensi keseluruhan pembangkit.

Pengoperasian *sootblower* kerap menghadapi masalah berupa penggunaan *steam* yang berlebihan untuk pembersihan yang sebenarnya tidak diperlukan. Kebiasaan ini bukan saja menguras energi, tetapi juga membuat keausan pada tube terjadi lebih cepat sehingga peralatan menjadi kurang awet dan membutuhkan perhatian lebih sering.

Sistem *sootblower* pada *boiler* saat ini bekerja dengan jadwal tetap, tiga kali sehari sehingga operator harus mengaktifkannya langsung dari panel setempat. Cara seperti itu sering membuat proses pembersihan berlangsung meski lapisan kotor belum benar-benar mengganggu kinerja, dan hal ini bisa menyebabkan pembersihan berlebihan. Kondisi tersebut membuat permukaan tube terkikis lebih cepat, mengurangi ketebalan material, menurunkan usia pakai, meningkatkan risiko kebocoran, dan memboroskan energi tanpa memberi keuntungan nyata bagi proses pemanasan. Untuk meningkatkan ketepatan kerja dan menjaga keandalan peralatan, operasi *sootblower* mulai diarahkan menuju sistem otomatis yang menyesuaikan pembersihan berdasarkan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 1. Operator Mengoperasikan Panel



Gambar 2. Bagian Logam yang Mulai Rusak

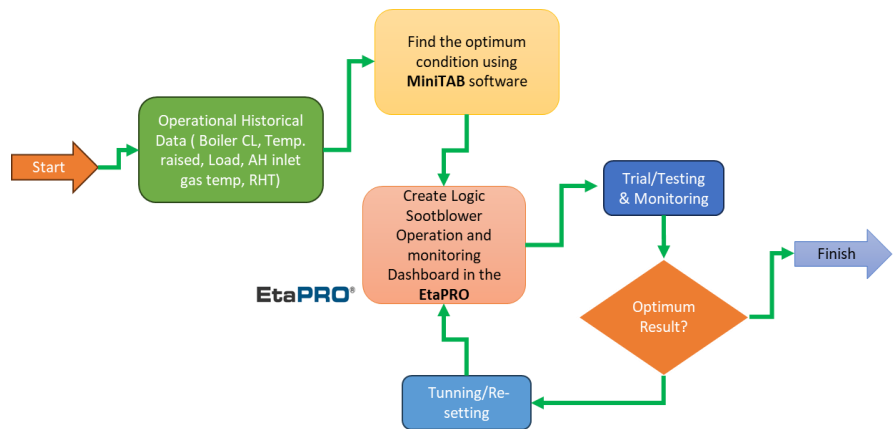
B. Membersihkan *Boiler* dengan Cara Lebih Hemat Energi

Sistem *sootblower* pada *boiler* saat ini bekerja dengan jadwal tetap, tiga kali sehari, dan masih memerlukan tindakan manual dari operator

melalui panel setempat. Cara seperti ini kerap membuat alat tetap beroperasi meski kerak belum benar-benar muncul sehingga pembersihan berlangsung lebih sering dari yang seharusnya dan berpotensi menimbulkan *over-cleaning*.

Inovasi ini menghadirkan *dashboard* I-Bost (*Intelligent Boiler Surface Tube Cleaner for Optimization*), sebuah sistem pengoperasian *sootblower* yang bekerja otomatis berbasis informasi untuk menentukan waktu terbaik pembersihan. Skema kerjanya memadukan nilai *Boiler Cleanliness Factor* (BCF) dari platform etaPRO sebagai penanda seberapa baik panas berpindah di dalam *boiler*. Nilai tersebut kemudian dicocokkan dengan perubahan produksi listrik serta kenaikan temperatur *steam* dan *feedwater* agar terlihat pola hubungan yang terjadi. Proses pepadanan berbagai informasi itu diolah melalui Minitab hingga menghasilkan angka batas yang menjadi acuan kapan *sootblower* seharusnya diaktifkan sehingga kinerja *boiler* tetap terjaga tanpa perlu pembersihan berlebihan.

Nilai *threshold* berperan sebagai penanda awal yang memberi tahu kapan performa termal *boiler* mulai merosot akibat timbunan deposit. Isyarat ini kemudian memicu *sootblower* bekerja pada saat yang paling tepat sehingga tidak boros uap karena dijalankan terlalu awal dan juga tidak menunggu hingga efisiensi turun atau muncul risiko *fouling*. Sistem tersebut membantu operator mengambil keputusan yang lebih yakin berbasis informasi nyata, menjaga pemakaian energi tetap efisien, dan mempertahankan keandalan unit dari waktu ke waktu. I-Bost hadir sebagai modul tambahan pada DCS dan menyajikan tampilan visual yang mudah dipahami, lengkap dengan alarm yang menyesuaikan perubahan kondisi serta rekaman kinerja sebelumnya.



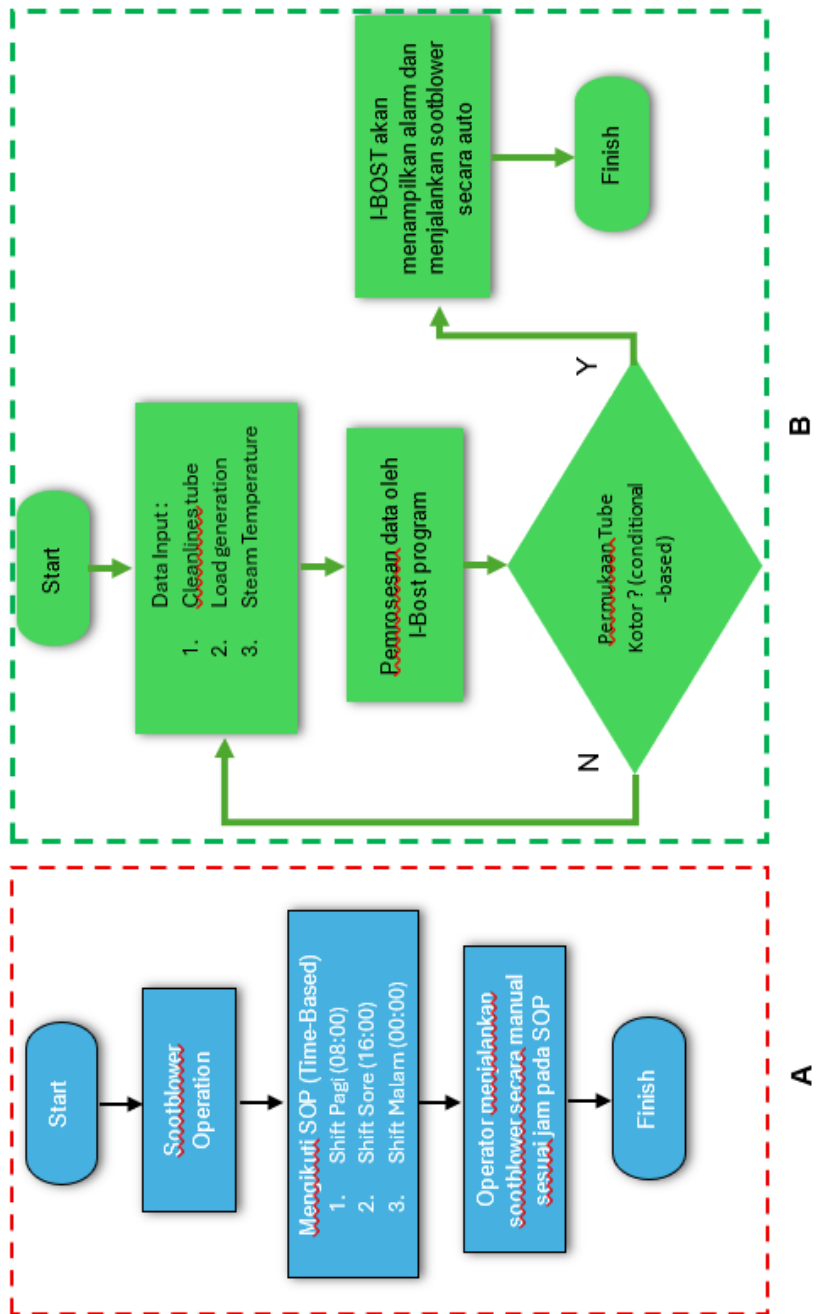
Gambar 3. Tahapan Pengembangan Sebuah Sistem



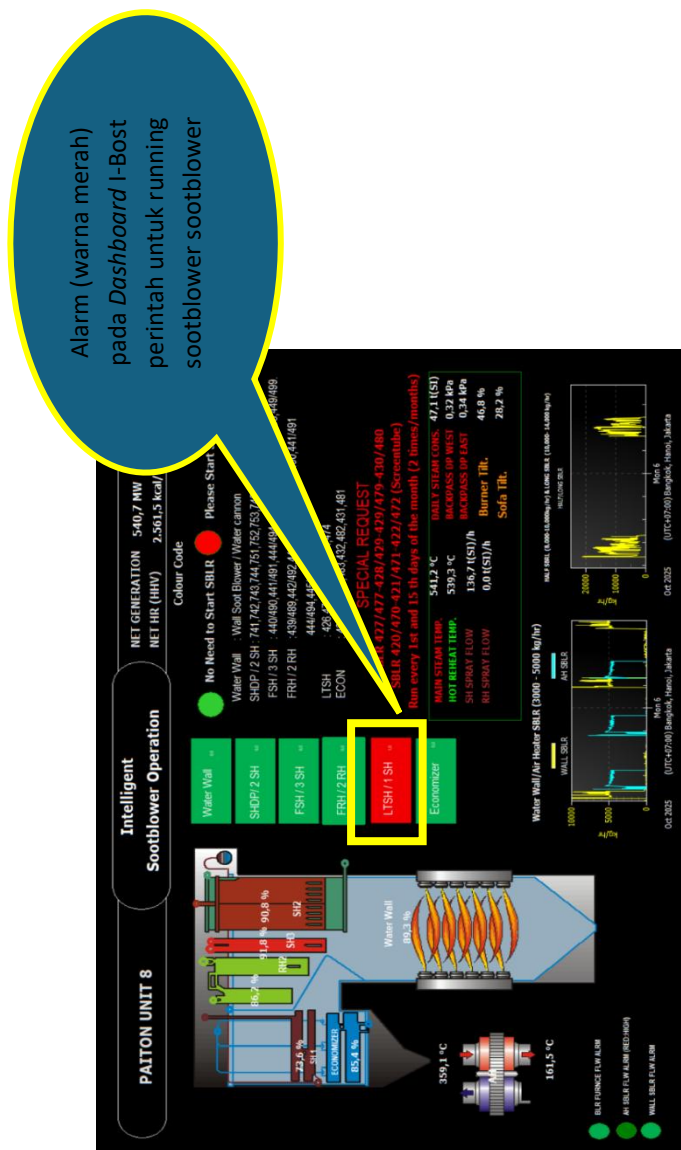
Gambar 4. Tampilan Perhitungan di Komputer



Gambar 5. Tampilan Saat Sistem Masuk ke Layar Kontrol



Gambar 6. Pergeseran Cara Kerja Menuju Sistem Otomatis



Gambar 7. Panel Kontrol di Ruang Operasi

Pengoperasian *sootblower* yang dijadwalkan tiga kali sehari selama bertahun-tahun kerap dianggap sebagai rutinitas biasa, padahal pola tersebut sering memicu pembersihan berlebihan. Situasi ini membuat permukaan tube lebih cepat aus karena terus-menerus terkena semburan

uap bertekanan tinggi. Energi pun banyak terbuang karena *steam* dipakai tanpa pertimbangan kebutuhan sebenarnya. Kebiasaan tersebut akhirnya menurunkan usia peralatan dan membuat biaya operasional meningkat dari waktu ke waktu.

Pola kerja *sootblower* berubah menjadi lebih cermat berkat teknologi pintar I-Bost yang membuat proses pembersihan tidak lagi mengandalkan jadwal tetap. Sistem ini memberi kesempatan untuk menggunakan *steam* secara lebih hemat karena setiap pembersihan dilakukan secara lebih terarah. Pemakaian yang tepat sasaran membantu mencegah pembersihan berlebihan dan menjaga efisiensi penggunaan *steam*. Selain itu, kondisi permukaan tube tetap terjaga dengan baik sehingga risiko kerusakan dapat ditekan dan keandalan peralatan tetap terpelihara.

C. I-Bost: Inovasi Kecil, Penghematan Besar

Program inovasi efisiensi energi I-Bost (*Intelligent Boiler Surface Tube Cleaner for Optimization*) menggambarkan perubahan penting pada subsistem yang memberi nilai tambah nyata. Perubahan tersebut membuat rantai nilai bekerja lebih optimal sehingga manfaatnya terasa lebih luas, terutama karena proses yang sebelumnya kurang efisien kini berjalan lebih terarah dan memberikan hasil yang lebih baik bagi keseluruhan operasi.

Efisiensi I-Bost terlihat dari perubahan pemakaian *steam* sebelum dan sesudah sistem ini digunakan. Perbandingan dilakukan dengan mengacu pada catatan pemakaian *steam* tahun sebelumnya, lalu mencermatinya kembali setelah I-Bost mulai beroperasi. Selisih pemakaian antara dua periode tersebut menunjukkan besarnya penghematan yang berhasil dicapai, sekaligus menggambarkan seberapa besar peningkatan efisiensi yang diberikan oleh penerapan I-Bost.

Perhitungan penghematan uap dapat digambarkan melalui selisih penggunaan uap pada unit 7 dan unit 8. Kedua selisih tersebut kemudian dijumlahkan, lalu dikurangi dengan angka acuan pada persamaan pertama. Hasil akhirnya menunjukkan berapa besar uap yang berhasil dihemat dalam satuan kilogram.

$$\begin{aligned} & \text{Total penghematan Uap (kg)} \\ & = [\text{Selisih Konsumsi Uap unit 7} + \text{Selisih Konsumsi Uap unit 8}] - (1) \end{aligned}$$

Penghematan energi dapat dibayangkan sebagai upaya menjaga agar sumber daya tetap digunakan secara bijak. Besarnya penghematan dihitung dengan melihat selisih penggunaan energi dalam bentuk massa, lalu mengalikannya dengan nilai panas yang terkandung pada bahan tersebut. Hasil perkalian itu kemudian dibagi satu juta sehingga menghasilkan angka penghematan dalam satuan gigajoule. Rumus sederhana ini membantu menggambarkan seberapa besar energi yang berhasil dihemat dari perubahan cara kerja atau kebiasaan yang lebih efisien.

$$\begin{aligned} & \text{Penghematan Energi (GJ)} = \\ & = \left[\frac{\text{Selisih konsumsi energi (kg)} \times \text{Enthalphy}}{1.000.000} \right] - - - - - (2) \end{aligned}$$

Penghematan batu bara dapat digambarkan melalui gagasan sederhana bahwa setiap energi yang berhasil dihemat akan mengurangi jumlah batu bara yang harus dibakar. Rumus yang digunakan melihat seberapa besar energi yang berhasil disimpan, lalu membandingkannya dengan nilai kalor batu bara dan kemampuan *boiler* mengubah batu bara menjadi energi berguna. Dari sana terlihat berapa ton batu bara yang bisa dihemat sehingga upaya efisiensi terasa lebih nyata dan mudah dipahami dalam aktivitas sehari-hari di lingkungan operasional.

$$\begin{aligned} & \text{Penghematan Batubara (Ton)} = \\ & = \left[\frac{\text{Penghematan energi (GJ)}}{\text{HHV batubara}} / \text{Efficiency Boiler} \right] - - - (3) \end{aligned}$$

Nilai penghematan batu bara dihitung dengan mengacu pada kondisi operasi yang digunakan sebagai dasar perhitungan. Suhu uap utama mencapai 535°C dan tekanannya berada pada 165 bar, sedangkan nilai entalpi uap panas sebesar 3.406,5 kJ/kg. Harga batu bara tercatat Rp1.050.000 per ton dengan nilai kalor 4.800 kcal/kg atau setara 19,13 GJ

per ton. Efisiensi *boiler* berada pada kisaran 86%. Seluruh angka ini dipakai untuk menggambarkan besarnya kebutuhan energi dan perkiraan biaya yang dapat ditekan ketika konsumsi batu bara berkurang.

Perhitungan penghematan menunjukkan hasil yang cukup besar. Total uap yang berhasil dihemat mencapai 30.239.088,4 kilogram, berasal dari penggabungan dua komponen utama yang sebelumnya telah dihitung. Jumlah uap tersebut kemudian diterjemahkan menjadi penghematan energi sekitar 103.009 gigajoule. Nilai energi yang begitu besar turut memberikan dampak nyata pada pemakaian batu bara sehingga kebutuhan batu bara berkurang hingga sekitar 6.261 ton. Angka-angka ini memperlihatkan betapa besar manfaat yang muncul ketika setiap bagian proses bekerja lebih efisien.

Tabel 1. Perubahan Pemakaian dari Tahun ke Tahun

Penerapan I-Bost menghasilkan data sebagai berikut:					
Unit 7					
Tahun	Total Konsumsi Uap (kg)	Selisih Konsumsi Uap (kg)	Penghematan Energi Uap (GJ)	Penghematan Batu Bara (ton)	Penghematan (Rp)
2024 (<i>Baseline</i>)	32.472.492,0	-	-	-	-
2025 (Jan-Jun)	3.690.087,3	14.391.202,3	49.023,6	2.979,8	3.128.825.551,9
Unit 8					
Tahun	Total Konsumsi Uap (kg)	Selisih Konsumsi Uap (kg)	Penghematan Energi Uap (GJ)	Penghematan Batu Bara (ton)	Penghematan (Rp)
2024 (<i>Baseline</i>)	34.379.588,1	-	-	-	-
2025 (Jan-Jun)	2.683.815,9	15.847.886,1	53.985,8	3.281,5	3.445.526.640,3

Tabel 2. Total Penghematan Energi Motor FD Fan

TOTAL PENGHEMATAN STATION 7&8				
Tahun	Penghematan Uap (kg)	Penghematan (GJ)	Penghematan Batu Bara (ton)	Penghematan (Rp)
2025 (Jan-Jun)	30.239.088,4	103.009	6.261	6.574.352.192

Penerapan I-Boost memberi dorongan besar bagi efisiensi energi perusahaan. Total penghematan yang berhasil terkumpul mencapai 103.009 GJ, setara dengan nilai sekitar Rp6.574.352.192,00. Angka ini bukan hanya menunjukkan keberhasilan upaya penghematan, tetapi juga menegaskan komitmen untuk menggunakan energi dengan lebih bijak dan memberi manfaat nyata bagi keberlanjutan operasional.

Program I-Bost menghadirkan nilai tambah yang terasa nyata di berbagai sisi operasional. Perubahan pada rantai nilai subsistem tampak dari cara kerja *sootblower* yang kini dapat berjalan otomatis melalui DCS. Pengoperasian manual dari panel lokal tidak lagi diperlukan sehingga penggunaan *steam* menjadi lebih hemat dan umur peralatan semakin panjang karena risiko kerusakan akibat pembersihan berlebihan bisa ditekan. Kondisi ini membantu unit bisnis bekerja lebih efisien, sebab waktu henti berkurang dan biaya perawatan dapat ditekan. Penerapan teknologi digital pada I-Bost memberi alur kerja baru yang lebih bernilai bagi sistem.

Pada layanan produk, program ini mengubah pola kerja *sootblower* yang sebelumnya mengikuti jadwal waktu, lalu beralih menjadi berbasis kondisi yang terlihat jelas melalui parameter pada *dashboard* I-Bost. Perubahan ini membuat proses pembersihan permukaan *boiler tube* lebih tepat sasaran sehingga keandalan, efisiensi, dan keselamatan kerja PLTU meningkat.

Perubahan juga terasa pada perilaku kerja. Dahulu operator harus mengaktifkan *sootblower* secara manual dengan pola yang selalu sama. Setelah hadirnya I-Bost, pengoperasian diarahkan oleh kondisi aktual yang terhubung langsung dengan DCS di *Control Room*. Operator lokal dapat memusatkan tenaga pada tugas lain yang lebih penting. Situasi ini menunjukkan pergeseran cara kerja yang lebih cermat dan bertumpu pada informasi yang akurat sehingga menjadikan aktivitas pengelolaan unit pembangkit lebih terarah dan efektif.

Program inovasi ini memberi dampak positif yang selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan. Melalui I-Bost, upaya menyediakan energi yang lebih bersih terasa nyata berkat efisiensi yang meningkat dan sistem operasi *sootblower* yang kini berjalan secara digital. Penghematan

energi mencapai 103.009 GJ, menghadirkan manfaat yang dapat dirasakan langsung oleh operasional perusahaan ataupun lingkungan sekitar.

Komitmen terhadap iklim juga terlihat dari berkurangnya penggunaan batu bara hingga 6.261 ton. Langkah ini membantu menekan emisi dari sektor energi dan menjadi bagian penting dari perjalanan menuju masa depan yang lebih ramah lingkungan. Program ini pada akhirnya menunjukkan bahwa perubahan besar sering berawal dari keputusan sederhana untuk memperbaiki cara kita menggunakan energi setiap hari.

BAB 3

HEMAT ENERGI DI JANTUNG PLTU

A. Menjawab Tantangan Transisi Energi Indonesia

1. Mengapa Efisiensi Energi Kini Semakin Mendesak?

Di tengah urgensi global untuk menekan laju perubahan iklim, perhatian dunia banyak tertuju pada sektor energi yang masih menjadi sumber terbesar emisi gas rumah kaca. Karbon dioksida yang keluar ke atmosfer terus mendorong perubahan iklim bergerak lebih cepat dari yang diharapkan. Situasi ini mendorong kebutuhan untuk berperilaku lebih bijak dalam menggunakan energi, terutama pada pembangkit listrik tenaga uap, agar langkah penghematan dapat memberi dampak nyata bagi lingkungan dan masa depan.

Situasi energi di Indonesia masih menghadapi tantangan besar. Laporan IETO 2025 dari IESR menggambarkan bahwa pada tahun 2023, sekitar 81% pasokan listrik masih bertumpu pada sumber fosil, sedangkan energi terbarukan tertahan di angka 13,21%, jauh dari harapan nasional yang ingin mencapai 23% pada 2025. Ketergantungan yang kuat pada batu bara dan besarnya subsidi LPG yang mencapai sekitar Rp83 triliun, menjadi penghambat perjalanan menuju sistem energi yang lebih bersih (IESR, 2025).

Kementerian ESDM mencatat kabar baik ketika Indonesia berhasil menekan emisi gas rumah kaca sektor energi hingga 147,67 juta ton CO₂e pada 2024, melewati target yang sudah ditetapkan. Upaya ini terus

berlanjut dengan sasaran baru sebesar 164 juta ton CO₂e untuk tahun 2025, sebagai bagian dari langkah panjang menuju tujuan besar Net Zero Emission 2060.

PLTU Paiton Unit 7&8 yang dioperasikan oleh PT Paiton Energy memiliki kapasitas 2×615 MW dan menggunakan 3.723.387,75 ton batu bara pada tahun 2024. Dari proses itu, pembangkit menghasilkan energi listrik bruto sebesar 7.011.584,10 MWh. Setiap pembakaran batu bara memunculkan emisi seperti SO₂, NO_x, PM, serta CO₂ yang berdampak pada kualitas udara dan keseimbangan iklim. Beragam temuan menunjukkan bahwa proses menghasilkan listrik dari batu bara meninggalkan jejak yang tidak sedikit bagi lingkungan sehingga upaya menjaga penggunaan energi menjadi semakin penting. Langkah menghemat energi dapat dilakukan dengan cara memakai energi secara lebih cermat dan efisien. Arah ini sejalan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi, yang menegaskan bahwa pihak yang memanfaatkan sumber energi lebih dari 6.000 setara ton minyak per tahun memiliki kewajiban untuk melaksanakan pengelolaan energi secara bertanggung jawab.

Efisiensi energi menggambarkan upaya untuk memakai tenaga secara lebih bijak agar hasil yang dicapai tetap optimal tanpa harus menghabiskan sumber daya yang berlebihan. Upaya ini membantu menurunkan penggunaan energi sekaligus memperkecil jejak emisi setiap tahun. Sebagai bagian dari komitmen menjaga keberlanjutan, PT Paiton Energy menetapkan arah yang jelas dalam menekan emisi. Perusahaan menargetkan penurunan emisi udara konvensional berupa SO₂ sebesar 60 ton, NO_x sebesar 475 ton, dan partikulat sebesar 25 ton hingga tahun 2028. Untuk emisi gas rumah kaca, perusahaan menargetkan pengurangan CO₂e hingga 920.000 ton pada tahun yang sama. Langkah ini didukung oleh penerapan Sistem Manajemen Lingkungan berbasis LCA serta penguatan keterkaitan program dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan sehingga setiap tindakan membawa dampak positif bagi lingkungan dan masa depan.

Sebagai wujud nyata kontribusi terhadap kebijakan energi yang lebih bijak, EcoFan-7™ hadir sebagai langkah baru untuk menjawab

kebutuhan efisiensi pada sistem pendukung pembangkit. Inovasi ini berfokus pada peningkatan kinerja *High Voltage Motor* (HV Motor) yang menggerakkan suplai udara pembakaran, bagian yang selama ini dikenal sebagai salah satu pengguna energi terbesar. EcoFan-7™ dirancang agar mampu menekan konsumsi energi secara berarti, membantu mengurangi emisi karbon, serta memperkuat komitmen perusahaan menuju operasional pembangkit yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan.

2. Apa Pentingnya Rekondisi Motor FD Fan bagi PLTU?

Sebagai salah satu pembangkit listrik swasta terbesar di Indonesia, PLTU Paiton Energy Unit 7 & 8 memikul tanggung jawab besar untuk menjaga agar proses pembangkitan tetap andal, efisien, dan ramah terhadap lingkungan. Operasionalnya bertumpu pada beragam sistem yang saling melengkapi guna menjaga kestabilan dan kualitas pasokan listrik. Penjelasan menyeluruh mengenai jejak lingkungan pada tahun 2022 menunjukkan bahwa titik paling menentukan berada pada bagian *boiler*. Temuan tersebut mendorong lahirnya dorongan kuat untuk menurunkan emisi di area itu sehingga program inovasi ini memperoleh pijakan yang jelas untuk diwujudkan.

Salah satu tantangan yang dihadapi tim operasional berkaitan dengan tingginya penggunaan listrik pada peralatan berdaya besar, terutama pada sistem suplai udara pembakaran. Perhatian utama tertuju pada motor listrik tiga fasa FD Fan berkekuatan 1.800 HP dengan tegangan 6.600 V AC. Perangkat ini bekerja tanpa henti selama lebih dari dua puluh tahun dan menyedot energi dalam jumlah besar sehingga menjadi salah satu fokus yang perlu ditangani untuk menjaga efisiensi dan keberlanjutan proses produksi.

Upaya memahami kondisi motor FD Fan membawa tim pada gagasan baru setelah membandingkan cara perawatan yang pernah dijalankan. Selama ini motor hanya dirawat di tempat tanpa dibongkar seluruhnya sehingga banyak bagian penting tidak tersentuh. Setelah mempelajari berbagai panduan praktis dan pengalaman lapangan, muncul keyakinan bahwa motor tegangan tinggi itu perlu dirawat lebih

menyeluruh. Rencana perawatan baru ini mencakup rekondisi total di bengkel luar dengan melepas motor dari unit operasional saat *outage* unit 7 tahun 2024. Panduan EPRI NP-7502 menunjukkan bahwa perawatan yang direncanakan dengan baik—mulai dari pembersihan menyeluruh hingga pengujian isolasi—mampu mengangkat efisiensi motor hingga 10–15% sekaligus menekan risiko gangguan mendadak. Gagasan ini tumbuh dari keinginan kuat untuk memangkas kehilangan energi selama proses pembangkitan dan membantu perusahaan mencapai target penurunan emisi.



Gambar 8. Perawatan Motor Sebelum Perbaikan

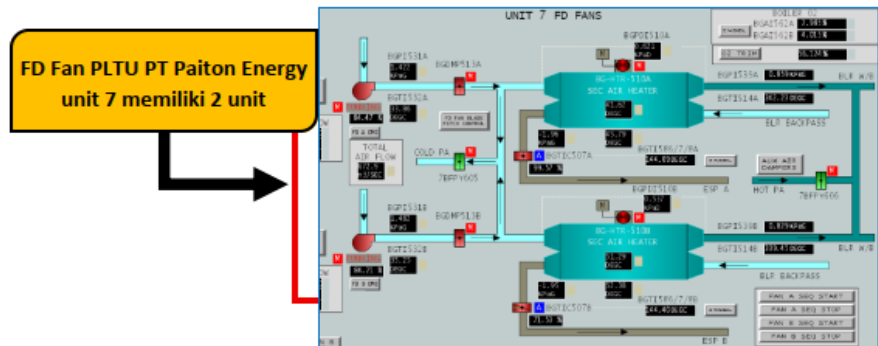
Inovasi ini lahir bukan semata karena kebutuhan teknis, tetapi juga sebagai wujud kesungguhan perusahaan menjalankan prinsip pengelolaan energi dan penghematan sumber daya yang sejalan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023. Berkat pemanfaatan teknologi yang mendukung efisiensi operasional, gagasan tersebut berkembang menjadi sebuah program bernama EcoFan-7™ –

Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi. Program ini menjadi bukti nyata komitmen PLTU Paiton Energy dalam mendorong transisi energi sekaligus membantu menurunkan emisi gas rumah kaca.



Gambar 9. Contoh Label pada Motor

Motor High Voltage (HV) FD Fan di PLTU Paiton Unit 7 telah bekerja setia lebih dari dua puluh tahun dan tetap memegang peran penting dalam menjaga proses pembangkitan listrik berjalan lancar. Udara dari atmosfer dialirkan ke *boiler* sebagai udara sekunder untuk membantu proses pembakaran, lalu diarahkan melalui jaringan *ducting* dan *damper* yang bergerak otomatis mengikuti besar-kecilnya beban listrik yang harus dipenuhi. Perjalanan udara tersebut berlangsung seirama dengan tugas dua fan lainnya, yaitu PA Fan yang membawa udara primer untuk membantu pengeringan dan pengangkutan batu bara menuju *burner*, serta ID Fan yang menarik gas buang menuju cerobong agar aliran tetap stabil dan tekanan di ruang bakar terjaga. Semua perangkat itu bekerja seperti satu kesatuan yang saling melengkapi, memastikan api tetap menyala dan listrik dapat mengalir hingga ke rumah-rumah dan tempat kegiatan masyarakat.



Gambar 10. Letak Peralatan di Area Pembangkit

FD Fan berada pada sisi *inlet boiler* dan bertugas mendorong udara masuk ke *furnace* agar proses pembakaran berjalan lancar. Udara yang masuk bukan hanya untuk memenuhi kebutuhan dasar pembakaran, tetapi juga memberi suplai tambahan supaya api tetap stabil dan bahan bakar terbakar dengan sempurna. Perannya ikut membantu menutup potensi kebocoran udara pada *air preheater* dan menjaga tekanan sistem tetap seimbang sehingga kinerja *boiler* tetap terjaga. Keberadaan FD Fan memegang peran penting karena memengaruhi konsumsi energi motor, mutu pembakaran, dan upaya mengurangi emisi gas buang.

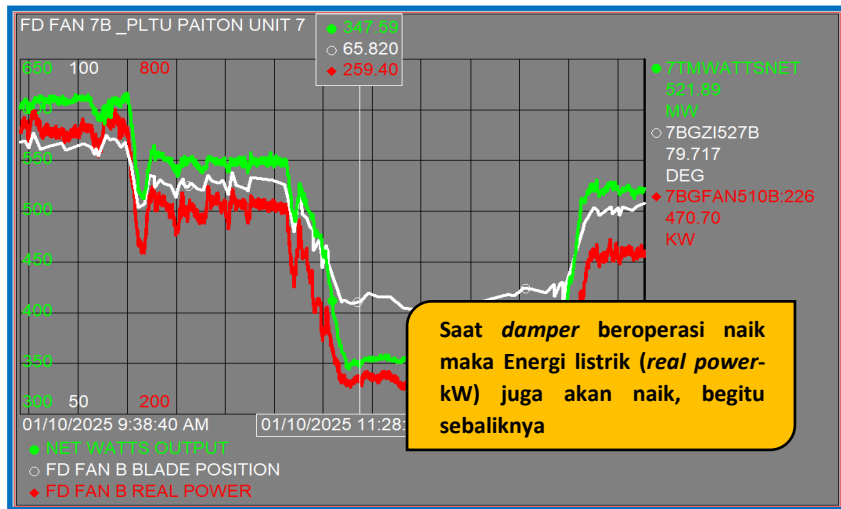


Gambar 11. Pengaturan Peralatan di Pembangkit

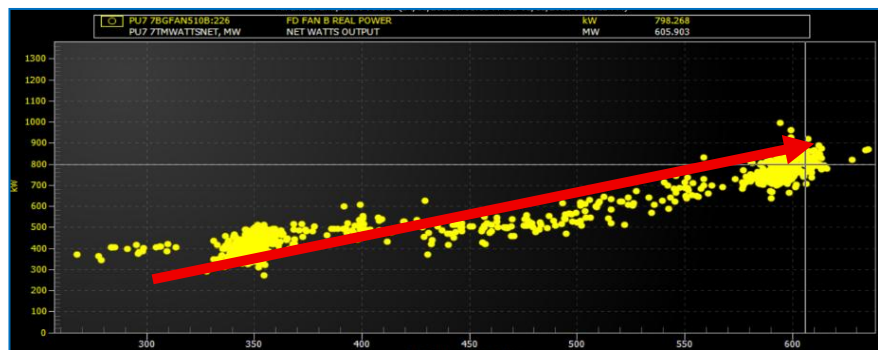
Efisiensi energi dari pengaturan bukaan *damper* tidak akan tercapai sepenuhnya ketika motor FD Fan mulai melemah akibat usia pakai yang panjang. Semakin lebar bukaan *damper* untuk memenuhi kebutuhan pembakaran, semakin besar pula volume udara yang harus didorong sehingga beban kerja motor meningkat dan konsumsi listrik ikut naik. Program pemeliharaan dan rekondisi motor FD Fan menjadi upaya penting untuk memulihkan tenaga motor, mencakup perbaikan *winding*, penyeimbangan rotor, penggantian *bearing*, serta peningkatan sistem pendinginan dan pelumasan. Motor yang sudah direkondisi mampu merespons perubahan bukaan *damper* dengan lebih ringan sehingga penggunaan listrik untuk menghasilkan aliran udara sesuai kebutuhan pembakaran dapat ditekan secara berarti. Efisiensi ini berkontribusi langsung pada berkurangnya emisi tidak langsung dari penggunaan bahan bakar fosil, menjadikan rekondisi motor FD Fan sebagai langkah nyata yang mendukung penghematan energi dan keberlanjutan operasi.



Gambar 12. Gerakan Penutup Udara Mengikuti Kebutuhan Beban



Gambar 13. Perubahan Kebutuhan Energi Saat Buka-an Udara Berubah



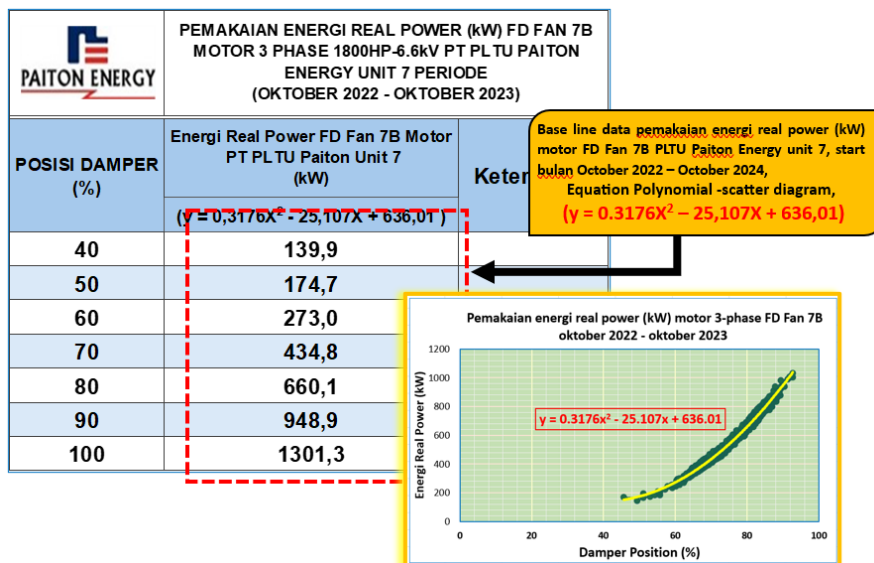
Gambar 14. Performa Peralatan pada Berbagai Kondisi

Motor induksi 3-phase FD Fan memegang peran penting dalam menjaga kelancaran aliran udara pembakaran sehingga kinerjanya sangat bergantung pada posisi *damper* dan beban pembangkitan unit. Efisiensi sistem dapat terlihat langsung dari konsumsi listrik *real power* yang sekaligus memberi gambaran tentang besarnya emisi yang mungkin timbul dari penggunaan energi internal. Untuk memahami kondisi sebenarnya, informasi konsumsi listrik motor FD Fan 7B dikumpulkan satu tahun. Rentang waktu tersebut menggambarkan situasi operasional yang

stabil tanpa kegiatan pemeliharaan besar, khususnya sebelum *outage* unit 7 sehingga memberikan gambaran yang utuh mengenai keseharian performa peralatan.

Korelasi antara konsumsi daya motor, posisi *damper*, dan beban pembangkitan unit (MW) dipetakan dengan bantuan PI ProcessBook sehingga pola penggunaan energinya terlihat lebih jelas. Proses ini memperlihatkan perubahan kecenderungan konsumsi energi sebelum dan setelah inovasi diterapkan. Dari pemahaman tersebut, besarnya penghematan energi dan penurunan emisi dapat dihitung, sekaligus menunjukkan bahwa program ini benar-benar membantu meringankan kerja motor, membuat pemakaian energi lebih hemat, dan mengurangi gas buang yang muncul dari kebutuhan energi internal pembangkit.

Tabel 3. Kebutuhan Energi Motor FD Fan per Posisi Damper (Sebelum)



3. Mengapa Motor FD Fan 7B Harus Diremajakan?

Unit 7 PLTU PT Paiton Energy mengandalkan dua motor *Forced Draft Fan* (FD Fan), yaitu FD Fan 7A dan FD Fan 7B yang bekerja berdampingan untuk menjaga kelancaran proses pembangkitan. Pada program inovasi ini, perhatian utama diarahkan pada motor FD Fan 7B.

Sebelumnya, perawatan dilakukan sebatas pembersihan *in-situ* tanpa pembongkaran penuh sehingga kondisi bagian penting, seperti *winding*, *bearing*, dan sistem pendingin tidak bisa diperiksa ataupun diperbaiki secara menyeluruh. Upaya yang lebih menyeluruh kemudian dipilih agar motor dapat bekerja lebih andal dan memberi rasa aman bagi para operator yang bergantung pada kinerjanya setiap hari.

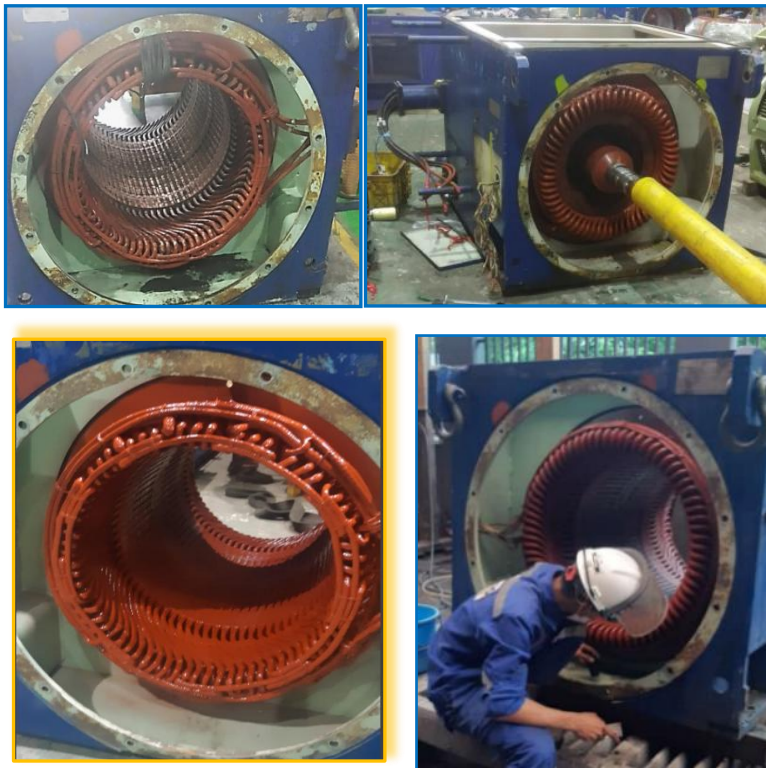
Sebelum inovasi diterapkan, pemeliharaan *in-situ* memperlihatkan sejumlah kondisi yang perlu mendapat perhatian serius. Debu tampak menumpuk cukup berat pada bagian dalam motor sehingga membuat aliran udara terhambat dan mempercepat keausan isolasi. Rembesan dari *bearing* juga menyebabkan oli tercampur ke area yang seharusnya bersih, memperbesar risiko kerusakan pada komponen penting. Situasi makin menantang ketika tingkat kelembapan di ruang motor terpantau tinggi sehingga membuat lilitan dan bagian logam lebih rentan terhadap kerusakan. Temuan-temuan ini menunjukkan betapa pentingnya menjaga motor tetap bersih, kering, dan terawat agar tetap bekerja andal.

Temuan tersebut mendorong tim untuk menelusuri berbagai rujukan terpercaya, termasuk panduan dari EPRI NP-7502 serta standar internasional seperti IEEE Std 43-2013 dan IEEE Std 112-2017 yang biasa digunakan untuk memastikan kesehatan motor listrik. Setelah mempertimbangkan isi panduan itu beserta kondisi peralatan yang ada, pilihan yang paling masuk akal adalah membawa motor ke *workshop* eksternal agar bisa diremajakan secara menyeluruh. Langkah ini memberi peluang terbesar bagi motor untuk kembali bekerja dengan aman dan andal, sekaligus menghadirkan ketenangan bagi para pekerja yang mengandalkannya setiap hari.

Perubahan cara kerja ini dilakukan dengan melepas motor FD Fan 7B dari unit operasional saat *outage* Unit 7 yang berlangsung cukup lama, yakni sekitar 3 bulan. Waktu yang tersedia memberi ruang luas bagi tim untuk memeriksa dan merapikan setiap bagian motor agar kembali berada pada kondisi terbaiknya. Pekerjaan yang dijalankan mencakup pembersihan serta perbaikan stator dan rotor, penggantian *bearing* untuk mencegah kerusakan lanjutan, pembaruan isolasi lilitan agar tetap kuat menahan tegangan, pelapisan ulang bagian dalam motor untuk

menghindari karat, penyegaran sistem pendingin termasuk alur sirkulasi udara dan *heat exchanger*, serta rangkaian pengecekan listrik guna memastikan motor siap kembali bekerja dengan aman dan andal.

Sebagai tindak lanjut dari perubahan cara kerja sebelumnya, perusahaan menjalankan program “EcoFan-7™ – Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi”, sebuah upaya rekondisi motor tegangan tinggi yang berfokus pada penghematan energi. Program ini dikerjakan secara menyeluruh selama *outage* panjang, dengan tujuan memperkuat cara pemeliharaan yang lebih efektif dan hemat energi. Inisiatif ini sekaligus menjadi bagian dari langkah inovatif perusahaan untuk menekan emisi dan meningkatkan kinerja pembangkitan secara berkelanjutan sehingga manfaatnya dapat dirasakan, baik bagi operasional maupun lingkungan.



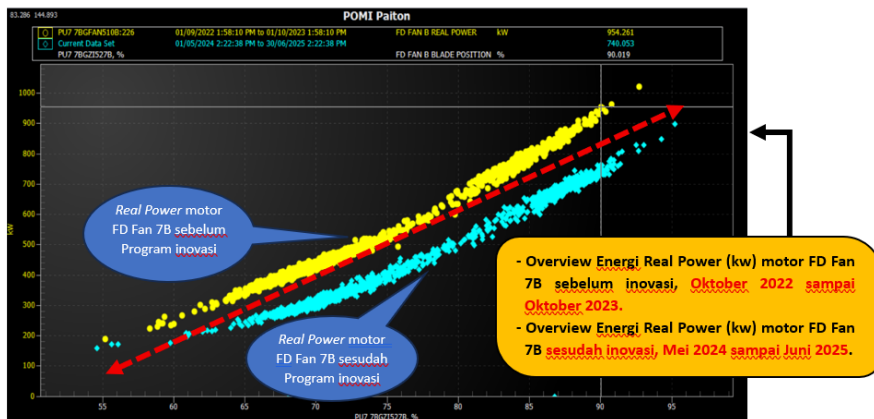
Gambar 15. Perbaikan Bagian Dalam Motor



Gambar 16. Pemeriksaan Bagian Motor



Gambar 17. Perawatan Bagian yang Berputar

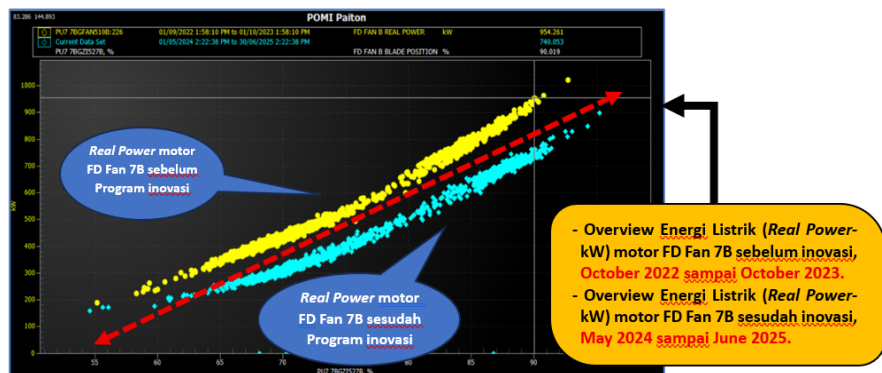
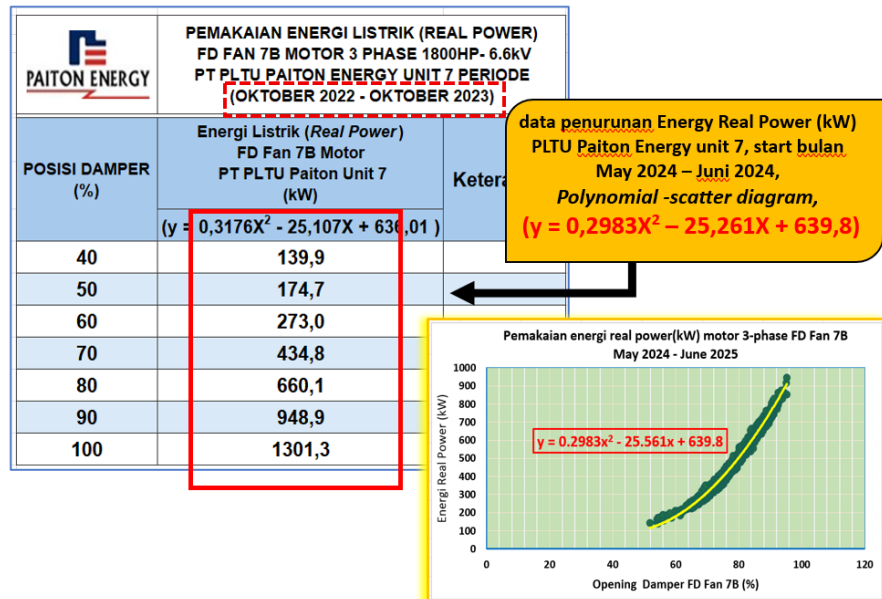


Gambar 18. Perbandingan Pemakaian Energi Sebelum dan Sesudah Perbaikan

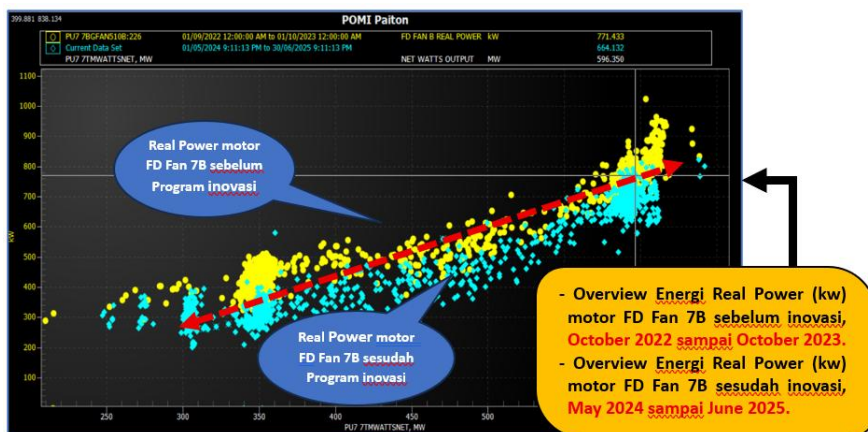
Pekerjaan pemeliharaan motor induksi 3-phase FD Fan 7B dilaksanakan pada masa *outage* Unit 7 selama 3 bulan. Waktu tersebut dipilih karena proses rekondisi membutuhkan lebih dari 20 hari kerja dan harus dikerjakan di bengkel luar. Setelah unit kembali beroperasi, pengamatan terhadap kinerja motor dilakukan selama $\pm$ satu tahun untuk memastikan seluruh perbaikan memberi hasil yang diharapkan dan motor dapat bekerja dengan andal dalam jangka panjang.

Pemantauan kinerja motor FD Fan 7B berkapasitas 1.800 hp pada PLTU PT Palton Energy Unit 7 menunjukkan hasil yang menggembirakan sejak program inovasi dijalankan. Selama satu tahun, rata-rata terjadi penurunan pemakaian energi listrik sekitar 130,3 kW. Angka tersebut diperoleh dari pencatatan besarnya daya yang dikonsumsi motor pada berbagai posisi *damper*, seiring perubahan beban pembangkitan Unit 7. Informasi yang terkumpul kemudian diolah dengan bantuan perangkat digital untuk melihat pola korelasi antara daya motor dan kondisi kerja harian sehingga terlihat jelas bahwa upaya perbaikan yang dilakukan telah membawa dampak positif pada efisiensi energi.

Tabel 4. Penggunaan Daya Motor FD Fan di Berbagai Posisi Damper (Sesudah)



Gambar 19. Perubahan Pemakaian Energi Seiring Waktu



Gambar 20. Perubahan Kondisi Udara Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Tabel 5. Penurunan Energi Listrik Motor FD Fan

PERUBAHAN PENURUNAN ENERGI REAL POWER (kW) PEMAKAIAN DARI FD FAN 7B MOTOR 3 PHASE 1800HP/6.6 Kv PLTU PAITON UNIT 7 SEBELUM INOVASI (OKTOBER 2022 - OKTOBER 2023) DENGAN SESUDAH INOVASI (MAY 2024 - JUNE 2025)				
POSISI DAMPER (%)	Energi Listrik (Real Power) FD Fan 7B Motor PT PLTU Paiton Unit 7 (kW)		Selisih Energi Listrik (Real Power) Motor FD Fan 7B PLTU Paiton Unit 7 (kW)	Keterangan
	Oktober 2022 - Oktober 2023	May 2024 - June 2025		
Nilai perubahan energi listrik (real power-kW), dari sebelum dan sesudah program inovasi di dijalankan		$(y = 0,2983x^2 - 25,261x + 639,8)$		
		94,6	45,25	
		101,5	67,16	
60	273,0	180,0	92,93	
70	434,8	312,2	122,56	
Rata-rata perubahan penurunan Energi listrik (real power-kW) sebagai nilai dasar perhitungan penghematan energi listrik		504,0	156,05	
		755,5	193,4	
		1066,7	234,61	
Rata-rata Penurunan Energi Real Power (kW)			130,3	

B. Mendorong Operasi yang Lebih Efisien dan Rendah Emisi

Program EcoFan-7™ – Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi menjadi salah satu langkah kreatif yang dijalankan di PLTU PT Paiton Energy Unit 7 & 8 untuk membantu menekan emisi gas buang dari proses

pembangkitan listrik. Upaya ini berfokus pada peningkatan efisiensi energi melalui perbaikan cara merawat motor FD Fan 7B sehingga peralatan dapat bekerja lebih ringan, lebih hemat, dan memberi dampak positif bagi lingkungan serta keberlanjutan operasional.

Pelaksanaan kegiatan ini berlangsung saat *outage* Unit 7 pada tahun 2024 dengan mengubah cara merawat motor tegangan tinggi, dari pembersihan terbatas di lokasi menjadi proses rekondisi penuh di *workshop* eksternal. Perubahan cara kerja tersebut memberi kesempatan untuk membenahi bagian-bagian penting, seperti rotor, *winding*, *bearing*, dan sistem pendingin, sekaligus memastikan motor melewati serangkaian pengecekan kelistrikan yang mengacu pada standar yang biasa digunakan di industri. Hasilnya, motor kembali siap beroperasi dengan kondisi yang jauh lebih meyakinkan.

Rekondisi menyeluruh yang dilakukan pada motor FD Fan 7B membawa hasil yang terasa nyata. Motor kini bekerja lebih ringan, suhu operasinya lebih stabil, dan keseluruhan prosesnya berjalan dengan lebih lancar. Perbaikan ini memberi dampak langsung pada berkurangnya kebutuhan listrik untuk menggerakkan motor sehingga pemakaian energi menjadi lebih hemat tanpa mengurangi kinerja yang dibutuhkan.

Penurunan konsumsi energi listrik tersebut dapat diterjemahkan ke besaran pemakaian daya (kWh), lalu dihitung kembali menjadi penghematan energi (GJ) dan penurunan emisi (ton CO₂). Cara ini membantu menggambarkan seberapa besar jejak positif yang dihasilkan EcoFan-7™, sekaligus memperlihatkan kontribusinya terhadap upaya mengurangi emisi pembangkitan secara lebih berkelanjutan.

Upaya menurunkan emisi dan biaya operasional di PLTU PT Paiton Energy Unit 7 mendapat dorongan besar melalui perubahan cara perawatan motor listrik 3-phase tegangan tinggi pada FD Fan 7B. Perubahan ini lahir dari kebutuhan untuk membuat motor bekerja lebih ringan, lebih efisien, dan lebih stabil sehingga pemakaian energi listriknya dapat ditekan tanpa mengurangi keandalan proses pembangkitan. Setiap langkah yang ditempuh diarahkan untuk memastikan motor mampu beroperasi dengan konsumsi energi yang lebih rendah karena

berkurangnya beban listrik akan langsung berdampak pada turunnya emisi dari penggunaan energi internal pembangkit.

1. Penghematan Energi dan Berkurangnya Polusi

Penyusunan informasi mengenai potensi penurunan emisi dan penghematan biaya bertujuan memberi gambaran menyeluruh tentang manfaat yang dihasilkan. Proses ini tidak hanya menyoroti angka penghematan, tetapi juga menggambarkan perubahan nyata yang terjadi setelah motor kembali bekerja dalam kondisi terbaiknya. Penurunan pemakaian daya listrik pada motor berkapasitas 1.800 Hp 6,6 kV menjadi titik awal perhitungan. Rata-rata pengurangan real power kemudian diubah ke satuan energi (GJ) sehingga besarnya penghematan dapat dilihat lebih jelas dan mudah dipahami. Hasil perhitungan tersebut memberikan cerminan tentang seberapa jauh langkah efisiensi ini berkontribusi terhadap upaya menjaga lingkungan sekaligus menekan biaya operasional pembangkit.

Tabel 6. Penghematan Energi, Batu Bara, dan Biaya

TOTAL PENGHEMATAN STATION 7&8			
Tahun	Penghematan (GJ)	Penghematan Batu bara (ton)	Penghematan (Rp)
2024 (May - Des)	2757,77	167,63	176.008.424
2025-Jun	2037,37	123,84	130.030.713

Tabel 7. Pengurangan Emisi dan Nilai Penghematan Tahun 2024

Parameter	Penurunan Beban Emisi 2024 (Mei - Desember)	Penghematan (Rp)
CO ₂ eq (ton)	699,444	20.983.315
SO ₂ (ton)	0,0663	14.161.570
NO _x (ton)	0,6740	70.622.410
PM (ton)	0,0306	36.885.190

Tabel 8. Pengurangan Emisi dan Dampak Penghematan Tahun 2025

Parameter	Penurunan Beban Emisi 2025 (Januari- Juni)	Penghematan (Rp)
CO ₂ eq (ton)	515,820	15.474.602
SO ₂ (ton)	0,0555	11.860.736
NO _x (ton)	0,4812	50.416.240
PM (ton)	0,0242	29.198.157

Informasi kuantitatif pada program ini merujuk pada hasil perhitungan LCA 2024 yang telah digunakan PT Paiton Energy untuk memasukkan inovasi EcoFan-7™ – Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi ke dalam proses kerja perusahaan. Upaya ini diwujudkan dengan mengubah sistem pemeliharaan motor FD Fan yang sebelumnya bersifat konvensional menjadi rekondisi menyeluruh yang berfokus pada penghematan energi. Perubahan tersebut tidak hanya membuat kinerja motor semakin andal, tetapi juga memberi keuntungan tambahan berupa perubahan rantai nilai, peningkatan kualitas layanan produk, dan dorongan positif terhadap perilaku yang lebih hemat energi.

2. Menata Ulang Pemeliharaan

Inovasi EcoFan-7™ – Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi membawa angin segar bagi cara kerja pemeliharaan peralatan kelistrikan perusahaan. Perubahan yang terjadi terasa kuat terutama pada motor listrik 3-phase tegangan tinggi di FD Fan 7B karena sistem yang sebelumnya berjalan biasa saja kini bergerak lebih luwes, hemat energi, dan memberi dampak positif bagi upaya menurunkan emisi. Cara baru ini membuat alur kerja terasa lebih teratur sekaligus membuka peluang bagi peningkatan kualitas perawatan di masa mendatang.

Sebelum inovasi dijalankan, pemeliharaan motor hanya dilakukan secara terbatas dan lebih berfokus pada pembersihan serta pemeriksaan ringan tanpa menyentuh bagian dalam mesin secara menyeluruh. Cara kerja seperti ini membuat berbagai gejala penurunan kinerja mudah terlewat sehingga motor berisiko bekerja kurang efisien. Kondisi tersebut

kemudian dapat memicu peningkatan penggunaan energi dan berkontribusi pada bertambahnya emisi.

Perubahan cara merawat motor induksi 3-*phase* tegangan tinggi lewat rekondisi menyeluruh di *workshop* eksternal membawa pergeseran besar pada rantai nilai pemeliharaan. Proses kerja yang sebelumnya terbatas kini berkembang menjadi upaya yang lebih lengkap dan tertata sehingga motor dapat bekerja lebih efisien serta kebutuhan listriknya menurun. Dampaknya terasa langsung pada berkurangnya emisi, sekaligus mendorong kolaborasi yang lebih erat antara tim pemeliharaan, tim teknis, dan pihak luar agar tercipta kerja sama yang saling menguatkan.

Perubahan ini juga meningkatkan kualitas hasil pekerjaan dan membuat pemakaian energi menjadi lebih hemat. Kemampuan para pekerja ikut berkembang karena mereka tidak lagi menunggu masalah muncul, tetapi bergerak lebih sigap berdasarkan kondisi nyata peralatan. Nilai keberlanjutan akhirnya ikut tertanam dalam proses kerja sehingga efisiensi energi dan penurunan emisi menjadi ukuran penting dalam menjalankan kegiatan pemeliharaan.

Penerapan cara pemeliharaan yang lebih menyeluruh dan tertata membawa perubahan besar pada alur kerja perawatan. Kegiatan yang sebelumnya bersifat reaktif kini bergerak menuju pola yang lebih hemat energi dan mampu menekan emisi. Langkah ini turut memperkuat keberlanjutan operasi pembangkitan sehingga setiap upaya perawatan memberi manfaat yang lebih luas bagi kinerja jangka panjang.

3. Energi Turun, Performa Naik

Pelaksanaan program inovasi EcoFan-7™ – Efisiensi *High Voltage Motor* untuk Rendah Emisi membawa PT Paiton Energy pada langkah penting berupa peralihan layanan produk, khususnya pada cara merawat motor induksi tegangan tinggi FD Fan 7B berkapasitas 1.800 hP 6,6 kV di Unit 7. Langkah ini menjadi bagian dari upaya besar perusahaan untuk memperkuat efisiensi energi sekaligus menekan emisi dari proses pembangkitan sehingga operasional tetap andal sekaligus lebih ramah bagi lingkungan.

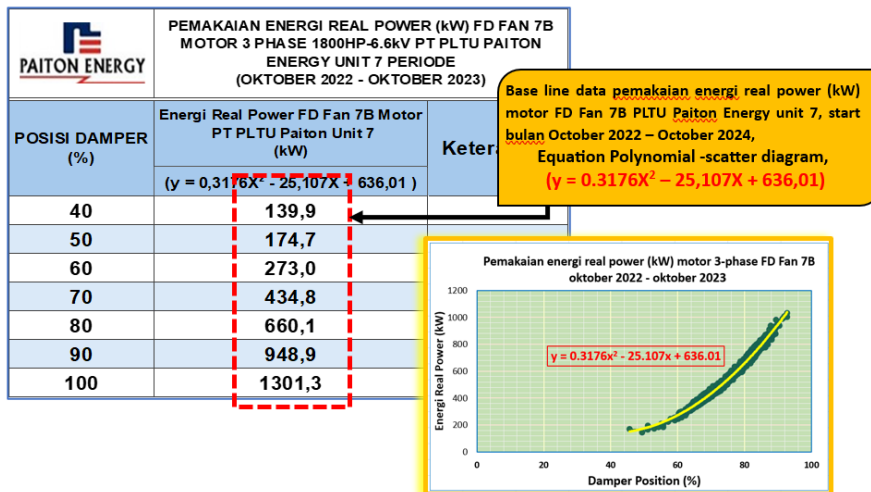
Pada periode *outage* sebelumnya, pemeliharaan hanya dilakukan secara *in-situ* dengan cakupan yang sangat terbatas karena motor tidak dibongkar sepenuhnya. Cara kerja seperti ini membuat bagian-bagian penting, seperti *winding*, *bearing*, dan sistem pendingin, tidak dapat diperiksa secara menyeluruh. Kondisi tersebut memunculkan risiko berkurangnya performa dan efisiensi motor sehingga potensi gangguan operasional pun meningkat.

Sebagai upaya untuk meningkatkan mutu layanan, perusahaan memilih untuk melakukan rekondisi menyeluruh pada motor induksi tegangan tinggi FD Fan 7B di *workshop* eksternal saat *outage* berikutnya. Langkah ini memberi kesempatan untuk merapikan setiap bagian motor secara lebih terarah, mulai dari pembersihan dan pemulihan stator serta rotor, penggantian *bearing* beserta perbaikan sistem pendinginnya, pembaruan isolasi lilitan agar tetap kuat menahan tegangan, hingga rangkaian pengecekan kelistrikan yang memastikan motor kembali bekerja dengan aman dan dapat diandalkan.

Perubahan layanan ini membawa hasil yang terasa, yaitu turunnya penggunaan listrik sekitar ± 130.000 Watt yang ikut membantu mengurangi emisi CO₂, SO₂, NO_x, dan PM. Penghematan tersebut tidak hanya menurunkan beban lingkungan, tetapi juga memperkuat keandalan sistem pembangkitan sekaligus mendorong tercapainya tujuan perusahaan dalam efisiensi energi dan pengendalian udara yang lebih bersih.

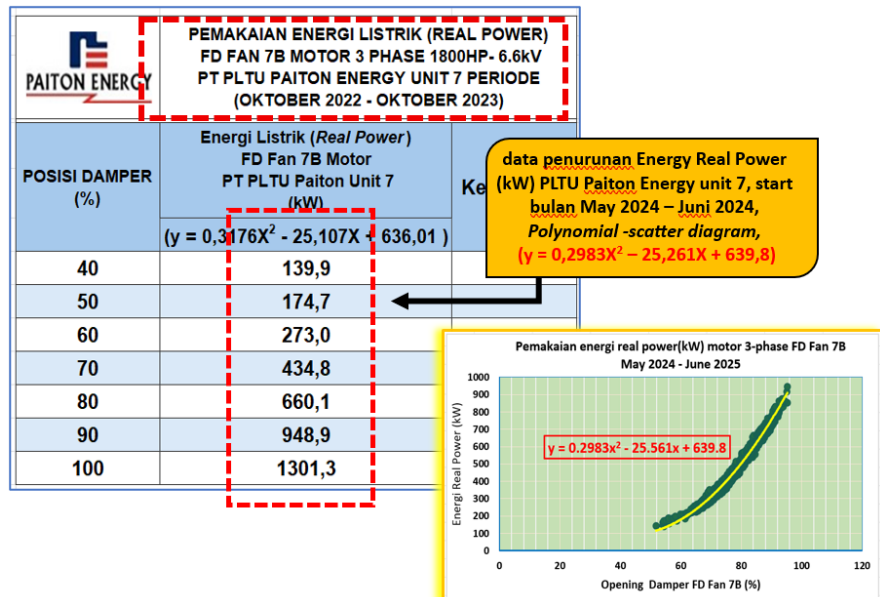
Sebagai langkah untuk memastikan dampak inovasi terasa nyata, tim melihat kembali jejak kerja motor FD Fan 7B dengan memperhatikan korelasi antara posisi *damper* dan perubahan beban pembangkit. Catatan penggunaan listrik satu tahun dijadikan acuan awal, lalu dibandingkan dengan kondisi terbaru setelah perbaikan. Proses ini membantu menggambarkan pola pemakaian energi secara lebih jelas sehingga terlihat seberapa besar penurunan yang terjadi. Hasil pengamatan tersebut menjadi pegangan penting untuk menilai kontribusi nyata inovasi terhadap penghematan energi sekaligus menurunkan emisi.

Tabel 9. Konsumsi Energi Motor FD Fan Sesuai Posisi Damper (Sebelum)



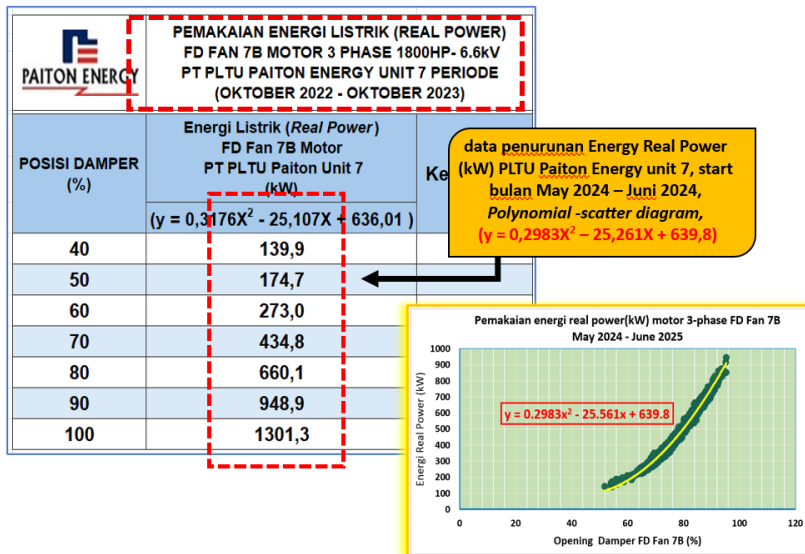
Informasi penghematan energi listrik dari motor induksi 3-phase FD Fan 7B setelah program inovasi diterapkan diintegrasikan dari masa operasi selama satu tahun. Informasi tersebut kemudian dibandingkan dengan perubahan posisi *damper* yang mengikuti beban pembangkit sehingga terlihat pola pemakaian energi sebelum dan sesudah perbaikan dilakukan. Pola yang muncul dari proses ini menjadi dasar untuk menghitung besarnya penghematan yang berhasil dicapai.

Tabel 10. Pemakaian Energi Listrik Motor FD Fan
Berdasarkan Posisi Damper (Sesudah)

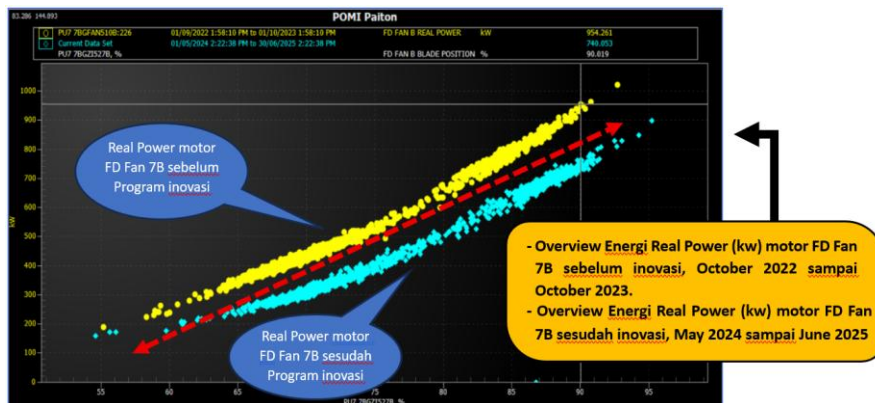


Perubahan pemakaian energi listrik pada motor FD Fan 7B berkapasitas 1.800 HP – 6,6 kV di Unit 7 PLTU PT Paiton Energy terlihat jelas setelah sistem pemeliharaan diperbarui saat unit memasuki masa *outage*. Waktu henti yang cukup panjang memberi kesempatan untuk melakukan rekondisi menyeluruh sehingga kinerja motor kembali pulih. Penerapan pembaruan ini menghasilkan penurunan daya rata-rata sekitar 130 kW. Jumlah tersebut kemudian dihitung menjadi total penghematan sekitar 1.331.982,72 kWh selama satu tahun, berdasarkan pengolahan informasi operasional yang menunjukkan pola penurunan konsumsi secara konsisten.

Tabel 11. Rata-Rata dan Penurunan Real Power FD Fan



Perubahan pemakaian energi listrik pada Motor 3-phase FD Fan sebelum dan sesudah program inovasi diperoleh dari *software* PI-Processbook dan EtaPRO – *Asset Performance and Condition Monitoring*. Informasi penggunaan *real power* motor FD Fan 7B kemudian dicocokkan dengan perubahan bukaan *damper* yang mengikuti beban pembangkit (MW) sehingga terlihat perbedaan nyata antara kondisi sebelum perbaikan dan setelah upaya peningkatan kinerja dilakukan.



Gambar 21. Perubahan Kualitas Udara di Dalam Boiler

4. Perubahan Kecil yang Menghasilkan Efisiensi Besar

PLTU PT Paiton Energy Unit 7 dan 8 terus berupaya menekan konsumsi *houseload* dengan memaksimalkan penggunaan energi pada peralatan elektrikal. Salah satu langkah yang menonjol terlihat pada sistem motor 3-phase FD Fan 7B berkapasitas 1.800 hp – 6,6 kV di Unit 7, dengan menata ulang cara merawat dan mengoperasikannya agar lebih hemat energi. Pada *outage* Unit 7 di tahun-tahun sebelumnya, perawatan motor FD Fan masih dilakukan secara *in-situ* sehingga akses ke bagian dalam motor sangat terbatas. Kondisi tersebut membuat beberapa potensi gangguan tidak sepenuhnya terpantau dan kinerja motor belum mencapai tingkat efisiensi terbaiknya.

Pengaturan aliran udara pada FD Fan bergantung pada sistem *dampers* yang membuka dan menutup secara otomatis mengikuti naik turunnya beban pembangkitan. Saat beban unit meningkat, bukaan *dampers* ikut melebar sehingga motor FD Fan harus bekerja lebih berat dan penggunaan energi listrik pun bertambah. Korelasi antara bukaan *dampers* dan kebutuhan daya motor berjalan searah sehingga perubahan kecil pada bukaan dapat langsung terlihat pada jumlah energi yang dipakai.

Rekondisi menyeluruh terhadap motor FD Fan 7B dilakukan di *workshop* eksternal setelah motor dilepas dari sistem saat *outage* Unit 7 pada tahun 2024. Proses ini mengikuti acuan teknis seperti IEEE Std 43-2013 dan referensi EPRI sehingga setiap bagian motor—mulai dari lilitan, *bearing*, sistem pendingin, hingga pengecekan kelistrikan—dapat dirapikan dengan lebih menyeluruh dan terarah. Upaya ini memberi kesempatan bagi motor untuk kembali beroperasi dengan kondisi yang jauh lebih andal.

Langkah tersebut juga membawa perubahan besar pada cara tim menjalankan tugas sehari-hari. Mereka yang sebelumnya cenderung menunggu gangguan kini mulai merencanakan perawatan secara lebih matang. Pekerjaan yang dulu hanya berfokus pada bagian luar kini dilakukan secara lebih lengkap. Pengambilan keputusan pun menjadi lebih tertata karena berlandaskan hasil pengecekan yang jelas, bukan sekadar pengalaman. Operator pun semakin memahami keterkaitan

antara bukaan *damper* dan pemakaian daya motor sehingga pengoperasian dilakukan dengan lebih cermat demi menjaga efisiensi energi.

Perubahan perilaku ini memberi dampak nyata berupa turunnya pemakaian energi listrik, berkurangnya emisi, dan penghematan biaya operasional. Penggunaan energi yang lebih rendah juga membantu memperpanjang usia motor karena perangkat bekerja pada suhu yang lebih stabil dan beban yang tidak terlalu berat. Selain manfaat tersebut, keandalan sistem pembangkitan ikut meningkat karena motor yang lebih efisien mampu menjaga kestabilan tekanan *furnace* dan aliran udara pembakaran di dalam *boiler*. Frekuensi gangguan operasional pun menurun sehingga ketersediaan unit menjadi lebih baik. Semua ini membawa keuntungan jangka panjang, terutama karena kebutuhan perbaikan mendadak dan penggantian komponen penting semakin jarang terjadi.

BAB 4

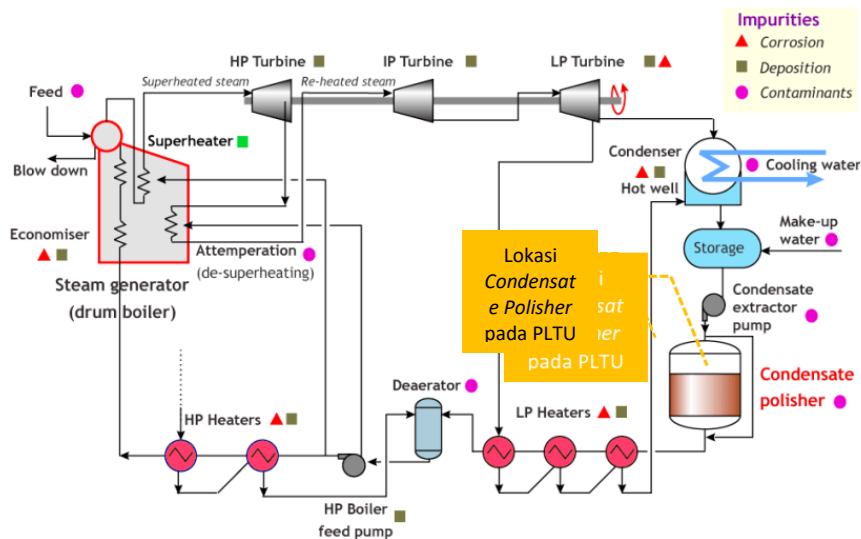
TRANSFORMASI HIJAU DALAM PEMURNIAN AIR

A. Regenerasi Resin: Tantangan dan Perubahannya

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara bekerja lewat rangkaian proses yang saling bergantung, mulai dari alur bahan bakar, pengolahan air dan uap, pengelolaan gas buang, penanganan limbah, hingga penyaluran listrik ke gardu PLN. Setiap bagian perlu berfungsi dengan baik agar listrik yang dihasilkan tetap bernilai tinggi dan mampu memenuhi kebutuhan pelanggan. Di antara berbagai bagian penting tersebut, *condensate polisher* menjadi salah satu elemen yang memegang peran besar karena membantu menjaga kualitas air yang beredar dalam siklus pembangkitan sehingga keseluruhan proses tetap berjalan lancar dan stabil.

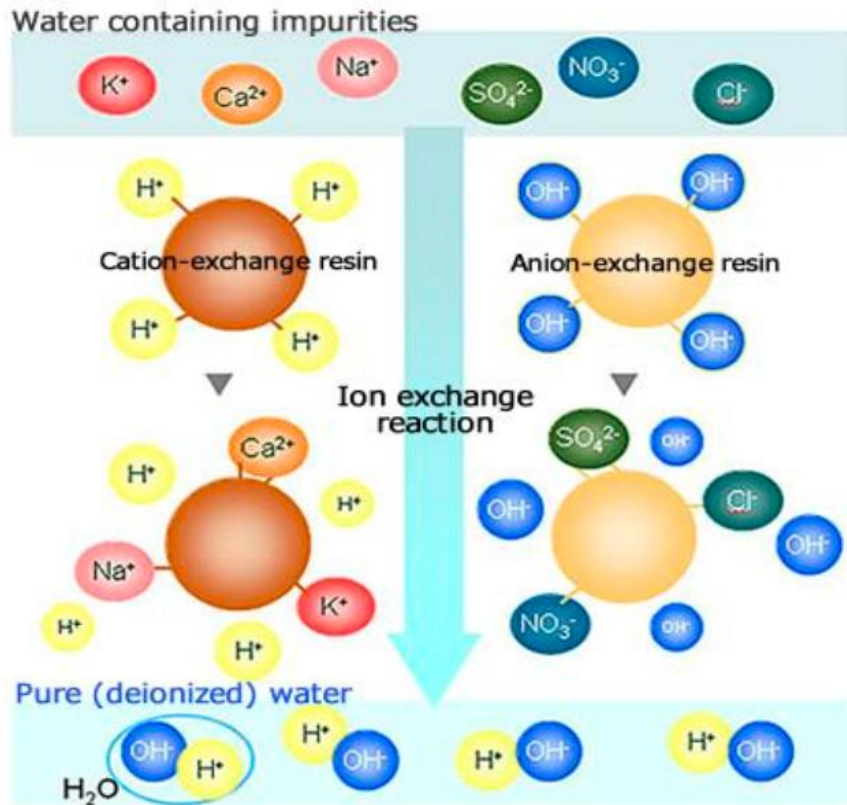
Condensate polisher merupakan unit yang bertugas memurnikan air kondensat, yaitu air hasil pengembunan uap dari turbin yang kemudian dialirkan kembali sebagai air umpan *boiler*. Perannya sangat penting karena menjaga air tetap bersih dari korosi, kebocoran kondensor, serta berbagai pengotor yang bisa menurunkan kinerja peralatan seperti *boiler*, turbin, pipa, dan sistem pendingin. Air yang tidak terjaga mutunya dapat menimbulkan karat, kerak, dan menurunkan kemampuan peralatan bekerja secara efisien. Keberadaan *condensate polisher* menjadi bagian yang tak terpisahkan dari upaya menjaga keandalan dan keberlangsungan

operasi PLTU. Siklus air yang bergerak di dalam sistem dapat dilihat secara sederhana pada Gambar 22.



Gambar 22. Alur Air dan Uap di Pembangkit

Condensate polisher bekerja seperti penyaring khusus yang membantu membersihkan air kondensat sebelum dipakai kembali. Bejana ini berisi dua jenis resin. Resin pertama bertugas menangkap zat bermuatan positif, seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Fe^{2+} , dan NH_4^{+} , lalu menukarnya dengan H^{+} . Resin kedua menangkap zat bermuatan negatif, seperti Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , dan SiO_3^{2-} , lalu menukarnya dengan OH^{-} . Ketika kedua proses itu berlangsung, H^{+} dan OH^{-} bertemu dan membentuk H_2O sehingga air yang keluar menjadi jauh lebih murni. Air kondensat yang melewati resin perlahan kehilangan zat yang tidak dibutuhkan dan berubah menjadi air yang lebih bersih serta aman untuk digunakan kembali.



Gambar 23. Proses Penyaringan Air

Seiring berlalunya waktu, resin kation dan anion yang bekerja menyaring air perlahan-lahan penuh oleh berbagai zat pengotor. Ketika kapasitasnya mencapai batas, proses penyaringan tidak lagi berlangsung sebagaimana mestinya. Zat pengotor yang seharusnya tertahan justru ikut terbawa bersama aliran air kondensat melalui *condensate polisher*. Keadaan ini bisa membuat tingkat konduktivitas air keluaran meningkat cukup tajam dan berisiko mengganggu kualitas air yang seharusnya tetap bersih.

Regenerasi resin jenuh menjadi langkah penting untuk mengembalikan daya kerja resin agar tetap bisa berfungsi dengan baik. Proses ini, meski sangat dibutuhkan, membawa sejumlah tantangan.

Penggunaan air bersih—terutama air demineralisasi—bertambah karena setiap siklus memerlukan tahap pencucian. Kegiatan tersebut juga menimbulkan beban pencemar berupa TSS dan TDS yang kemudian harus ditangani oleh Instalasi Pengolah Air Limbah Utama. Pengeluaran operasional ikut meningkat karena ada kebutuhan bahan kimia, baik untuk proses regenerasi maupun untuk mengolah air limbah. Di samping itu, terdapat risiko ketidaksesuaian terhadap aturan lingkungan ketika beban pencemar melonjak sehingga pengawasan dan pengendalian menjadi sangat penting agar proses berlangsung aman dan tetap menghormati ketentuan yang berlaku.

Catatan PT Paiton Energy menunjukkan bahwa satu siklus regenerasi *condensate polisher* membutuhkan air bersih sekitar 300–500 m³, memakai bahan kimia hingga 8.000 kg, dan menghasilkan TSS sekitar 100 ppm. Penggunaan mode *Hydrogen Cycle* membuat masa pakai *condensate polisher* menjadi lebih singkat sehingga media di dalamnya lebih cepat jenuh dan proses regenerasi harus dilakukan lebih sering. Hal ini bukan hanya menambah kebutuhan air dan bahan kimia, tetapi juga meningkatkan volume limbah yang harus ditangani.

Tabel 12. Potensi Kerugian Hydrogen Cycle vs Ammonia Cycle

Potensi Kerugian	Mode Operasi <i>Hydrogen Cycle</i> (H-OH Operation)
Penggunaan Air Bersih Tinggi/Boros karena <i>condensate polisher</i> cepat mengalami kejenuhan dan cepat dilakukan regenerasi	 
Volume air limbah dari cucian dan <i>backwash</i> proses regenerasi tinggi dan menghasilkan timbulan limbah TSS seiring jumlah siklus regenerasi dalam periode waktu tertentu	 

Potensi Kerugian	Mode Operasi <i>Hydrogen Cycle (H-OH Operation)</i>
Kenaikan biaya operasional, penggunaan bahan kimia yang meningkat untuk regenerasi <i>condensate polisher</i> dan biaya operasional IPAL WWTP	 
Adanya potensi melebihi parameter Baku Mutu pada keluaran WWTP karena fluktuasi air limbah yang masuk WWTP	 

Tabel di bawah ini merangkum informasi penggunaan air bersih pada tahun 2023 untuk proses regenerasi *condensate polisher*, termasuk jumlah bahan kimia yang terpakai dan kadar TSS yang dihasilkan. Rekap ini memberi gambaran umum tentang kebutuhan air dan material pendukung sepanjang tahun, sekaligus menunjukkan besarnya upaya yang diperlukan agar peralatan tetap bekerja dengan baik dan kualitas air tetap terjaga.

Tabel 13. Regenerasi Condensate Polisher per Tahun

Tahun	Mode Operasi <i>Condensate Polisher</i>	Penggunaan Air Bersih	Penggunaan Bahan Kimia	Pencemar TSS
		m ³ /tahun	ton/tahun	ton/tahun
2023 (baseline)	<i>Hydrogen Cycle(H-OH operation)</i>	27.820	704	1,798

Permasalahan tersebut mendorong lahirnya sebuah gagasan untuk menekan pemakaian air bersih, mengurangi kebutuhan bahan kimia, dan menurunkan beban pencemar TSS. Perkembangan cara kerja *condensate polisher* dan kemajuan pengetahuan saat ini membuka peluang besar untuk mengadopsi mode operasi *Ammonia Cycle*. Mode ini diharapkan mampu memperpanjang usia pakai *Condensate Polisher* tanpa

mengurangi perannya dalam menjaga kejernihan air pada siklus PLTU. Selain itu, mode ini juga berpotensi membantu menghemat air bersih, menekan beban pencemar TSS, dan menjaga agar beban yang masuk ke WWTP tidak melonjak secara tiba-tiba.

Program inovasi ini selaras dengan arahan yang tercantum pada hasil perhitungan Daur Hidup (LCA) tahun 2024 yang menekankan pentingnya menjadikan kajian tersebut sebagai bahan pembelajaran untuk terus memperbaiki pengelolaan lingkungan. Arahan itu juga mendorong setiap unit kerja agar lebih peka melihat peluang peningkatan kinerja lingkungan, terutama yang berkaitan dengan upaya mengurangi berbagai dampak yang muncul. Semangat tersebut kemudian diterjemahkan melalui rangkaian tindakan yang berfokus pada penghematan air serta penurunan kadar TSS sehingga manfaatnya dapat dirasakan lebih luas bagi keberlanjutan operasional ataupun lingkungan sekitar.

B. Menuju Operasi yang Lebih Bersih dan Efisien

Operasional *Condensate Polisher* pada industri PLTU umumnya masih mengandalkan *Hydrogen Cycle* (H-OH) karena dianggap mampu menjaga kualitas air pada sistem yang mudah terpapar kontaminan, seperti masuknya air laut, endapan pengerakan, ataupun sisa korosi. Pilihan ini memang lama dianggap cukup andal, tetapi penggunaan air bersih dan bahan kimia yang tinggi dan meningkatnya limbah TSS membuatnya tidak lagi menjadi satu-satunya cara yang dianggap efektif untuk digunakan saat ini.

Gagasan untuk menerapkan mode operasi *Ammonia Cycle* di PT Paiton Energy tumbuh dari perpaduan kemampuan operasional yang sudah mapan dan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. PT Paiton Energy telah menunjukkan ketangguhan dalam mengelola siklus air dengan dukungan peralatan yang andal, tercermin dari berkurangnya gangguan terkait pasokan air dan penggunaan pengolahan air *boiler* yang sudah sangat maju. Tim operasional mampu menghasilkan air penambah dengan kualitas sangat tinggi, hampir menyerupai air murni. Selain itu, tim *engineering* dan tim

maintenance sukses menekan gangguan akibat kebocoran air laut pada kondensor selama beberapa tahun terakhir sehingga kualitas air yang mengalir menuju *condensate polisher* tetap stabil dan rendah kontaminan.

Pengolahan air pada *boiler* sudah menggunakan AVT dan CWT, dua cara perawatan yang dikenal andal dalam menjaga pipa tetap terlindungi dari korosi. Keduanya bekerja dengan baik sehingga kualitas air di dalam siklus *boiler* tetap stabil dari waktu ke waktu. Stabilitas inilah yang menjadi syarat penting untuk mendukung keberhasilan operasi *Ammonia Cycle* dan memastikan seluruh rangkaian peralatan dapat berfungsi dengan aman serta tahan lama.

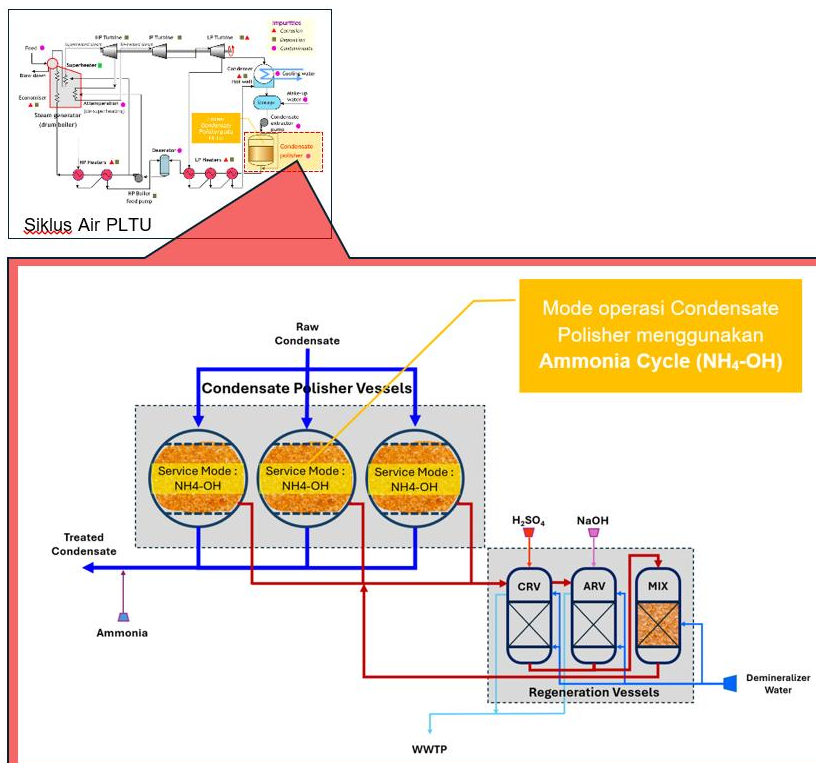
Gagasan untuk beralih ke mode operasi *Ammonia Cycle* kemudian diperdalam dengan memahami berbagai pengalaman dan sumber pengetahuan yang relevan. Cara kerja *Ammonia Cycle* telah terbukti membantu memperpanjang usia pakai *Condensate Polisher*, mengurangi kebutuhan bahan kimia, dan menekan munculnya endapan TSS berupa *sludge* tanpa mengorbankan peran penting alat tersebut dalam menjaga kemurnian air pada proses pembangkitan listrik. Terobosan ini menjadi langkah berarti yang tidak hanya meningkatkan kinerja operasional, tetapi juga menghadirkan manfaat bagi lingkungan dan biaya operasional jangka panjang.

Gagasan inovasi ini terinspirasi dari berbagai sumber bacaan yang mengupas pengalaman serta pemikiran para praktisi di bidang energi dan pengolahan air. Salah satunya mengulas pemahaman mengenai aliran fluida dan perilakunya pada sistem pembangkit listrik berbasis turbin gas. Ada juga tulisan yang menggambarkan upaya memodifikasi proses pengolahan air umpan *boiler* agar lebih ramah lingkungan. Selain itu, terdapat panduan yang menjelaskan dampak kondisi operasi pada proses pemurnian kondensat. Ketiga referensi tersebut memberi wawasan yang memperkaya sudut pandang dan membantu membentuk arah pengembangan inovasi ini.

Pertimbangan tersebut mendorong PT Paiton Energy untuk mengubah mode operasi *condensate polisher* menjadi *Ammonia Cycle*. Langkah ini membuka peluang besar untuk menghemat penggunaan air

bersih, khususnya air demineralisasi yang biasanya dibutuhkan saat proses regenerasi. Selain itu, pemakaian bahan kimia dapat ditekan, sedangkan jumlah TSS dan limbah B3 yang muncul dari kegiatan operasional berkurang secara signifikan. Upaya ini menjadi bagian dari komitmen perusahaan untuk bekerja lebih efisien sekaligus menjaga lingkungan.

Penggunaan mode operasi *Ammonia Cycle Condensate Polisher* pada sistem air *condensate* ditampilkan pada Gambar 24, sedangkan Tabel 14 memperlihatkan gambaran keuntungan dan efektivitas yang bisa diperoleh dari penerapannya. Kedua tampilan tersebut membantu pembaca memahami bagaimana mode operasi ini bekerja dan manfaat apa saja yang dapat dirasakan ketika sistem berjalan dengan kondisi yang lebih terjaga.



Gambar 24. Cara Kerja Pembersihan Air Menggunakan Amonia

Tabel 14. Keuntungan Mode Ammonia Cycle

Potensi Keuntungan	Mode Operasi Ammonia Cycle (NH ₄ -OH Operation)
Penggunaan air bersih Lebih Hemat karena operasional waktu <i>service condensate polisher</i> lebih lama dan regenerasi lebih jarang	 
Total volume air limbah dari cucian dan <i>backwash</i> proses regenerasi lebih rendah seiring penurunan jumlah siklus regenerasi dalam periode waktu tertentu	 
Efisien biaya operasional karena penggunaan bahan kimia lebih kecil baik untuk regenerasi dan operasional IPAL WWTP	 
Kualitas air limbah dapat terjaga dengan baik karena sumber limbah yang masuk WWTP minim fluktuasi sehingga parameter beban pencemar pada keluaran WWTP menjadi lebih memenuhi baku mutu	 

C. Langkah Kecil yang Mengubah Pengolahan Air

Perubahan yang diterapkan pada sistem lama dilakukan dengan mengalihkan cara kerja dari *Hydrogen Cycle* ke *Ammonia Cycle*. Langkah ini membuat proses menjadi lebih hemat air saat regenerasi berlangsung sehingga kebutuhan energi untuk menghasilkan air bersih di instalasi pengolahan air ikut menurun. Biaya operasional dan penggunaan bahan kimia pada *condensate polisher* juga berkurang, sedangkan efisiensi instalasi pengolah air limbah utama meningkat. Penerapan cara kerja baru ini turut membantu menekan jumlah TSS sehingga timbunan *sludge* sebagai limbah B3 dapat berkurang signifikan.

Penerapan *Ammonia Cycle condensate polisher* memberi serangkaian manfaat nyata bagi PT Paiton Energy. Dampak positifnya terlihat dari perbaikan kualitas operasi, peningkatan keandalan peralatan, dan penghematan yang muncul berkat proses yang berjalan lebih stabil. Seluruh manfaat tersebut telah dirangkum secara ringkas dan mudah dipahami pada Tabel 15 sehingga pembaca dapat melihat gambaran hasilnya dengan jelas.

Tabel 15. Perubahan Kinerja Hydrogen Cycle dan Ammonia Cycle

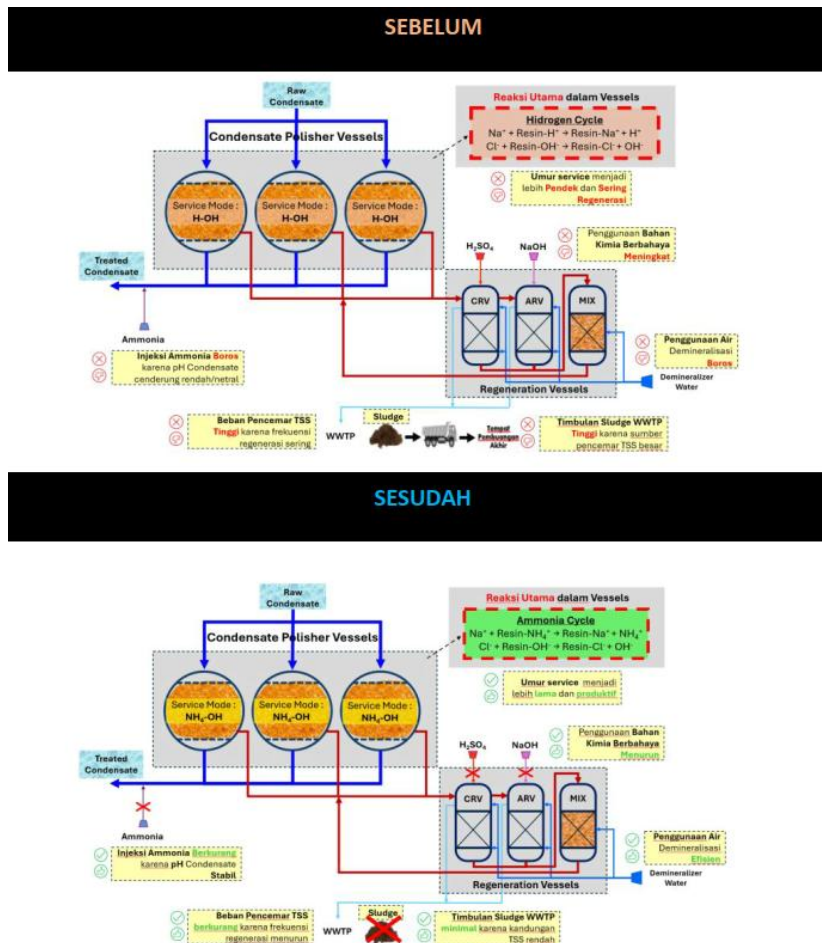
Parameter	Sebelum Perubahan (<i>Hydrogen Cycle</i>)	Sesudah Perubahan (<i>Ammonia Cycle</i>)	Dampak
Frekuensi Regenerasi	Lebih sering (<i>service life</i> resin pendek sekitar 5 hari)	Lebih jarang (<i>service life</i> resin lebih lama sekitar 15 – 20 hari)	Menurunkan konsumsi air bersih (Air Demineralisasi)
Pemakaian Air Demin (m³/bulan)	Lebih boros sekitar 8 -10% penggunaan air. (kalkulasi total jumlah regenerasi 8 - 10 <i>cycle</i> dalam sebulan)	Lebih hemat sekitar 10% penggunaan air. (kalkulasi total jumlah regenerasi 4 - 5 <i>cycle</i> dalam sebulan)	% efisiensi penggunaan air
Konsumsi Bahan Kimia	Lebih tinggi (penggunaan bahan kimia asam, basa dan konsumsi Ammonia untuk injeksi pengontrol pH)	Lebih rendah (penurunan penggunaan bahan kimia regenerasi seiring turunnya frekuensi regenerasi dan kecilnya konsumsi Ammonia untuk injeksi pengontrol pH karena keluaran air <i>Condensate Polisher</i> masih mempunyai kandungan ammonia)	Penghematan biaya bahan kimia

Parameter	Sebelum Perubahan (<i>Hydrogen Cycle</i>)	Sesudah Perubahan (<i>Ammonia Cycle</i>)	Dampak
Timbulan Limbah TSS dan Sludge	Lebih Tinggi (cepat meningkatkan level <i>sludge holding tank</i> WWTP dan jam operasional <i>Belt Press</i> serta pembersihan <i>Equalization Basin</i> di WWTP) (1.695 Ton <i>cleaning sludge Eq. Basin</i>)	Lebih Rendah (level <i>sludge holding tank</i> tidak banyak bertambah, <i>belt press standby</i> dan volume hasil pembersihan <i>Equalization Basin</i> WWTP cukup rendah) (1.193 Ton <i>cleaning sludge Eq. Basin</i>)	Menurunkan biaya <i>handling sludge</i> & volume limbah B3
<i>Preventive Maintenance</i> Peralatan WWTP	Sering terjadi penumpukan lumpur /<i>sludge</i> pada di <i>lamella clarifier</i> WWTP yang meningkatkan periode pembersihan lumpur/<i>sludge lamella clarifier</i> WWTP (Jadwal Preventif Maintenance <i>Cleaning Lamella</i> 1x / minggu)	Air limbah yang masuk dan di proses WWTP cenderung lebih ringan beban pencemarnya sehingga frekuensi pembersihan lumpur/<i>sludge lamella clarifier</i> WWTP jarang dilakukan (Jadwal Preventif <i>Maintenance Cleaning Lamella</i> 1x / bulan)	Meningkatkan <i>kontinuitas operasi</i> WWTP

Parameter	Sebelum Perubahan (<i>Hydrogen Cycle</i>)	Sesudah Perubahan (<i>Ammonia Cycle</i>)	Dampak
Biaya Produksi Air Bersih	Jam operasional <i>water treatment plant</i> khususnya DWRO lebih tinggi (<i>Running Hours</i> DWRO A: 2.385 jam, DWRO B: 5.529 jam)	Jam operasional <i>water treatment plant</i> lebih rendah (<i>Running Hours</i> DWRO A: 2.212 jam, DWRO B: 3.933 jam)	Penghematan biaya Operasional Produksi
Keselamatan Kerja (K3)	Meningkatkan risiko kecelakaan kerja (Pekerja lebih sering kontak langsung dengan peralatan yang berbahaya selama melakukan regenerasi <i>condensate polisher</i> , kontak langsung dengan lumpur selama melakukan aktivitas pembersihan atau perbaikan)	Menurunkan risiko kecelakaan kerja, (seiring semua efek berantai dari kegiatan regenerasi <i>condensate polisher</i> sudah berkurang karena operasional efektif)	Lingkungan kerja lebih aman

D. Dari *Hydrogen Cycle* ke *Ammonia Cycle*

Sebelum program inovasi dijalankan, *condensate polisher* bekerja dengan pola *Hydrogen Cycle* sehingga kinerjanya sangat bergantung pada ketersediaan ion hidrogen pada resin kation. Kondisi ini membuat masa pakainya menjadi singkat dan proses regenerasi harus dilakukan lebih sering. Perbandingan antara cara kerja *Hydrogen Cycle* dan *Ammonia Cycle* terlihat jelas pada ilustrasi yang ditampilkan pada Gambar 25 sehingga membantu memberikan gambaran mengenai perubahan yang terjadi setelah pembaruan dilakukan.



Gambar 25. Perubahan Cara Kerja Sistem Penyaringan Air

Resin kation pada *Ammonia Cycle* bekerja dengan melepaskan ion amonium ketika menangkap kotoran bermuatan positif, seperti natrium. Hal yang sama terjadi pada resin anion yang melepaskan ion hidroksida saat menyaring kotoran bermuatan negatif, seperti klorida dan sulfat. Proses saling bertukar muatan inilah yang membuat kualitas air tetap terjaga. Ringkasan alur kerjanya dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16. Cara Kerja Resin di Condensate Polisher

Resin dalam Condensate Polisher	Proses Pertukaran Ion	Keterangan
Resin Kation (NH ₄ ⁺)	$\text{Na}^+ + \text{Resin-NH}_4^+ \rightarrow \text{Resin-Na}^+ + \text{NH}_4^+$	Resin menangkap kation berbahaya (Na ⁺ , Ca ²⁺) dan melepaskan ion NH ₄ ⁺ yang memang sudah dikehendaki dalam siklus air.
Resin Anion (OH ⁻)	$\text{Cl}^- + \text{Resin-OH}^- \rightarrow \text{Resin-Cl}^- + \text{OH}^-$	Resin menangkap anion berbahaya (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻) dan melepaskan ion OH ⁻ (yang bergabung dengan NH ₄ ⁺ menjadi NH ₄ OH), membantu menjaga pH air boiler.

Siklus air di PLTU PT Paiton Energy menggunakan pola pengolahan yang mengandalkan *All Volatile Treatment* (AVT) dan *Combined Water Treatment* (CWT), dengan amonia sebagai bahan untuk menjaga kestabilan pH. Penggunaan amonia tersebut membuat air kondensat yang beredar di sistem sudah membawa ion amonium sejak awal proses berlangsung.

Saat air melewati *condensate polisher* pada mode *Ammonia Cycle*, kadar amonium tetap terjaga sehingga pH air kondensat berada pada tingkat yang aman untuk mengurangi potensi korosi. Kenaikan kadar kotoran bermuatan positif seperti natrium yang lolos dari proses penyaringan kemudian menjadi tanda bahwa media penyerap mulai

jenuh. Keadaan ini membuat masa pakai *condensate polisher* bisa bertahan lebih lama, sekaligus tetap mampu menjaga mutu air kondensat agar sesuai dengan kebutuhan operasional.

Tabel 17. Perbedaan Kerja AC dan HC

Parameter Kunci	Mode <i>Ammonia Cycle</i> (NH ₄ -OH)	Mode <i>Hydrogen Cycle</i> (H-OH)
Bentuk Resin Kation	R - NH ₄ ⁺ (Amonia)	R - H ⁺ (Hidrogen)
Ion yang dilepaskan	NH ₄ ⁺	H ⁺
Indikator Kejenuhan	Kenaikan kation konduktivitas (dari kebocoran Cl ⁻ dan SO ₄ ²⁻)	Kenaikan <i>Direct Conductivity</i> (dari kebocoran Na ⁺) dan Kenaikan kation konduktivitas (dari kebocoran Cl ⁻ dan SO ₄ ²⁻) Penurunan pH yang tajam (H ⁺ yang berlebihan)
Efek pada Siklus Air	Efisien karena NH ₄ ⁺ adalah bagian dari bahan kimia injeksi <i>treatment</i> AVT/CWT. pH <i>water cycle</i> pada air <i>boiler</i> lebih stabil	Boros & Risiko pH karena H ⁺ yang dilepaskan dapat menurunkan pH air yang masuk ke <i>boiler</i> (risiko korosi).

Jumlah proses regenerasi pada *Condensate Polisher* saat masih memakai mode *Hydrogen Cycle* di tahun 2023 kemudian dibandingkan dengan kondisi setelah beralih ke mode *Ammonia Cycle* pada 2024 dan seterusnya, sebagaimana tercatat pada Tabel 18. Informasi mengenai banyaknya limbah TSS yang muncul dari kedua mode tersebut juga telah dirangkum pada Tabel 19 sehingga perubahan yang terjadi dari satu tahun ke tahun berikutnya dapat terlihat dengan jelas.

Tabel 18. Jumlah Regenerasi dan Konsumsi Demin Water Tahunan

Tahun	Total Jumlah Regenerasi <i>Condensate Polisher</i>			Penggunaan <i>Demin Water</i> untuk Regenerasi(m3)		
	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Sulphonation</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Sulphonation</i>
2023 (<i>baseline</i>)	82	6	0	25.420	2.400	0
2024	75	5	0	23.250	2.000	0
2025*	25	8	4	7.750	3.200	2.000

*) Informasi 2025 sampai bulan Juni

Tabel 19. Perubahan Debit dan Kekeruhan Air CPP

<i>Outlet Condensate Polisher Plant (CPP)</i>						
Bulan	2023 (<i>baseline</i>)		2024		2025*	
	Debit (m ³)	TSS (ton)	Debit (m ³)	TSS (ton)	Debit (m ³)	TSS (ton)
Januari	1.240	0,078	1.860	0,078	2.220	0,012
Februari	3.100	0,203	1.240	0,079	2.170	0,001
Maret	2.790	0,180	1.550	0,100	3.980	0,003
April	2.260	0,145	1.550	0,099	2.620	0,002
Mei	2.880	0,185	2.480	0,159	2.050	0,001
Juni	2.260	0,147	1.860	0,120	1.330	0,009
Juli	2.260	0,148	3.100	0,198		
Agustus	2.480	0,159	2.170	0,137		
September	2.260	0,148	2.480	0,160		
Oktober	2.260	0,147	2.170	0,141		
November	2.170	0,140	1.950	0,124		
Desember	1.860	0,118	2.840	0,185		
Total	27.820	1,798	25.250	1,579	14.370	0,027
Average	2.318	0,150	2.104	0,132	2.395	0,004

*) Informasi 2025 sampai bulan Juni

E. Transformasi Bersih di *Condensate Polisher*

Program inovasi berupa penerapan *Ammonia Cycle Condensate Polisher* untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air regenerasi Unit 7–8

dan menurunkan limbah TSS WWTP membawa perubahan berarti pada rangkaian proses yang saling terhubung di sistem tersebut. Perubahan ini memperlihatkan bagaimana penyempurnaan alur kerja dapat memberi dampak positif bagi beberapa bagian sekaligus sehingga setiap langkah di rantai proses menjadi lebih selaras dan memberikan manfaat yang lebih luas.

Rangkaian kerja *condensate polisher plant* pada mode *Ammonia Cycle* mampu menyederhanakan alur yang sebelumnya memicu munculnya limbah cair dengan parameter TSS pada fasilitas pengolah air limbah utama. Langkah ini tidak hanya membantu mengurangi beban pada sistem pengolahan, tetapi juga menekan jumlah limbah B3 berupa *sludge* dan resin bekas. Hasilnya memberi manfaat ganda, yaitu proses menjadi lebih bersih dan lingkungan kerja semakin terjaga.

Tabel 20. Hasil Tahunan Condensate Polisher

Tahun	Mode Operasi <i>Condensate Polisher</i>	Total Regenerasi <i>Condensate Polisher</i>	Penggunaan <i>Demin Water</i> untuk Regenerasi (m3)			Total Penggunaan <i>Demin Water</i> Regenerasi (m³)
		X (kali)	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Sulphonation</i>	
2023 (baseline)	<i>Hydrogen Cycle</i>	88	25.420	2.400	0	27.820
2024	<i>Ammonia Cycle</i>	80	23.250	2.000	0	25.250
2025*	<i>Ammonia Cycle</i>	37	7.750	3.200	2.000	12.950

*) Informasi 2025 sampai bulan Juni

Tabel 21. Perubahan Jumlah Limbah dan Kotoran Air

Tahun	Mode Operasi Condensate Polisher	Total Debit Outlet Limbah Condensate Polisher	Beban Pencemar TSS
		m ³	Ton
2023 (baseline)	Hydrogen Cycle (H-OH mode)	27.820	1,798
2024	Ammonia Cycle (NH4-OH mode)	25.250	1,579
2025*	Ammonia Cycle (NH4-OH mode)	12.950	0,027

*) Informasi 2025 sampai bulan Juni

Hasil akhir dari program inovasi ini menunjukkan adanya penghematan biaya yang terasa nyata bagi operasional. Jumlah pengurangan beban biaya tersebut menjadi bukti bahwa langkah perbaikan yang dilakukan tidak hanya memperbaiki kinerja peralatan, tetapi juga memberikan manfaat langsung bagi efisiensi perusahaan.

Tabel 22. Penggunaan Air dan Penghematan Biayanya

Tahun	Efisiensi Air	Produksi Listrik	Normalisasi	Biaya Penghematan
	m3	GJ	m3/GJ	Rp
2024	2.570	46.019.409	0,000056	43.526.548
2025*	960	22.162.710	0,000043	16.258.944

**) Informasi 2025 sampai bulan Juni*

Tabel 23. Biaya Produksi Jenis Air

Biaya Produksi	Unit 3	Unit 7&8
	(Rp/m3)	(Rp/m3)
<i>Potable Water</i>	Rp15.226	Rp11.286
<i>Service water</i>	Rp17.588	Rp13.679
<i>Demin Water</i>	Rp18.728	Rp16.936

Tabel 24. Penurunan Beban Pencemar dan Dampak Operasional Tahunan

Tahun	Penurunan Beban Pencemar TSS	Produksi Listrik	Normalitas	Biaya Penghematan
	Ton	GJ	Ton/GJ	Rp
2024	0,219	46.019.409	0,000000005	6.526.170
2025*	0,872	22.162.710	0,000000039	25.948.017

**) Informasi 2025 sampai bulan Juni*

Tabel 25. Kualitas Air dan Perkiraan Biaya Pengolahan

Parameter	Desain Kadar Inlet	Desain Kadar Outlet Baku Mutu	Biaya Investasi Penurunan Beban Pencemar
	mg/L	mg/L	Rp
PO ₄	20	10	11.900.655
TSS	500	100	29.751.637
Fe	10	3	59.503.274

Program Penerapan *Ammonia Cycle Condensate Polisher* Untuk Efisiensi Air Regenerasi dan Penurunan Limbah TSS WWTP memberikan sejumlah nilai tambah yang terasa nyata. Perubahan yang muncul tampak pada rantai nilai yang menjadi lebih ringkas dan efisien, layanan yang dihasilkan menjadi lebih baik serta lebih ramah lingkungan, dan kebiasaan kerja ikut bergerak ke arah yang lebih peduli terhadap pemanfaatan sumber daya. Semua hal tersebut memperlihatkan bahwa upaya yang dilakukan bukan hanya membawa manfaat teknis, tetapi juga mendorong pola pikir yang lebih bertanggung jawab.

Perubahan mode operasi pada *condensate polisher* dari *Hydrogen Cycle* menjadi *Ammonia Cycle* membawa dampak positif bagi pengolahan air limbah utama di pabrik. Pergantian ini berhasil mengurangi penggunaan air bersih dan menurunkan timbulan limbah cair khususnya pada parameter TSS. Penurunan yang signifikan membuat PT Paiton Energy lebih mudah mencapai target pengurangan limbah industri, sekaligus mengurangi kebutuhan pengangkutan dan penyimpanan lumpur sehingga proses operasional menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan.

Perubahan mode operasi *condensate polisher* dari *Hydrogen Cycle* ke *Ammonia Cycle* membawa dampak nyata pada efisiensi penggunaan air demineralisasi dan penurunan kadar TSS dari proses regenerasi. Dampak positifnya terasa pada peningkatan kualitas lingkungan sekitar sekaligus mendukung kepatuhan perusahaan terhadap peraturan yang berlaku. Inovasi ini, melalui penerapan *Ammonia Cycle* pada *condensate polisher*, menunjukkan langkah nyata dalam menghadirkan layanan yang lebih baik dan ramah lingkungan dibandingkan kondisi sebelumnya.

Personel yang bertugas di instalasi pengolahan air limbah utama harus rutin menangani akumulasi lumpur saat *condensate polisher plant* dijalankan dengan mode *Hydrogen Cycle*. Setiap tahun, mereka membersihkan tangki penampung lumpur dan mengoperasikan *belt press* untuk mengubah lumpur menjadi bentuk *cake*. Selain itu, lumpur yang terbawa hingga *cartridge lamella clarifier* juga perlu dibersihkan secara rutin setiap bulan sehingga seluruh sistem tetap berjalan lancar dan efisien.

Saat *condensate polisher plant* beroperasi dengan mode *Ammonia Cycle*, perilaku personel yang bertugas mengalami perubahan yang signifikan. Kegiatan pengurasan menjadi tidak lagi diperlukan karena timbulan limbah TSS yang masuk ke WWTP berkurang secara drastis. Perubahan cara kerja ini juga membawa keuntungan berupa penurunan biaya operasional sekaligus meningkatkan keselamatan para pekerja sehingga lingkungan kerja menjadi lebih aman dan efisien.

BAB 5

RAHASIA DI BALIK TIMBUNAN *SLUDGE*

A. Dari Mana *Sludge* Berasal?

Operasional produksi listrik yang memanfaatkan air laut sebagai bahan baku tidak bisa lepas dari penggunaan disinfektan untuk menjaga agar organisme tidak menumpuk dan mengganggu kinerja peralatan. PLTU Paiton Unit 3 - PT Paiton Energy menggunakan *sodium hypochlorite* untuk mencegah munculnya *macrofouling*, yaitu penumpukan organisme seperti alga, cacing, dan teritip pada permukaan peralatan. Larutan disinfektan ini diproduksi secara terus-menerus oleh instalasi *sodium hypochlorite* di area *Balance of Plant*. Selama proses produksi melalui elektrolisis air laut, muncul juga produk samping berupa endapan atau *sludge* yang mengandung kalsium dan magnesium karbonat, yang tercampur dengan larutan utama *sodium hypochlorite* dan tergolong sebagai bahan berbahaya.

Product storage tank dirancang dengan *baffle* untuk menjaga aliran tetap lancar dan mencegah masuknya produk samping berupa *sludge* dalam jumlah besar ke sistem. Produk samping yang tertahan akan menumpuk di dasar tangki sehingga pembersihan perlu dilakukan secara rutin. *Sludge* ini termasuk limbah terkontaminasi B3 dengan kode A108d. Seiring waktu, meningkatnya jumlah *sludge* memberi tekanan tambahan terhadap biaya pengelolaan limbah sehingga perhatian pada pengurangan timbunan menjadi hal penting.

PLTU Paiton Unit 3 menghadapi tantangan serius terkait penanganan *sludge* yang terkontaminasi *sodium hypochlorite*, termasuk limbah berbahaya kategori B3 dengan kode A108d. Kondisi ini menuntut langkah konkret agar pengelolaan limbah menjadi lebih aman dan bertanggung jawab. Rekomendasi dari kajian *life cycle assessment* (LCA) pada 2022 menekankan perlunya upaya pengurangan limbah B3 sehingga gagasan untuk melaksanakan program inovasi ini lahir sebagai jawaban atas kebutuhan mendesak tersebut.



Gambar 26. Tempat Pembuatan Larutan

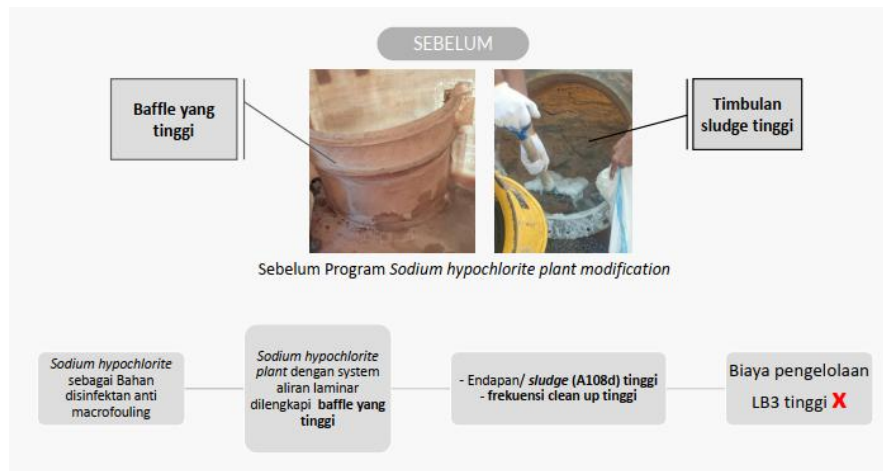
Proses produksi *sodium hypochlorite* di PLTU Paiton Unit 3 secara rutin menghasilkan timbunan *sludge calcium* dan *magnesium carbonate* yang cukup tinggi sehingga tim *chemist* harus melakukan pembersihan setiap bulan. Posisi *baffle* di bagian bawah tangki penyimpanan sebelum *suction pump* menyebabkan aliran cairan menjadi lebih lambat dan tenang sehingga endapan atau *sludge* mudah menumpuk. Kondisi ini mendorong perhatian ekstra agar tangki tetap bersih dan operasional pabrik berjalan lancar tanpa gangguan.

Tingginya timbunan *sludge* membawa dampak langsung pada biaya operasional, terutama untuk tenaga kerja yang melakukan pembersihan rutin setiap bulan. *Sludge* yang dihasilkan dari proses pembersihan harus ditangani secara menyeluruh. Saat masih basah, *sludge* perlu dikeringkan di tempat penyimpanan limbah B3 sebelum diserahkan ke pengelola berizin, agar pengangkutan tidak menimbulkan tumpahan air lindi di perjalanan. Kondisi ini membuat proses pengelolaan limbah menjadi lebih lama dan memerlukan perhatian ekstra. Upaya perbaikan pada *sodium hypochlorite plant* menjadi langkah penting untuk mengurangi timbunan *sludge* sekaligus menekan biaya operasional.

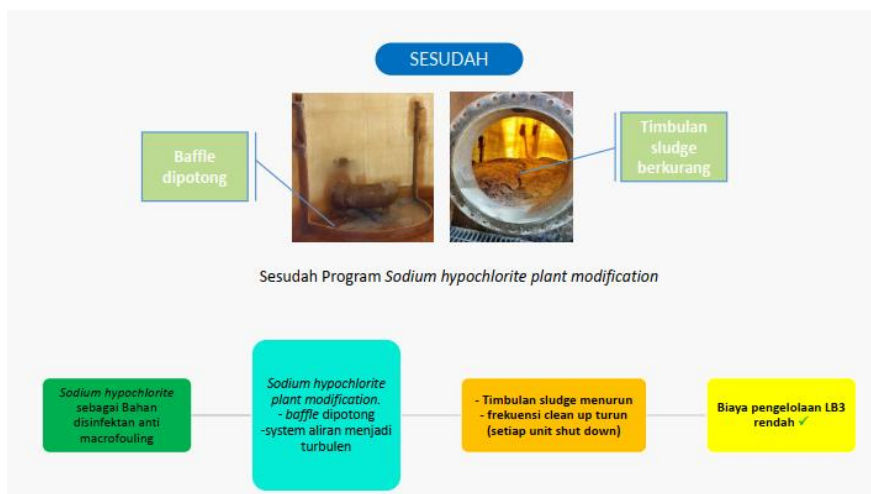
Program modifikasi pabrik *sodium hypochlorite* di Paiton Unit 3 menghadirkan perubahan signifikan pada aliran di dalam pabrik dengan memotong tinggi *baffle* sebelum *suction pump* sehingga aliran menjadi lebih dinamis. Hasil dari inovasi ini terlihat dari meningkatnya konsentrasi produk sekaligus berkurangnya akumulasi *sludge* berupa kalsium dan magnesium karbonat. Dampaknya, pembersihan pabrik *sodium hypochlorite* dapat dilakukan lebih jarang, hanya saat unit mengalami *shutdown* atau *outage* sehingga operasional menjadi lebih efisien dan terencana.

Program inovasi pada *plant sodium hypochlorite* berhasil menekan timbunan limbah terkontaminasi B3 (A108d) secara signifikan, sekaligus mengurangi jumlah limbah B3 secara keseluruhan. Dampak dari langkah ini terasa tidak hanya pada pengurangan biaya pembersihan dan pengelolaan limbah, tetapi juga memberi sumbangan nyata bagi upaya perlindungan lingkungan. Inisiatif ini menjadi bukti nyata komitmen perusahaan untuk menurunkan limbah B3 sekaligus mendukung

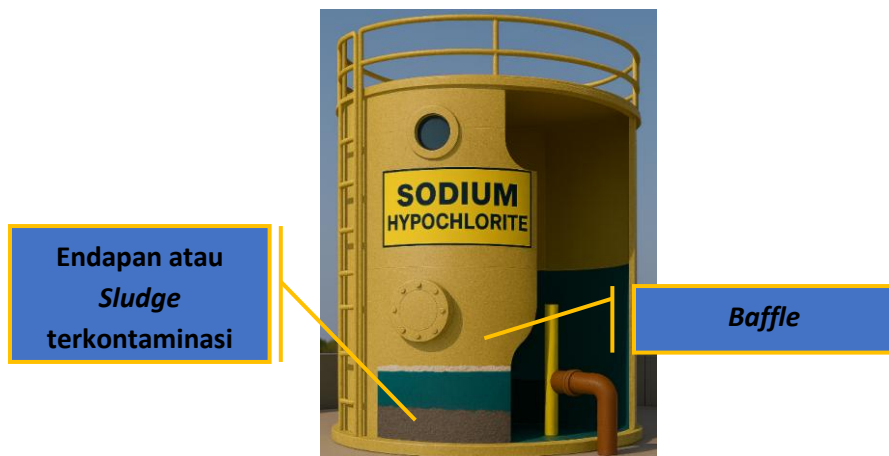
pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, khususnya parameter 12.4.2 yang menekankan pengelolaan limbah dan sumber daya secara bertanggung jawab.



Gambar 27. Kondisi Fasilitas Sebelum Diperbaiki



Gambar 28. Kondisi Fasilitas Setelah Diperbaiki



Gambar 29. Area Tangki Sebelum Perbaikan



Gambar 30. Area Tangki Setelah Perbaikan

B. Solusi Cerdas untuk Mengurangi *Sludge*

Program inovasi untuk mengurangi limbah terkontaminasi B3 dari *sodium hypochlorite* membawa perubahan positif pada sistem operasi dan memberikan nilai tambah pada keseluruhan proses. Desain pabrik

sodium hypochlorite diperbarui tanpa *baffle* sehingga konsentrasi produk meningkat dan jumlah endapan atau *sludge* terkontaminasi berkurang. Perubahan ini membantu mempercepat waktu pembersihan serta menekan biaya operasional, sekaligus membuat proses menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan.

Program pengurangan limbah B3 di Paiton Unit 3 menunjukkan hasil yang nyata setelah dilakukan perubahan pada subsistem pengolahan *sludge sodium hypochlorite* di area *Balance of Plant*. Program ini dimulai pada Juli 2024 dengan membandingkan informasi timbulan limbah tahun sebelumnya sebagai acuan. Pada 2023, jumlah *sludge sodium hypochlorite* mencapai 17,625 ton, sedangkan pada 2024 turun menjadi 6,850 ton, dan hingga Juni 2025 bahkan tercatat nol ton. Dengan perhitungan sederhana, pengurangan absolut limbah pada 2024 mencapai sekitar 1,9625 ton, jumlah ini setara dengan pengurangan timbulan limbah terkontaminasi B3 (A108d). Hasil ini memperlihatkan bahwa upaya yang dilakukan mampu membawa perubahan signifikan bagi lingkungan kerja dan keberlanjutan operasional PLTU.

Program pengurangan limbah *sludge* melalui modifikasi pabrik *sodium hypochlorite* di Paiton Unit 3 berhasil menurunkan jumlah *sludge* yang harus dikelola. Setiap ton limbah yang berhasil dikurangi berarti penghematan biaya pengelolaan sebesar Rp3.500.000. Dengan pengurangan *sludge* sebesar 1,9625 ton, total penghematan yang tercapai mencapai sekitar Rp10.990.000. Hasil ini tidak hanya menunjukkan manfaat finansial, tetapi juga menggambarkan komitmen untuk mengelola limbah secara lebih bertanggung jawab dan ramah lingkungan.

Tabel 26. Pengurangan Timbunan Sludge dan Dampak Ekonominya

Tahun	Timbunan <i>Sludge Sodium Hypochlorite</i> (ton)	Absolut Pengurangan (ton)	Normalisasi Absolut	Total Penghematan (Rp)
2023 <i>Baseline</i>	17.625	-	-	-
2024	6,850	1,9625	$7,53 \times 10^{-8}$	Rp10.990.000
2025- Juni	0	8,8125	$3,98 \times 10^{-7}$	Rp30.843.750

Informasi yang digunakan untuk menghitung hasil program inovasi berasal dari perhitungan LCA 2024. PT Paiton Energy telah menggabungkan program modifikasi *plant sodium hypochlorite* ini ke dalam perhitungan tersebut sehingga setiap langkah yang diambil selaras dengan upaya pengelolaan limbah yang lebih efisien dan bertanggung jawab.

Program pengurangan timbunan limbah terkontaminasi B3 melalui modifikasi *sodium hypochlorite plant* membawa sejumlah manfaat nyata. Perubahan yang terjadi mencakup perbaikan alur kerja sehingga setiap tahap produksi menjadi lebih efisien, peningkatan layanan yang membuat proses operasional lebih lancar dan andal, serta terbentuknya perilaku baru yang lebih bertanggung jawab terhadap pengelolaan limbah dan penggunaan bahan kimia. Semua ini menunjukkan bagaimana inovasi sederhana bisa menghasilkan dampak yang luas bagi lingkungan dan operasional.

Program pengurangan timbunan limbah terkontaminasi B3 melalui modifikasi *sodium hypochlorite plant* lahir dari kebutuhan untuk memperbaiki desain operasi yang sebelumnya menggunakan *baffle* tinggi sehingga aliran sistem menjadi laminar. Kondisi tersebut memicu peningkatan timbunan limbah B3, frekuensi pembersihan yang tinggi, dan biaya pengelolaan limbah yang besar. Dengan desain baru, permasalahan ini dapat diatasi secara signifikan. Volume endapan atau *sludge* di bagian bawah tangki berkurang, sedangkan konsentrasi produk meningkat karena aliran turbulen memperlambat pengendapan endapan *calcium*

dan *magnesium carbonate* sehingga menjaga produk tetap tersuspensi lebih lama.

Efisiensi produksi *sodium hypochlorite* yang meningkat membantu mencegah terbentuknya *macrofouling*, memperpanjang usia pipa, dan menjaga kinerja peralatan secara keseluruhan. Modifikasi ini memberikan nilai tambah berupa optimalisasi rantai nilai, meningkatkan kinerja pabrik, sekaligus menurunkan jumlah limbah B3 dari *sludge calcium* dan *magnesium carbonate* yang sebelumnya menjadi perhatian utama.

Program pengurangan timbulan limbah B3 melalui perubahan pada *sodium hypochlorite plant* membawa dampak besar bagi layanan perusahaan. *Baffle* di bagian bawah tangki sebelumnya membuat aliran cenderung tenang sehingga endapan mudah terbentuk dan menumpuk. Setelah bagian tersebut dipotong, aliran di dalam tangki menjadi lebih hidup dan risiko terbentuknya endapan menurun. Kondisi ini berdampak langsung pada frekuensi pembersihan tangki. PT Paiton Energy yang sebelumnya harus membersihkan fasilitas tersebut setiap bulan, kini cukup melakukannya saat unit berada pada kondisi *shutdown*. Perubahan ini memberi manfaat nyata karena kegiatan pembersihan menjadi lebih jarang dan biaya pengelolaan limbah B3 pun ikut berkurang.

Program Sodium Hypochlorite Plant Modification menghadirkan perubahan nyata pada cara kerja para karyawan bagian *chemist*. Kehadiran inovasi ini membantu menurunkan jumlah limbah terkontaminasi B3 (A108d) dan sekaligus mengurangi frekuensi tenaga kerja harus berhadapan langsung dengan limbah tersebut. Kondisi ini memberi dampak positif bagi keselamatan dan kenyamanan kerja karena aktivitas yang sebelumnya berisiko kini dapat ditekan secara signifikan.

BAB 6

MEMBANGUN DENGAN SISA

A. Dari Limbah Menjadi *Paving Block*

Operasional pembangkit listrik di PT Paiton Energy menghasilkan sisa pembakaran batu bara berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu bawah (*bottom ash*) atau FABA. Jumlah limbah yang muncul cukup besar sehingga diperlukan upaya nyata untuk mengurangnya sekaligus memanfaatkannya secara lebih bijak. Sebagian besar abu terbang sudah dapat dimanfaatkan oleh industri semen atau *batching plant* sebagai bahan pengganti sehingga tidak banyak tersisa di area penyimpanan. Kondisi berbeda terjadi pada abu bawah yang belum memiliki pemanfaatan luas sehingga volumenya terus meningkat dan akhirnya menumpuk di fasilitas penyimpanan Limbah Non B3 dengan kode N107.

Kondisi infrastruktur jalan di Kabupaten Probolinggo masih menjadi tantangan besar bagi masyarakat. Hampir seperempat ruas jalan berada pada keadaan kurang layak, terutama yang terletak di wilayah pegunungan. Informasi Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024 menunjukkan bahwa dari total panjang jalan 905,81 km, terdapat 226,9 km yang mengalami kerusakan berat. Situasi ini membuat aktivitas pengangkutan barang dan jasa menjadi lebih sulit sehingga memengaruhi kelancaran ekonomi daerah dan menurunkan daya saing produk lokal.

PT Paiton Energy menghadapi tantangan penting terkait pengelolaan FABA, sebuah isu yang sebelumnya juga ditegaskan dalam

rekomendasi kajian *life cycle assessment* (LCA) Tahun 2022. Sejak terbitnya PP 22 Tahun 2021 yang menetapkan FABA sebagai limbah non-B3 terdaftar, perusahaan mulai mengambil langkah proaktif untuk memanfaatkan material tersebut sebagai bagian dari upaya pengelolaan yang lebih bertanggung jawab. Komitmen ini diperkuat melalui keberadaan dokumen rincian teknis pemanfaatan limbah non-B3 sebagaimana tercantum pada Lampiran VII KepMen LHK RI Nomor 1146 Tahun 2024 yang mengatur kelayakan lingkungan pengembangan PLTU Paiton Unit 7–8 dan Unit 3. Dokumen tersebut berperan sebagai landasan hukum yang memungkinkan perusahaan menjalankan berbagai program berbasis FABA yang memberi manfaat bagi masyarakat.

Kondisi infrastruktur di Kabupaten Probolinggo yang masih memerlukan banyak perbaikan memberi peluang bagi PT Paiton Energy untuk menjalankan program pemanfaatan FABA. Timbunan FABA yang cukup besar pada fasilitas penyimpanan Limbah Non B3 juga mendorong munculnya gagasan untuk menghadirkan solusi yang bermanfaat bagi masyarakat, terutama terkait peningkatan kualitas jalan. *Paving block* kemudian dipilih sebagai jawaban yang praktis dan mudah diterapkan, sekaligus mampu memberikan nilai tambah nyata bagi lingkungan sekitar.

Bahan utama untuk membuat *paving block* biasanya berupa pasir vulkanis dari Gunung Semeru di Kabupaten Lumajang. Jarak yang cukup jauh membuat biaya produksinya meningkat karena proses pengangkutannya membutuhkan waktu dan tenaga lebih besar. PT Paiton Energy melihat peluang baru ketika menyadari bahwa FABA dapat dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian bahan pasir. Banyaknya *fly ash* yang telah terserap oleh pihak ketiga membuat perusahaan memilih *bottom ash* sebagai bahan yang paling sesuai untuk digunakan sebagai komponen utama *paving block*.

PT Paiton Energy mengambil langkah baru dengan memanfaatkan FABA yang sebelumnya hanya tersimpan di fasilitas penyimpanan limbah non-B3, lalu mengubahnya menjadi bahan utama pembuatan *paving block*. Upaya ini diwujudkan melalui program *EcoFA-Ving* yang hasilnya digunakan untuk memperbaiki jalan di wilayah sekitar Kabupaten Probolinggo sehingga memberi manfaat langsung bagi masyarakat. Bahan

utamanya berasal dari *bottom ash* yang dipadukan dengan sedikit *fly ash* dan semen sebagai perekat. Hasil akhirnya membentuk produk yang kuat, bahkan mampu menahan beban berat seperti kendaraan besar sehingga tidak hanya membantu mengurangi timbunan limbah, tetapi juga menghadirkan sarana yang lebih baik bagi lingkungan sekitar.

Tabel 27. Kualitas dan Kekuatan Paving block

No	Kode	Berat kg	Tekanan Hancur ton (P)	Tegangan Hancur kg/cm ²	Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	T6	3.10	73.67	394.23	Tipe : Segi Empat Ukuran : Panjang (p) : 21.00 cm Lebar (l) : 10.50 cm Tebal : 8.00 cm Luas : 220.50 cm ² Factor Chamfered (c) : 1.18 Rata-rata : 387.21 kg/cm² Tegangan Hancur : $\frac{P}{p \times l} \times c$
2	T7	3.11	74.28	397.51	
3	T8	3.04	68.49	366.50	
4	T9	3.12	75.74	405.32	
5	T10	3.05	69.61	372.51	

Nilai menunjukkan kualitas paving pada standart K300

Hasil uji serapan menunjukkan bahwa *paving block* EcoFA-Ving mampu menyerap air hingga 5,90% dari berat keringnya. Angka tersebut memberi gambaran bahwa produk ini ramah lingkungan karena mampu membantu air meresap ke tanah, terutama saat hujan ringan. Kemampuan tersebut turut berperan mengurangi risiko erosi sekaligus mendukung keseimbangan lingkungan sekitar.

Tabel 28. Kemampuan Paving Menyerap Air

Contoh Benda Uji	4	5	6	Satuan
Berat benda uji kondisi SSD (A)	3293.0	3342.0	3094.0	Gram
Berat benda uji kondisi kering oven (B)	3117.5	3156.5	2913,5	Gram
Resapan $\frac{A-B}{B} \times 100\%$	5.63	5.88	6.20	%
Rata-rata	5.90			%

Nilai kemampuan resap paving dari berat keringnya

Pengujian kuat tekan *concrete paving* berlangsung di Laboratorium Beton, Material Maju, dan Komputasi Mekanik, Departemen Teknik Sipil ITS Surabaya. Prosesnya mengikuti ketentuan SII 0819-83 untuk pengujian kuat tekan serta SNI 03-0691-1996 untuk pengujian daya serap. Seluruh rangkaian aktivitas dilakukan agar kualitas *concrete paving* dapat dipastikan sesuai standar yang berlaku dan layak digunakan.

Penerapan inovasi pemanfaatan FABA melalui program EcoFA-Ving berhasil menekan jumlah limbah non-B3 tersimpan (N106 dan N107) sekaligus memenuhi kebutuhan material untuk perbaikan jalan. Hasilnya, biaya perbaikan di area sekitar perusahaan dapat ditekan, sedangkan lingkungan juga mendapatkan manfaat karena limbah yang sebelumnya menumpuk kini memiliki nilai guna yang lebih baik.



Gambar 31. Contoh Paving dari Bahan Sisa



Gambar 32 Masalah Pengelolaan Limbah Sebelum Perbaikan



Gambar 33. Perubahan Cara Mengelola Limbah



Gambar 34. Kondisi Limbah Sebelum Ditata Ulang



Gambar 35. Proses Pembuatan Paving



Gambar 36. Pemasangan Paving untuk Jalan



Gambar 37. Kerja Sama Pemerintah dan Perusahaan

B. Mengubah Masalah Lingkungan Menjadi Peluang Baru

Program *EcoFA-Ving* membawa perubahan berarti bagi pemanfaatan limbah abu batu bara karena mampu mengubah sesuatu yang semula dianggap beban menjadi produk yang memiliki nilai guna. Upaya ini membantu PT Paiton Energy menekan timbunan FABA dan mengubahnya menjadi *paving block* yang bermanfaat serta memberikan citra positif di mata masyarakat. Selain memberi manfaat lingkungan, program ini juga menghadirkan penghematan biaya dan meningkatkan nilai usaha melalui perbaikan alur kerja, layanan yang lebih baik, serta kebiasaan baru yang lebih bertanggung jawab dalam mengelola sumber daya.

Berikut ini gambaran pemanfaatan limbah Non-B3 serta penghematan biaya perbaikan jalan melalui program *EcoFA-Ving* yang mulai dijalankan pada Juli 2024. Setiap *paving* memiliki berat sekitar 3,5 kilogram, dengan campuran yang terdiri atas semen sebanyak 10%, *fly ash* 3%, dan *bottom ash* 87%. Komposisi tersebut menunjukkan

bagaimana limbah yang sebelumnya tidak memiliki nilai guna dapat diolah menjadi produk bermanfaat, sekaligus membantu menekan biaya pemeliharaan jalan.

Tabel 29. Produksi Paving dan Luas Pemasangan

Tahun	Jumlah Produksi Paving (pcs)	Area Pemasangan (m ²)
2024	59.100	1.343,18
2025 - Juni	308.000	7.000,00
Total	367.100	8.343,18

*1 m² = 44 pcs

Tabel 30. Penggunaan Fly Ash per Tahun

Tahun	Absolut Pemanfaatan Fly Ash (ton)	Produksi (GJ)	Normalisasi Pemanfaatan
2024	6,21	26.076.545,94	2,39 x10 ⁻⁷
2025 - Juni	32,34	22.217.340,21	1,46 x10 ⁻⁶

Contoh Perhitungan Pemanfaatan Fly Ash 2024

= Jumlah produksi Paving x 3,5 Kg x 3%
 = 59.100 x 3,5 x 3%
 = 6.206 kg
 = **6,21 ton**

Tabel 31. Pemakaian Bottom Ash per Tahun

Tahun	Absolut Pemanfaatan Bottom Ash (ton)	Produksi (GJ)	Normalisasi Pemanfaatan
2024	179,96	26.076.545,94	3,91 x10 ⁻⁶
2025 - Juni	937,86	22.217.340,21	4,22 x10 ⁻⁵

Contoh Perhitungan pemanfaatan Bottom Ash 2024

= Jumlah produksi Paving x 3,5 kg x 87%
 = 59.100 x 3,5 x 87%
 = 179.960 kg
 = **179,96 ton**

Tabel 32. Penggunaan Paving dan Penghematannya

Tahun	Jumlah Paving Terpakai (pcs)	Area Pemasangan (m ²)	Penghematan
2024	59.100	1.343,18	Rp131.631.818,18
2025 - Juni	308.000	7.000,00	Rp686.000.000,00
Total	367.100	8.343,18	Rp817.631.818,18

* Diketahui harga *paving* per m²= Rp98.000,00

Informasi absolut yang digunakan pada perhitungan program ini merujuk pada hasil kajian LCA 2024. Langkah tersebut menunjukkan bahwa PT Paiton Energy telah memasukkan inovasi EcoFA-Ving (Eco FABA Paving) sebagai bagian dari kajian tersebut sehingga program ini menjadi bagian utuh dari upaya perusahaan untuk memperkuat praktik keberlanjutan.

Program EcoFA-Ving (Eco FABA Paving) menjadi wujud nyata upaya PT Paiton Energy untuk memberi nilai baru pada *fly ash* dan *bottom ash* yang sebelumnya hanya tersimpan di fasilitas penyimpanan limbah non-B3. Inisiatif ini mengalirkan kembali material tersebut ke kebutuhan masyarakat, terutama untuk membantu perbaikan dan pembangunan jalan. Alurnya tidak lagi berhenti pada penyimpanan, tetapi bergerak hingga menyentuh persoalan nyata yang dihadapi warga sehingga manfaatnya dapat dirasakan secara langsung.

Perubahan ini memperlihatkan bahwa perusahaan mampu memperluas kebermanfaatan usahanya, sebab kegiatan produksi *paving* berjalan berdampingan dengan tugas utama sebagai penyedia listrik. Kehadiran EcoFA-Ving menunjukkan bahwa sisa proses pembangkitan tidak harus berakhir sebagai beban, melainkan dapat menjadi bagian dari solusi sosial yang memberi dampak positif. Hasilnya terlihat dari berkurangnya timbunan *fly ash* dan *bottom ash* yang termasuk kategori limbah non-B3 dengan kode N106 dan N107 sehingga beban penyimpanan ikut berkurang.

Penerapan program EcoFA-Ving (Eco FABA Paving) membawa perubahan nyata terhadap layanan produk berupa penyediaan material

paving. Sebelum inovasi ini hadir, PT Paiton Energy menyerahkan pengelolaan *fly ash* kepada pihak ketiga, sedangkan sisa *fly ash* ataupun *bottom ash* yang belum dimanfaatkan disimpan di fasilitas perusahaan. Sejak program EcoFA-Ving berjalan, FABA berhasil diolah menjadi *paving* berkualitas K300 yang dapat digunakan oleh masyarakat. Perubahan ini menggeser peran FABA dari sekadar material tersimpan menjadi produk bernilai yang memberikan manfaat lebih luas. Nilai tambah tersebut ikut mengangkat citra perusahaan di mata publik.

Penerapan program EcoFA-Ving membawa perubahan besar pada cara perusahaan menangani limbah non-B3. Proses yang sebelumnya hanya berhenti pada penyimpanan kini berkembang menjadi kegiatan yang memberi manfaat sosial. Masyarakat pun mulai menunjukkan ketertarikan terhadap penggunaan produk EcoFA-Ving untuk memperbaiki infrastruktur di wilayah mereka. Ketertarikan ini perlahan menggeser pandangan lama bahwa FABA hanyalah sisa yang tidak berguna, menjadi keyakinan bahwa material tersebut mampu memberi nilai tambah bagi banyak orang. Perjalanan ini akhirnya membuat EcoFA-Ving berperan penting dalam mempermudah pergerakan barang dan jasa, sekaligus membantu meningkatkan kesejahteraan masyarakat melalui dukungan terhadap kualitas dan daya saing produk lokal.

BAB 7

MENGURANGI LIMBAH PANGAN (*FOOD WASTE*) DI PERUSAHAAN

A. Manajemen Donasi Pangan (*Food Donation Management*) di Dunia Industri

Amanat UU Nomor 13 Tahun 2003 *jo.* UU Cipta Kerja 2020 serta Permenaker Nomor 5 Tahun 2018 menegaskan bahwa kesejahteraan, kesehatan, dan keselamatan para pekerja perlu didukung oleh fasilitas yang layak, termasuk tempat makan yang higienis. Tanggung jawab tersebut dijalankan PT Paiton Energy dengan menyediakan kantin perusahaan yang telah beroperasi sejak 1999 dan berlokasi di Gedung Administrasi. Fasilitas ini hadir sebagai bentuk perhatian terhadap kebutuhan pekerja agar mereka dapat beristirahat dan menikmati makanan dengan nyaman.

Kantin perusahaan setiap hari menyiapkan sekitar 400–500 porsi makanan untuk memenuhi kebutuhan makan para karyawan, menjamu tamu, dan mendukung berbagai kegiatan yang berlangsung. Aktivitas ini berjalan terus-menerus sehingga peran kantin menjadi bagian penting dari kenyamanan dan kelancaran kegiatan di lingkungan perusahaan.

Kantin perusahaan setiap hari menghasilkan makanan berlebih, baik karena jumlah karyawan yang makan sering berubah-ubah maupun karena ada tambahan sekitar 5% sebagai cadangan jika muncul

permintaan mendadak. Situasi ini membuat sebagian hidangan yang sudah disiapkan tidak tersentuh sehingga perlu cara bijak untuk mengelolanya agar tidak terbuang percuma.

Makanan berlebih yang dihasilkan merupakan hidangan yang sebenarnya masih layak disantap, tetapi berisiko tidak termanfaatkan. Situasi ini dapat memicu pemborosan biaya operasional dan menambah jumlah sampah organik. Kondisi tersebut menjadi pengingat bahwa pengelolaan makanan perlu dilakukan dengan lebih bijak agar tidak menimbulkan dampak yang merugikan.

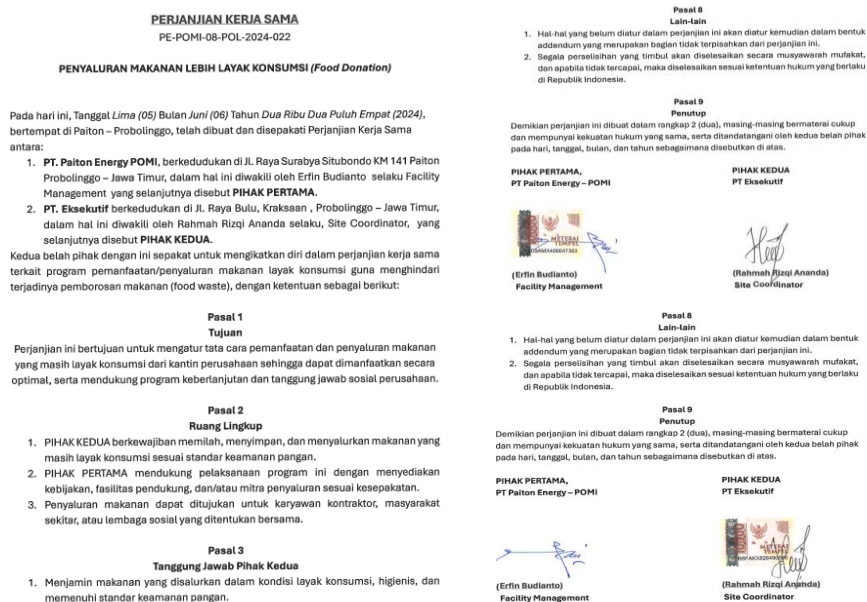
PT Paiton Energy menghadapi persoalan makanan berlebih dari kantin yang perlu segera ditangani agar tidak menimbulkan pemborosan dan dampak lingkungan. Rekomendasi dari *life cycle assessment* (LCA) tahun 2022 menegaskan pentingnya upaya pengurangan makanan tersisa sehingga dorongan ini menjadi landasan kuat bagi lahirnya program inovasi yang dijalankan. Program tersebut disusun untuk memastikan makanan lebih dihargai, dikelola dengan bijak, dan memberikan manfaat bagi perusahaan ataupun lingkungan sekitar.

Gagasan ini lahir dari kerja sama antara tim *facility management* dan pengelola kantin yang melihat peluang untuk mengurangi makanan berlebih agar tidak berubah menjadi kehilangan pangan (*food loss*). Kesempatan tersebut kemudian dimanfaatkan PT Paiton Energy untuk membantu peningkatan gizi masyarakat, terutama guna menekan angka *stunting* di sekitar kawasan PLTU. Upaya itu akhirnya dirangkum dalam praktik manajemen donasi pangan (*food donation management*) melalui program Berkatan sehingga makanan yang sebelumnya berpotensi terbuang dapat memberi manfaat yang jauh lebih besar.

Istilah "*berkatan*" dalam adat Jawa lekat dengan tradisi hajatan atau syukuran, saat tuan rumah memberikan makanan yang sudah dibungkus kepada para tamu sebagai wujud syukur dan harapan akan keberkahan. Nilai itulah yang menginspirasi pelaksanaan program Berkatan, yaitu membagikan makanan berlebih yang masih layak konsumsi dari kantin perusahaan kepada masyarakat sekitar. Semangatnya tetap sama, yaitu berbagi kebaikan agar manfaat dapat dirasakan lebih luas.

Selain memberi manfaat nyata bagi masyarakat sekitar, program Berkatan turut membantu menekan munculnya sampah organik yang biasanya menghasilkan emisi metana (CH₄) saat membusuk. Upaya ini sekaligus menunjukkan peran PT Paiton Energy dalam mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya parameter 12.3.1.a yang berfokus pada pengurangan sisa makanan. Program tersebut tidak hanya memberi nilai sosial, tetapi juga membawa dampak positif bagi lingkungan.

Program ini dijalankan PT Paiton Energy bersama pengelola kantin sebagai mitra, sesuai ketentuan yang tercantum pada Surat Perjanjian Kerja Sama Nomor PE-POMI-08-POL-2024-022. Isi perjanjian tersebut menjelaskan cara kerja yang perlu diikuti, mulai dari pemilahan bahan, penyimpanan sementara, hingga proses penyaluran. Setiap langkah juga memuat perhatian terhadap kebersihan dan keamanan pangan agar kegiatan berlangsung tertata serta memberikan rasa aman bagi semua pihak yang terlibat.



Gambar 38. Dokumen Perjanjian dengan Pihak Luar



Gambar 39. Proses Pengemasan dan Pengiriman Berkatan

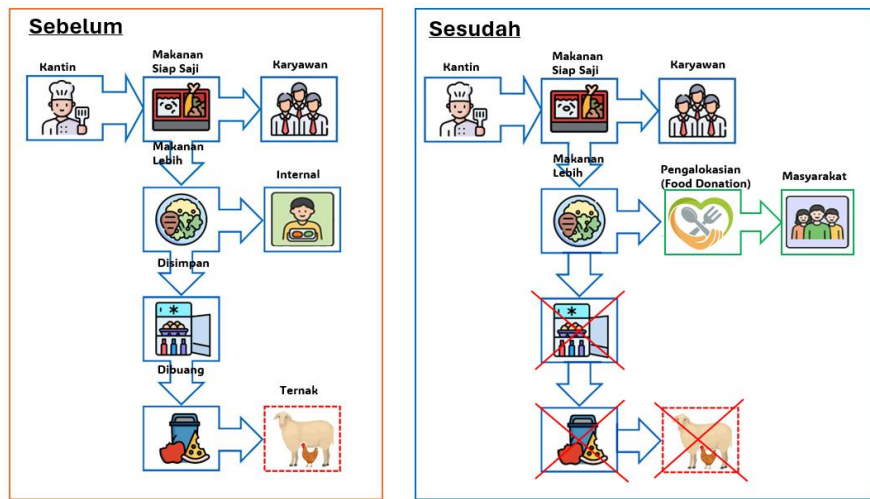


Gambar 40. Pembagian Berkatan kepada Masyarakat

Keseriusan pelaksanaan program Berkatan tampak dari perluasan wilayah yang disentuh oleh berbagai kegiatannya. Area di sekitar PLTU Paiton menjadi salah satu titik awal, lalu jangkauannya meluas ke kawasan lain yang membutuhkan sentuhan positif serupa. Upaya ini menunjukkan tekad kuat untuk menghadirkan manfaat yang merata dan lebih terasa bagi banyak komunitas.

Sebelum hadirnya inovasi, lebih makanan layak konsumsi dari kantin perusahaan biasanya dimanfaatkan oleh karyawan yang sedang bertugas atau disimpan dalam *freezer* hingga dua hari. Jika tidak digunakan dalam waktu tersebut, makanan itu akhirnya dibuang sebagai

sampah organik atau digunakan sebagai pakan ternak. Setelah program Berkatan berjalan, setiap lebihan makanan diidentifikasi untuk memastikan kelayakannya. Makanan yang masih memenuhi standar keamanan dan kelayakan konsumsi dipilah dan dikemas dengan tetap memperhatikan aspek kebersihan, estetika, serta penghormatan terhadap martabat penerima manfaat. Proses ini membuat makanan dapat didistribusikan melalui pihak ketiga atau mitra sosial pada hari yang sama sehingga manfaatnya bisa langsung dirasakan oleh mereka yang membutuhkan.



Gambar 41. Perubahan Cara Mengelola Makanan

B. Dari Pemborosan ke Kepedulian

Program Berkatan menghadirkan cara baru untuk melihat pengelolaan sampah melalui perubahan pada beberapa bagian kerjanya sehingga nilai yang tercipta menjadi lebih terasa bagi perusahaan ataupun masyarakat. Upaya ini membantu perusahaan bekerja lebih efektif dan efisien dalam mengurangi timbulan sampah organik sekaligus memperkuat citra positif terkait tanggung jawab sosial dan lingkungan. Selain itu, program ini mampu menunjukkan besarnya penghematan biaya yang terjadi serta menghadirkan nilai tambah berupa peningkatan

mutu layanan dan perubahan perilaku yang lebih peduli terhadap keberlanjutan.

Program inovasi Berkatan menghadirkan upaya sederhana yang dekat dengan kehidupan sehari-hari, yaitu menyalurkan makanan yang masih layak konsumsi kepada warga sekitar agar tidak terbuang percuma. Inisiatif ini tumbuh dari kesadaran bahwa setiap hidangan memiliki nilai, baik bagi yang membuatnya maupun bagi mereka yang membutuhkan. Kegiatan berbagi ini bukan hanya membantu mengurangi pemborosan makanan, tetapi juga menumbuhkan rasa kebersamaan, saling peduli, dan harapan bahwa kebaikan dapat hadir dari hal-hal kecil yang sering kita abaikan.

Perhitungan Makanan Layak Konsumsi

Tabel 33. Produksi dan Sisa Makanan Setiap Bulan

Bulan	Total Produksi (Porsi)	Berat Total Produksi Makanan			Jumlah Lebihan Makanan Layak Konsumsi Tersalurkan (Porsi)	% dari Produksi	Pengurangan Timbunan Limbah Pangan (Food Waste)	
		gram	kg	ton			kg	ton
Jul-24	6967	3.065.480,00	3.065,48	3,07	82	1,18	36,1	$3,61 \times 10^{-2}$
Aug-24	6919	3.044.360,00	3.044,36	3,04	34	0,49	15,0	$1,50 \times 10^{-2}$
Sep-24	6975	3.069.000,00	3.069,00	3,07	90	1,29	39,6	$3,96 \times 10^{-2}$
Okt-24	6930	3.049.200,00	3.049,20	3,05	45	0,65	19,8	$1,98 \times 10^{-2}$
Nov-24	6959	3.061.960,00	3.061,96	3,06	74	1,06	32,6	$3,26 \times 10^{-2}$
Des-24	6951	3.058.440,00	3.058,44	3,06	66	0,95	29,0	$2,90 \times 10^{-2}$
Jan-25	6943	3.054.920,00	3.054,92	3,05	58	0,84	25,5	$2,55 \times 10^{-2}$
Feb-25	6981	3.071.640,00	3.071,64	3,07	96	1,38	42,2	$4,22 \times 10^{-2}$
Mar-25	7020	3.088.800,00	3.088,80	3,09	135	1,92	59,4	$5,94 \times 10^{-2}$
Apr-25	6918	3.043.920,00	3.043,92	3,04	33	0,48	14,5	$1,45 \times 10^{-2}$
Mei-25	6970	3.066.800,00	3.066,80	3,07	85	1,22	37,4	$3,74 \times 10^{-2}$
Jun-25	6989	3.075.160,00	3.075,16	3,08	104	1,49	45,8	$4,58 \times 10^{-2}$

- Total produksi makanan Tahun 2024 (Juli-Desember) = 41.701 paket
- Total produksi makanan Tahun 2025 (Januari-Juni) = 41.821 paket
- Jumlah lebihan makanan layak konsumsi tersalurkan Tahun 2024 (Juli-Desember) = 391 paket

- Jumlah lebih makanan layak konsumsi tersalurkan Tahun 2025 (Januari-Juni) = 511 paket
- Berat makanan per paket = 0,44 kg
- Total produksi listrik tahun 2024 (Juli-Desember) = 26.076.545,94 GJ
- Total produksi listrik tahun 2025 (Januari-Juni) = 22.162.710,26 GJ
- Biaya pengangkutan sampah Tahun 2024 = Rp167.441,86/ton
- Biaya pengangkutan sampah Tahun 2025 = Rp334.883,36/ton
- Estimasi harga *meal box* per porsi = Rp25.000,00

Perhitungan Estimasi Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*)

Estimasi Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*) (kg) = Jumlah lebih makanan layak konsumsi tersalurkan (porsi) × berat makanan per paket (kg)

Estimasi Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*) Tahun 2024 (kg) = 391 paket × 0,44 kg = 172 kg

Estimasi Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*) Tahun 2025 (kg) = 511 paket × 0,44 kg = 224,8 kg

Perhitungan Nilai Absolut Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*)

Nilai Absolut Pengurangan Timbulan *Food Waste* (ton) =

$$\frac{\text{Estimasi Pengurangan Timbulan Food Waste (kg)}}{1000}$$

Nilai Absolut Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*) Tahun 2024 (ton) = $\frac{172 \text{ kg}}{1000} = 0,172 \text{ ton}$

Nilai Absolut Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (*Food Waste*) Tahun 2025 (ton) = $\frac{224,8 \text{ kg}}{1.000} = 0,225 \text{ ton}$

Perhitungan Normalisasi Absolut

Normalisasi Absolut (ton/GJ) =

$$\frac{\text{Nilai Absolut Pengurangan Timbulan Limbah Pangan (Food Waste) (ton)}}{\text{Produksi Listrik (GJ)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Normalisasi Absolut 2024 (ton/GJ)} &= \left(\frac{0,172}{26.076.545,94} \right) \\ &= 6,60 \times 10^{-9} \text{ ton/GJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Normalisasi Absolut 2025 (ton/GJ)} &= \left(\frac{0,225}{22.162.710,26} \right) \\ &= 1,01 \times 10^{-8} \text{ ton/GJ}\end{aligned}$$

Perhitungan Penghematan Biaya Pembuangan Sampah

$$\begin{aligned}&= \text{Biaya pengangkutan sampah ke TPA} \times \text{Nilai Absolut} \\ &\quad \text{Pengurangan Timbunan Limbah Pangan (Food Waste) (ton)} \\ \text{Penghematan Biaya Pembuangan Sampah 2024} \\ &= \text{Rp}167.442,00 \times 0,172 \text{ ton} = \text{Rp}28.807,00 \\ \text{Penghematan Biaya Pembuangan Sampah 2025} \\ &= \text{Rp}334.884,00 \times 0,225 \text{ ton} = \text{Rp}75.295,26 \\ \text{Total Penghematan Biaya Pembuangan Sampah} \\ &= \text{Rp}28.807,00 + \text{Rp}75.295,26 = \text{Rp}104.101,95\end{aligned}$$

Estimasi Nilai Sosial/CSR

$$\begin{aligned}\text{Estimasi Nilai Sosial/CSR (Rp)} &= \text{Estimasi harga meal box per porsi} \times \\ &\quad \text{Jumlah Lebihan Makanan Layak} \\ &\quad \text{Konsumsi Tersalurkan (Porsi)} \\ \text{Estimasi Nilai Sosial/CSR} &= \text{Rp}25.000 \times 391 \text{ porsi} = \\ \text{2024} &\quad \text{Rp}9.775.000,00 \\ \text{Estimasi Nilai Sosial/CSR} &= \text{Rp}25.000 \times 511 \text{ porsi} = \\ \text{2025} &\quad \text{Rp}12.775.000,00 \\ \text{Total Estimasi Nilai} &= \text{Rp}9.775.000,00 + \text{Rp}12.775.000,00 \\ \text{Sosial/CSR} &= \text{Rp}22.550.000\end{aligned}$$

Tabel 34. Pengurangan Sampah Makanan dan Keuntungannya

Tahun	Estimasi Pengurangan Timbunan Limbah Pangan (<i>Food Waste</i>) (kg)	Nilai Absolut Pengurangan Timbunan Limbah Pangan (<i>Food Waste</i>) (ton)	Normalisasi Absolut (ton/GJ)	Penghematan Biaya Pembuangan Sampah (Rp)	Nilai Sosial/ CSR (Rp)
2024	172	0,172	$6,60 \times 10^{-9}$	28.807	9.775.000,00
2025	224,8	0,225	$1,01 \times 10^{-8}$	75.295,26	12.775.000,00

Informasi yang digunakan untuk mengukur program ini bersumber dari perhitungan LCA 2024. Hal tersebut menunjukkan bahwa PT Paiton Energy sudah memasukkan gagasan inovatif Berkatan ke dalam acuan LCA 2024 sehingga upaya keberlanjutan perusahaan berjalan lebih selaras dan menyatu dengan langkah yang sudah direncanakan.

Program Berkatan tumbuh sebagai wujud kepedulian perusahaan yang tidak hanya memperkuat citra positif atau membantu mengurangi timbulan sampah organik, tetapi juga membawa perubahan nyata dari hulu hingga hilir. Para pengelola kantin, karyawan sebagai pengguna layanan, hingga masyarakat di sekitar merasakan manfaatnya. Setiap pihak mendapat ruang untuk bergerak bersama menuju kebiasaan yang lebih bijak dan bermanfaat. Perjalanan ini menghadirkan nilai baru yang memperkaya hubungan antarmanusia sekaligus memperkuat peran perusahaan dalam memberi makna bagi lingkungan sekitarnya.

Berjalan lewat program inovasi Berkatan, perusahaan berhasil mengubah makanan berlebih yang sebelumnya berpotensi terbuang menjadi bagian dari alur kerja yang lebih ramah lingkungan. Perubahan ini membuat perjalanan makanan dari kantin tidak berhenti pada kebutuhan internal perusahaan saja, tetapi terus mengalir hingga sampai kepada masyarakat yang membutuhkan.

Kualitas rantai nilai perusahaan pun meningkat karena jumlah makanan terbuang dapat ditekan sehingga risiko munculnya emisi berbahaya dari proses pembusukan bisa berkurang. Program ini sekaligus memberi kontribusi nyata terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya terkait pengurangan sisa makanan.

Inovasi Berkatan menghadirkan perubahan bermakna dalam sistem perusahaan. Alur produksi yang sebelumnya hanya berfokus pada penyediaan konsumsi kini berkembang menjadi gerakan yang mendukung pemanfaatan sumber daya secara lebih bijak, menguatkan kepedulian terhadap lingkungan, dan memberi manfaat sosial yang lebih luas.

Program Berkatan memberi warna baru bagi layanan makanan kantin perusahaan. Sebelum program ini hadir, sajian kantin hanya berfokus pada kebutuhan makan karyawan. Kini, berkat gagasan Berkatan, makanan yang diolah kantin memiliki makna yang lebih luas

karena ikut menghadirkan manfaat bagi masyarakat. Perubahan ini memperluas peran kantin dari sekadar penyedia kebutuhan internal menjadi bagian dari upaya perusahaan untuk berbagi dan memberi dukungan sosial. Makanan yang sebelumnya hanya dinikmati di lingkungan kerja kini menjadi jembatan kebaikan yang mempererat hubungan perusahaan dengan masyarakat, sekaligus memperkuat citra perusahaan sebagai tempat yang peduli, ramah, dan berkomitmen terhadap nilai keberlanjutan.

Sebelum program Berkatan hadir, persoalan sampah makanan dan tanggung jawab sosial sering terabaikan sehingga upaya mengurangi limbah pangan (*food waste*) serta membangun kepedulian bersama belum berjalan dengan baik. Kehadiran program Berkatan membawa angin segar karena donasi makanan berlebih mulai memicu perubahan kebiasaan di banyak pihak. Karyawan dan pengelola kantin menjadi lebih peka terhadap pemborosan, lalu mulai mengatur bahan pangan dengan lebih bijak. Masyarakat sekitar pun melihat perusahaan sebagai tetangga yang peduli dan siap berbagi sehingga tumbuh rasa percaya serta kedekatan yang hangat. Perusahaan turut merasakan perubahan suasana kerja yang lebih positif karena semangat hemat, efisien, dan peduli sesama semakin terasa dalam keseharian. Perubahan-perubahan ini memberi nilai yang besar, sebab bukan hanya memperkuat keberhasilan program Berkatan, tetapi juga menumbuhkan budaya keberlanjutan (*sustainability culture*) yang membuat perusahaan semakin kukuh untuk waktu yang panjang.

BAB 8

KAYU, POPOK, DAN PELUANG BARU BAGI MASYARAKAT

A. Energi Terbarukan dari Kayu Bekas

1. Dari Limbah Kayu Menjadi Energi Terbarukan

PLTU Paiton memiliki ruang terbuka hijau yang cukup luas, mencapai sekitar 12 hektare. PT Paiton Energy merawat area tersebut secara rutin, termasuk melakukan pemangkasan pohon (*tree trimming*) agar pepohonan tetap rapi dan sehat. Kegiatan itu menghasilkan timbunan kayu, dahan, dan ranting yang menjadi bagian dari sampah organik di area pembangkit. Aktivitas operasional juga sering meninggalkan sisa berupa kotak/boks kemasan suku cadang dan pelet kayu yang sudah tidak terpakai.

PT Paiton Energy telah menyiapkan fasilitas untuk memilah sampah organik, termasuk menyediakan tempat khusus bagi sampah kayu dan palet kayu. Meskipun begitu, pemanfaatannya belum berjalan optimal. Jumlah sampah kayu yang terus bertambah membuat seluruh kayu bekas dan palet tetap berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Seboro, sehingga upaya pengelolaan yang lebih baik masih sangat dibutuhkan agar material tersebut tidak terbuang sia-sia.

Timbunan sampah kayu yang belum dimanfaatkan dengan baik telah menjadi perhatian besar di lingkungan PT Paiton Energy. Situasi ini

sejalan dengan gagasan kajian *life cycle assessment* (LCA) yang mendorong lahirnya upaya pengelolaan sampah kayu sebagai alasan utama munculnya program inovasi tersebut. Melalui langkah ini, perusahaan berusaha mengubah masalah yang lama terabaikan menjadi kesempatan untuk menghadirkan manfaat yang lebih luas bagi lingkungan sekitar.

Amanat Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah menegaskan kewajiban para pelaku usaha untuk memilih bahan produksi yang lebih ramah bagi kehidupan. Setiap kegiatan usaha diharapkan menghasilkan sampah sesedikit mungkin, memakai bahan yang bisa digunakan ulang, mudah didaur ulang, atau dapat terurai secara alami. Semangat ini mengajak dunia usaha untuk ikut menjaga keseimbangan lingkungan dan memberikan ruang bagi generasi mendatang agar dapat menikmati bumi yang tetap layak huni.

PT Paiton Energy menegaskan komitmennya untuk taat pada peraturan dengan menjalankan Kebijakan Pengelolaan Sampah yang selaras dengan upaya menjaga kelestarian lingkungan. Perusahaan mendorong pemanfaatan sampah sebagai sumber daya yang masih bernilai, termasuk upaya membatasi timbulan, mengolah kembali, dan memanfaatkannya secara teratur serta terpadu sehingga memberi manfaat bagi lingkungan ataupun masyarakat.

Ide perubahan muncul dari unit *facility management* yang bertugas mengelola serta merawat berbagai fasilitas dan aset perusahaan, termasuk urusan pengelolaan sampah. Salah satu jenis sampah yang memberi kontribusi cukup besar terhadap tumpukan sampah di area kerja PT Paiton Energy adalah kayu bekas yang sudah tidak memiliki nilai ekonomis. Banyak potongan kayu itu akhirnya langsung berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sehingga memicu munculnya gagasan untuk mencari cara yang lebih bijak dan bermanfaat dalam menanganinya.

PT Paiton Energy berupaya memanfaatkan timbulan sampah kayu bekas untuk mengoptimalkan nilai ekonomis sekaligus menciptakan rantai nilai baru. Kayu bekas yang berasal baik dari pemangkasan tanaman atau pohon di area perusahaan, maupun bekas kemasan

material dan aktivitas proyek, dijadikan sumber bahan baku untuk produk baru melalui program inovasi. Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah mengubah kayu bekas menjadi pelet kayu (*wood pellet*). Sejak pertengahan tahun 2024, PT Paiton Energy mulai mengimplementasikan program SarKa yang berfokus pada pengolahan sampah kayu menjadi *pellet*, sekaligus menghadirkan nilai tambah dari limbah yang sebelumnya terabaikan.

Perusahaan melalui program CSR-nya mengajak kelompok masyarakat sekitar PLTU, yang tergabung dalam BUMDes Desa Selobanteng, Kecamatan Banyuglugur, Kabupaten Situbondo, untuk ikut serta mengolah sampah kayu, ranting, dan bahan kayu lainnya menjadi pelet kayu (*wood pellet*). Sampah kayu diubah menjadi serbuk melalui proses pencacahan, kemudian dicetak menjadi pelet kayu (*wood pellet*) siap pakai. Kegiatan ini tidak hanya memberikan manfaat ekonomi bagi warga sekitar, tetapi juga membantu menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan. Dokumentasi kegiatan pemanfaatan limbah kayu dan ranting pohon dapat dilihat pada Gambar 42.

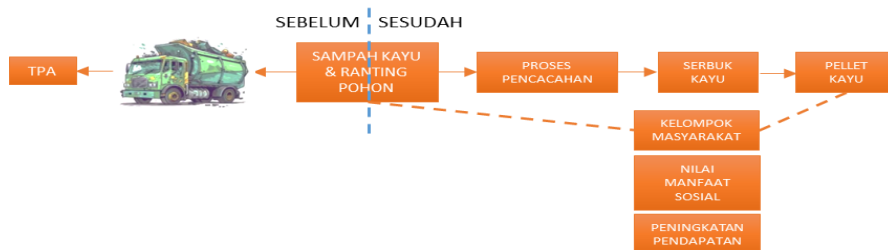


Gambar 42. Proses Pengolahan Serbuk Kayu

Program inovasi PT Paiton Energy membuka peluang bagi masyarakat untuk mengembangkan kemampuan dan menciptakan produk baru yang bermanfaat. Dari produksi pelet kayu (*wood pellet*), muncul berbagai kemungkinan pemanfaatan, seperti serbuk kayu yang bisa dijadikan media tanam, bahan bakar alternatif yang dapat digunakan

baik dalam skala rumah tangga maupun perusahaan, dan biomassa yang berperan sebagai sumber energi campuran. Program SarKa turut berperan dalam mengurangi timbulan sampah kayu sekaligus mendorong lahirnya produk-produk baru yang ramah lingkungan, baik sebagai media tanam maupun energi terbarukan.

Sebelum adanya inovasi, sampah kayu yang tidak memiliki nilai ekonomis, seperti kayu bekas kemasan material, palet rusak, atau dahan dan ranting pohon, langsung dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Kebiasaan ini meningkatkan biaya pengelolaan sampah karena timbulan yang semakin besar. Inovasi yang diterapkan membawa perubahan signifikan dengan memanfaatkan kembali sampah kayu sehingga tercipta rantai nilai baru yang sekaligus mengurangi biaya pengelolaan. Prosesnya dimulai dari pencacahan kayu bekas menjadi serbuk menggunakan mesin khusus, kemudian serbuk tersebut dipadatkan menjadi pelet kayu (*wood pellet*) melalui mesin cetakan. Hasilnya bukan hanya mengurangi sampah, tetapi juga menghadirkan produk baru yang bermanfaat dan ramah lingkungan.



Gambar 43. Pengolahan Sampah Kayu Setelah Perbaikan

2. Kontribusi SarKa dalam Mendorong Ekonomi Sirkular

Program SarKa menghadirkan cara baru dalam memanfaatkan sampah kayu yang sebelumnya dianggap tidak bernilai. Sampah tersebut diubah menjadi pelet kayu (*wood pellet*), sebuah produk yang memiliki beragam potensi, mulai dari media tanam, sumber energi terbarukan, hingga energi campuran. Pemanfaatan ini tidak hanya membantu

mengurangi timbunan sampah kayu, tetapi juga memberikan manfaat sosial bagi masyarakat, sekaligus menurunkan biaya operasional pengelolaan sampah. Dengan langkah sederhana ini, sebuah masalah bisa berubah menjadi peluang yang membawa kebaikan bagi lingkungan dan kehidupan sekitar.

Program inovasi ini membuka peluang untuk melihat seberapa besar pengurangan biaya yang dapat dicapai, sekaligus menghadirkan nilai tambah melalui peningkatan layanan produk dan perubahan perilaku masyarakat. Dengan begitu, program ini tidak hanya memberi manfaat ekonomi, tetapi juga mendorong cara baru dalam memanfaatkan produk dan layanan secara lebih efektif.

Program inovasi SarKa menghadirkan peluang baru untuk memanfaatkan dan mengoptimalkan sampah kayu menjadi pelet kayu (*wood pellet*). Program ini mendorong terciptanya produk yang bermanfaat sekaligus mengurangi limbah sehingga sampah kayu tidak lagi terbuang percuma. Setiap tahap pengolahan membuka kesempatan bagi masyarakat untuk berkreasi dan menghadirkan nilai tambah dari bahan yang sebelumnya dianggap sia-sia.

Keterangan:

- Jumlah sampah kayu dimanfaatkan Tahun 2024 = 143.480,61 kg
- Jumlah sampah kayu dimanfaatkan Tahun 2025 = 130.096,20 kg
- Total produksi listrik tahun 2024 (Juli-Desember) = 26.076.545,94 GJ
- Total produksi listrik tahun 2025 (Januari-Juni) = 22.162.710,26 GJ
- Biaya pengangkutan sampah Tahun 2024 = Rp167.441,86/ton
- Biaya pengangkutan sampah Tahun 2025 = Rp334.883,36/ton

Perhitungan

- Absolut (ton) = jumlah sampah yang dimanfaatkan (kg) / 1000
- Normalisasi (ton/GJ) = Absolut / Produksi Listrik
- Penghematan = biaya pengangkutan sampah ke TPA x absolut

Contoh perhitungan tahun 2024 (Juli-Desember)

$$\begin{aligned}\text{Absolut (ton)} &= 143.480,61 \text{ (kg) } / 1000 \\ &= 143,480 \text{ ton}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Normalisasi (ton/GJ)} &= 143,480 \text{ ton} / 26.076.545,94 \text{ GJ} \\ &= 5,5 \times 10^{-6} \text{ ton/GJ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Penghematan} &= 143,480 \text{ ton} \times \text{Rp}167.441,86 \\ &= \text{Rp}24.024.660,62\end{aligned}$$

Tabel 35. Jumlah yang Diolah dan Penghematan

Tahun	Nilai Absolut Pemanfaatan (ton)	Normalisasi Absolut (ton/GJ)	Penghematan (Rp)
2024	$1,43 \times 10^2$	$5,50 \times 10^{-6}$	Rp24.024.660,62
2025	$1,30 \times 10^2$	$5,87 \times 10^{-6}$	Rp43.567.099,68

PT Paiton Energy telah menggabungkan program inovasi SarKa dalam kegiatan yang dihitung melalui kuantifikasi program pada tahun 2024. Integrasi ini menunjukkan komitmen perusahaan untuk memastikan setiap langkah program memiliki dasar yang jelas dan dapat memberikan manfaat nyata.

Program inovasi SarKa tidak hanya membantu mengurangi timbunan sampah kayu, tetapi juga membawa manfaat sosial bagi masyarakat. Kelompok masyarakat yang terlibat dalam produksi pelet kayu (*wood pellet*) memiliki peluang untuk menambah penghasilan melalui penjualan produk. Program ini membuka kesempatan bagi masyarakat untuk merasakan langsung nilai manfaat dari setiap kegiatan yang dijalankan, sekaligus mendorong terciptanya produk baru yang berguna bagi lingkungan dan kehidupan sehari-hari.

Keterangan:

Harga jual *wood pellet* = Rp2.400/kg

Rumus perhitungan:

Nilai tambah masyarakat (2024) = absolut pelet kayu/*wood pellet* x harga jual x 1000

$$= 143 \times \text{Rp}2400 \times 1000$$

$$= \text{Rp}344.353.468,84$$

Nilai tambah masyarakat (2025) = absolut pelet kayu/*wood pellet* x harga jual x 1000

$$= 130 \times \text{Rp}2400 \times 1000$$

$$= \text{Rp}312.230.880,95$$

Program Pemanfaatan Sampah Kayu melalui Inovasi SarKa adalah inisiatif perusahaan untuk mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan sekaligus mengurangi timbulan sampah di area perusahaan. Program ini mendorong terciptanya nilai positif bagi lingkungan, ekonomi, dan masyarakat, sekaligus menumbuhkan kesadaran serta perilaku yang lebih peduli terhadap keberlanjutan.

Sampah kayu dan ranting pohon yang sebelumnya hanya dibuang kini memiliki nilai guna baru melalui pengolahan menjadi *wood pellet*. Program ini berhasil mengubah cara pandang masyarakat dan perusahaan terhadap limbah kayu. Dari sisi ekonomi, limbah yang sebelumnya tidak memiliki nilai kini dapat dimanfaatkan untuk memberdayakan masyarakat. *Wood pellet* menjadi produk baru yang membuka peluang bagi pengumpul kayu bekas dan produsen *pellet* dari komunitas sekitar, sekaligus memberikan dampak positif pada pendapatan mereka. Setiap tahap pengelolaan kini menghasilkan manfaat sosial dan ekonomi, sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular.

Selain itu, muncul layanan produk baru yang ramah lingkungan. Proses pengolahan sampah kayu mengurangi kebutuhan pengangkutan ke tempat pembuangan akhir, sekaligus menghadirkan produk turunan yang bermanfaat bagi masyarakat dan lingkungan. Inovasi ini memperkuat citra perusahaan sebagai pelaku industri yang bertanggung jawab dan berorientasi pada keberlanjutan.

Perubahan perilaku juga terlihat jelas. Petugas kebersihan dan pengelola lingkungan kini lebih sadar akan potensi manfaat sisa material alami, sedangkan karyawan dan manajemen mendorong pemanfaatan limbah sebagai bagian dari tanggung jawab terhadap lingkungan. Masyarakat sekitar pun menciptakan peluang usaha baru dari *wood pellet*, meningkatkan pendapatan, sekaligus menumbuhkan budaya keberlanjutan di seluruh lapisan. Setiap individu terlibat aktif dalam menjaga sumber daya, mengurangi limbah, dan menciptakan nilai tambah bagi lingkungan serta masyarakat.

BAB 9

Mengubah Popok Menjadi Solusi Pertanian

A. Solusi Ramah Lingkungan dari Limbah Popok

Inovasi “HI-GELIMAS” (*Hybrid Gel* Limbah Inovasi Masyarakat) lahir dari semangat Program Pemberdayaan Masyarakat “INSPIRASI” yang digagas untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat melalui pengelolaan air bersih dan penanganan masalah sosial. Kelompok Binor Tirta Lestari menciptakan terobosan ini dengan mengubah limbah popok sekali pakai menjadi *hydrogel* yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk dan media tanam bagi petani. Keistimewaan HI-Gelimas terletak pada kemampuannya mengubah sesuatu yang sebelumnya dianggap tidak bernilai menjadi produk ramah lingkungan yang bermanfaat bagi kehidupan sehari-hari.

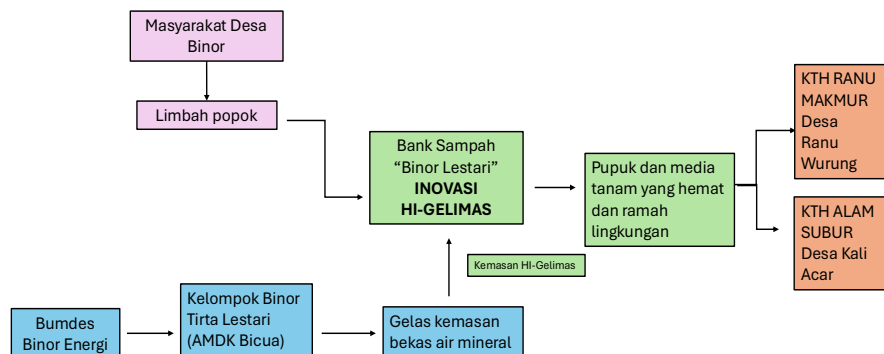
Inovasi HI-Gelimas lahir dari kepedulian Kelompok Binor Tirta Lestari terhadap meningkatnya volume limbah popok yang sering dibuang sembarangan dan berpotensi merusak lingkungan. Bersama perusahaan, mereka mencoba mengolah gel dari limbah popok menggunakan enzim alami dari kulit buah, hingga tercipta media tanam sekaligus pupuk organik. Upaya ini berhasil mengubah masalah menjadi solusi nyata bagi lingkungan. Sebelumnya, masyarakat membuang ratusan kilogram limbah popok setiap tahun, tetapi setelah HI-Gelimas hadir, limbah tersebut berhasil dikelola sehingga tidak mencemari lingkungan. Petani di Kabupaten Probolinggo yang sering mengalami kekeringan juga

merasakan manfaatnya karena tanaman lebih mudah tumbuh subur tanpa bergantung pada pupuk kimia yang sebelumnya digunakan sebanyak ratusan kilogram per tahun. Selain mengurangi penggunaan pupuk kimia, HI-Gelimas juga memberikan dampak ekonomi yang positif karena harga yang harus dibayar petani kini lebih terjangkau dibandingkan *hydrogel* komersial.

B. Transformasi Pengelolaan Limbah Popok di Tingkat Desa

Inovasi HI-Gelimas mengubah cara masyarakat Desa Binor mengelola limbah popok. Sebelumnya, popok bekas sering dibuang sembarangan, menumpuk di lingkungan, bahkan ada yang berakhir di laut. Kini, limbah popok dikelola dengan rapi oleh Bank Sampah Binor Lestari, dan anggota masyarakat mengubah gel dari popok bekas menjadi produk HI-Gelimas. Sistem pengelolaan ini berkembang berkat dukungan masyarakat, pemerintah desa, dan perusahaan sehingga aktivitas sehari-hari menjadi lebih bersih, sehat, serta bermanfaat.

Inovasi HI-Gelimas memberikan manfaat yang luas, tidak hanya bagi masyarakat Desa Binor, tetapi juga menjangkau desa dan kecamatan sekitarnya. Dampaknya menciptakan rantai nilai yang melibatkan berbagai pihak, mulai dari masyarakat, BUMDes, bank sampah, hingga petani sehingga setiap langkah yang dijalankan membawa kebaikan bagi banyak pihak secara bersamaan.



Gambar 44. Alur Pengelolaan Limbah Plastik dan Organik

Rantai inovasi ini dimulai dari *hydrogel* yang berasal dari limbah popok masyarakat Desa Binor, diolah oleh Kelompok Bank Sampah Binor Lestari menjadi produk HI-Gelimas. Kemasan HI-Gelimas memanfaatkan limbah gelas dari salah satu unit usaha Badan Usaha Milik Desa (BumDes) “Binor Energi” yang bergerak di bidang produksi air minum dalam kemasan. Produk ini kemudian digunakan oleh anggota Kelompok Tani Hutan Ranu Makmur di Desa Ranu Wurung dan anggota Kelompok Tani Hutan Alam Subur di Desa Kali Acar sebagai media tanam sekaligus pupuk organik untuk menanam tanaman Gamal.

Produk HI-Gelimas menawarkan keunggulan sekaligus membawa manfaat bagi lingkungan. Banyak *hydrogel* yang tersedia di pasaran hanya bisa melembapkan tanah tanpa memberikan nutrisi sehingga petani tetap perlu menambahkan pupuk kimia. HI-Gelimas hadir dengan kemampuan menyerap dan menyimpan air secara optimal, menjaga kelembapan tanah bahkan saat musim kemarau. Kandungan ekoenzim yang kaya nutrisi mendukung pertumbuhan tanaman dan meningkatkan hasil panen sehingga ketergantungan pada pupuk kimia bisa berkurang. Selain itu, kemasan produk dibuat dari bahan daur ulang, menambah nilai keberlanjutan dan membantu mengurangi limbah plastik. Inovasi ini berhasil mengubah limbah popok menjadi solusi nyata untuk permasalahan kekeringan lahan pertanian.

Inovasi HI-Gelimas berhasil membawa perubahan positif dalam kehidupan masyarakat Desa Binor. Kesadaran akan pentingnya daur ulang limbah rumah tangga, terutama popok yang sebelumnya sulit diolah, kini semakin meningkat. Popok yang dulu dibuang sembarangan kini disetorkan langsung ke Bank Sampah Binor Lestari. Para petani pun mulai beralih dari pupuk kimia ke praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan, memanfaatkan HI-Gelimas sebagai media tanam yang lebih terjangkau, efisien, dan kaya nutrisi organik. Berkat inovasi ini, masyarakat semakin giat mengelola potensi lokal dan memandang limbah bukan sebagai masalah, melainkan sebagai peluang usaha berkelanjutan yang memberi manfaat ekonomi sekaligus menjaga lingkungan.

Tabel 36. Jumlah Limbah Popok yang Diolah per Tahun

Jumlah limbah popok yang diolah	2020	2021	2022	2023	2024	2025
	430	555	824	1180	1400	1656

BAB 10

BANGKITNYA FLORA DAN FAUNA DARI LAHAN TERABAIKAN

A. Tantangan Konservasi di Tengah Krisis Iklim

Keanekaragaman hayati Indonesia, terutama tanaman, sedang menghadapi ancaman yang semakin serius akibat perubahan iklim, alih fungsi lahan, dan tekanan eksploitasi berlebihan. Beberapa tanaman langka telah berada di ambang kepunahan, baik di alam bebas maupun di habitat aslinya. Konservasi tanaman langka menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan kehidupan mereka. Salah satu cara yang bisa dilakukan adalah merawat dan menjaga tanaman di luar habitat aslinya sehingga spesies-spesies berharga ini tetap bisa bertahan dan dinikmati generasi mendatang.

Tantangan besar muncul ketika upaya konservasi eksitu harus menyesuaikan diri dengan perubahan iklim yang mempercepat rusaknya habitat alami dan menimbulkan ketidakstabilan lingkungan. Solusi inovatif dibutuhkan agar pelestarian tanaman langka tetap berjalan sekaligus memberikan pemahaman lebih baik tentang bagaimana ekosistem mereka bertahan di tengah tekanan perubahan iklim.

Inovasi ini menjadi langkah nyata untuk melindungi keanekaragaman hayati, terutama tanaman langka yang terpengaruh oleh perubahan sistem. Ekosistem lahan terbuka yang sebelumnya tidak

dikelola kini bertransformasi menjadi ekosistem vegetasi campuran yang banyak ditumbuhi tanaman langka. Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) pun berkembang menjadi ruang konservasi sekaligus tempat lahirnya ide-ide baru dalam pelestarian tanaman langka. Perubahan ekosistem ini membawa manfaat bagi lingkungan, seperti menyediakan habitat alami bagi satwa, memperbaiki struktur tanah, menurunkan suhu, dan menciptakan iklim mikro yang lebih seimbang.

Kebaruan program ini hadir bersamaan dengan pemanfaatan teknologi digital dan keterlibatan masyarakat secara aktif. Setiap tanaman langka kini dilengkapi *QR code* yang terhubung ke *database* digital sehingga pengunjung dapat langsung mengakses informasi tentang spesies tersebut. Cara ini menciptakan pengalaman belajar yang interaktif sekaligus menumbuhkan kesadaran akan pentingnya konservasi. Selain itu, pemanfaatan sensor digital yang terhubung ke *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan kelembapan, suhu, dan cahaya secara *real-time* sehingga perawatan tanaman dapat dilakukan secara tepat sesuai kebutuhan tiap spesies.

Taman Kehati bukan sekadar tempat pelestarian, tetapi juga ruang inovasi yang memadukan teknologi, edukasi, dan keterlibatan masyarakat untuk menjaga warisan hayati bangsa agar tetap hidup dalam ekosistem yang berkelanjutan. Taman ini menunjukkan bagaimana konservasi bisa dijalankan secara modern, efektif, dan menyentuh banyak orang melalui kerja sama dan kreativitas bersama.

Sebelum menjadi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati), lahan ini merupakan area terbuka yang tidak produktif. Sebagian besar permukaan dipenuhi batuan sehingga sulit ditumbuhi tanaman. Kondisi awalnya cukup memprihatinkan karena hampir tidak ada pohon, dan lahan ini belum memiliki nilai ekologis ataupun ekonomi yang nyata. Tanahnya kering, tandus, miskin unsur hara, dan tidak mendukung pertumbuhan vegetasi secara alami.

Tahap awal inovasi menghadirkan tantangan besar untuk mengubah lahan marginal menjadi ekosistem yang sehat dan mendukung kehidupan tanaman langka. Tim pengelola harus menemukan cara mengendalikan hama dan gulma, memperbaiki struktur tanah, serta

memulihkan kondisi mikroklimat agar tanaman bisa tumbuh optimal. Keterbatasan informasi tentang spesies lokal yang cocok untuk direhabilitasi membuat proses ini semakin menantang, ditambah minimnya fasilitas seperti sistem irigasi, jalur akses, dan sarana pemantauan yang diperlukan untuk menjaga keberlanjutan program konservasi.

Justru dari berbagai permasalahan, lahir inovasi yang menjadi kekuatan utama taman, mulai dari teknologi pemulihan ekosistem, edukasi digital, hingga pemberdayaan masyarakat. Transformasi lahan semak menjadi taman konservasi menunjukkan bahwa kreativitas dan ide baru sering muncul dari keterbatasan, dan dari situ, sesuatu yang bermanfaat bagi banyak orang dapat tercipta.

Ide perubahan dan inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) lahir dari kepedulian para karyawan PT Paiton Energy terhadap lingkungan sekitar. Lahan kosong yang sebelumnya tidak dimanfaatkan kemudian diubah menjadi ruang konservasi yang memberi manfaat ekologis sekaligus edukatif. Gagasan ini tumbuh dari keinginan kuat untuk menjaga keanekaragaman hayati di tengah tantangan kerusakan lingkungan akibat aktivitas industri dan perubahan iklim.

Para karyawan menyadari bahwa PT Paiton Energy, meski bergerak di bidang pembangkitan listrik, memegang tanggung jawab sosial dan lingkungan yang besar. Dari kesadaran itu, lahirlah gagasan Taman Kehati sebagai wujud kontribusi nyata untuk menjaga keseimbangan alam. Ide ini mendapatkan dukungan penuh dari manajemen dan terus berkembang melalui kerja sama dengan para ahli lingkungan, akademisi, serta komunitas lokal, termasuk LIPI (sekarang BRIN), Universitas Negeri Malang, dan warga sekitar.

Keistimewaan ide ini terlihat dari cara inovatif yang diterapkan sejak awal, memadukan teknologi digital, pelestarian modern, dan keterlibatan masyarakat. Dari lahan yang sebelumnya tak produktif, tumbuh taman yang kini menjadi simbol transformasi sekaligus wujud komitmen terhadap pelestarian hayati. Inisiatif ini membuktikan bahwa perubahan besar bisa lahir dari kepedulian kecil yang dirawat di sekitar lingkungan kerja.

Transformasi lahan menjadi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) membawa perubahan yang nyata bagi perlindungan tanaman langka dan keseimbangan alam. Dahulu, area ini hanyalah lahan kosong yang tidak dimanfaatkan, tanpa nilai ekologis ataupun sosial sehingga banyak tumbuhan liar invasif mengambil alih dan mengganggu keseimbangan lingkungan. Tanahnya pun tandus, sulit bagi vegetasi alami untuk tumbuh, dan tidak ada upaya yang terarah untuk menjaga atau memanfaatkan lahan tersebut. Sekarang, taman ini hadir sebagai ekosistem vegetasi campuran yang dikelola dengan penuh perhatian. Setiap sudutnya dirancang agar tanaman langka bisa berkembang, sedangkan keberadaan manusia dan alam bisa saling mendukung. Aktivitas edukasi dan keterlibatan masyarakat menambah kehidupan di taman ini, membuatnya bukan sekadar tempat pelestarian, tetapi juga menjadi ruang untuk orang belajar, merasakan, dan menghargai keanekaragaman hayati. Dengan begitu, taman ini menjadi simbol nyata bagaimana alam yang semula terabaikan bisa kembali hidup, memberi manfaat ekologis, sosial, dan inspirasi bagi banyak orang.

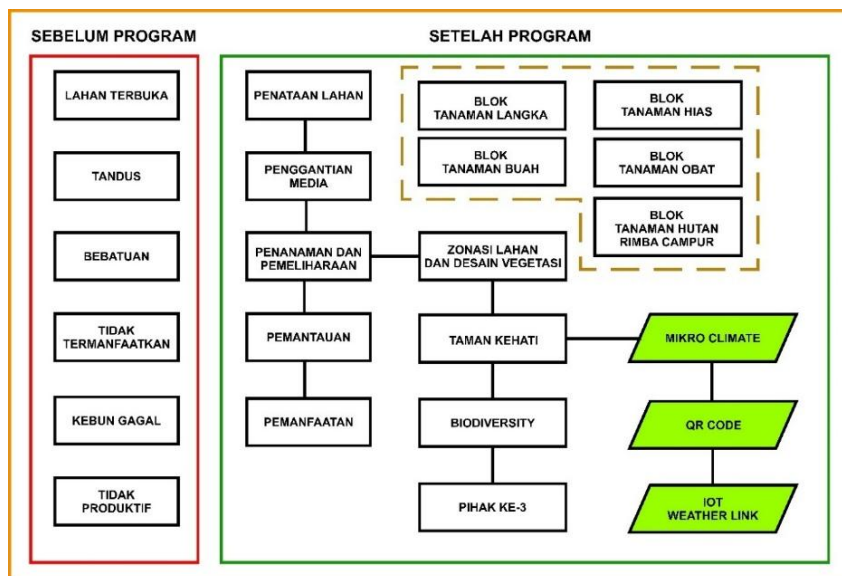
Perubahan dimulai dari inisiatif karyawan PT Paiton Energy yang melihat potensi lahan untuk dikembangkan menjadi ruang konservasi. Mereka merancang Taman Kehati sebagai wujud pelestarian lingkungan yang memadukan teknologi, edukasi, dan keterlibatan masyarakat. Langkah awal menitikberatkan pada rehabilitasi lahan dengan membersihkan gulma, memperbaiki struktur tanah, serta menanam spesies lokal dan tanaman langka yang memiliki nilai pelestarian tinggi.

Sistem yang sebelumnya pasif digantikan oleh cara yang lebih aktif dengan bantuan teknologi. Sensor digital dipasang untuk memantau kelembapan, suhu, dan intensitas cahaya secara langsung. Setiap tanaman langka diberi papan nama yang memuat famili, nama ilmiah, dan nama Indonesia sehingga pengunjung bisa belajar tentang spesies yang ada dengan bimbingan karyawan PT Paiton Energy dan komunitas lokal KAWAN HAYATI. Selain itu, pengunjung juga dapat memahami cara memperbanyak tanaman langka secara efisien melalui mikropropagasi sehingga pengalaman belajar menjadi lebih menarik dan interaktif.

Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) hasil inovasi PT Paiton Energy menyuguhkan pemandangan yang menggambarkan perubahan lahan kosong menjadi taman konservasi modern. Taman ini tersusun dari beberapa zona yang saling terhubung, seperti zona tanaman langka, zona tanaman rimba campur, zona tanaman buah, dan zona tanaman hias sehingga menciptakan keselarasan antara keindahan, keanekaragaman, dan fungsi ekologis.

Lahan yang sebelumnya kosong dan tandus kini berubah menjadi area pembibitan tanaman langka, lengkap dengan rumah kaca dan fasilitas perbanyakan bibit. Di tengah taman, jalur edukatif dihiasi berbagai spesies langka, masing-masing dilengkapi papan informasi yang memudahkan pengunjung mengenal keunikan tiap tanaman.

Zona pemantauan lingkungan dilengkapi sensor yang memantau kelembapan, suhu, dan cahaya secara *real-time* sehingga kondisi alam dapat terjaga dengan lebih baik. Sementara itu, serasah daun yang terkumpul diolah menjadi kompos, kemudian digunakan untuk merawat area Taman Kehati, menciptakan siklus alami yang bermanfaat bagi tanaman dan ekosistem sekitarnya.



Gambar 45. Perubahan Area Taman



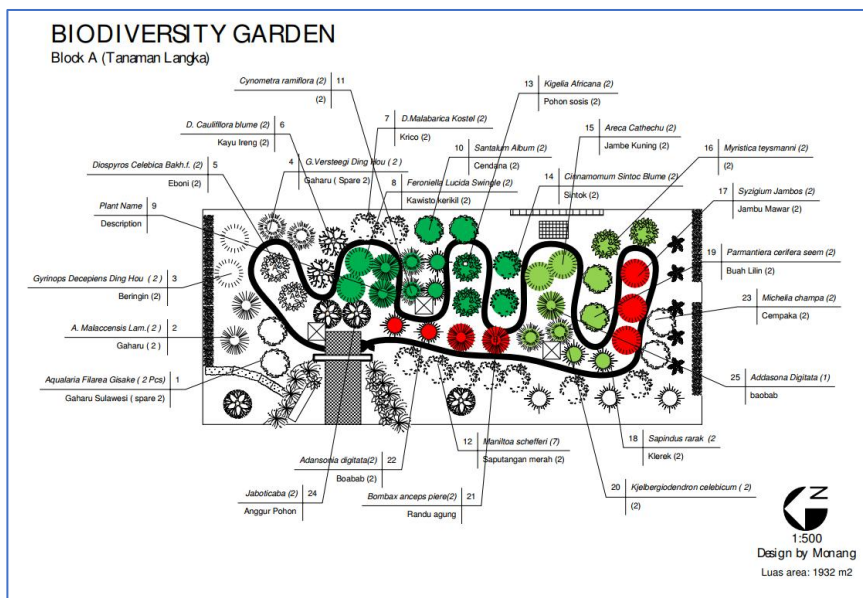
SEBELUM

SESUDAH

Gambar 46. Perbaikan Tata Kelola Area Taman



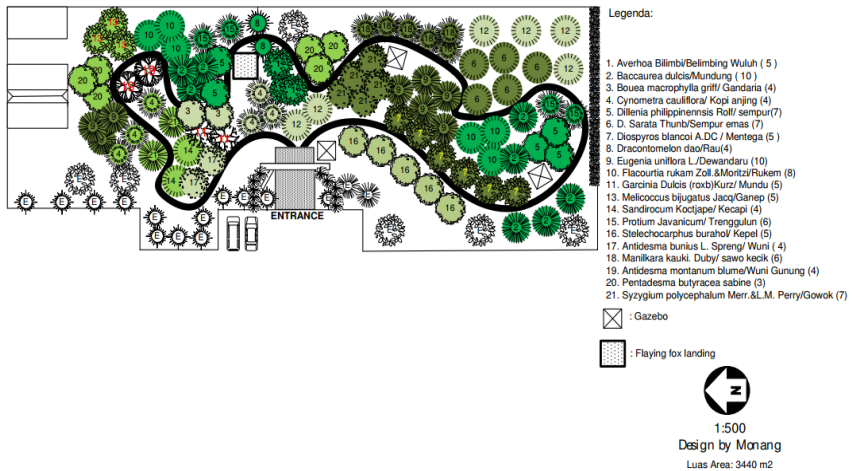
Gambar 47. Keanekaragaman Tanaman di Area Taman



Gambar 48. Denah Area Tanaman Langka

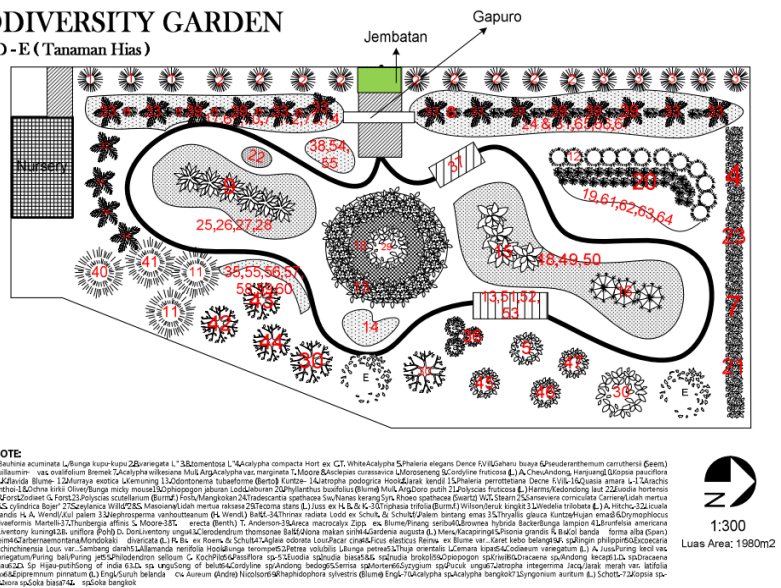
BIODIVERSITY GARDEN

Block B (Tanaman Buah)



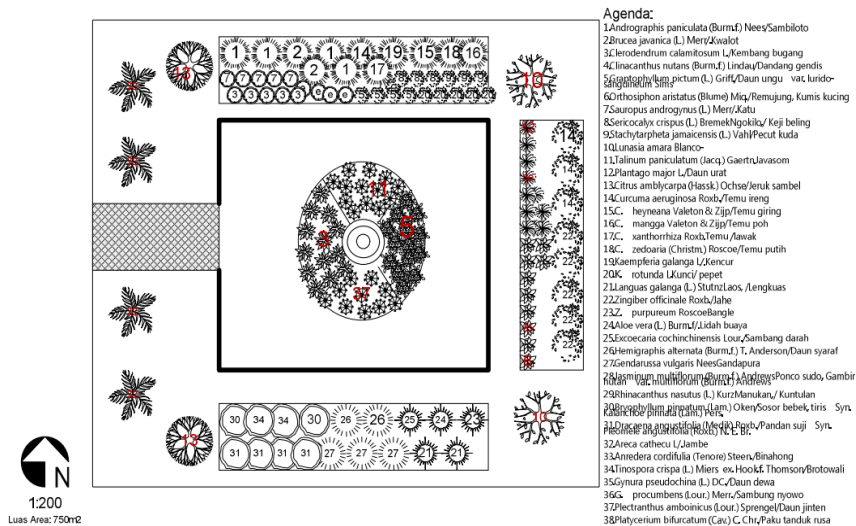
BIODIVERSITY GARDEN

Block D - E (Tanaman Hias)

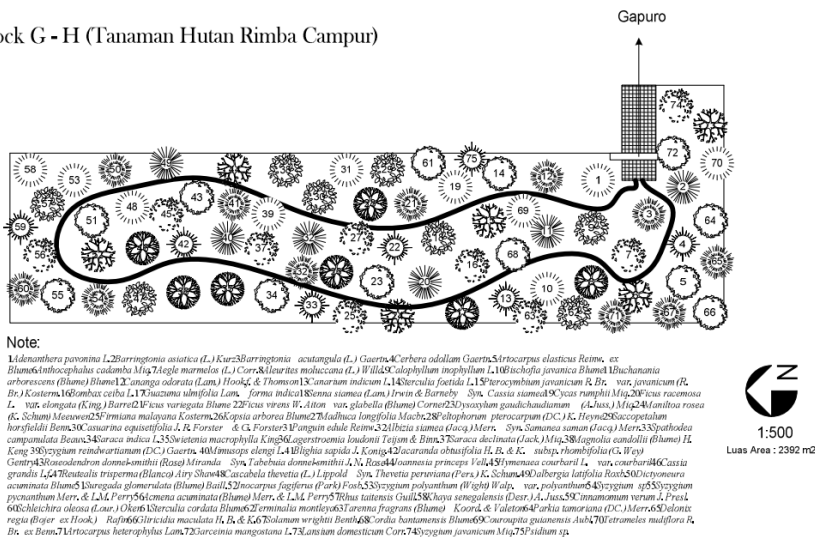


Gambar 49. Denah Area Tanaman Buah dan Tanaman Hias

Block F (Tanaman Obat)



Block G - H (Tanaman Hutan Rimba Campur)



Gambar 50. Denah Area Tanaman Obat dan Hutan Campuran

B. Kehidupan Baru: Meningkatnya Keanekaragaman Hayati

Inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) yang digagas karyawan PT Paiton Energy berhasil mengubah lahan kosong dan tandus menjadi taman yang penuh kehidupan. Transformasi ini menghadirkan ekosistem vegetasi campuran yang dihuni banyak tanaman langka, termasuk pohon sosis, nagasari, budengan, kayu hitam, kreco, wunut, sintok, dan gaharu. Sebanyak 60 individu dari 21 spesies langka ditanam, dan sekitar 80% berasal dari mikropropagasi sehingga reproduksi tanaman berlangsung cepat tanpa harus mengambil dari alam liar. Keberhasilan ini juga didukung kerja sama dengan BRIN yang membantu sejumlah spesies langka mulai pulih di habitat baru.

Taman ini membawa manfaat sosial dan ekologis yang nyata. Vegetasi yang lebih lebat menurunkan erosi, meningkatkan kelembapan tanah dan udara, serta menurunkan suhu rata-rata sekitar 1,5°C sehingga lingkungan terasa lebih sejuk dan nyaman. Kehadiran tanaman baru juga mendorong jumlah serangga penyerbuk, seperti lebah dan kupu-kupu, meningkat tiga kali lipat, menandai pemulihan ekosistem alami dan terciptanya harmoni antara manusia, tumbuhan, dan hewan di sekitar taman.

Taman Kehati menghadirkan banyak nilai tambah yang nyata. Vegetasi hijau di kawasan ini meningkat hingga 60% dalam dua tahun, sekaligus memperbaiki kualitas tanah dan menciptakan iklim mikro yang lebih sejuk. Kegiatan pelestarian tanaman langka melibatkan lebih dari 500 peserta, baik individu maupun komunitas, yang aktif berkontribusi melalui pendanaan dan edukasi konservasi. Taman ini juga menjadi pusat pembelajaran lingkungan bagi sekolah dan universitas, memberikan pengalaman langsung tentang keanekaragaman hayati. Keseluruhan kegiatan di Taman Kehati mengubah sistem lama yang pasif menjadi lebih aktif dan berkelanjutan, sekaligus membuktikan bahwa konservasi bisa dijalankan secara efisien, berdampak luas, dan menyentuh banyak orang. Kehadiran taman ini menegaskan bahwa teknologi, kepedulian, dan kerja sama mampu menciptakan solusi nyata bagi pelestarian keanekaragaman hayati Indonesia.

Inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) oleh PT Paiton Energy membawa perubahan nyata pada lingkungan sekitar. Lahan seluas sekitar 8.600 m² yang dulunya kosong dan tandus, dengan tutupan vegetasi kurang dari 10%, kini dipenuhi warna hijau setelah proses rehabilitasi dan penanaman. Keanekaragaman spesies di taman ini pun meningkat dengan pesat, termasuk lebih dari 21 spesies tanaman langka yang kini tumbuh subur dan aktif, menunjukkan hidupnya kembali kekayaan hayati yang sempat terabaikan.

Inovasi yang dilakukan di Taman Kehati telah berhasil meningkatkan keanekaragaman hayati flora dan fauna. Pada tahun 2025, tercatat 315 jenis tumbuhan, termasuk 25 tanaman langka yang menambah kekayaan taman ini. Keanekaragaman flora terlihat dari nilai indeks yang tinggi, dengan pemerataan sebesar 0,7 dan kekayaan jenis sebesar 33,4, menunjukkan bagaimana taman ini menjadi rumah bagi berbagai kehidupan yang seimbang dan beragam.

Keanekaragaman flora di Taman Kehati terus dipantau secara rutin selama bertahun-tahun. Hasil pemantauan tersebut tersaji pada Tabel 23, memperlihatkan ragam tanaman yang hidup dan berkembang di taman, sekaligus menjadi cermin kekayaan alam yang perlu dijaga dan dirawat bersama.

Tabel 37. Perkembangan Keanekaragaman Flora

Flora Taman Kehati	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Jumlah Flora	7.794	9.840	9.804	9.002	9.002	9.136	11.257	8.471	9.519	11.829	12.097
Jumlah Spesies	285	312	312	314	202	303	344	315	303	303	315
Indeks Keanekaragaman (H')	4,11	4,11	4,14	4,38	-	4,39	4,44	4,25	3,85	4,14	4,19
Indeks Kemerataan (E)	0,73	0,72	0,72	0,76	0	0,76	0,76	0,76	0,67	0,72	0,7
Indeks Kekayaan (R)	31,6	33,5	33,6	33,9	0	33	37	34,8	33	32,2	33,4

Perbaikan tutupan vegetasi tidak hanya meningkatkan keanekaragaman flora, tetapi juga memperbaiki habitat bagi fauna, terutama burung. Pada tahun 2025, jumlah jenis burung di Taman Kehati telah mencapai 43, dengan keanekaragaman yang tinggi. Sebarannya pun merata di seluruh area taman, sedangkan kekayaan jenis burung

menambah kehidupan dan warna di taman ini. Pemantauan fauna burung di Taman Kehati menunjukkan bagaimana taman ini menjadi rumah yang ramah dan penuh kehidupan bagi berbagai jenis burung.

Tabel 38. Perubahan Burung yang Terlihat Setiap Tahun

Fauna Taman Kehati	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Jumlah individu Burung	178	182	287	386	497	1796	1795	318	323	298
Jumlah Jenis	29	29	27	39	38	34	35	47	40	43
Indeks Keanekaragaman Burung	2,74	2,86	2,88	3,02	3,10	1,05	1,05	3,22	2,99	3,10
Indeks Kemerataan Burung	0,81	0,85	0,87	0,82	0,85	0,30	0,30	0,84	0,81	0,82
Indeks Kekayaan Burung	5,40	5,38	4,59	6,38	5,96	4,40	4,54	7,98	6,75	7,37

Inovasi ini tidak sekadar memperindah lanskap, tetapi juga mengembalikan kehidupan lahan dengan menghadirkan fungsi ekologis yang utuh sehingga menjadi habitat yang sehat dan berkelanjutan bagi berbagai flora dan fauna lokal. Keberadaan ruang ini menghadirkan harmoni antara alam dan manusia, sekaligus mengajak masyarakat untuk menghargai dan merawat lingkungan sekitar.

Inovasi Taman Kehati (INTAKE) telah melibatkan lebih dari 500 peserta, termasuk kelompok masyarakat, pelajar, komunitas lingkungan, dan karyawan perusahaan. Kegiatan ini mendorong terbentuknya kelompok masyarakat baru, Kawan Hayati, yang aktif menanam dan menjual tanaman hias lokal, memproduksi pupuk organik dari daun dan kompos taman, menyediakan jasa pemandu wisata edukatif, serta menyelenggarakan program edukasi lingkungan bagi sekolah dan universitas. Keterlibatan berbagai pihak ini menghadirkan semangat bersama untuk menjaga alam sekaligus menciptakan manfaat sosial yang nyata.

Kegiatan ini memberikan tambahan pendapatan rata-rata sebesar Rp1,5–2 juta per bulan bagi setiap peserta yang aktif dalam kegiatan ekonomi berbasis Taman Kehati. Secara keseluruhan, program ini meningkatkan pendapatan masyarakat lokal hingga Rp180 juta per tahun sekaligus menciptakan lapangan kerja hijau yang berkelanjutan. Dampak positif ini tidak hanya dirasakan dari sisi ekonomi, tetapi juga

menumbuhkan semangat partisipasi dan kepedulian masyarakat terhadap alam sekitar.

Inovasi Taman Kehati (INTAKE) membawa banyak manfaat, mulai dari efisiensi biaya operasional dan rehabilitasi lingkungan hingga mendorong perubahan sosial yang inklusif dan produktif. Program ini menunjukkan bagaimana perlindungan keanekaragaman hayati bisa menjadi sumber nilai tambah, baik secara ekonomi maupun sosial, sekaligus mendukung pembangunan yang ramah lingkungan dan penggunaan sumber daya yang berkelanjutan.

1. Penggerak Kolaborasi Lingkungan dan Sosial

Inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) yang dikembangkan PT Paiton Energy membawa perubahan positif pada aktivitas perusahaan. Fokus yang sebelumnya hanya pada pembangkitan listrik dan distribusi energi kini meluas, mencakup kegiatan konservasi, edukasi, dan pemberdayaan masyarakat. Kehadiran Taman Kehati memungkinkan perusahaan berperan lebih nyata dalam menjaga lingkungan sekaligus menciptakan manfaat sosial bagi masyarakat sekitar.

Transformasi lahan yang tadinya tidak produktif menjadi aset ekologis bernilai tinggi membuka kesempatan baru bagi pelestarian alam. Proses ini melibatkan tenaga profesional, teknologi kultur jaringan, dan sistem pemantauan berbasis sensor yang bekerja sama untuk membangun jaringan baru dalam menjaga keanekaragaman hayati. Langkah-langkah tersebut tidak hanya menyelamatkan lingkungan, tetapi juga menghadirkan contoh nyata bagaimana alam dan inovasi bisa saling mendukung.

Partisipasi aktif komunitas lokal dalam program adopsi tanaman langka dan kegiatan edukasi membuat masyarakat menjadi bagian penting dari perjalanan perusahaan. Keterlibatan ini tidak hanya menjaga kelestarian tanaman, tetapi juga menumbuhkan rasa kepemilikan, kebanggaan, dan tanggung jawab bersama terhadap lingkungan sekitar.

Taman edukasi dan konservasi yang menjadi produk baru ini menghadirkan peluang untuk bekerja sama dengan sekolah, universitas, dan lembaga lingkungan, sekaligus memperluas jaringan mitra

perusahaan. Keberadaan taman ini juga menambah nilai bagi reputasi perusahaan, menunjukkan komitmen terhadap keberlanjutan, sekaligus meningkatkan kepercayaan investor dan pemangku kepentingan.

Inovasi keanekaragaman hayati membawa perubahan positif pada rantai nilai yang dirasakan oleh banyak pihak, termasuk PT Paiton Energy, institusi pendidikan, dan masyarakat sekitar. Taman Kehati menjadi tempat bermanfaat bagi institusi pendidikan untuk belajar dan bereksplorasi, sedangkan masyarakat ikut berperan sebagai pemandu lokal melalui lembaga Kawan Hayati. Lembaga ini lahir dari semangat warga desa untuk bekerja sama dengan PT Paiton Energy, menghadirkan kegiatan pendidikan dan konservasi yang melibatkan masyarakat secara aktif.

Inovasi ini tidak hanya memperluas peran perusahaan, tetapi juga mengubah cara nilai tercipta menjadi lebih inklusif dan berkelanjutan. Dampak sosial dan lingkungan yang dihasilkan terasa nyata, membawa manfaat bagi masyarakat sekaligus menjaga keseimbangan alam.

2. Penguatan Budaya Keberlanjutan

Inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) membawa nilai tambah yang nyata bagi transformasi layanan PT Paiton Energy, terutama dalam hal tanggung jawab sosial dan pengelolaan lingkungan. Perusahaan yang sebelumnya dikenal dengan fokus pada pembangkitan energi kini memperluas jangkauan layanan melalui program-program konservasi dan edukasi lingkungan yang mendalam, menghadirkan dampak positif bagi masyarakat sekaligus alam sekitar.

Inovasi ini menghadirkan nilai tambah yang nyata bagi pengunjung Taman Kehati sekaligus memberikan keunggulan bagi perusahaan dibanding kegiatan lainnya. Dampak positifnya terasa tidak hanya pada lingkungan, tetapi juga pada masyarakat sekitar yang mendapat peluang baru untuk belajar dan berkreasi. Salah satu hasil paling berarti adalah lahirnya layanan baru berupa taman yang bisa diakses publik, sekolah, dan komunitas sebagai ruang belajar tentang konservasi. Taman Kehati kini berkembang menjadi destinasi pembelajaran lingkungan hidup, dengan rata-rata 500 pengunjung setiap tahun, menandakan tingginya

antusiasme dan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga keanekaragaman hayati. Keberhasilan ini turut memperkuat citra PT Paiton Energy sebagai perusahaan yang peduli terhadap keberlanjutan dan pelestarian ekosistem.

Taman Kehati menawarkan lebih dari sekadar inisiatif lingkungan karena mampu menghadirkan nilai tambah yang tinggi melalui kemitraan dengan berbagai institusi pendidikan dan lembaga lingkungan. Keterlibatan sekolah dan universitas dalam kegiatan edukasi dan pengembangan ilmu pengetahuan membuka peluang kolaborasi jangka panjang sekaligus memperkuat citra PT Paiton Energy di mata publik dan *stakeholder*. Inovasi ini menegaskan kemampuan perusahaan untuk mengikuti tuntutan masa depan yang lebih ramah lingkungan dan penuh pengetahuan, sambil menciptakan manfaat nyata bagi masyarakat dan alam.

Inovasi ini turut memperkuat budaya perusahaan yang menekankan keberlanjutan. Karyawan yang terlibat dalam kegiatan sosial dan ekologis terkait Taman Kehati mendapatkan kesempatan untuk lebih dekat dengan misi perusahaan sekaligus menjadi agen perubahan di komunitas. Keterlibatan ini tidak hanya menumbuhkan semangat dan kebanggaan kerja, tetapi juga memperkuat nilai-nilai keberlanjutan yang dihidupkan dalam setiap aktivitas perusahaan.

Taman Kehati tidak hanya memperluas portofolio produk PT Paiton Energy, tetapi juga menambah nilai reputasi, edukasi, dan dampak sosial yang berkelanjutan, sekaligus menciptakan sinergi antara kepentingan lingkungan, sosial, dan ekonomi. Inovasi ini membuka peluang bagi perusahaan untuk memimpin dalam industri yang semakin peduli pada keberlanjutan, sekaligus menjadikan PT Paiton Energy sebagai pionir dalam pengelolaan ekosistem dan pelestarian alam yang memberi manfaat nyata bagi masyarakat luas.

3. Perubahan Budaya Peduli Lingkungan

Inovasi Taman Keanekaragaman Hayati (Kehati) berhasil mendorong perubahan perilaku yang nyata, baik di PT Paiton Energy maupun di masyarakat sekitar. Sebelum taman ini hadir, kesadaran akan

pentingnya menjaga lingkungan masih terbatas, dan kegiatan pelestarian belum menjadi bagian dari kehidupan sehari-hari perusahaan ataupun komunitas lokal. Kehadiran taman ini membawa semangat baru, menumbuhkan kepedulian, dan mengajak banyak pihak untuk ikut merawat alam secara lebih aktif.

Penerapan inovasi di Taman Kehati mendorong karyawan untuk lebih aktif terlibat dalam kegiatan konservasi, mulai dari menanam dan memantau tanaman langka hingga memberikan edukasi lingkungan. Lebih dari 70% karyawan kini rutin berpartisipasi, menunjukkan perubahan sikap dari pasif menjadi proaktif. Masyarakat juga semakin peduli terhadap pelestarian alam melalui program pendidikan tentang tanaman langka dan jalur edukatif yang tersedia di taman. Beberapa sekolah bahkan menjadikan Taman Kehati sebagai ruang belajar di luar kelas, sekaligus melibatkan komunitas lokal dalam berbagai kegiatan konservasi.

Perubahan perilaku ini menumbuhkan budaya baru yang lebih peduli terhadap keberlanjutan. Hubungan antara perusahaan dan masyarakat pun semakin erat, sekaligus menumbuhkan rasa tanggung jawab bersama untuk menjaga lingkungan. Taman Kehati kini berperan sebagai katalisator yang menginspirasi sikap peduli lingkungan dan menciptakan dampak yang luas bagi banyak orang.

Inovasi Taman Kehati dalam pelestarian tanaman langka membawa berbagai nilai tambah yang terasa nyata. Kegiatan ini menciptakan perubahan pada rantai nilai, meningkatkan kualitas layanan dan produk, serta memengaruhi perilaku masyarakat menjadi lebih peduli dan aktif dalam menjaga keberlanjutan alam. Dampak-dampak ini menunjukkan bagaimana inovasi sederhana bisa menimbulkan perubahan besar bagi lingkungan dan komunitas sekitar.

Tabel 39. Perubahan pada Layanan, Kegiatan, dan Perilaku

Perubahan Rantai Nilai	Perubahan Layanan Produk	Perubahan Perilaku
Terbentuk lembaga baru KAWAN HAYATI yang berkolaborasi dalam pendidikan konservasi/ lingkungan	Taman Kehati menjadi lokasi wisata edukasi, penelitian dan pendidikan konservasi yang dapat diakses oleh publik, sekolah, dan komunitas	- Lebih dari 70% karyawan kini terlibat dalam program lingkungan secara rutin, menunjukkan pergeseran perilaku dari pasif menjadi proaktif terhadap pelestarian lingkungan. - Masyarakat lebih peduli terhadap pelestarian hayati serta terlibat langsung.

BAB 11

KOLABORASI UNTUK OPERASI YANG BERKELANJUTAN

A. Peta Pemangku Kepentingan dan Perannya dalam Empat Pilar Keberlanjutan

Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) melibatkan jaringan pemangku kepentingan yang kompleks. Secara garis besar, pemangku kepentingan di lingkungan PLTU dapat dibagi menjadi dua kelompok utama: aktor inti internal dan aktor pendukung eksternal. Aktor inti meliputi operator, teknisi, supervisor, tim *boiler* & turbin, tim air & kimia, tim lingkungan, HSSC (*Health Safety Security Compliance*), serta manajemen unit. Mereka bertanggung jawab langsung terhadap operasi harian, pemeliharaan, pengendalian kualitas, dan pengambilan keputusan strategis. Operator dan teknisi menjadi ujung tombak dalam pengendalian proses, sementara supervisor dan manajemen unit memastikan kepatuhan terhadap standar operasional dan regulasi (Ramly *et al.*, 2025; Roopa *et al.*, 2025). Tim *boiler* & turbin serta tim air & kimia berperan dalam menjaga efisiensi termal dan kualitas air, sedangkan tim lingkungan dan HSSC fokus pada pemantauan dampak lingkungan dan keselamatan kerja (Asif *et al.*, 2022; Roopa *et al.*, 2025).

Adapun aktor pendukung eksternal terdiri dari pemerintah daerah, dinas lingkungan, akademisi, sekolah, komunitas, lembaga sosial, UMKM,

serta pihak ketiga pengolah limbah. Pemerintah daerah dan dinas lingkungan berperan dalam pengawasan regulasi, penerbitan izin, serta penegakan standar emisi dan pengelolaan limbah (Sun *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022). Sementara itu, akademisi dan sekolah berkontribusi melalui riset, validasi data, serta edukasi masyarakat. Komunitas dan lembaga sosial menjadi jembatan antara PLTU dan masyarakat sekitar, mengadvokasi kepentingan lingkungan dan sosial, serta mendorong transparansi dan partisipasi publik (Ishardanti, 2023). Di sisi lain, UMKM dan pihak ketiga pengolah limbah berperan dalam pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah, mendukung ekonomi sirkular (Prasittisopin, 2024; Bielecka & Kulczycka, 2020).

Posisi dan kepentingan masing-masing aktor sangat dipengaruhi oleh tujuan keberlanjutan operasional PLTU. Operator dan manajemen unit berfokus pada efisiensi dan keandalan pembangkit, sementara tim lingkungan dan HSSC menekankan kepatuhan terhadap regulasi dan pengurangan dampak lingkungan (Ramly *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022). Pemerintah daerah dan dinas lingkungan menuntut kepatuhan terhadap standar emisi dan pengelolaan limbah, sedangkan masyarakat dan komunitas menuntut transparansi, partisipasi, dan perlindungan lingkungan hidup (Sun *et al.*, 2025; Ishardanti, 2023). Diagram jaringan hubungan antaraktor menggambarkan interaksi dinamis antara aktor internal dan eksternal, di mana kolaborasi, koordinasi lintas fungsi, dan transparansi data menjadi prinsip dasar yang harus dijaga untuk mencapai tujuan bersama (Sun *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022; Bielecka & Kulczycka, 2020).

Dalam konteks efisiensi energi, peran operator sangat krusial dalam penerapan pola *sootblower*, i-Bost, kontrol fan, dan pengendalian parameter efisiensi. Operator bertanggung jawab memastikan proses pembakaran berjalan optimal, mengurangi kehilangan panas, dan menjaga stabilitas operasi (Dzikuć *et al.*, 2020; Roopa *et al.*, 2025). Tim *engineering* berperan dalam analisis data, inspeksi peralatan, serta perbaikan terjadwal untuk mencegah kerusakan dan meningkatkan efisiensi sistem (Ramly *et al.*, 2025; Roopa *et al.*, 2025). Manajemen unit mengambil keputusan investasi operasional, mendukung implementasi

digitalisasi, dan memastikan adopsi teknologi terbaru untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi (Ramly *et al.*, 2025; Roopa *et al.*, 2025). Regulator memastikan pemenuhan standar emisi dan efisiensi melalui pengawasan, audit, serta pemberian insentif atau sanksi (Sun *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022). Masyarakat, meski tidak terlibat langsung, berperan melalui tuntutan lingkungan dan keterlibatan dalam program edukasi, yang mendorong PLTU untuk terus meningkatkan kinerja lingkungan dan sosial (Ishardanti, 2023).

Pengelolaan air di PLTU melibatkan tim *water treatment* yang bertanggung jawab atas manajemen CP Plant, siklus resin, kontrol kualitas air, dan proses regenerasi. Mereka memastikan air yang digunakan memenuhi standar kualitas untuk mencegah korosi dan *fouling* pada peralatan (Nihalani *et al.*, 2021; Roopa *et al.*, 2025). Operator WWTP (*Waste Water Treatment Plant*) berperan dalam pengurangan *sludge* dan pengendalian kualitas limbah cair sebelum dibuang ke lingkungan, meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem (Nihalani *et al.*, 2021). HSSC melakukan monitoring mutu air dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan (Asif *et al.*, 2022; Roopa *et al.*, 2025). Akademisi dan mitra eksternal berkontribusi dalam validasi metode pengolahan air serta memberikan rekomendasi perbaikan berbasis riset (Nihalani *et al.*, 2021). Masyarakat sekitar terlibat melalui program edukasi dan inspeksi terbuka, meningkatkan transparansi dan kepercayaan publik terhadap pengelolaan air di PLTU (Ishardanti, 2023).

Dalam pengelolaan dan pemanfaatan limbah, operator unit memastikan proses pembakaran berjalan optimal untuk mengurangi produksi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) (Dzikuć *et al.*, 2020; Prasittisopin, 2024). Tim lingkungan dan *engineering* mendesain pemanfaatan FABA, seperti pembuatan *paving block*, pengurangan *sludge*, serta pemisahan limbah berdasarkan karakteristiknya (Prasittisopin, 2024; Bielecka & Kulczycka, 2020). Pihak ketiga dan UMKM memanfaatkan limbah sebagai bahan baku produk bernilai tambah, seperti *paving*, media tanam, pupuk, dan kerajinan, mendukung ekonomi sirkular dan pemberdayaan ekonomi lokal (Prasittisopin, 2024; Bielecka & Kulczycka, 2020). Lembaga sosial berperan dalam pengelolaan *food waste* dan program *food donation*,

mengurangi limbah organik dan mendukung ketahanan pangan masyarakat sekitar (Ishardanti, 2023). Pemerintah daerah berperan dalam penerbitan izin pemanfaatan limbah non-B3 dan penerimaan produk hasil pemanfaatan limbah, memperkuat ekosistem ekonomi sirkular (Bielecka & Kulczycka, 2020).

Konservasi dan ekologi menjadi aspek penting dalam operasi PLTU yang berkelanjutan. Tim lingkungan bertanggung jawab atas restorasi Taman Kehati, monitoring burung, dan pengelolaan vegetasi di sekitar area PLTU, menjaga keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem (Asif *et al.*, 2022; Roopa *et al.*, 2025). Sekolah, komunitas pecinta alam, dan masyarakat terlibat dalam kegiatan edukasi, penanaman pohon, serta pengamatan biodiversitas, memperkuat kesadaran dan partisipasi publik dalam konservasi (Ishardanti, 2023). Lembaga riset dan akademik berperan dalam validasi data biodiversitas serta memberikan rekomendasi teknis berbasis sains (Asif *et al.*, 2022). Manajemen unit menyediakan ruang dan pendanaan operasional konservasi, memastikan program berjalan berkelanjutan (Ramly *et al.*, 2025; Roopa *et al.*, 2025). Sementara itu, pemerintah menetapkan standar dan kebijakan perlindungan keanekaragaman hayati, menjadi payung hukum bagi seluruh inisiatif konservasi di lingkungan PLTU (Sun *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022).

Kolaborasi lintas aktor menjadi kunci dalam mengatasi tantangan operasional, lingkungan, dan sosial di PLTU. Prinsip transparansi data, koordinasi lintas fungsi, dan kepatuhan regulasi harus dijaga untuk membangun kepercayaan dan sinergi antarpemangku kepentingan (Sun *et al.*, 2025; Asif *et al.*, 2022; Bielecka & Kulczycka, 2020). Pemerintah dan regulator perlu menyediakan insentif dan dukungan kebijakan untuk mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan dan praktik ekonomi sirkular (Sun *et al.*, 2025; Prasittisopin, 2024; Bielecka & Kulczycka, 2020). Akademisi dan lembaga riset harus terus mengembangkan inovasi dan memberikan rekomendasi berbasis bukti untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan PLTU (Asif *et al.*, 2022; Roopa *et al.*, 2025). Masyarakat dan komunitas juga perlu dilibatkan secara aktif dalam pengawasan,

edukasi, dan program pemberdayaan, sehingga tercipta hubungan yang harmonis antara PLTU dan lingkungan sekitarnya (Ishardanti, 2023).

B. Mekanisme Kolaborasi dan Tata Kelola Operasional

Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menghadapi tekanan besar untuk bertransformasi menuju keberlanjutan di tengah tuntutan efisiensi, keselamatan, dan pengurangan dampak lingkungan. Dalam konteks ini, mekanisme kolaborasi lintas departemen dan tata kelola keberlanjutan menjadi fondasi utama untuk memastikan operasi yang adaptif, akuntabel, dan berorientasi jangka panjang. Kolaborasi yang efektif antara departemen *engineering*, operasi, lingkungan, HSSC (*Health Safety Security Compliance*), serta CSR (*Corporate Social Responsibility*) sangat krusial untuk mengintegrasikan berbagai kepentingan dan keahlian dalam mencapai tujuan keberlanjutan.

Alur koordinasi antardepartemen di PLTU umumnya melibatkan proses komunikasi yang terstruktur dan informal. Koordinasi formal diwujudkan melalui rapat rutin lintas departemen, penggunaan *dashboard* digital untuk pemantauan kinerja, serta penerapan SOP (*Standard Operating Procedure*) lintas-fungsi yang memastikan setiap unit memahami peran dan tanggung jawabnya dalam rantai operasional dan pengelolaan risiko (Ramly *et al.*, 2025; Park *et al.*, 2020). Rapat rutin menjadi forum utama untuk menyelaraskan target, membahas isu teknis, dan mengevaluasi pencapaian, sementara *dashboard* digital menyediakan data *real-time* yang dapat diakses oleh seluruh pemangku kepentingan internal untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data (Liu *et al.*, 2022; Ramly *et al.*, 2025). SOP lintas-fungsi berperan sebagai panduan baku yang mengurangi potensi miskomunikasi dan memastikan konsistensi pelaksanaan tugas, terutama dalam aspek keselamatan kerja dan pengendalian emisi (Ramly *et al.*, 2025; Arifin & Ali, 2022).

Pengambilan keputusan dalam operasi PLTU semakin mengandalkan data operasional yang terintegrasi. Sistem pelaporan internal, seperti laporan harian dan bulanan, dikombinasikan dengan pelaporan eksternal kepada regulator dan masyarakat, membentuk mekanisme akuntabilitas yang transparan (Kuruppu *et al.*, 2023; Ludwig &

Sassen, 2021). Data yang dikumpulkan dari sensor, audit internal, dan evaluasi kinerja lingkungan menjadi dasar untuk menilai efektivitas strategi pengelolaan, mengidentifikasi area perbaikan, serta merespons dinamika eksternal seperti perubahan regulasi atau tekanan publik (Liu *et al.*, 2022; Asif *et al.*, 2022). Pelaporan eksternal, khususnya dalam bentuk *sustainability report*, tidak hanya memenuhi kewajiban regulasi, tetapi juga membangun kepercayaan publik dan memperkuat legitimasi sosial perusahaan (Kuruppu *et al.*, 2023; Ludwig & Sassen, 2021).

Prinsip tata kelola keberlanjutan (*sustainability governance*) yang relevan untuk PLTU meliputi transparansi, akuntabilitas, partisipasi, dan integrasi kepentingan lintas pemangku kepentingan (Ludwig & Sassen, 2021; Park *et al.*, 2020). Tata kelola yang efektif menuntut adanya komite keberlanjutan di tingkat dewan direksi, keberagaman dan independensi anggota dewan, serta insentif bagi manajemen untuk mendorong inovasi dan kepatuhan terhadap standar lingkungan (Ludwig & Sassen, 2021). Selain itu, praktik keterbukaan informasi dan pelibatan pemangku kepentingan eksternal, seperti pemerintah, masyarakat, dan LSM, menjadi kunci untuk memastikan bahwa kebijakan dan program keberlanjutan benar-benar responsif terhadap kebutuhan dan ekspektasi yang berkembang (Ezeh *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2025).

Namun, implementasi mekanisme kolaborasi dan tata kelola keberlanjutan di PLTU tidak lepas dari berbagai tantangan. Hambatan koordinasi lintas departemen sering kali muncul akibat perbedaan budaya kerja, prioritas, dan persepsi risiko antara unit *engineering*, operasi, lingkungan, dan HSSC (Park *et al.*, 2020; Arifin & Ali, 2022). Misalnya, departemen operasi cenderung fokus pada efisiensi dan kontinuitas produksi, sementara unit lingkungan dan HSSC lebih menekankan pada kepatuhan regulasi dan mitigasi risiko. Perbedaan ini dapat memicu resistensi terhadap perubahan, terutama ketika inovasi teknologi atau kebijakan baru dianggap mengganggu rutinitas atau menambah beban kerja (Ban *et al.*, 2024; Wei *et al.*, 2022).

Kendala teknis juga menjadi tantangan signifikan, terutama dalam integrasi sistem digital dan pengelolaan data lintas departemen. Kompleksitas sistem PLTU yang melibatkan ribuan sensor dan proses

dinamis menuntut adanya platform analitik yang mampu mengekstraksi, memvisualisasikan, dan menginterpretasi data secara intuitif (Liu *et al.*, 2022). Tanpa dukungan teknologi yang memadai, proses pengambilan keputusan berbasis data dapat terhambat oleh keterbatasan akses, kualitas data, atau kurangnya kapasitas analitik di tingkat operasional (Ramly *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2022). Selain itu, resistensi perubahan sering kali dipicu oleh kekhawatiran akan hilangnya kontrol, ketidakpastian hasil, atau kurangnya pemahaman terhadap manfaat jangka panjang dari inisiatif keberlanjutan (Sun *et al.*, 2025; Ban *et al.*, 2024).

Perbedaan prioritas antara pihak internal dan eksternal juga menjadi sumber ketegangan. Sering kali, manajemen PLTU dihadapkan pada dilema antara target produksi dan tuntutan pengurangan emisi atau peningkatan tanggung jawab sosial (Sun *et al.*, 2025; Sanz-Hernández *et al.*, 2020). Sementara regulator dan masyarakat menuntut transparansi, partisipasi, dan akuntabilitas yang lebih tinggi, pihak internal cenderung memprioritaskan stabilitas operasional dan efisiensi biaya. Ketidakseimbangan ini dapat memicu konflik, memperlambat proses pengambilan keputusan, atau bahkan menurunkan tingkat kepercayaan publik terhadap perusahaan (Sun *et al.*, 2025; Sanz-Hernández *et al.*, 2020; Ezeh *et al.*, 2024).

Untuk mengatasi tantangan tersebut, strategi membangun kapasitas, komunikasi, dan kepercayaan menjadi sangat penting. Pelatihan lintas departemen, *workshop* bersama, dan pembentukan tim kerja lintas-fungsi dapat meningkatkan pemahaman bersama, memperkuat jejaring kolaborasi, dan mengurangi silo organisasi (Park *et al.*, 2020; Arifin & Ali, 2022). Komunikasi yang efektif, baik formal melalui rapat dan laporan, maupun informal melalui diskusi ad hoc dan kelompok kerja sukarela, terbukti mampu memperkuat kepercayaan dan komitmen kolaboratif (Park *et al.*, 2020). Penggunaan platform digital untuk berbagi data, memantau kinerja, dan mendokumentasikan proses pengambilan keputusan juga meningkatkan transparansi dan akuntabilitas (Liu *et al.*, 2022; Ramly *et al.*, 2025).

Konsistensi data dan transparansi proses menjadi fondasi utama dalam membangun tata kelola keberlanjutan yang kredibel. Standardisasi format pelaporan, audit internal berkala, serta keterbukaan terhadap evaluasi eksternal memastikan bahwa data yang disajikan dapat diverifikasi dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan strategis (Kuruppu *et al.*, 2023; Ludwig & Sassen, 2021). Selain itu, pelibatan pemangku kepentingan eksternal melalui konsultasi publik, forum dialog, dan program CSR yang responsif terhadap kebutuhan lokal memperkuat legitimasi sosial dan memperluas dukungan terhadap inisiatif keberlanjutan (Ezeh *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2025).

Dalam konteks pengelolaan keberlanjutan PLTU, integrasi antara mekanisme formal dan informal menjadi kunci. Mekanisme formal seperti SOP, komite keberlanjutan, dan pelaporan terstruktur memberikan kerangka kerja yang jelas dan dapat diukur, sementara mekanisme informal seperti komunikasi kasual, kelompok kerja sukarela, dan jejaring personal memperkuat kohesi dan fleksibilitas organisasi (Park *et al.*, 2020). Keseimbangan antara kedua pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk beradaptasi dengan dinamika eksternal tanpa kehilangan arah strategis.

Selain itu, pengambilan keputusan berbasis data operasional yang terintegrasi dengan sistem pelaporan internal dan eksternal memperkuat akuntabilitas dan responsivitas organisasi terhadap perubahan lingkungan dan regulasi (Ramly *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2022; Kuruppu *et al.*, 2023). Prinsip tata kelola keberlanjutan yang menekankan transparansi, partisipasi, dan integrasi kepentingan lintas pemangku kepentingan menjadi landasan bagi PLTU untuk bertransformasi menuju operasi yang lebih hijau, efisien, dan berkelanjutan (Ludwig & Sassen, 2021; Ezeh *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2025).

C. Dampak Sosial dan Nilai Tambah Kolaborasi

Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) tidak hanya berperan sebagai penyedia energi, tetapi juga menjadi pusat dinamika sosial, ekonomi, dan lingkungan di sekitarnya. Dalam konteks keberlanjutan, kolaborasi antara PLTU, masyarakat, pemerintah, dan

institusi pendidikan menjadi kunci untuk memaksimalkan dampak positif dan meminimalkan risiko sosial. Salah satu aspek penting adalah pemanfaatan limbah seperti *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA), popok bekas, dan kayu, yang dapat memberikan nilai tambah ekonomi lokal melalui pendekatan ekonomi sirkular. Inovasi dalam pemanfaatan FABA, misalnya, telah terbukti mampu menghasilkan produk kompos berkualitas yang memenuhi standar nasional, sehingga mendukung program reklamasi lahan bekas tambang dan memperpanjang siklus hidup limbah (Juniarto *et al.*, 2025). Dengan demikian, limbah PLTU yang sebelumnya dianggap masalah lingkungan kini dapat menjadi sumber pendapatan baru bagi masyarakat sekitar, terutama jika didukung oleh kebijakan pemerintah yang mendorong pasar produk hasil daur ulang (Marinina *et al.*, 2021).

Selain aspek ekonomi, kolaborasi dalam pengelolaan limbah juga membuka peluang terciptanya pekerjaan hijau (*green jobs*) dan usaha baru. Proses daur ulang FABA dan limbah organik membutuhkan tenaga kerja untuk pengumpulan, pengolahan, hingga distribusi produk akhir. Hal ini tidak hanya mengurangi tingkat pengangguran, tetapi juga meningkatkan keterampilan masyarakat dalam bidang pengelolaan lingkungan dan teknologi ramah lingkungan (Juniarto *et al.*, 2025; Marinina *et al.*, 2021). Di beberapa wilayah, transformasi ekonomi lokal akibat keberadaan PLTU dan program daur ulang limbah telah mendorong diversifikasi usaha, seperti produksi bahan bangunan dari *fly ash*, pengembangan pupuk organik, hingga usaha jasa pengelolaan limbah domestik. Namun, penting untuk memastikan bahwa peluang ekonomi ini dapat diakses secara adil oleh kelompok rentan, seperti petani dan nelayan yang terdampak langsung oleh perubahan fungsi lahan dan kualitas lingkungan akibat operasi PLTU (Ishardanti, 2023; Al-Mahde *et al.*, 2025).

Peran sekolah dan komunitas sebagai mitra konservasi juga sangat vital dalam mendukung keberlanjutan operasi PLTU. Melalui kemitraan ini, sekolah dapat menjadi pusat edukasi lingkungan dan energi, memperkuat literasi masyarakat tentang pentingnya pengelolaan limbah, konservasi energi, dan adaptasi terhadap perubahan lingkungan.

Keterlibatan siswa dan mahasiswa dalam proyek-proyek kolaboratif, seperti penelitian reklamasi lahan atau pengembangan teknologi daur ulang, tidak hanya meningkatkan kapasitas individu, tetapi juga memperkuat jejaring sosial dan ketahanan komunitas (Budowle *et al.*, 2021). Kolaborasi antara institusi pendidikan dan PLTU dapat menghasilkan inovasi yang aplikatif, mempercepat adopsi teknologi ramah lingkungan, dan mendorong perubahan perilaku masyarakat menuju pola hidup berkelanjutan.

Peningkatan literasi energi dan lingkungan di masyarakat sekitar PLTU menjadi salah satu dampak sosial yang signifikan dari kolaborasi multipihak. Melalui program edukasi, pelatihan, dan sosialisasi, masyarakat menjadi lebih sadar akan risiko dan peluang yang dihadirkan oleh operasi PLTU. Pengetahuan tentang bahaya polusi udara, pentingnya efisiensi energi, serta manfaat ekonomi dari daur ulang limbah mendorong masyarakat untuk lebih proaktif dalam menjaga lingkungan dan memanfaatkan peluang ekonomi baru (Ma *et al.*, 2021; Ishardanti, 2023). Namun, penelitian menunjukkan bahwa meskipun tingkat kesadaran masyarakat terhadap risiko lingkungan cukup tinggi, adopsi perilaku adaptif masih rendah tanpa adanya dukungan emosional dan komunikasi risiko yang efektif (Ma *et al.*, 2021). Oleh karena itu, strategi komunikasi yang inklusif dan partisipatif sangat diperlukan untuk membangun kepercayaan dan mendorong perubahan perilaku kolektif.

Salah satu bentuk kolaborasi sosial yang berdampak langsung pada kesejahteraan masyarakat adalah program *food donation* yang dijalankan oleh PT Paiton Energy bersama mitra lokal. Program ini tidak hanya membantu mengatasi masalah ketahanan pangan di sekitar wilayah operasi, tetapi juga memperkuat solidaritas sosial dan memperluas jejaring dukungan bagi kelompok rentan. Di beberapa kasus, program donasi pangan juga terintegrasi dengan upaya pengurangan limbah makanan dan edukasi gizi, sehingga memberikan manfaat ganda bagi masyarakat (Al-Mahde *et al.*, 2025). Namun, untuk memastikan keberlanjutan program, diperlukan mekanisme monitoring dan evaluasi yang transparan serta partisipasi aktif dari komunitas penerima manfaat.

Keberlanjutan operasi PLTU pada akhirnya bertumpu pada sejauh mana seluruh pemangku kepentingan mampu menjalankan perannya secara selaras dalam empat pilar utama: energi, air, limbah, dan keanekaragaman hayati. Peran operator dalam menjaga stabilitas proses, teknisi dan *engineering* dalam memastikan keandalan peralatan, tim lingkungan dan HSSC dalam mengawal kepatuhan regulasi, hingga kontribusi pemerintah, komunitas, sekolah, lembaga sosial, serta pelaku usaha lokal membentuk satu ekosistem yang menentukan keberhasilan setiap inisiatif. Tidak ada satu inovasi pun—baik peningkatan efisiensi energi, pengurangan limbah, transformasi pengolahan air, maupun upaya restorasi ekologis—yang dapat bertahan tanpa dukungan kolektif dari seluruh aktor di dalam jaringan ini.

Kolaborasi menjadi faktor penentu karena keberlanjutan tidak lahir dari tindakan tunggal atau unit tertentu, melainkan dari interaksi yang terus-menerus antara aspek teknis, regulatif, sosial, dan ekologis. Ketika operator menjalankan prosedur efisiensi, regulator memastikan standar dipenuhi, dan masyarakat terlibat dalam pengawasan serta kegiatan edukasi, maka proses operasional berjalan dengan ritme yang lebih stabil dan bertanggung jawab. Begitu pula dalam pengelolaan limbah dan konservasi; tanpa kerja bersama antara internal PLTU, mitra eksternal, dan komunitas lokal, pemanfaatan limbah menjadi sumber nilai atau penguatan ekosistem tidak akan memberikan dampak jangka panjang.

Hubungan kolaboratif ini juga menjadi landasan bagi PLTU untuk berperan dalam agenda transisi energi dan ekonomi sirkular. Transformasi menuju operasi yang lebih efisien dan rendah emisi menuntut integrasi antara teknologi, kompetensi manusia, dan penerimaan sosial. Pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah, pengurangan jejak karbon melalui optimasi penggunaan energi, dan kegiatan konservasi yang berbasis komunitas menunjukkan bahwa transisi energi tidak hanya soal perubahan teknologi, tetapi juga perubahan dalam cara para aktor bekerja dan berinteraksi. Prinsip *circular economy* memperkuat struktur ini dengan menempatkan limbah sebagai sumber daya, memastikan bahwa setiap proses menghasilkan manfaat kembali bagi sistem sosial dan lingkungan.

Dengan demikian, keberlanjutan operasional PLTU adalah perjalanan kolektif. Kekuatan inovasi teknis perlu dipadukan dengan tata kelola yang transparan, komunikasi yang terbuka, serta partisipasi publik yang inklusif. Seluruh aktor memegang peran yang saling melengkapi, membentuk fondasi yang memungkinkan PLTU menjalankan operasi yang andal, efisien, dan bertanggung jawab secara lingkungan. Kolaborasi menjadi simpul yang mengikat semua upaya ini, memastikan bahwa transformasi yang dilakukan hari ini dapat memberikan manfaat jangka panjang bagi pembangkit, masyarakat, dan ekosistem tempat PLTU berada.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, K., & Chaerul, M. (2025). The effect of coal and biomass on the generation of fly ash and bottom ash at the Coal-Fired Power Plant ASAM ASAM Unit 1-4, South Kalimantan. *Applied Research in Science and Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.33292/areste.v5i1.78>
- Aditya, I. A., Wijayanto, T., & Hakam, D. F. (2025). Advancing Renewable Energy in Indonesia: A comprehensive analysis of challenges, opportunities, and strategic solutions. *Sustainability*, 17(5), 2216. <https://doi.org/10.3390/su17052216>
- Afify, A. A., Hassan, G. K., Al-Hazmi, H. E., et al. (2023). *Electrochemical Production of Sodium Hypochlorite from Salty Wastewater Using a Flow-by Porous Graphite Electrode*. *Energies*, 16(12), 4754.
- Albizzati, P. F., Tonini, D., Chammard, C. B., & Astrup, T. F. (2019). Valorisation of surplus food in the French retail sector: Environmental and economic impacts. *Waste Management*, 90, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.034>
- Ali, A., & Russell, J. D. (2025). Accelerating the transition to wood-based circular bioeconomy: A literature review of current state, trends, opportunities, and priorities for future research. *Current Forestry Reports*, 11, Article 23. <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00255-7>
- Al-Mahde, A. E., Hassan, S. A., Islam, M. T., Turzo, N. a. A., & Hossain, M. S. (2025). Impact of Rampal coal power plant on livelihood of local community. *International Journal of Social Science and Human Research*, 08(02). <https://doi.org/10.47191/ijsshr/v8-i2-23>
- Amaral, R. E., Brito, J., Buckman, M., Drake, E., Ilatova, E., Rice, P., Sabbagh, C., Voronkin, S., & Abraham, Y. S. (2020). Waste Management and Operational Energy for Sustainable Buildings: A

- review. *Sustainability*, 12(13), 5337.
<https://doi.org/10.3390/su12135337>
- Anriany, D., & Martianto, D. (2013). Estimasi sisa nasi konsumen di beberapa jenis rumah makan di Kota Bogor. *Jurnal Gizi dan Pangan*, 8(1), 33–38. <https://doi.org/10.25182/jgp.2013.8.1.33-38>
- Antoni, K., Klarens, K., Indranata, M., Al Jamali, L., & Hardjito, D. (–). The use of bottom ash for replacing aggregate in concrete paving blocks. *Proceedings, Petra Christian University & YTL Jawa Timur*.
- Arifin, K., & Ali, M. X. M. (2022). Relationship of communication and coordination practices on safety outcomes in Coal-Fired power plants: Validating leading indicators influences. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4250776>
- Asif, Z., Chen, Z., Wang, H., & Zhu, Y. (2022). Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(8), 2329–2347. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02328-8>
- Ateeq, A., & Jain, N. (2025). Development of road paving blocks utilizing bottom ash from waste-to-energy plant. *International Journal of Environmental Protection*, 45(8), 711–719.
- Aygün, B. F., Bilir, T., & Uysal, M. (2024). Coal bottom ash and its applications in cement and concrete technologies: a review. *Discover Civil Engineering*, 1, 86.
- B. A Larkin, Frances M. Cutler, Michael A. Sadler (2001), *EPRI Guideline for Off site Regeneration of Condensate Polishing Resin*, 3420 Hillview Avenue Palo Alto, CA 94304
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 8021:2014 – Pelet kayu sebagai bahan bakar padat – Persyaratan mutu*. Badan Standardisasi Nasional.
- Balai Konservasi Sumber Daya Alam Indonesia. (2019). *Panduan konservasi tumbuhan langka Indonesia*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Ban, M., Sun, Y., Chen, Q., Liu, Y., Jiang, H., Song, W., Xia, S., Song, M., Liu, H., & Bai, W. (2024). Coordination of maintenance and Multi-

- Technical flexibility retrofits for Coal-Fired power plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(3), 4946–4957. <https://doi.org/10.1109/tia.2024.3354233>
- Bhoi, P. R., & Sarkar, S. (2025). The Co-Firing of pine biomass and waste coal in 100 and 600 MW power plants: a sustainable approach to reduce GHG emissions. *Sustainability*, 17(10), 4473. <https://doi.org/10.3390/su17104473>
- Bielecka, A., & Kulczycka, J. (2020). Coal Combustion Products Management toward a Circular Economy—A Case Study of the Coal Power Plant Sector in Poland. *Energies*, 13(14), 3603. <https://doi.org/10.3390/en13143603>
- Budowle, R., Krszjanek, E., & Taylor, C. (2021). Students as change Agents for Community–University Sustainability Transition Partnerships. *Sustainability*, 13(11), 6036. <https://doi.org/10.3390/su13116036>
- Cahyani, F. A., Wulandari, P., & Putri, N. A. (2022). Food waste management regulation in Indonesia to achieve sustainable development goals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 978, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/978/1/012022>
- Cashman, S., Gaglione, A., Mosley, J., Weiss, L., Hawkins, T. R., Ashbolt, N. J., et al. (2014). *Environmental and Cost Life Cycle Assessment of Disinfection Options for Municipal Wastewater Treatment*. EPA Report 600/R-14/377.
- Castelluccio, S., Orlandella, I., Fiore, S., & Comoglio, C. (2025). Evaluating the environmental performances of thermal power plants: A study on EMAS registered Italian sites. *Journal of Cleaner Production*, 490, 144677. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144677>
- Chi, K. H., & McCracken, M. (2024). Water usage in cooling systems for electricity production: an event study of retrofitted coal-fired power plants in the United States. *Environmental Research Letters*, 19(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad6fb8>
- Convention on Biological Diversity. (2020). *Global biodiversity outlook 5*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

- Dzikuć, M., Kuryło, P., Dudziak, R., Szufa, S., Dzikuć, M., & Godzisz, K. (2020). Selected aspects of combustion optimization of coal in power plants. *Energies*, 13(9), 2208. <https://doi.org/10.3390/en13092208>
- Electric Power Research Institute. (2006). *Heat Rate Improvement Reference Manual (TR-109546)*. EPRI.
- Electric Power Research Institute. *Maintenance Guide for High Voltage Motors*. NP-7502. Palo Alto (CA): EPRI; 1991.
- Elwardany, M., Nassib, A., & Mohamed, H. A. (2024). Advancing sustainable thermal power generation: insights from recent energy and exergy studies. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 617–644. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.039>
- Endress, B. A., & Gorchov, D. L. (2020). Ex situ conservation and plant propagation strategies for threatened species under climate change. *Journal of Nature Conservation*, 55, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125837>
- Eslick, J. C., Zamarripa, M. A., Ma, J., Wang, M., Bhattacharya, I., Rychener, B., Pinkston, P., Bhattacharyya, D., Zitney, S. E., Burgard, A. P., & Miller, D. C. (2022). Predictive modeling of a subcritical pulverized-coal power plant for optimization: Parameter estimation, validation, and application. *Applied Energy*, 319, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119226>
- Ezeh, N. M. O., Ogbu, N. a. D., Ikevuje, N. a. H., & George, N. E. P. (2024). Stakeholder engagement and influence: Strategies for successful energy projects. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(7), 2375–2395. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i7.1330>
- Fajri, M., & Wibowo, A. (2021). Pemanfaatan Internet of Things (IoT) untuk pemantauan lingkungan pada area konservasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(2), 145–156.
- FAO. (2017). *Water management in agriculture: Improving resilience to climate change*. FAO.
- FAO. (2018). *Soil health and sustainable agriculture*. FAO.

- Fauziah, Nur. (2020), *Analisis Data Menggunakan Multiple Linear Regression Test di Bidang Kesehatan Masyarakat dan Klinis*, Politeknik Kesehatan Kemenkes Bandung, 978-623-91302-6-8.
- Flanagan, K., Robertson, K., & Hanson, C. (2019). *Reducing food loss and waste: Setting a global action agenda*. World Resources Institute. https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/reducing-food-loss-waste-global-action-agenda_0.pdf
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Food wastage footprint: Impacts on natural resources – Summary report*. FAO. <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- GP Strategies. (2021). *EtaPRO 10.5 Administrator Training Workbook*. EtaPRO LLC.
- Guo, S., Wu, Y., Wang, Z., & Yin, X. (2024). *Effect of electrolytic zero-valent iron activated sodium hypochlorite on sludge dewatering performance*. *Water Science & Technology*, 89(4), 989–1002.
- Guo, Y., Mauzerall, D. L., Lyu, Y., Hu, W., Tian, J., & Chen, L. (2022). Benefits of infrastructure symbiosis between coal power and wastewater treatment. *Nature Sustainability*, 5(12), 1070–1079. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00963-z>

- Hossain, S., Chowdhury, H., Chowdhury, T., Ahamed, J. U., Saidur, R., Sait, S. M., & Rosen, M. A. (2020). Energy, exergy and sustainability analyses of Bangladesh's power generation sector. *Energy Reports*, 6, 868–878. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.010>
- IEEE Standards Association. *IEEE Std 112-2017: Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE; 2017.
- IEEE Standards Association. *IEEE Std 43-2013: Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. New York: IEEE; 2013.
- Institute for Essential Services Reform. *Indonesia Energy Transition Outlook (IETO) 2025*. Jakarta: IESR; 2025.
- Ishardanti, R. (2023). Social impact analysis on environmental conflict dynamics at coal fired steam power plant. *Interaction Community Engagement and Social Environment*, 1(1). <https://doi.org/10.61511/icese.v1i1.2023.187>
- Islam, N. F., Gogoi, B., Saikia, R., Yousaf, B., Narayan, M., & Sarma, H. (2024). Encouraging circular economy and sustainable environmental practices by addressing waste management and biomass energy production. *Regional Sustainability*, 5(4), 100174. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2024.100174>
- Ivanova, S., Vesnina, A., Fotina, N., & Prosekov, A. (2022). An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions. *Sustainability*, 14(22), 15135. <https://doi.org/10.3390/su142215135>
- Ji, L., Ding, J., Wang, C., Luo, Y., Liu, Q., Hu, G., & Liu, X. (2025). *Recent progress in electrochemical synthesis of hypochlorite and its future outlook*. *Materials Chemistry Frontiers*, 9, 1997–2017.
- Juniarto, A., Hardiwinoto, S., Faridah, E., Mansur, I., & Elettaria, A. A. (2025). Utilization of fly ash, bottom ash, and local organic materials to support circular economy in coal mine reclamation. *BIO Web of Conferences*, 167, 03015. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516703015>

- K.J Shield, B. A Larkin, Francess M. Cutler, Michael A. Sadler, Eli Salem (2006), *EPRI, Condensate Polishing Guidelines for Fossil Plants*, 3420 Hillview Avenue Palo Alto, CA 94304
- K.J Shield, B. A Larkin, Francess M. Cutler, Michael A. Sadler, Eli Salem (2004), *EPRI, Condensate Polishing Training Manual*, 3420 Hillview Avenue Palo Alto, CA 94304
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2023 tentang Pemanfaatan Bahan Bakar Biomassa sebagai Campuran Bahan Bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap*. <https://jdih.esdm.go.id/index.php/web/result/2233/detail>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. *Laporan Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi*. Jakarta: ESDM; 2024.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2018). *Pedoman Pembangunan Taman Keanekaragaman Hayati (Taman Kehati)*. Direktorat Jenderal Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem.
- Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Bappenas. (2021). *Laporan kajian food loss and waste di Indonesia dalam rangka mendukung penerapan ekonomi sirkular dan pembangunan rendah karbon*. Kementerian PPN/Bappenas. <https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/06/Report-Kajian-FLW-FINAL-4.pdf>
- Kennedy, A., Marwah, N., Socaningrum, J. F., & Diana, D. R. (2024). Optimizing Renewable Energy Integration and Emission Reduction Through Coal-Fired Power Plants Co-Firing. *2024 International Conference on Technology and Policy in Energy and*

- Electric Power (ICTPEP)*, 181–186. <https://doi.org/10.1109/ict-pep63827.2024.10733533>
- KLHK RI. (2022). *Strategi nasional pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Koksal, F., Gençel, O., Şahin, Y., & Okur, O. (2021). Recycling bottom ash in production of eco-friendly interlocking concrete paving blocks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 985–1001.
- Kuruppu, S. C., Milne, M. J., & Tilt, C. A. (2023). Sustainability control systems in short-term operational and long-term strategic decision-making. *Meditari Accountancy Research*, 32(1), 234–265. <https://doi.org/10.1108/medar-12-2021-1548>
- Lestari, D., & Prasetyo, A. (2021). Pengembangan Taman Keanekaragaman Hayati sebagai upaya konservasi eks situ di Indonesia. *Jurnal Konservasi Sumber Daya Hayati*, 7(2), 45–56.
- Liao, B., Zeng, X., Ling, Z., Zhao, S., Li, B., & Han, X. (2025). Recent Advances in zero discharge treatment technologies for desulfurization wastewater in Coal-Fired power Plants: A Mini-Review. *Processes*, 13(4), 982. <https://doi.org/10.3390/pr13040982>
- Liu, S., Weng, D., Tian, Y., Deng, Z., Xu, H., Zhu, X., Yin, H., Zhan, X., & Wu, Y. (2022). ECOALVIS: Visual Analysis of Control Strategies in Coal-fired power Plants. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(1), 1–11. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2022.3209430>
- Losada-Agudelo, M., & Souyris, S. (2024). Sustainable Operations Management in the Energy Sector: A Comprehensive Review of the Literature from 2000 to 2024. *Sustainability*, 16(18), 7999. <https://doi.org/10.3390/su16187999>
- Ludwig, P., & Sassen, R. (2021). Which internal corporate governance mechanisms drive corporate sustainability? *Journal of Environmental Management*, 301, 113780. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113780>
- Ma, Y., Gopal, S., Ma, X., Gallagher, K., Koch, M., & Kaufman, L. (2023). The deforestation and biodiversity risks of power plant projects in

- Southeast Asia: A big data Spatial Analytical framework. *Sustainability*, 15(19), 14461. <https://doi.org/10.3390/su151914461>
- Ma, Y., Ma, Y., Cao, Z., Li, S., Lv, B., Ruan, Z., Wang, L., Yu, H., & Lu, Z. (2021). Residents' Cognition and Behavior Related to Eco-Environmental Risks from the Development of Large Coal Power Plants: A Case Study in Xilinhot, Inner Mongolia. *Sustainability*, 13(14), 7813. <https://doi.org/10.3390/su13147813>
- Marinina, O., Nevskaya, M., Jonek-Kowalska, I., Wolniak, R., & Marinin, M. (2021). Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: a stakeholder approach. *Energies*, 14(12), 3597. <https://doi.org/10.3390/en14123597>
- Miśkiewicz, R. (2020). Efficiency of Electricity Production Technology from Post-Process Gas Heat: Ecological, Economic and Social Benefits. *Energies*, 13(22), 6106. <https://doi.org/10.3390/en13226106>
- Mulgan, G. (2019). *Social innovation: How societies find the power to change*. Policy Press.
- Nihalani, S. A., Mishra, Y. D., & Meeruty, A. R. (2021). Water resource management for Coal-Based thermal power plant. In *Water science and technology library* (pp. 27–40). https://doi.org/10.1007/978-3-030-79400-2_3
- Paiboonsin, P., Oluleye, G., Howells, M., Yeganyan, R., Cannone, C., & Patterson, S. (2023). Pathways to Clean Energy Transition in Indonesia's Electricity Sector with Open-Source Energy Modelling System Modelling (OSeMOSYS). *Energies*, 17(1), 75. <https://doi.org/10.3390/en17010075>
- Park, A. Y. S., Krause, R. M., & Hawkins, C. V. (2020). Institutional Mechanisms for Local Sustainability collaboration: Assessing the duality of formal and informal mechanisms in promoting collaborative processes. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 31(2), 434–450. <https://doi.org/10.1093/jopart/muaa036>
- Pemerintah Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi*. Jakarta: Sekretariat Negara; 2023.

- Penkarski Rodon, E. (2017). *Life Cycle Assessment for Wastewater Disinfection Using Sodium Hypochlorite, Peracetic Acid or Performic Acid*. Master's thesis, McGill University.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. (2012). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 188. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5325/pp-no-81-tahun-2012>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. (2017). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2017 Nomor 210. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/74769/perpres-no-97-tahun-2017>
- Peters, I. M., Hauch, J., & Brabec, C. (2024). Cradle-to-cradle recycling in terawatt photovoltaics: A vision of perpetual utility. *Joule*, 8(4), 899–912. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.025>
- Prasittisopin, L. (2024). Power plant waste (fly ash, bottom ash, biomass ash) management for promoting circular economy in sustainable construction: emerging economy context. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/sasbe-09-2024-0395>
- Purwanto, Y., & Rugayah. (2018). Keanekaragaman hayati flora Indonesia: Kondisi terkini dan upaya konservasinya. *Biodiversitas*, 19(6), 2141–2153.
- Putra, M. S. N., Prasojo, A. E., Budiman, A., Anty, M. Z., & Hasnowo, L. A. (2024). Comparative analysis of FABA waste composition in various Coal-Fired Power plant industries in several countries and Indonesia: a review. *Indonesian Journal of Chemical Studies*, 3(2), 82–89. <https://doi.org/10.55749/ijcs.v3i2.58>
- R. E Puttman . (2000). *EPRI, Condenser In Leakage Guideline*, Conco Consulting Corporation 532 Jones Street Washington Verona, Pennsylvania 15147

- Rahayu, S., & Yuliani, N. (2020). Peran Taman Kehati dalam peningkatan keanekaragaman flora lokal di kawasan industri. *Jurnal Ekologi Tropis*, 9(1), 12–21.
- Ramly, Z. T. A., Ishak, M. Y., Abdullah, A. M., Ismail, M., Abdullah, S., & Mansor, A. A. (2025). Investigating the effectiveness of Coal-Fired power plant operations: management, technical and air pollution aspects. *Emerging Science Journal*, 9(1), 86–113. <https://doi.org/10.28991/esj-2025-09-01-06>
- Resosudarmo, B. P., Rezki, J. F., & Effendi, Y. (2023). Prospects of energy transition in Indonesia. *Bulletin of Indonesian Economic Studies*, 59(2), 149–177. <https://doi.org/10.1080/00074918.2023.2238336>
- Reynolds, C., Soma, T., Spring, C., & Lazell, J. (Eds.). (2020). *Routledge handbook of food waste*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429462795>
- Rimantho, D., Hidayah, N. Y., & Pratomo, V. A. (2023). Performance evaluation of wood pellets derived from biomass waste as a sustainable energy source. *International Journal of Energy Production and Management*, 8(4), 251–258. <https://doi.org/10.18280/ijepm.080407>
- Roopa, M., Mangaroo-Pillay, M., & Siriram, R. (2025). A Systematic Literature Review: An Input-Transformation-Output Model for Coal-Fired Plant Operations. *Energy Science & Engineering*, 13(9), 4615–4632. <https://doi.org/10.1002/ese3.70174>
- Sanz-Hernández, A., Ferrer, C., López-Rodríguez, M. E., & Marco-Fondevila, M. (2020). Visions, innovations, and justice? Transition contracts in Spain as policy mix instruments. *Energy Research & Social Science*, 70, 101762. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101762>
- Sengkey, S. L., Kandiyoh, G. E., Slat, V. B., & Hombokau, C. (–). Properties of geopolymer paving blocks based on fly ash with bottom ash as sand substitution. *ResearchGate* (manado).
- Shi. Yuanho, Li. Mengwei, Win. Jie, Cui. Fangshu, Qiao. Gangzhu (2022). *Prediction of Ash Deposition on Heating Surfaces of Coal-fired*

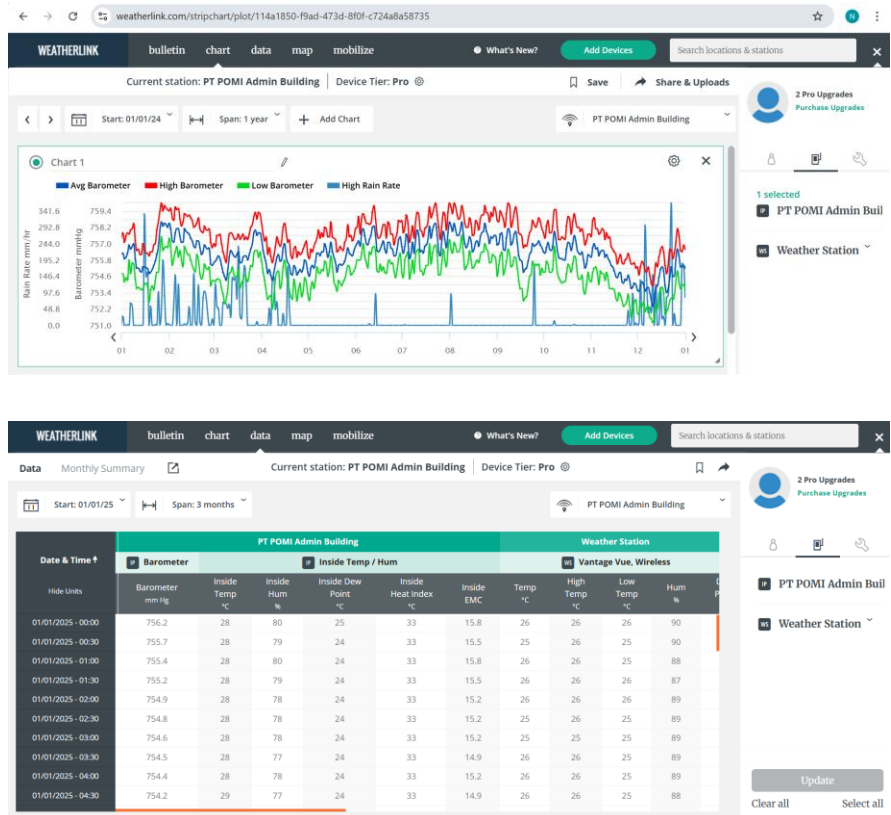
- Power Plant Boiler based on Dynamic Neural Network*, IEEE, 978-1-6654-7896-0.
- Skoczko, I. (2025). Energy Efficiency Analysis of Water Treatment Plants: Current status and future trends. *Energies*, 18(5), 1086. <https://doi.org/10.3390/en18051086>
- Southern-Company. (2004). Heat rate handbook.
- Sugiyono, A., Syahputra, R., & Febijanto, I. (2022). Potential of biomass and coal co-firing power plants in Indonesia: A PESTEL analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012007>
- Sujai, M., Wahyudi, R., & Sakina, N. A. (2023). *Transition from coals to renewable energy: Evidence from Indonesia* (No. 1416). ADBI Working Paper. <https://doi.org/10.56506/dmqn4483>
- Sukandar, D., & Hamzah, H. (2022). Pemanfaatan QR Code dalam pengelolaan database tanaman untuk edukasi konservasi. *Jurnal Sistem Informasi*, 18(1), 55–64.
- Sun, L., Li, X., Su, C., Wang, X., & Yuan, X. (2025). Analysis of dynamic strategies for decision-making on retrofitting carbon capture, utilization, and storage technology in coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125371. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125371>
- Sunaryo, S., Kasmawati, K., Pham, H. N., & Rahayu, A. (2025). Regulatory Frameworks to Integrate *Corporate Social Responsibility* with Circular Economy Principles. *Hasanuddin Law Review*, 236–253. <https://doi.org/10.20956/halrev.v11i2.6135>
- Sundin, N., Persson Osowski, C., Strid, I., & Eriksson, M. (2022). Surplus food donation: Effectiveness, carbon footprint and rebound effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106271. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106271>
- Tsalas, N., Golfinopoulos, S. K., Samios, S., Katsouras, G., & Peroulis, K. (2024). Optimization of energy consumption in a wastewater treatment plant: An overview. *Energies*, 17(12), 2808. <https://doi.org/10.3390/en17122808>

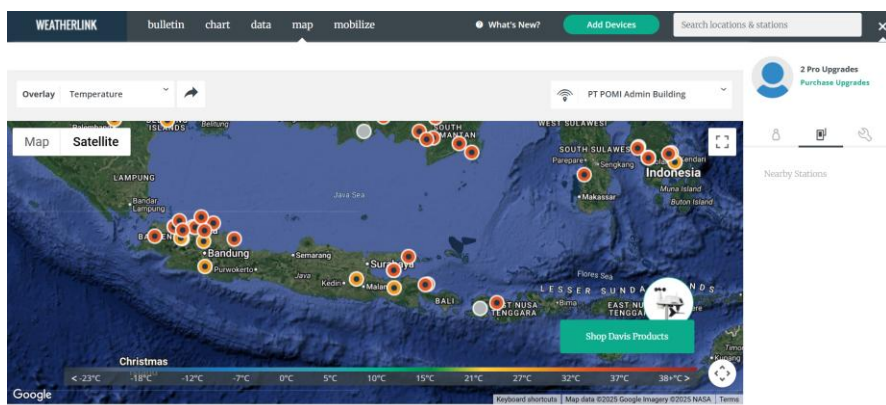
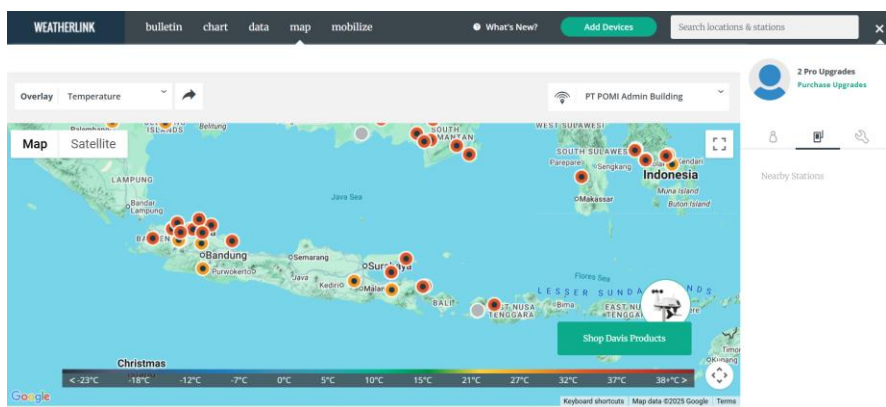
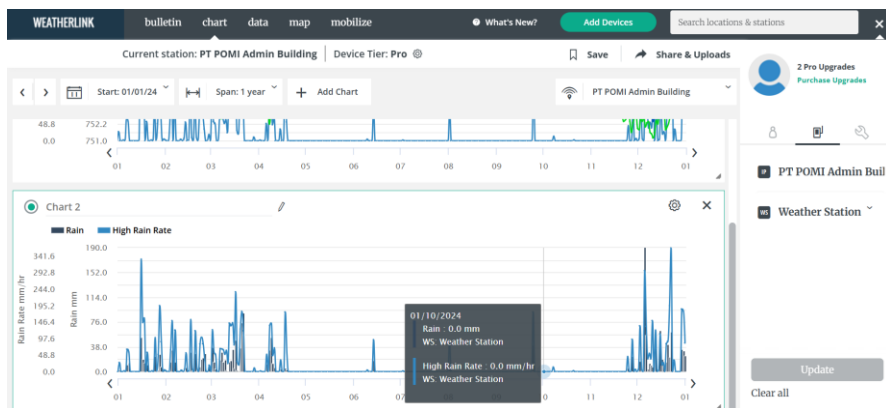
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. (2008). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2008 Nomor 69. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/39903/uu-no-18-tahun-2008>
- UNEP. (2020). *Sustainable consumption and production: Circular economy approaches*. United Nations Environment Programme.
- United Nations Environment Programme. (2021). *UNEP Food Waste Index Report 2021*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>.
- Vincevica-Gaile, Z., Zhylina, M., Shishkin, A., Ansone-Bertina, L., Klavins, L., Arbidans, L., Dobkevica, L., Zekker, I., & Klavins, M. (2025). Selected residual biomass valorization into pellets as a circular economy-supported end-of-waste. *Cleaner Materials*, 15, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100295>
- Wang, C., Xu, M., Olsson, G., & Liu, Y. (2020). Characterizing of water-energy-emission nexus of coal-fired power industry using entropy weighting method. *Resources Conservation and Recycling*, 161, 104991. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104991>
- Wang, C., Yan, Y., Li, J., Quan, Y., Li, S., & Wu, G. (2020). Integrated Environmental Effect Assessment on large Coal-Electricity Production Base and Sustainability Strategy: a case in Xilin Gol, China. *Sustainability*, 12(15), 5943. <https://doi.org/10.3390/su12155943>
- Wang, J., Salman, C. A., Wang, B., Li, H., & Thorin, E. (2020). Integrating sludge drying in biomass fueled CHP plants. *Energy Ecology and Environment*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00187-x>
- Wei, P., Peng, Y., & Chen, W. (2022). Climate change adaptation mechanisms and strategies of coal-fired power plants. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27(8). <https://doi.org/10.1007/s11027-022-10031-8>

- Widagdo, Y. D., & Darmanto, P. S. (2025). A review of biomass cofiring as an effort for maintaining steam power plant performance in Indonesia. *ITB Graduate School Conference*, 4(1). <https://gcs.itb.ac.id/proceeding-igsc/index.php/igsc/article/view/325>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. (2022). Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 55–80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
- Yang, M., Zhou, Y., Yang, J., Bao, J., Wang, D., & Yu, Q. (2022). Performance analysis of an efficient waste heat utilization system in an ultra-supercritical coal-fired power plant. *Energy Reports*, 8, 5871–5882. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.044>
- Yue, H., Worrell, E., Crijns-Graus, W., & Zhang, S. (2021). The potential of industrial electricity savings to reduce air pollution from coal-fired power generation in China. *Journal of Cleaner Production*, 301, 126978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126978>
- Zeng, B., Yang, X., Hu, P., Wang, Y., Dong, H., Gong, D., & Ye, X. (2025). Towards a digitally enabled intelligent coal mine integrated energy system: Evolution, conceptualization, and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 73, 104128. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104128>
- Zhang, Yun-Hui, Pu, Xue-sen, Yang, Qing-feng. (2011). *The Intelligent Soot-Blowing Programmable Control System which is Based on Improved Elman Neural Network*, IEEE, 978-1-4244-9010-3.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemantauan Cuaca dan Lingkungan





Lampiran 2 Bukti Legal Hak Cipta

 REPUBLIK INDONESIA KEMENTERIAN HUKUM	
SURAT PENCATATAN CIPTAAN	
Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:	
Nomor dan tanggal permohonan	: EC002025154244, 15 Oktober 2025
Pencipta	
Nama	: Muhammad Lubab
Alamat	: Dusun Kelembun Timur RT/RW 002/001, Pakuniran, Kab. Probolinggo, Jawa Timur, 67292
Kewarganegaraan	: Indonesia
Pemegang Hak Cipta	
Nama	: Nurlaily Lavianti
Alamat	: Dusun Krajan RT/RW 006/003, Paiton, Kab. Probolinggo, Jawa Timur, 67291
Kewarganegaraan	: Indonesia
Jenis Ciptaan	: Karya Tulis
Judul Ciptaan	: INTAKE – INOVASI TAMAN KEHATI EKSITU SEBAGAI MINIATUR LABORATORIUM KONSERVASI - MENEMUKAN SOSUSI BARU UNTUK TANAMAN LANGKA DI ERA PERUBAHAN IKLIM
Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia	: 15 Oktober 2025, di Kab. Probolinggo
Jangka waktu perlindungan	: Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.
Nomor Pencatatan	: 000994505
adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon. Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.	
	a.n. MENTERI HUKUM DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL u.b Direktur Hak Cipta dan Desain Industri Agung Damarsasongko,SH.,MH. NIP. 196912261994031001
	Disclaimer: 1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan. 2. Surat Pencatatan ini tidak dapat digunakan sebagai alat bukti elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara. 3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan kebenarannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi jika diragukan dapat diwww.

Lampiran 3 Aksi Hijau Bersama Masyarakat





Citra industri pembangkit listrik sering kali lekat dengan bayangan asap tebal dan mesin raksasa yang kaku dan tak tersentuh. Di balik dinding beton yang kokoh tersebut, sebuah revolusi hijau diam-diam dijalankan untuk mengubah wajah operasional menjadi lebih bersahabat dengan bumi. Tantangan besar dalam menekan pemborosan energi di jantung pembangkit dijawab melalui inovasi-inovasi cerdas, mulai dari teknik membersihkan ketel uap yang lebih hemat hingga pembaruan teknologi yang mampu menurunkan emisi secara signifikan. Tidak hanya berkuat pada api dan listrik, siklus air yang menjadi nadi kehidupan mesin pun dijaga kemurniannya lewat transformasi proses yang meninggalkan cara-cara lama. Semangat untuk bergerak menuju transisi energi dituangkan dalam langkah-langkah nyata, membuktikan bahwa efisiensi tinggi dan kepedulian pada kelestarian alam bisa berjalan beriringan dalam satu napas operasi.

Sisa buangan industri yang selama ini dipandang sebelah mata ternyata menyimpan potensi kebaikan yang tak terduga jika dilihat dengan kacamata baru. Timbunan limbah seperti lumpur dan abu sisa pembakaran (FABA) disulap menjadi material berguna seperti *paving block* yang siap memperkuat infrastruktur warga. Kepedulian tersebut diperluas hingga ke hal-hal yang sering luput dari perhatian, seperti penyelamatan sisa makanan, pemanfaatan kayu bekas, hingga solusi kreatif untuk limbah rumah tangga demi pertanian. Lahan-lahan yang dulunya gersang atau terabaikan kini disapa kembali oleh kehidupan flora dan fauna yang mekar di tengah area industri, menandakan pulihnya keseimbangan ekosistem. Seluruh kisah perubahan ini dirangkum sebagai bukti nyata bahwa kolaborasi harmonis antara manusia, teknologi, dan alam mampu menciptakan nilai tambah yang membawa manfaat luas bagi masyarakat dan lingkungan sekitar.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id

📖 Penerbit Deepublish

📧 @penerbitbuku_deepublish

🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Pembangkit Listrik Tenaga Uap

ISBN 978-634-01-3106-2



9

786340

131062

