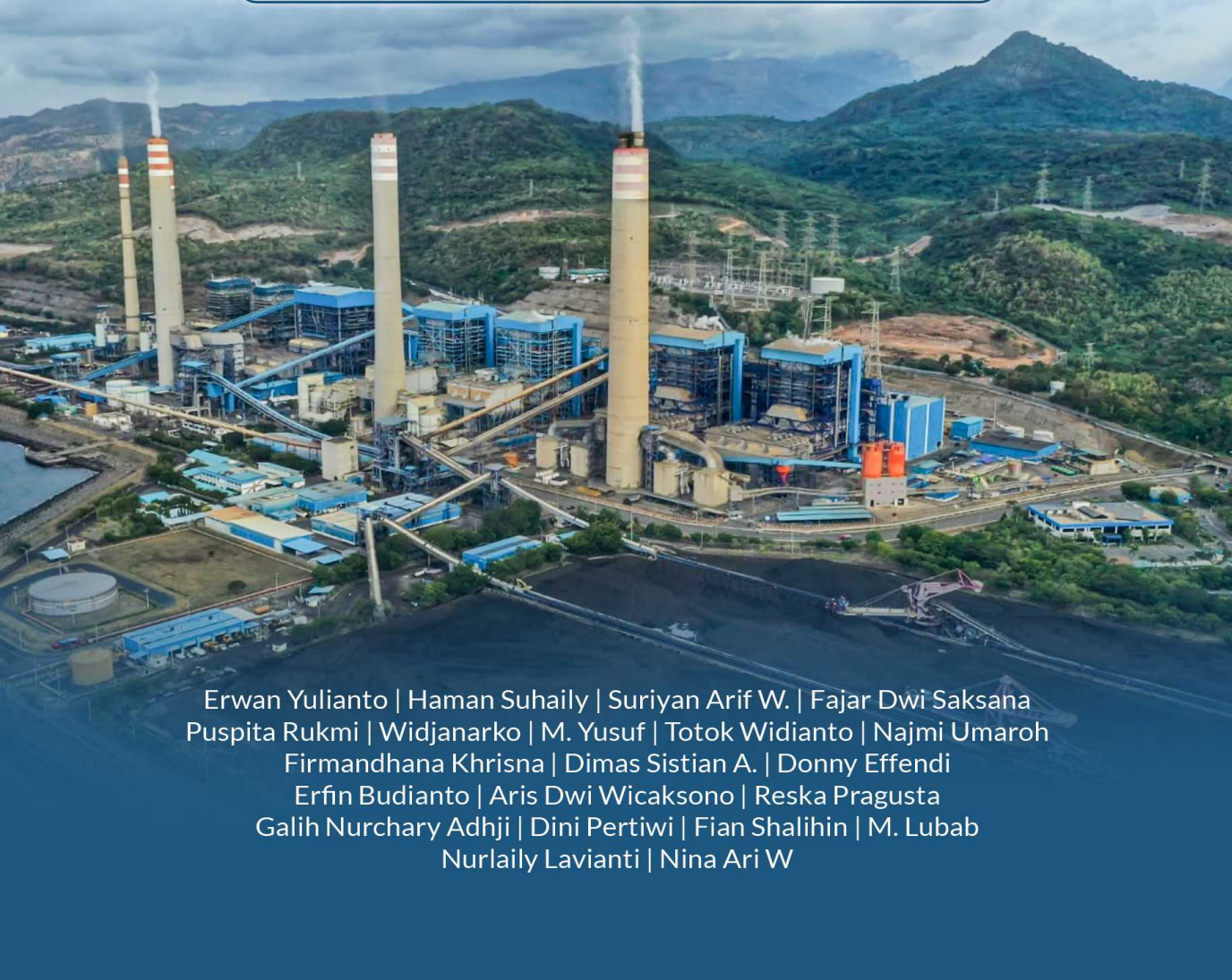




Membangun Masyarakat Berdaya
Melalui Teknologi:

LANGKAH MENUJU MASA DEPAN YANG BERKELANJUTAN

(Building Empowered Societies Through Technology:
Steps Towards a Sustainable Future)



Erwan Yulianto | Haman Suhaily | Suriyan Arif W. | Fajar Dwi Saksana
Puspita Rukmi | Widjanarko | M. Yusuf | Totok Widiyanto | Najmi Umaroh
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

**Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi :
Langkah Menuju Masa Depan yang Berkelanjutan
(*Building Empowered Societies Through Technology :
Steps Towards a Sustainable Future*)**

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).

**Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi :
Langkah Menuju Masa Depan yang Berkelanjutan
(*Building Empowered Societies Through Technology :
Steps Towards a Sustainable Future*)**

Erwan Yulianto, Haman Suhaily, Suriyan Arif W., Fajar Dwi Saksana,
Puspita Rukmi, Widjanarko, M. Yusuf, Totok Widiyanto, Najmi Umaroh,
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

Editor:

M. Lubab, Erfin Budianto, Haman Suhaily, Fajar Dwi Saksana,
Totok Widiyanto, Galih Nurchary Adhji, Nina Ari W

Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi : Langkah Menuju Masa Depan yang Berkelanjutan (*Building Empowered Societies Through Technology : Steps Towards a Sustainable Future*)

Editor : M. Lubab, Erfin Budianto, Haman Suhaily, Fajar Dwi Saksana, Totok Widiyanto
Galih Nurchary Adhji, Nina Ari W
Desain Cover : Ali Hasan Zein
Sumber : humphery (www.shutterstock.com)
Tata Letak : T. Yuliyanti
Proofreader : A. Timor Eldian

Ukuran:
xvi, 115 hlm., Uk.: 15.5x23 cm

ISBN:
978-634-01-0726-5

Cetakan Pertama:
Mei 2025

Hak Cipta 2025 pada Penulis
Copyright © 2025 by Deepublish Publisher
All Right Reserved

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

Penerbitan buku ini bekerja sama dengan PT. Paiton Energy

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 ***Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi: Langkah Menuju Masa Depan yang Berkelanjutan (Building Empowered Societies Through Technology: Steps Towards a Sustainable Future)*** 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 menyajikan serangkaian inovasi yang berdampak pada lingkungan dan pemberdayaan masyarakat, mulai dari pengelolaan limbah non-B3 hingga penerapan teknologi canggih dalam peningkatan performa pembangkit dan pengolahan air limbah.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis 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

KATA PENGANTAR

Dengan penuh kebanggaan, kami persembahkan buku berjudul ***"Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi: Langkah Menuju Masa Depan Berkelanjutan"*** ini sebagai bagian dari komitmen yang kuat dalam upaya transformasi menuju bisnis energi yang berkelanjutan.

Inovasi-inovasi yang tercantum dalam buku ini merupakan hasil pemikiran cemerlang dan dedikasi berbagai pihak. Setiap gagasan dan terobosan yang dihadirkan tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kinerja pembangkit, tetapi juga membuka peluang bagi pengembangan energi bersih di masa depan dan dapat menjadi motor penggerak bagi pemberdayaan masyarakat dan kelestarian lingkungan.

Kami percaya bahwa kolaborasi antara industri, pemerintah, dan akademisi adalah kunci penting untuk mempercepat transisi energi. Oleh karena itu, buku ini kami hadirkan sebagai kontribusi nyata bagi pemangku kepentingan untuk bersama-sama membangun sistem energi yang lebih berkelanjutan.

Kami berharap buku ini dapat menjadi sumber inspirasi bagi berbagai pihak—mulai dari pelaku industri, pembuat kebijakan, peneliti, hingga masyarakat umum—untuk terus mendorong inovasi yang berdampak positif bagi bisnis, lingkungan, dan sosial. Semoga karya ini dapat memicu ide-ide baru dan aksi kolektif menuju masa depan energi yang lebih baik.

Salam inovasi dan keberlanjutan.

Fazil Erwin Alfitri

Presiden Direktur PT Paiton Energy

SEKAPUR SIRIH / SUMMARY

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan karunia-Nya, kami mempersembahkan buku bertajuk *“Membangun Masyarakat Berdaya Melalui Teknologi: Langkah Menuju Masa Depan yang Berkelanjutan.”* Buku ini merupakan cerminan dari komitmen kami terhadap keberlanjutan, teknologi, dan pemberdayaan masyarakat sebagai fondasi utama dalam menghadapi tantangan masa depan.

Buku ini diawali dengan bab mengenai **Inovasi Perlindungan Keanekaragaman Hayati**, salah satunya dengan **SUSPECFUEL (Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel)**. SUSPECFUEL memanfaatkan limbah serbuk kayu menjadi *wood pellet* ramah lingkungan sebagai alternatif bahan bakar. Inovasi ini tidak hanya mengurangi limbah dan emisi karbon, tetapi juga membuka lapangan kerja dan mendukung kemandirian energi berbasis biomassa.

Pengelolaan limbah Non-B3 dengan EnzymPoz merupakan sebuah inovasi terintegrasi dari pengelolaan limbah organik berupa kulit buah dan daun yang menghasilkan cairan ecoenzyme, pupuk organik, dan bahkan produk kesehatan *EcoPillow*. Inovasi berbasis *zero waste* ini tidak hanya berkontribusi pada lingkungan, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi baru dari bahan yang sebelumnya terbuang sia-sia.

Inovasi Efisiensi Energy dengan tema **THERMEX (Thermal Heat Rate Management Expert System)** mampu meningkatkan efisiensi energi di PLTU. Sistem ini membantu operator dalam memantau dan mengelola parameter pembangkit secara real-time, sehingga mampu menurunkan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca. Inovasi ini mampu memperbaiki efisiensi thermal sekitar (2-3)% yang sebanding dengan penghematan 140.000 ton batubara pertahun. Selain itu, inovasi ini juga mampu menghemat penggunaan batu bara hingga 50.496 ton atau setara dengan 1.009.913,92 GJ energi. Hal ini membuktikan bahwa transformasi digital mampu memberikan dampak nyata pada efisiensi dan keberlanjutan operasional pembangkit.

Inovasi Menurunkan Emisi dengan pemeliharaan berbasis data **menurunkan konsumsi arus listrik motor PLTU** melalui optimasi sistem pemantauan tekanan udara furnace. Inovasi ini mampu menurunkan emisi untuk bahan pencemar konvensional dan gas rumah kaca dengan. Dengan inovasi ini, konsumsi energi dapat ditekan secara signifikan, serta mengurangi beban lingkungan dari penggunaan listrik berlebih.

Inovasi Efisiensi Air dan Penurunan Beban Pencemar Air menjadi langkah kongsrit dalam menjaga sumber daya air. Sebuah inovasi yang mengaplikasikan teknologi **Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)** pada instalasi pengolahan air limbah (SWTP) di pembangkit. Teknologi ini meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair domestik dan memenuhi baku mutu lingkungan. Teknologi MBBR merupakan salah satu solusi penting dalam mendukung standar lingkungan hidup perusahaan. Efektivitas Teknologi MBBR Terhadap Removal TSS pada SWTP merupakan tipe inovasi perubahan sub system dan termasuk pada kategori Value Chain Optimisation. Tipe inovasi perubahan sub system, menekankan pada perubahan pada rantai proses dan perubahan sektor. Rantai proses pengolahan air limbah SWTP baru (MBBR) mampu mengubah dan memotong rantai proses timbulan limbah domestik sehingga mengurangi timbulan limbah domestik pada sektor limbah non B3. Nilai tambah terkait perubahan perilaku berupa tidak diperlukan lagi pengurasan dan pembersihan chamber yang akan berdampak pada penurunan biaya perawatan dan peningkatan keselamatan pekerja.

Bidang **Inovasi Pengurangan Limbah B3**, mengusung strategi ekonomi sirkular dalam ***Hyflex Reusable Hand Glove***, yaitu daur ulang sarung tangan kerja menjadi produk baru yang dapat digunakan kembali. Strategi ini memberikan efisiensi biaya sekaligus mengurangi limbah padat yang sulit terurai.

Buku ini ditutup dengan pembahasan **Inovasi Pemberdayaan Masyarakat** berupa ***Water Integrated Sustainability Programme for Livelihood (WIS POL)***, yaitu sebuah pemberdayaan masyarakat berbasis air terpadu. Pemberdayaan masyarakat ini tidak hanya menjawab tantangan sanitasi dan ketersediaan air bersih di era pascapandemi, tetapi

juga menjadi motor penggerak pemulihan ekonomi lokal melalui pertanian dan wirausaha air bersih.

Kami menyadari bahwa inovasi sejati tidak lahir dari zona nyaman, melainkan dari keberanian untuk berubah dan kemauan untuk terus belajar. Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi inspiratif bagi pelaku industri, akademisi, pemerintah, dan masyarakat luas dalam menciptakan solusi yang lebih hijau, lebih cerdas, dan lebih inklusif.

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah menjadi bagian dari perjalanan luar biasa ini. Mari kita lanjutkan langkah bersama menuju masa depan yang lebih berkelanjutan.

**Hormat kami,
Penulis.**

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
SEKAPUR SIRIH / SUMMARY	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAGIAN 1 INOVASI PERLINDUNGAN KEANEKARAGAMAN	
HAYATI	1
M. Lubab, Nurlaily Lavianti	
<i>Editor: M. Lubab</i>	
BAGIAN 2 INOVASI LIMBAH NON B3 ENZYMPZ.....	14
Erfin Budianto, Aris Dwi Wicaksono, Reska Pragusta	
<i>Editor: Erfin Budianto</i>	
BAGIAN 3 PENINGKATAN PERFORMA PEMBANGKIT DENGAN	
THERMAL HEAT RATE MANAGEMENT EXPERT	
SYSTEM (THERMEX)	26
Haman Suhaily, Suriyan Arif W	
<i>Editor: Haman Suhaily</i>	
BAGIAN 4 PENURUNAN KONSUMSI ARUS LISTRIK MOTOR DARI	
PROGRAM METODE PEMELIHARAAN	
INSTRUMENTASI FURNACE DRAFT PRESSURE	
TRANSMITER	47
Fajar Dwi Saksana, Puspita Rukmi, Widjanarko	
<i>Editor: Fajar Dwi Saksana</i>	

BAGIAN 5	TEKNOLOGI <i>MOVING BED BIOFILM REACTOR</i> (MBBR) DAN REMOVAL <i>TOTAL SUSPENDED SOLID</i> (TSS) PADA <i>SEWAGE WATER TREATMENT PLANT</i> (SWTP) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)	70
	M. Yusuf, Totok Widiyanto, Najmi Umaroh, Firmandhana Khrisna, Dimas Sistian A, Donny Effendi <i>Editor: Totok Widiyanto</i>	
BAGIAN 6	PENGURANGAN LIMBAH SARUNG TANGAN TERKONTAMINASI MENGGUNAKAN <i>HYFLEX REUSEABLE HAND GLOVE</i>.....	84
	Galih Nurchary Adhji, Dini Pertiwi, Fian Shalihin <i>Editor: Galih Nurchary Adhji</i>	
BAGIAN 7	INOVASI SOSIAL DAN PEMBERDAYAAN MASYARAKAT MELALUI <i>WATER INTEGRATED SUSTAINABILITY PROGRAMME FOR LIVELIHOOD</i> (WIS POL) DALAM MENANGGULANGI TANTANGAN LINGKUNGAN DAN SOSIAL DI ERA PANDEMI	93
	Nina Ari W <i>Editor: Nina Ari W</i>	
DATAR PUSTAKA		105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Alur Proses Inovasi SUSPECFUEL (<i>Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel</i>)	5
Gambar 1.	Visualisasi Inovasi <i>EnzymPoz</i> untuk pembuatan pupuk enzyme dan <i>EcoPillow</i>	16
Gambar 2.	Proses pencampuran cairan dan ampas <i>ecoenzyme</i> pada proses pembuatan kompos menghasilkan pupuk enzyme	17
Gambar 3.	Bantal Kesehatan (<i>EcoPillow</i>)	18
Gambar 1.	<i>Root Cause Analysis</i> Peningkatan <i>Heat Rate</i>	28
Gambar 2.	Proses Tindak Lanjut Hasil Tinjauan Energi 2019	28
Gambar 3.	Integrasi Fitur <i>THERMEX</i>	29
Gambar 4.	Skema kondisi sebelum dan sesudah <i>THERMEX</i>	30
Gambar 5.	Tahapan Perancangan Monitoring <i>Dashboard</i>	31
Gambar 6.	Monitoring Dashboard Unit 8	32
Gambar 7.	Grafik APR	34
Gambar 8.	Dashboard alarm APR	35
Gambar 9.	Pemodelan <i>VirtualPlant</i>	36
Gambar 10.	<i>VirtualPlant</i> Parametric Study	37
Gambar 11.	Dashboard Intelligent Soot Blower (ISB)	38
Gambar 12.	<i>Baseline</i> konsumsi energi 2023 (a) Station Unit 3 (b) Station Unit 78.	39
Gambar 13.	Cusum penghematan energi di tahun 2024	40
Gambar 1.	<i>Name plate</i> motor induksi 3 phase ID Fan PLTU	49
Gambar 2.	<i>Face plate</i> DCS <i>Operating Control</i> ID Fan <i>Demand set point</i>	50
Gambar 3.	ID Fan pada PLTU	51
Gambar 4.	Data etaPRO Tekanan udara furnace pressure boiler PLTU Unit 8 bulan July 2023 – February 2024	52
Gambar 5.	<i>Procedure instruction</i> Pemeliharaan <i>pressure transmitter</i> kalibrasi	53

Gambar 6.	Furnace pressure transmitter 8BF-PT-697 dan line impuls sensing dalam kondisi plugging.....	56
Gambar 7.	Pembacaan Furnace pressure transmitter 8BF-PT-697 setelah dilakukan pembersihan	57
Gambar 8.	Kondisi perubahan tekanan udara furnace boiler sebelum dan sesudah program inovasi dari data software <i>PI-processBook</i>	57
Gambar 9.	Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sebelum Program Inovasi	58
Gambar 10.	Kondisi perubahan tekanan udara <i>furnace boiler</i> sebelum dan sesudah program inovasi dari data software PI	65
Gambar 11.	Kondisi perubahan <i>furnace pressure boiler</i> sebelum dan sesudah program inovasi dari data software etaPRO	65
Gambar 1.	Skematik Flow Diagram SWTP dengan teknologi lumpur aktif.....	70
Gambar 2.	Skematik Flow Diagram SWTP dengan teknologi MBBR.....	73
Gambar 3.	Visualisasi Lumpur Aktif dan Media Pack MBBR.....	74
Gambar 4.	Perbedaan Sistem SWTP Teknologi Lumpur Aktif dan MBBR.....	74
Gambar 5.	Simulasi Media Packing MBBR tersuspensi pada Aeration Chamber.....	75
Gambar 6.	Media Packing MBBR	75
Gambar 1.	<i>Hyflex Reusable Hand Glove</i>	85

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jumlah Jenis, Indeks Keanekaragaman, Indeks Kemerataan dan Indeks Kekayaan Tumbuhan di hutan Selobanteng tahun 2015-2024	7
Tabel 2. Keanekaragaman Jenis Fauna Meliputi Jumlah Jenis, Indeks Keanekaragaman, Indeks Kemerataan Dan Indeks Kekayaan Jenis Satwa Di Mata Air Hutan Rakyat Tahun 2016-2024	8
Tabel 1. Konsumsi Energi PLTU Tahun 2018	26
Tabel 2. Perhitungan penghematan dan payback period inovasi.....	41
Tabel 1. Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sebelum Program Inovasi.....	55
Tabel 2. Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sesudah Program Inovasi.....	58
Tabel 3. Total Pemakaian Arus listrik Motor ID Fan PLTU sebelum dan sesudah Program Inovasi.....	59
Tabel 4. Total Penghematan perhitungan program energi	60
Tabel 5. Total penurunan emisi bahan pencemar udara konvensional dan gas rumah kaca	60
Tabel 6. Kondisi pemakaian arus Listrik motor induksi ID Fan sebelum dilakukan program.....	62
Tabel 7. Kondisi pemakaian arus Listrik motor induksi ID Fan setelah dilakukan program.....	63
Tabel 8. Kondisi penurunan dan rata-rata total arus Listrik motor induksi ID Fan	64
Tabel 1. Potensi Sumber TSS pada SWTP Lumpur Aktif.....	71
Tabel 2. Kualitas keluaran SWTP lumpur aktif parameter TSS.....	71
Tabel 3. Baku mutu keluaran limbah domestik (Permen LHK Nomor. P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016).....	71
Tabel 4. Potensi Sumber TSS pada SWTP MBBR.....	73

Tabel 5. Hasil Pengolahan Air Limbah pada Sewage Water Treatment dengan Teknologi Lumpur Aktif	76
Tabel 6. Hasil Pengolahan Air Limbah pada Sewage Water Treatment dengan teknologi MBBR.....	77
Tabel 7. Data Perbandingan Efisiensi SWTP antara teknologi lumpur aktif dengan teknologi MBRR	78
Tabel 8. Penghematan Biaya dari Program Inovasi	78

BAGIAN 1

INOVASI PERLINDUNGAN KEANEKARAGAMAN HAYATI

M. Lubab, Nurlaily Lavianti

Editor: M. Lubab

Keanekaragaman hayati merupakan komponen yang sangat berharga bagi ekosistem dan kehidupan manusia. Dalam upaya melindungi keanekaragaman hayati, PT Paiton Energy telah melakukan berbagai inisiatif perbaikan lingkungan, salah satunya adalah program penanaman pohon di Hutan Rakyat Desa Selobanteng sejak tahun 2008. Penanaman pohon dianggap krusial untuk mengintegrasikan perbaikan lingkungan yang berkelanjutan serta mempromosikan pemanfaatan sumber daya hutan secara bijak.

Hutan Rakyat Desa Selobanteng menjadi rumah bagi berbagai jenis flora dan fauna, serta berperan dalam memperbaiki kondisi alam. PT Paiton Energy telah merancang inovasi perlindungan keanekaragaman hayati yang berfokus pada peningkatan dan perbaikan lingkungan. Kegiatan penanaman pohon yang telah dilakukan sejak 2005 terbukti meningkatkan nilai keanekaragaman hayati. Selain itu, masyarakat setempat juga memanfaatkan hasil hutan untuk kegiatan kerajinan mebel dari kayu berkualitas yang ditanam. Namun, proses ini menimbulkan masalah baru terkait limbah kayu yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan limbah serbuk kayu yang efisien untuk meminimalkan dampak lingkungan negatif.

Sebagai solusi berkelanjutan, PT Paiton Energy telah meluncurkan Program SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*) yang memanfaatkan limbah pengelolaan Hutan Rakyat oleh masyarakat Desa Selobanteng dan hasil pengelolaan hutan tanaman energi (HTE) untuk mendukung produksi wood pellet sebagai pengganti bahan bakar batu bara. Program inovasi ini merupakan pengembangan dari industri wood pellet sebagai sumber energi terbarukan.

Kegiatan konservasi hutan yang dilakukan oleh PT Paiton Energy telah berhasil memberikan dampak positif bagi peningkatan perekonomian masyarakat Desa Selobanteng dan secara bersamaan memberikan manfaat bagi lingkungan. Sebelum adanya program konservasi, kondisi hutan Selobanteng sangat berbeda; hutan terlihat kering dan tidak ada aliran air dari mata air yang ada saat musim kemarau. Tanah yang buruk menyebabkan fungsi hutan dalam menahan air tidak optimal. Namun, sejak program konservasi dimulai pada tahun 2009, kondisi ini mulai membaik. Program ini bertujuan untuk meningkatkan ekosistem Hutan Rakyat Selobanteng dan mendukung ekonomi yang berkelanjutan.

Sejak 2009, PT Paiton Energy telah menanam ratusan ribu bibit pohon jati dan gmelina di Hutan Selobanteng, melibatkan masyarakat setempat. Penanaman pohon ini diharapkan dapat menurunkan emisi karbon dan meningkatkan kualitas oksigen. Secara ekonomi, program ini juga membantu perekonomian masyarakat, khususnya dalam industri mebel. Di Desa Selobanteng, terdapat 23 pengrajin mebel yang tersebar di empat dusun, dengan omzet per tahun per orang berkisar antara Rp80.000.000 hingga Rp150.000.000. Namun, proses pembuatan mebel menghasilkan limbah serbuk kayu yang cukup banyak, sekitar 100 ton per bulan. Sayangnya, limbah ini belum banyak dimanfaatkan dan sering kali dibakar atau dibiarkan begitu saja, yang berpotensi merusak estetika lingkungan dan keanekaragaman hayati di hutan.

PT Paiton Energy menginisiasi program inovasi SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*) dengan memanfaatkan limbah serbuk kayu dari pembuatan mebel di Desa Selobanteng. Limbah tersebut yang selama ini kurang dimanfaatkan, diolah menjadi bahan baku wood pellet. Selain itu, bahan baku *wood pellet* juga dapat diperoleh dari hutan tanaman energi (HTE) yang ada di Desa Selobanteng, sebagai solusi berkelanjutan untuk menggantikan bahan bakar batu bara. Hutan yang ditanam khusus untuk tujuan energi, seperti tanaman gamal dan kaliandra, berfungsi mendukung kebutuhan energi global dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. PT Paiton Energy menjadi pelopor dalam program inovasi ini, yang belum ada pada *Best Practice* Inovasi

Pembangkit dalam empat tahun terakhir (2020-2023) menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Program ini juga telah diverifikasi dan diajukan sebagai Paten Sederhana ke Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual Kementerian Hukum dan HAM Republik Indonesia dengan nomor registrasi S00202410791.

Program inovasi SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*) *Wood Pellet* memiliki beberapa keunggulan sebagai sumber energi terbarukan, antara lain emisi karbon yang lebih rendah, efisiensi pembakaran yang tinggi, dan keberlanjutan bahan bakunya. Wood pellet menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar batu bara PLTU, sekaligus memberikan manfaat bagi lingkungan. Dengan mengolah limbah biomassa menjadi wood pellet, masyarakat dapat memanfaatkan sumber daya yang ada, sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem dengan pengelolaan limbah yang tepat. PT Paiton Energy juga berperan dalam mengelola lahan kritis dan terdegradasi, dengan menanam tanaman energi di lahan yang kurang produktif untuk mengembalikan fungsi ekologisnya, serta menghasilkan biomassa untuk wood pellet. Program ini berfungsi ganda sebagai sarana konservasi lingkungan dan sumber ekonomi bagi masyarakat.

Sebelum Program Inovasi:	Sesudah Program Inovasi:
• Indeks kehati menurun • Sampah serbuk kayu tidak terkelola • 23 kelompok pengrajin mebel	• Indeks kehati meningkat • Terbentuk lembaga “Koperasi Setia Bakti” • Produksi Wood Pellet

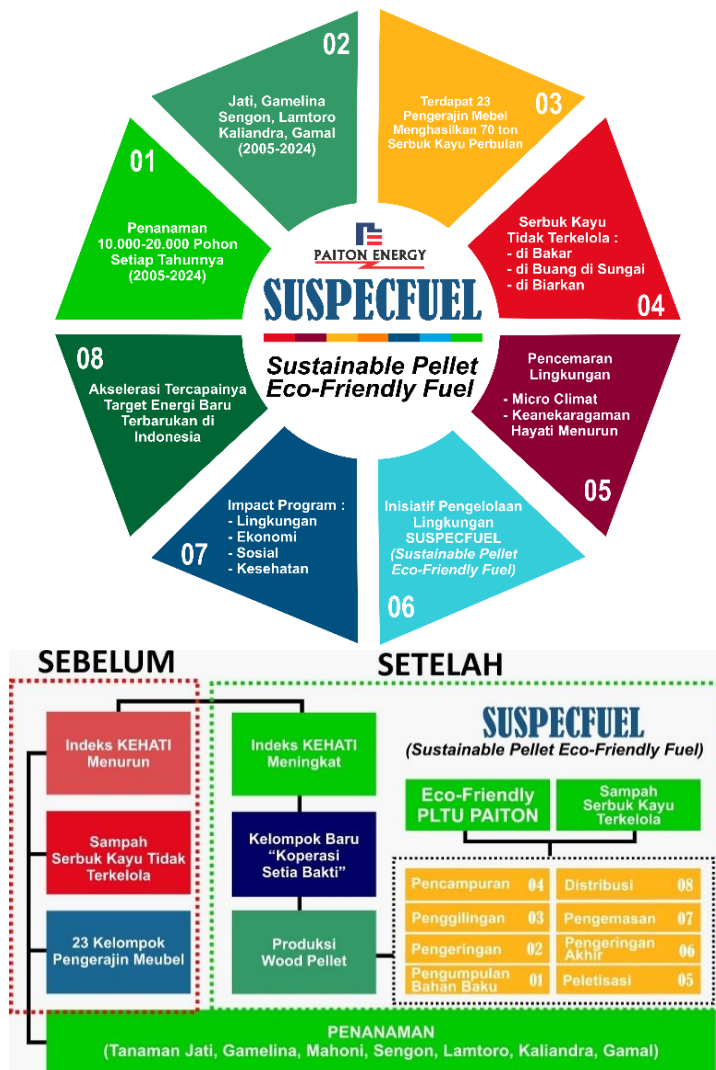
Program inovasi SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*) memiliki pendekatan dan strategi yang berbeda, dengan peluang pengembangan industri wood pellet yang terbuka, terutama untuk memenuhi permintaan pasar domestik. Dengan ketersediaan bahan baku berupa serbuk kayu, potensi pengembangan industri wood pellet dapat dilakukan dengan mengintegrasikan industri mebel yang sudah ada, yang merupakan investasi lokal, dengan dukungan kelembagaan serta kekuatan dan peluang ketersediaan lahan, khususnya di Hutan Rakyat

Selobanteng, untuk pengembangan tanaman yang sesuai sebagai bahan baku pelet kayu.

Pembuatan pelet kayu dari serbuk kayu melalui beberapa langkah penting, dengan urutan proses umum sebagai berikut:

1. Pengumpulan Bahan Baku: Mengumpulkan serbuk kayu dari sumber yang ada, seperti limbah kayu, sisa pemotongan, atau produk kayu yang tidak terpakai.
2. Pengeringan: Jika serbuk kayu terlalu basah, lakukan pengeringan untuk menurunkan kadar air. Kadar air ideal untuk pelet kayu adalah sekitar 10-15%.
3. Penggilingan: Giling serbuk kayu menjadi ukuran lebih halus menggunakan mesin penggiling, agar proses peletisasi menjadi lebih mudah.
4. Pencampuran: Jika diperlukan, campurkan serbuk kayu dengan bahan tambahan (seperti perekat alami) untuk meningkatkan kekuatan pelet.
5. Peletisasi: Masukkan campuran serbuk kayu ke dalam mesin pelet untuk memadatkan dan membentuknya menjadi pelet.
6. Pendinginan: Setelah keluar dari mesin pelet, pelet akan panas. Proses pendinginan dilakukan untuk menurunkan suhu dan mengeraskan pelet.
7. Pengeringan Akhir: Pastikan kadar air pelet sesuai standar sebelum disimpan atau dipasarkan. Pengeringan tambahan mungkin diperlukan jika kadar air masih tinggi.
8. Pengemasan: Kemasan pelet kayu dalam kantong atau wadah yang tepat untuk menjaga kualitas dan mempermudah distribusi.
9. Penyimpanan: Simpan pelet kayu di tempat yang kering dan terlindung dari kelembapan untuk mencegah pembusukan.





Gambar 1. Alur Proses Inovasi SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*)

Perlindungan Keanekaragaman Hayati yang Dilakukan Akibat Inovasi

PT Paiton Energy melaksanakan program yang mendemonstrasikan komitmen perusahaan terhadap kepedulian lingkungan, dengan fokus pada kelestarian alam dan kesejahteraan masyarakat. Program ini melibatkan kerja sama antara PT Paiton Energy, instansi terkait, dan masyarakat Desa Selobanteng untuk melestarikan Hutan Rakyat, dengan target penanaman bertahap antara 10.000 hingga 20.000 bibit setiap tahun. Beberapa kegiatan yang telah dilaksanakan sesuai dengan perencanaan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengayaan jenis tanaman dengan penanaman dan penyulaman di area Hutan Rakyat untuk memperbaiki dan memulihkan ekosistem kawasan Hutan Rakyat Desa Selobanteng.
2. Melakukan monitoring dan evaluasi flora dan fauna secara rutin di kawasan Hutan Rakyat Desa Selobanteng untuk menjaga dan melestarikan keanekaragaman hayati, sekaligus menciptakan habitat alami bagi berbagai jenis burung dan meningkatkan fungsi ekologis hutan.
3. Pemasangan tanda larangan penebangan pohon, papan edukasi mengenai perlindungan ekosistem, serta papan larangan berburu dan menangkap burung di kawasan Hutan Rakyat Desa Selobanteng.
4. Pengelolaan keanekaragaman hayati di kawasan Hutan Rakyat Desa Selobanteng telah menunjukkan hasil yang signifikan, tercermin dari peningkatan jumlah flora dan berbagai jenis burung, baik dari segi jumlah spesies, individu, maupun indeks diversitasnya.

Secara umum, kawasan Hutan Rakyat di Desa Selobanteng terletak di dataran rendah dengan ketinggian antara 200–450 meter di atas permukaan laut, dengan topografi bervariasi, dari datar hingga terjal, dengan kemiringan 0-30 derajat. Berdasarkan hasil analisis Biodiversity Monitoring di Hutan Rakyat Selobanteng pada tahun 2024, tingkat keanekaragaman, pemerataan, dan kekayaan jenis tumbuhan di area tersebut menunjukkan beberapa hal penting.

Pada tahun 2024, tercatat ada 140 spesies tumbuhan yang ditemukan di kawasan Hutan Rakyat Desa Selobanteng. Indeks keanekaragaman jenis tumbuhan menunjukkan tingkat keanekaragaman yang tinggi, dengan nilai 4,41 pada tahun 2023. Nilai ini mencerminkan keberagaman jenis tumbuhan yang tinggi di kawasan tersebut.

Indeks kemerataan, yang dipengaruhi oleh besarnya nilai keanekaragaman dan jumlah keseluruhan jenis tumbuhan, menunjukkan tingkat penyebaran yang merata. Pada tahun 2024, indeks kemerataan tercatat 0,89, yang menandakan bahwa Hutan Rakyat Desa Selobanteng memiliki penyebaran jenis tumbuhan yang merata dan komunitasnya berada dalam kondisi yang stabil.

Indeks kekayaan jenis, yang mencerminkan jumlah spesies tumbuhan yang ada, menunjukkan nilai 20,51 pada tahun 2024. Nilai ini menunjukkan bahwa keanekaragaman spesies tumbuhan di Hutan Rakyat Desa Selobanteng tergolong tinggi.

Kajian keanekaragaman flora di hutan Selobanteng telah dilakukan secara periodik dan sudah berlangsung sejak lama. Hasil analisis keanekaragaman flora di hutan Selobanteng disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Jenis, Indeks Keanekaragaman, Indeks Kemerataan dan Indeks Kekayaan Tumbuhan di hutan Selobanteng tahun 2015-2024

Parameter	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Jumlah jenis	66	101	106	138	143	139	152	156	120	140
Indeks Keanekaragaman	3,91	3,94	3,95	4,47	3,08	4,53	5,17	4,47	3,43	4,41
Indeks Kemerataan	0,93	0,85	0,85	0,91	0,62	0,91	1,03	0,88	0,72	0,89
Indeks Kekayaan	11,1	14,1	14,5	18	16,9	17,8	19,1	20,5	20,3	20,51

Sumber: Monitoring Biodiversity PT Paiton Energy 2023 dan 2024

Keanekaragaman satwa di Hutan Selobanteng terbilang tinggi. Berdasarkan pemantauan biodiversitas yang dilakukan oleh PT Paiton Energy pada tahun 2024, ditemukan 44 spesies burung dari 24 famili, 3 jenis mamalia, 1 jenis amfibi, 8 jenis reptilia, serta 68 jenis serangga, yang terdiri dari 16 jenis capung dan 42 jenis kupu-kupu. Beberapa spesies satwa yang dilindungi di Indonesia juga ditemukan di kawasan ini, antara lain elang-ular bido, elang sikepmadu-asia, cangak besar, cerek asia,

bubut jawa, paok pancawarna, alap-alap sapi, serta satu jenis kupu-kupu *Troides helenia*. Hutan Selobanteng juga menjadi habitat bagi serangga endemik, termasuk tiga jenis capung endemik, yaitu *Vestalis luctuosa*, *Heliocypha fenestrata*, dan *Nososticta insignis*, serta satu jenis kupu-kupu endemik, *Ixias balice*.

Potensi keanekaragaman hayati di Hutan Rakyat Selobanteng sangat besar. PT Paiton Energy telah melakukan penelitian secara berkala sejak tahun 2016 hingga 2024. Hasil pengumpulan dan analisis data mengenai jumlah individu, jumlah spesies, serta indeks keanekaragaman, kemerataan, dan kekayaan jenis satwa di Mata Air Hutan Rakyat Selobanteng dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Keanekaragaman Jenis Fauna Meliputi Jumlah Jenis, Indeks Keanekaragaman, Indeks Kemerataan Dan Indeks Kekayaan Jenis Satwa Di Mata Air Hutan Rakyat Tahun 2016-2024

No	Parameter	Periode								
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	Area Sumber Sember Hutan Rakyat Desa Selobanteng									
	Jumlah individu	31	32	42	49	50	51	54	86	150
	Jumlah jenis	13	15	16	16	16	16	16	20	39
	Indeks keanekaragaman	2,44	2,57	2,66	2,66	2,61	2,63	2,66	2,68	3,16
	Indeks kemerataan	0,95	0,95	0,96	0,96	0,94	0,95	0,96	0,89	0,86
	Indeks kekayaan	3,5	4,09	4,01	3,85	3,83	3,81	3,7	3,7	7,58
2	Area Sumber Jrenguh Hutan Rakyat Desa Selobanteng									
	Jumlah individu	24	31	43	44	36	47	45	62	38
	Jumlah jenis	11	11	15	12	12	13	13	17	15
	Indeks keanekaragaman	2,18	2,24	2,52	2,46	2,34	2,34	2,34	2,54	2,23
	Indeks kemerataan	0,91	0,93	0,93	0,96	0,94	0,91	0,93	0,93	0,82
	Indeks kekayaan	3,14	2,91	3,72	3,13	3,06	3,11	3,15	3,15	3,85
3	Area Sumber Nyambulu Hutan Rakyat Desa Selobanteng									
	Jumlah individu	15	30	33	46	37	62	72	77	71
	Jumlah jenis	10	14	13	15	14	17	18	22	19
	Indeks keanekaragaman	2,15	2,48	2,48	2,62	2,55	2,66	2,66	3,23	2,59

No	Parameter	Periode								
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Indeks kemeraan	0,93	0,94	0,97	0,97	0,97	0,94	0,92	1,0	0,88
	Indeks kekayaan	3.04	3.32	3.24	4.50	4,24	4,2	4,24	4,2	4,22
4	Area Sumber Kedawung Desa Selobanteng									
	Jumlah individu	19	19	31	34	35	31	32	51	73
	Jumlah jenis	9	9	18	12	13	12	12	14	21
	Indeks keanekaragaman	2,04	2,08	2,38	2,42	2,44	2,44	2,14	2,18	2,68
	Indeks kemertaan	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,88
	Indeks kekayaan	2,71	2,71	3,2	3,11	3,14	3,2	3,17	3,17	4,66
5	Area Sumber Pagut Hutan Rakyat Desa Selobanteng									
	Jumlah individu	10	15	16	26	27	28	26	26	115
	Jumlah jenis	8	10	10	15	15	15	14	14	26
	Indeks keanekaragaman	1.97	2.21	2.22	2,68	2,62	2,63	2,64	2,58	2,82
	Indeks kemeraan	0,93	0,94	0,97	0,97	0,97	0,94	0,92	1,0	0,86
	Indeks kekayaan	3.04	3.32	3.24	4.50	4,24	4,2	4,24	4,2	5,27

Sumber: Penelitian PT POMI-Paiton Energy-LIPI, UNM dan UGM.

PT Paiton Energy meluncurkan program inovasi SUSPECFUEL (Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel) yang bertujuan untuk mengolah limbah serbuk kayu dari industri meubel di Desa Selobanteng menjadi bahan baku wood pellet yang sebelumnya kurang dimanfaatkan oleh masyarakat. Selain itu, bahan baku wood pellet juga bisa diperoleh dari hutan tanaman energi (HTE) di desa tersebut, yang menjadi solusi berkelanjutan dalam mendukung produksi wood pellet. Hutan yang ditanami khusus untuk tujuan energi, terutama biomassa, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk meubel dan wood pellet di Desa Selobanteng. PT Paiton Energy juga memanfaatkan tanaman gamal dan kaliandra untuk mendukung kebutuhan energi global sekaligus mengurangi ketergantungan pada batu bara untuk PLTU Paiton.

Program inovasi SUSPECFUEL menawarkan beberapa keunggulan sebagai sumber energi terbarukan, seperti emisi karbon rendah, efisiensi pembakaran tinggi, dan keberlanjutan bahan bakunya. Dalam konteks

keberlanjutan, wood pellet memberikan solusi untuk mengurangi ketergantungan pada batu bara PLTU, dengan mengolah limbah biomassa menjadi wood pellet. Hal ini memungkinkan masyarakat memanfaatkan sumber daya yang ada, sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem dengan pengelolaan limbah yang tepat.

Penghematan biaya juga tercatat dalam program ini, dengan penghematan sebesar Rp 46.100.000. Kegiatan ini juga berdampak pada peningkatan keanekaragaman hayati di Selobanteng pada tahun 2024, dengan ditemukan 140 spesies tumbuhan di area Hutan Rakyat Desa Selobanteng. Indeks keanekaragaman tumbuhan di kawasan tersebut menunjukkan keberagaman yang tinggi, dengan nilai 4,41 pada tahun 2023.

Keanekaragaman satwa di hutan Selobanteng juga sangat tinggi, dengan ditemukan 44 jenis burung dari 24 famili, 3 jenis mamalia, 1 jenis amfibi, 8 jenis reptilia, dan 68 jenis serangga (termasuk 16 jenis capung dan 42 jenis kupu-kupu). Terdapat juga 6 jenis satwa yang dilindungi di Indonesia di kawasan ini, seperti elang-ular bido, elang sikepmadu-asia, dan cangkak besar, serta jenis serangga endemik seperti capung dan kupu-kupu.

Program inovasi SUSPECFUEL memberikan nilai tambah dalam pengembangan subsistem, seperti optimasi rantai nilai dan pengembangan industri pellet kayu. Ketersediaan bahan baku yang terjangkau dan produksi dalam skala domestik memungkinkan wood pellet untuk bersaing dengan bahan bakar fosil yang semakin sulit didapat. Selain itu, pengolahan wood pellet secara langsung oleh masyarakat memberikan dampak ekonomi positif dan menciptakan lapangan kerja di Desa Selobanteng.

Melalui program ini, serbuk kayu yang sebelumnya hanya dibakar atau dibiarkan begitu saja, kini memiliki nilai ekonomi karena dapat diolah menjadi wood pellet yang dapat dijual dengan harga Rp 2.400 per kilogram. Masyarakat juga mulai mengubah perilaku mereka, dengan tidak lagi membakar serbuk kayu dan melindunginya agar bisa dimanfaatkan. Program ini mengarah pada pola hidup bersih dan

berkelanjutan, serta turut berkontribusi pada pelestarian hutan dan lingkungan di Selobanteng.

Masyarakat peduli dengan lingkungannya:

- Menempatkan limbah serbuk kayu di tempat khusus
- Peduli lingkungan
- Sayang hutan
- Tidak menebang pohon sembarangan
- Tidak berburu satwa

Dengan demikian, nilai tambah yang didapatkan dari program inovasi SUSPECFUEL (*Sustainable Pellet Eco-Friendly Fuel*) mengakibatkan perubahan rantai nilai, penambahan kualitas layanan produk, dan perubahan perilaku sebagai berikut.

Perubahan Rantai Nilai	Perubahan Layanan Produk	Perubahan Perilaku
Mata pencaharian baru sebagai pengrajin pellet kayu Terbentuk koperasi di bidang pellet kayu “Koperasi Setia Bakti”	Serbuk gergaji terolah menjadi pellet kayu yang memiliki nilai ekonomi. Rp. 2.400/kg Ekosistem hutan terjaga.	Masyarakat berkontribusi terhadap pelestarian hutan dan lingkungan

Inovasi Perlindungan Keanekaragaman Hayati dalam Mencapai Tujuan Keberlanjutan

Keanekaragaman hayati mengacu pada semua jenis kehidupan di Bumi, mulai dari gen hingga ekosistem. Keanekaragaman ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan alam dan menyediakan berbagai layanan ekosistem yang mendukung kelangsungan hidup manusia, seperti penyerbukan tanaman, penyebaran benih, pengaturan iklim, pemurnian air, daur ulang nutrisi, dan pengendalian hama. Namun, keanekaragaman hayati menghadapi berbagai ancaman akibat aktivitas manusia, seperti hilangnya habitat, eksploitasi sumber daya alam yang tidak berkelanjutan, masuknya spesies asing, polusi, dan perubahan iklim. Oleh karena itu,

pelestarian keanekaragaman hayati menjadi hal yang mendesak dan memerlukan solusi yang inovatif untuk mengatasi penurunan ini dan mendukung masa depan yang berkelanjutan.

Salah satu solusi yang menjanjikan adalah inovasi teknologi, seperti penggunaan Sistem Informasi Geografis (SIG) yang telah terbukti meningkatkan efisiensi konservasi hingga 40%. Teknologi ini memungkinkan para konservasionis untuk memetakan dan menganalisis data spasial, sehingga keputusan dapat diambil dengan lebih tepat dan sumber daya dapat dialokasikan secara lebih efektif. Selain itu, penerapan rekayasa genetika juga sedang dieksplorasi untuk meningkatkan ketahanan spesies yang terancam punah atau mengendalikan populasi spesies invasif (Andrew, 2019). Teknologi semacam ini membantu memperbaiki upaya konservasi sekaligus memperdalam pemahaman kita tentang keanekaragaman hayati.

Inisiatif konservasi berbasis masyarakat juga memainkan peran penting dalam perlindungan keanekaragaman hayati. Sebagai contoh, kolaborasi antara ahli entomologi dan masyarakat pedesaan telah menunjukkan manfaat besar dari kerja sama ini, memanfaatkan pengetahuan adat yang telah lama diterapkan dalam pengelolaan alam secara berkelanjutan (Eric *et al.*, 2017). Pendekatan berbasis masyarakat ini tidak hanya meningkatkan rasa memiliki, tetapi juga memastikan bahwa strategi konservasi lebih relevan dan efektif secara budaya. Program konservasi dapat memberikan manfaat langsung bagi masyarakat dengan memberi insentif dan memberdayakan mereka untuk berpartisipasi dalam melindungi alam (Emma, 2023).

Selain itu, inovasi kebijakan juga sangat penting untuk perlindungan keanekaragaman hayati. Salah satu contoh kebijakan ini adalah Kerangka Kerja Keanekaragaman Hayati Global Kunming-Montreal, yang menetapkan 23 target untuk tindakan segera dalam dekade mendatang. Kerangka ini bertujuan untuk meningkatkan kerja sama global dalam konservasi keanekaragaman hayati, dengan melibatkan berbagai pihak seperti perusahaan, pemerintah, dan masyarakat sipil. Pendekatan ini memastikan bahwa solusi terhadap krisis keanekaragaman hayati bersifat inklusif dan holistik.

Dalam konteks inovasi ekonomi, Program Pembayaran untuk Layanan Ekosistem (PES) berperan penting dengan memberikan insentif ekonomi kepada masyarakat lokal untuk terlibat dalam konservasi. Program ini mendukung keberagaman pendapatan yang stabil dan meningkatkan keamanan penguasaan lahan bagi masyarakat (Tuyet-Anh *et al.*, 2024). Selain itu, keanekaragaman hayati dalam pertanian juga sangat vital karena mendukung ketahanan pangan dan kemampuan sistem pertanian untuk bertahan menghadapi perubahan iklim dan ancaman hama. Ekowisata juga berkembang sebagai sumber pendapatan yang berkelanjutan bagi masyarakat lokal sekaligus mendukung konservasi (Rajashree & Madhusmita, 2023).

Pendidikan berperan penting dalam meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya keanekaragaman hayati. Melalui pendidikan, baik formal maupun informal, orang belajar untuk menghargai alam dan memahami dampak dari tindakan mereka terhadap lingkungan (Asma *et al.*, 2023). Media sosial juga memainkan peran penting dalam menyebarkan informasi mengenai konservasi keanekaragaman hayati ke seluruh dunia, mendorong percakapan global tentang isu ini dan menginspirasi aksi lebih banyak orang (Vinay & Sathyaprakash, 2019).

Agar perlindungan keanekaragaman hayati dapat efektif, kita perlu mengadopsi pendekatan holistik yang mempertimbangkan aspek ekologis, sosial, dan ekonomi. Kesehatan ekosistem yang baik tidak hanya mendukung kelangsungan hidup manusia tetapi juga memberikan keuntungan bagi sektor ekonomi, seperti perusahaan. Menjaga keseimbangan antara kesehatan manusia, nilai budaya, dan stabilitas ekonomi dapat memperkuat upaya konservasi (Carlos *et al.*, 2024). Dalam hal ini, riset lebih lanjut yang mendukung pendekatan holistik dalam konservasi keanekaragaman hayati laut juga menjadi penting, termasuk penggunaan metode yang melibatkan kolaborasi interdisipliner dan pengetahuan lokal (Elliot *et al.*, 2020). Dengan demikian, keberhasilan konservasi akan lebih terjamin melalui pendekatan yang komprehensif dan melibatkan berbagai pemangku kepentingan.

BAGIAN 2

INOVASI LIMBAH NON B3 ENZYMPZ

Erfin Budianto, Aris Dwi Wicaksono, Reska Pragusta

Editor: Erfin Budianto

Pada awal tahun 2019, PT Paiton Energy meluncurkan program pengelolaan limbah organik dengan memanfaatkan sisa kulit buah dan sayuran untuk diolah menjadi cairan *ecoenzyme*. Cairan ini berfungsi dalam bioteknologi untuk mengurai bahan organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan ramah lingkungan. Selain membantu mengurangi limbah Non-B3, *ecoenzyme* juga digunakan sebagai cairan pembersih lantai dalam kegiatan kebersihan di toilet area kerja dan wisma tamu perusahaan, yang sekaligus mengurangi biaya operasional untuk pembelian cairan pembersih. *Ecoenzyme* juga dimanfaatkan sebagai pupuk cair yang mampu melindungi tanaman dari hama serta meningkatkan kesuburannya. Namun, meskipun banyak manfaat yang dihasilkan, *ecoenzyme* juga menyisakan residu berupa ampas yang penggunaannya masih belum optimal. Residu ini biasanya digunakan bersama cairan *ecoenzyme*, tetapi pemanfaatannya perlu dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan nilai tambahnya.

Asal Usul Ide Perubahan atau Inovasi

PT Paiton Energy terus berupaya meningkatkan kontribusi perusahaan dalam pengelolaan dan pengembangan sampah organik, termasuk mengolah limbah kulit buah dan sayuran menjadi *ecoenzyme*. Namun, proses produksi *ecoenzyme* masih menghasilkan residu berupa ampas yang belum dimanfaatkan secara maksimal, meskipun selama ini digunakan bersama cairan *ecoenzyme*. Selain itu, PT Paiton Energy juga menjalankan program pengelolaan sampah organik lain berupa pembuatan kompos dari dedaunan. Mengingat produk kompos telah

banyak tersedia di masyarakat, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan nilai guna produk tersebut.

Beberapa alasan yang mendasari inovasi pemanfaatan residu *ecoenzyme* di antaranya:

- a) Sebagai anggota komunitas pegiat *ecoenzyme*, PT Paiton Energy berkomitmen menciptakan dan mengembangkan produk turunan dari proses produksi *ecoenzyme*.
- b) Limbah ampas dari pembuatan *ecoenzyme* cukup signifikan, mencapai sekitar 20% dari total produksi cairan *ecoenzyme*, sehingga membutuhkan solusi pemanfaatan lebih efektif.
- c) Diperlukan sinergi antara bahan baku kompos yang ada dengan limbah ampas *ecoenzyme* untuk menghasilkan pupuk organik yang lebih unggul dari segi kandungan protein dan mikroba tanah.
- d) Pemanfaatan ampas *ecoenzyme* dalam bidang kesehatan juga diharapkan mendukung program wellness karyawan PT Paiton Energy.

Untuk menjawab tantangan ini, PT Paiton Energy meluncurkan inisiatif baru bernama *EnzymPoz*, yang bertujuan meningkatkan nilai tambah produk kompos, *ecoenzyme*, serta residu *ecoenzyme*, sehingga memberikan manfaat yang lebih luas dan berkelanjutan.

Perubahan yang Dilakukan dari Sistem yang Lama

Sebelum adanya inovasi, kompos yang dihasilkan dari limbah daun dan ranting serupa dengan kompos pada umumnya, sedangkan limbah kulit buah dan sayuran diolah menjadi *ecoenzyme*. Namun, proses pembuatan *ecoenzyme* menghasilkan residu berupa ampas. Kedua program ini berjalan secara terpisah, meskipun keduanya memiliki manfaat yang sama, yakni meningkatkan nutrisi tanaman sebagai pupuk organik.

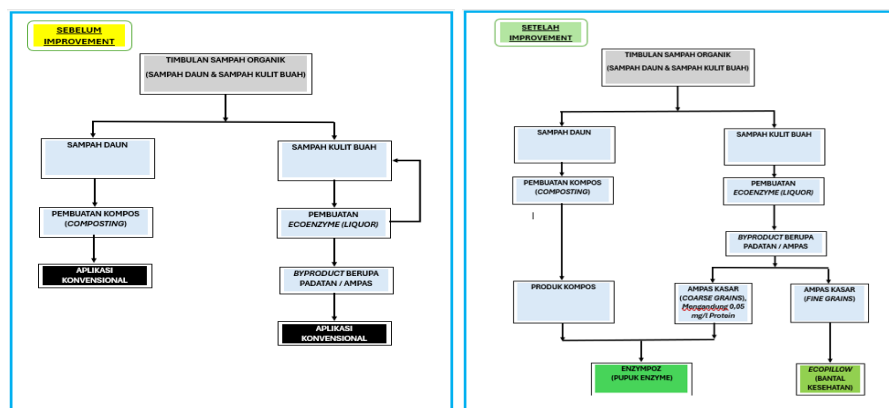
Inovasi terbaru mengintegrasikan kedua program tersebut, yaitu kompos dan *ecoenzyme*, untuk menciptakan nilai tambah pada produk yang dihasilkan. Selain meningkatkan kandungan protein, program ini juga berfokus pada optimalisasi pemanfaatan residu produk sehingga tidak menyisakan limbah baru, sejalan dengan prinsip *zero-waste*. Ampas

keras dari proses fermentasi ecoenzyme kini dimanfaatkan sebagai campuran kompos, menghasilkan produk baru bernama *EnzymPoz*, yang merupakan sinergi dari program ecoenzyme dan kompos yang telah ada sebelumnya.

Sementara itu, ampas yang lebih lunak dikembangkan menjadi produk inovatif baru, yakni *EcoPillow*, atau dikenal juga sebagai Bantal Kesehatan, yang memberikan manfaat tambahan dari pengolahan limbah organik.

Gambaran Skematis atau Visual Inovasi yang Dilakukan

Sebagaimana disampaikan sebelumnya, *EnzymPoz* ini merupakan program kolaborasi antara program ecoenzyme dan kompos yang menghasilkan produk baru berupa pupuk *Enzym* dan *EcoPillow* dengan gambaran skematis terkait penerapannya oleh PT Paiton Energi sebagai berikut:



Gambar 1. Visualisasi Inovasi *EnzymPoz* untuk pembuatan pupuk enzyme dan *EcoPillow*

1. Pupuk Enzyme (*EnzymPoz*)

Produksi Pupuk Enzym merupakan salah satu inovasi PT Paiton Energy yang menggabungkan dua produk yang sudah ada, yaitu Ecoenzyme dan Kompos, dengan tujuan untuk memperbaiki kualitas tanah melalui peningkatan kandungan protein tanah.

Langkah ini diambil berdasarkan studi literatur yang menunjukkan bahwa ampas ecoenzyme mengandung sekitar 5×10^{-2} mg/mL protein. Secara teori, protein merupakan rantai panjang asam amino yang terikat dalam ikatan peptida, yang memiliki berbagai manfaat bagi pertumbuhan tanaman, antara lain melindungi tanaman dari hama dan penyakit, meningkatkan aktivitas mikroba tanah, mendukung asimilasi nutrisi tanaman, serta mudah diserap untuk memberikan efek cepat. Protein juga membantu meningkatkan fotosintesis, kandungan klorofil, dan metabolisme tanaman, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres, seperti suhu tinggi, kekeringan, serangan hama, serta kondisi ekstrem lainnya. Selain itu, protein dapat berfungsi sebagai agen pengkhelat (pengikat) unsur mikro.

Inovasi *EnzymPoz* dikembangkan untuk menghasilkan pupuk enzim yang merupakan kombinasi dari pupuk kompos, cairan ecoenzyme, dan ampas sisa hasil proses fermentasi ecoenzyme. Dengan kolaborasi ini, diharapkan aplikasi pupuk enzim menjadi lebih efektif dan optimal dalam meningkatkan kesuburan tanah serta mengurai bahan organik yang kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan ramah lingkungan. Efisiensi penggunaan pupuk enzim juga dapat meningkat, karena PT Paiton Energy dapat memanfaatkan manfaat dari ecoenzyme dan pupuk kompos dalam satu waktu aplikasi.



Gambar 2. Proses pencampuran cairan dan ampas *ecoenzyme* pada proses pembuatan kompos menghasilkan pupuk enzim

2. Bantal Kesehatan (*Ecopillow*)

Ampas ecoenzyme yang dihasilkan dari proses pembuatan cairan ecoenzyme dapat dimanfaatkan lebih lanjut sebagai produk baru, yaitu *Ecopillow*, bantal kesehatan yang meskipun terlihat sederhana, mampu membantu mengurangi kelelahan penggunaanya. *Ecopillow* memiliki beberapa keunggulan, seperti ramah lingkungan karena tidak mengandung bahan kimia tambahan, mudah digunakan, berfungsi sebagai anti-polutan dan sterilisator, serta dapat membantu mengurangi kelelahan dan meningkatkan aliran oksigen ke otak. Proses pembuatan *Ecopillow* ini relatif sederhana dan dapat mengatasi potensi pemborosan dalam pemanfaatan ampas *ecoenzyme*.

Proses pembuatan *Ecopillow* dimulai dengan pemisahan ampas ecoenzyme dari cairan ecoenzyme menggunakan proses penyaringan. Selanjutnya, ampas lunak dan keras dipisahkan, di mana hanya ampas lunak yang digunakan untuk produksi *Ecopillow*, sementara ampas keras dimanfaatkan untuk pembuatan pupuk enzyme. Ampas lunak yang telah dipisahkan kemudian dihancurkan dan dimasukkan ke dalam kemasan tertutup. Setelah itu, *Ecopillow* siap untuk digunakan.



Gambar 3. Bantal Kesehatan (*EcoPillow*)

Produk *Ecopillow* ini dapat meningkatkan manfaat dari ampas ecoenzyme. Dengan adanya program *EnzymPoz*, ampas ecoenzyme tidak hanya berfungsi sebagai bahan tambahan pupuk, tetapi juga dapat diolah menjadi produk baru yang lebih berguna, yakni *Ecopillow*.

Kuantifikasi Informasi Pengurangan dan Pemanfaatan Sampah Akibat Penambahan Komponen dan Kuantifikasi Penurunan Biaya

Kuantifikasi Informasi

Program *EnzymPoz* memperlihatkan adanya penambahan komponen melalui peningkatan produk, yang terjadi karena sinergi antara produk ecoenzyme, termasuk ampasnya yang bersifat keras, dengan kompos, yang kemudian menghasilkan *EcoPillow* yang diproduksi dengan memanfaatkan ampas ecoenzyme lunak. Program *EnzymPoz* ini secara tidak langsung dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi aplikasi pupuk dalam satu waktu, serta memaksimalkan pemanfaatan ampas ecoenzyme yang tersisa dengan mengolahnya menjadi *EcoPillow*.

Berikut adalah kuantifikasi informasi pemanfaatan sampah daun dan kulit buah sebagai bahan dasar dari pelaksanaan *EnzymPoz*:

PERHITUNGAN NILAI ABSOLUT

Perhitungan Tahun 2024

Timbulan sampah kulit buah termanfaatkan = 1569 kg

Timbulan sampah daun termanfaatkan = 1103 kg

Absolut pemanfaatan

Sampah kulit buah $= \frac{1569 \text{ kg}}{1000} = 1,57 \text{ Ton}$

Sampah daun $= \frac{1103 \text{ kg}}{1000} = 11,03 \text{ Ton}$

Absolut total $= (1,57 \text{ Ton} + 11,03 \text{ Ton}) = 12,60 \text{ Ton}$

PERHITUNGAN NILAI NORMALISASI

Normalisasi kulit buah $= \frac{1,57 \text{ Ton}}{19.942.862,70 \text{ GJ}} = 7,87 \times 10^{-08} \text{ Ton/GJ}$

Normalisasi daun $= \frac{11,03 \text{ Ton}}{19.942.862,70 \text{ GJ}} = 5,53 \times 10^{-07} \text{ Ton/GJ}$

Normalisasi Total $= 7,87 \times 10^{-08} + 5,53 \times 10^{-07} = 6,32 \times 10^{-07} \text{ Ton/GJ}$

PERHITUNGAN NILAI PENGHEMATAN

Jumlah hasil produk	- kompos	= 10.984 kg
	- EcoPillow	= 160 unit
Harga produk	- kompos	= Rp 4.000 / kg
	- EcoPillow	= Rp 40.000 / unit
Penghematan	- kompos	= Rp 4.000 × 10.984 kg
		= Rp 43.936.000,00
	- EcoPillow	= Rp 40.000 × 160 unit
		= Rp 6.400.000,00
Penghematan total		= Rp 43.936.000,00 + Rp 6.400.000,00
		= Rp 50.336.000,00

Nilai Tambah

Program *EnzymPoz* adalah pengembangan dari program ecoenzyme dan kompos yang bertujuan untuk meningkatkan manfaat dari limbah sampah organik. Dengan demikian, nilai tambah yang dihasilkan dari pemanfaatan limbah sampah organik melalui program *EnzymPoz* dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Perubahan Rantai Nilai (*Process Improvement*)

Program pemanfaatan limbah organik seperti sampah daun dan kulit buah atau sayuran digabungkan dalam satu program untuk menghasilkan produk pupuk enzim yang lebih bermanfaat melalui *EnzymPoz*. Di sisi lain, ampas ecoenzyme yang belum dimanfaatkan dalam produksi pupuk enzim digunakan sebagai bahan untuk membuat bantal ecoenzyme. Produk bantal ini menjadi bagian dari program *EnzymPoz* yang sedang dijalankan saat ini. Inovasi ini menggantikan program sebelumnya, yaitu kompos dan ecoenzyme, yang awalnya dijalankan terpisah dan kurang efektif serta efisien. Masalah lain yang muncul pada aplikasi ecoenzyme adalah adanya *byproduct* (ampas) yang pada akhirnya dicampur dengan cairan ecoenzyme.

Dengan demikian, program inovasi *EnzymPoz* memberikan nilai tambah melalui perubahan rantai nilai, yakni peningkatan produk dengan pengembangan pupuk enzim yang lebih berkualitas, hasil dari penggabungan pupuk kompos, ecoenzyme, dan ampas

ecoenzyme bagian keras. Sedangkan ampas ecoenzyme lunak ditingkatkan nilai manfaatnya dengan dijadikan *EcoPillow*, yaitu bantal kesehatan.

b. Perubahan Layanan Produk

Implementasi program inovasi *EnzymPoz* menggabungkan produk kompos dan ecoenzyme yang sebelumnya diterapkan secara terpisah, dengan mengatasi masalah byproduct (ampas) pada ecoenzyme, sehingga menciptakan sinergi yang memberikan nilai tambah dan manfaat lebih. Melalui program ini, produksi kompos yang awalnya hanya menggunakan sampah daun kini ditambah dengan ecoenzyme cair dan ampas ecoenzyme, diharapkan dapat meningkatkan kandungan protein pupuk, sehingga menghasilkan pupuk yang lebih baik, yang dikenal dengan nama pupuk enzyme. Selain itu, byproduct ecoenzyme yang berupa ampas lunak/halus dapat dimanfaatkan lebih lanjut menjadi *EcoPillow ecoenzyme*. Dengan demikian, program inovasi *EnzymPoz* ini menunjukkan nilai tambah melalui perubahan produk, dari pupuk konvensional menjadi pupuk enzyme berkat kolaborasi antara pupuk kompos, *ecoenzyme*, dan ampas ecoenzyme. Selain itu, produk tambahan lainnya adalah *EcoPillow*, bantal kesehatan yang dihasilkan dari ampas ecoenzyme yang sebelumnya belum dimanfaatkan.

c. Perubahan Perilaku

Sebelum adanya inovasi *EnzymPoz*, PT Paiton hanya memproduksi ecoenzyme dalam jumlah terbatas karena proses pembuatannya bergantung pada timbulan sampah kulit buah. Namun, dengan inovasi *EnzymPoz*, PT Paiton Energy tidak hanya dapat memproduksi ecoenzyme, tetapi juga menghasilkan pupuk kompos dengan kandungan yang lebih baik, berkat penggabungan dengan cairan dan ampas ecoenzyme. Implementasi inovasi *EnzymPoz* ini membawa nilai tambah dalam hal perubahan proses, yaitu dengan menggabungkan pembuatan pupuk kompos dan *ecoenzyme* yang sebelumnya dilakukan terpisah menjadi satu proses yang saling mendukung. Selain itu, aplikasi *EnzymPoz* dapat dilakukan dalam satu waktu yang sama, dengan nilai guna yang meningkat dan lebih

efisien. Perubahan perilaku juga terlihat pada proses pembuatan *EcoPillow ecoenzyme*, yang sebelumnya tidak dilakukan, menjadi bagian yang wajib dilakukan oleh personil PT Paiton Energy. Hal ini secara tidak langsung meningkatkan komitmen perusahaan dalam mengoptimalkan pemanfaatan limbah yang ada di area kerja.

Inovasi Limbah Non B3 Enzymopoz dalam Mencapai Tujuan Berkelanjutan

Kerangka kerja Enzymopoz Non-B3 Waste Innovation berfungsi pada model yang memprioritaskan hierarki strategi pengelolaan limbah—mengurangi, menggunakan kembali, mendaur ulang, dan membuat kompos. Hirarki ini sangat penting dalam mendorong pengelolaan material yang berkelanjutan, karena mendorong pergeseran fokus dari sekadar mengelola limbah menjadi mencegahnya sama sekali. Inisiatif seperti proyek enzycle, yang didanai oleh CBE JU, berada di garis depan gerakan ini. Proyek ini menggunakan teknik daur ulang berbasis enzim baru yang secara khusus menangani limbah plastik dan mikroplastik, mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan. Dengan memajukan teknologi enzim ini, proyek ini tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah plastik tetapi juga berupaya untuk meningkatkan solusi ini untuk aplikasi yang lebih luas di seluruh industri. Lebih jauh lagi, mengadopsi praktik yang ramah lingkungan dapat menghasilkan pengurangan biaya yang signifikan bagi perusahaan, karena meminimalkan input yang diperlukan untuk proses produksi. Selain itu, inovasi ini dapat menghasilkan aliran pendapatan alternatif dengan menciptakan produk yang dapat dipasarkan dari bahan limbah yang sebelumnya dianggap (Ram *et al.*, 2009). Manfaat lingkungan dari inovasi enzymopoz sangat mendalam dan berjangkauan luas. Salah satu keuntungan utamanya adalah optimalisasi rantai pasokan, yang memfasilitasi pengurangan produksi limbah. Dengan merampingkan manajemen rantai pasokan, bisnis dapat menerapkan strategi untuk mengisi ulang dan menggunakan kembali produk, sehingga meminimalkan limbah berlebih dan mendorong ekonomi sirkular. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa inovasi ini berpotensi mengurangi

emisi CO₂ tahunan sebesar 1–2,5 miliar ton, permintaan karbon sekitar 200 juta ton, dan permintaan bahan kimia sekitar 90 juta ton (Sarika, 2024) (Patricia *et al.*, 2023). Lebih jauh lagi, daur ulang limbah plastik melalui proses berbasis enzim muncul sebagai praktik yang lebih ramah lingkungan. Hal ini tidak hanya mengurangi polusi tetapi juga secara signifikan melestarikan sumber daya alam, yang menggarisbawahi pentingnya mengintegrasikan inovasi tersebut ke dalam praktik pengelolaan limbah (Baotong *et al.*, 2022).

Implikasi sosial dari inovasi enzimoz melampaui manfaat lingkungan, berdampak pada masyarakat dengan mendorong kesempatan kerja dan mengatasi tantangan sosial yang lebih luas. Penelitian telah menunjukkan bahwa inovasi teknologi hijau dapat meningkatkan tingkat ketenagakerjaan di dalam kota secara signifikan, karena inovasi tersebut memerlukan tenaga kerja terampil untuk menerapkan dan mengelola teknologi baru ini (He Ziwen *et al.*, 2023). Lebih jauh lagi, promosi inovasi sosial dalam menangani masalah global yang mendesak, seperti pencegahan dan pengendalian penyakit, sangatlah penting. Pendekatan ini melibatkan berbagai inisiatif seperti tempat penampungan tunawisma, sekolah piagam, organisasi perdagangan yang adil, program bantuan kemiskinan, dan gerakan pertanian-ke-meja, yang semuanya berkontribusi untuk meningkatkan kesejahteraan dan ketahanan masyarakat (Maryam *et al.*, 2024) (Andy, 2019). Dengan menyelaraskan tujuan lingkungan dengan keadilan sosial, inovasi enzimoz menciptakan kerangka kerja holistik untuk pembangunan berkelanjutan.

Aspek penting dari Inovasi Sampah Non-B3 Enzimoz adalah sinergi yang tercipta antara berbagai komponennya. Sinergi ini memungkinkan pengembangan solusi dinamis yang melampaui efektivitas inovasi individual. Misalnya, interkoneksi antara inovasi produk dan proses telah terbukti menghasilkan efek sinergis yang meningkatkan hasil keberlanjutan secara keseluruhan (John, 2022) (Jeong-Bin *et al.*, 2023). Selain itu, memahami peran enzim yang aktif terhadap karbohidrat (CAZymes) dalam degradasi lignoselulosa merupakan contoh bagaimana berbagai aplikasi enzim dapat ditingkatkan secara kolektif untuk mencapai aktivitas dan efektivitas enzim yang lebih besar. Dengan

mendorong kolaborasi antara berbagai bidang inovasi, para pemangku kepentingan dapat memanfaatkan potensi penuh dari teknologi ini, yang mendorong kemajuan yang lebih substansial dalam upaya keberlanjutan (Dixita *et al.*, 2020).

Meskipun inovasi enzimoz memiliki potensi yang menjanjikan, beberapa tantangan menghambat penerapannya secara luas. Salah satu tantangan signifikan adalah aspek inovasi finansial, yang memerlukan pengembangan produk dan layanan yang secara efektif menangani fungsi finansial tanpa mengorbankan kepercayaan klien. Selain itu, tantangan regulasi yang terkait dengan teknologi yang baru muncul menghadirkan hambatan lain, karena yurisdiksi yang berbeda dapat memberlakukan respons regulasi yang beragam yang dapat mempersulit upaya implementasi. Studi kasus telah menggambarkan berbagai lanskap regulasi yang harus dilalui oleh teknologi ini, yang menunjukkan perlunya kebijakan kohesif yang mendukung inovasi sambil menjaga kepentingan publik. Terakhir, mengoptimalkan hasil enzim untuk pengembangan produk dalam bioteknologi industri tetap menjadi tantangan yang berkelanjutan, karena upaya peningkatan berkelanjutan diperlukan untuk meningkatkan titer enzim dan memastikan kelayakan ekonomi (José *et al.*, 2019). Keterlibatan pemangku kepentingan memainkan peran penting dalam keberhasilan promosi dan implementasi inovasi enzimoz. Kolaborasi yang efektif antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk bisnis, lembaga pemerintah, lembaga non-pemerintah, dan lembaga swadaya masyarakat (LSM). organisasi pemerintah, dan masyarakat lokal, dapat secara signifikan meningkatkan pengembangan kebijakan yang mendorong inovasi ini maju (Amy & Julie, 2015). Ketika pemangku kepentingan merasa didengar dan dihargai dalam proses pengambilan keputusan, mereka menjadi pendukung perusahaan, yang mendorong promosi dari mulut ke mulut yang positif dan dapat menarik pelanggan baru. Selain itu, pemangku kepentingan yang terlibat dapat memberikan umpan balik yang sangat berharga yang membantu organisasi menyesuaikan inovasi mereka untuk memenuhi kebutuhan khusus masyarakat, sehingga meningkatkan efektivitas dan penerimaan keseluruhan inisiatif ini. Misalnya, di masyarakat pedesaan, partisipasi

pemangku kepentingan telah berperan penting dalam meningkatkan keamanan lingkungan dan mata pencaharian penduduk setempat (Mekonnen *et al.*, 2022). Pendekatan kolaboratif ini tidak hanya memperkuat legitimasi sosial inovasi enzim tetapi juga memfasilitasi pembagian sumber daya dan pengetahuan, yang pada akhirnya mengarah pada hasil yang lebih berkelanjutan.

Ke depannya, prospek masa depan untuk inovasi enzim menjanjikan, terutama dengan eksplorasi enzim yang berasal dari ekstremofil. Enzim unik ini menunjukkan sifat luar biasa dan kemampuan untuk mengkatalisis reaksi dalam kondisi ekstrem, yang menghadirkan peluang menarik untuk berbagai aplikasi industri (Mehak *et al.*, 2016). Potensi enzim ekstremofilik ini untuk meningkatkan efisiensi proses yang terlibat dalam pengelolaan limbah, daur ulang, dan biokonversi dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pencapaian tujuan keberlanjutan. Lebih jauh lagi, integrasi inovasi teknologi energi bersih sangat penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca ke tingkat nol bersih. Seiring dengan kemajuan teknologi enzim, kapasitas untuk mengembangkan solusi yang lebih efektif dan layak secara ekonomi akan meningkat, yang menghasilkan dampak transformatif pada praktik pengelolaan limbah dan lanskap keberlanjutan secara keseluruhan. Momentum maju ini menggarisbawahi pentingnya penelitian berkelanjutan, keterlibatan pemangku kepentingan, dan investasi dalam solusi berbasis enzim yang inovatif untuk mengatasi tantangan lingkungan yang mendesak.

BAGIAN 3

PENINGKATAN PERFORMA PEMBANGKIT DENGAN *THERMAL HEAT RATE MANAGEMENT EXPERT SYSTEM* (THERMEX)

Haman Suhaily, Suriyan Arif W

Editor: Haman Suhaily

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton unit 3, 7, dan 8 adalah pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar, dimiliki oleh PT. Paiton Energy, dan dioperasikan oleh PT. Paiton Operation & Maintenance Indonesia (POMI). PLTU Paiton unit 3, 7, dan 8 berperan dalam menyediakan 7-10% dari kebutuhan listrik dalam jaringan listrik Jawa-Bali. Berdasarkan hasil tinjauan energi yang dilakukan pada tahun 2019, batu bara, listrik impor, dan BBM adalah jenis energi yang digunakan oleh PLTU Paiton unit 3, 7, dan 8 untuk menghasilkan listrik, dengan jumlah konsumsi energi yang tercantum dalam tabel 1.

Tabel 1. Konsumsi Energi PLTU Tahun 2018

Jenis Energi	Konsumsi Energi (GJ)	Persentasi Konsumsi Energi (%)
Batubara	109,041,781	99.72%
BBM	175,360	0.16%
Listrik impor	131,066	0.12%
Total	109,348,207	100.00%

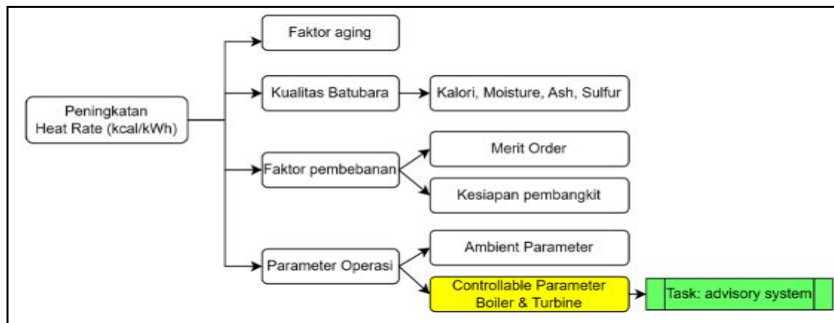
Dari tabel 1, terlihat bahwa batu bara adalah sumber energi utama yang dikonsumsi oleh *Power Block* (boiler, turbin, generator) Unit 3, 7, dan 8, dengan kontribusi sebesar 99,72% dari total energi yang digunakan. Hal ini menjadikan *Power Block* Unit 3, 7, dan 8 sebagai SEU (*Significant Energy Use*) dalam proses pembangkitan listrik di PLTU PT. Paiton Energy, di mana kinerja energi SEU tersebut lebih buruk dibandingkan dengan EnB (*Energy Baseline*) pada tahun 2018, yang tercatat sebesar 0,67%. Oleh

karena itu, diperlukan solusi untuk meningkatkan kinerja PLTU PT. Paiton Energy agar tetap dapat bersaing dalam industri pembangkitan energi listrik di Indonesia.

Asal Usul Ide Perubahan atau Inovasi

PT. POMI telah mengimplementasikan sistem manajemen energi sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM No. 14 Tahun 2012, dengan menerapkan proses PDCA (*Plan-Do-Check-Action*), yang mencakup audit energi untuk mengidentifikasi peluang peningkatan kinerja energi, melaksanakan rekomendasi dari hasil audit, serta melakukan monitoring dan evaluasi Heat Rate (kcal/kWh) sebagai EnPI (*Energy Performance Indicator*) terhadap EnB (*Energy Baseline*) dan variabel relevan yang mempengaruhi EnPI. Selain itu, PT. POMI juga menyusun dan melaksanakan tindak lanjut berdasarkan temuan hasil monitoring. Melalui proses ini, ditemukan adanya ketidakkonsistenan dalam pengaturan parameter operasi pada sistem boiler dan turbin yang menyebabkan peningkatan Heat Rate dan konsumsi energi. Masalah ini juga teridentifikasi dalam hasil kajian LCA, di mana terdapat HOT SPOT pada power block PLTU unit 3, 7, dan 8, khususnya pada area Boiler, Turbine, dan Generator, yang dikenal dengan istilah BTG.

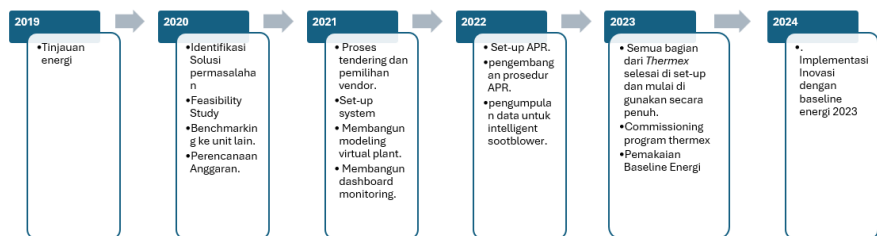
Ketidak konsistenan parameter operasi boiler dan turbin disebabkan oleh ketiadaan panduan dan sistem monitoring yang memadai untuk membantu operator pembangkit dalam menetapkan target parameter operasi boiler dan turbin yang optimal pada berbagai tingkat beban unit. Hal ini terjadi karena nilai optimal parameter dapat berubah seiring dengan perubahan beban unit, seperti yang terlihat pada root cause analysis di gambar 1.



Gambar 1. Root Cause Analysis Peningkatan Heat Rate

Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem yang dapat memberikan panduan secara real-time kepada operator pembangkit untuk menetapkan target parameter operasi boiler dan turbin yang optimal, memberikan indikasi apabila terjadi penyimpangan pada parameter operasi, dan memberikan rekomendasi untuk tindakan koreksi yang diperlukan.

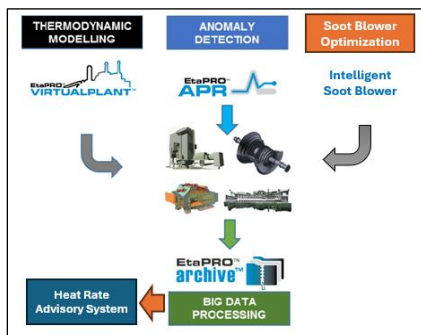
Tindak lanjut dari hasil tinjauan energi tahun 2019 melibatkan beberapa tahap utama yang dimulai pada tahun 2021 dengan pemilihan alternatif solusi, studi kelayakan, proses pengadaan, dan persiapan sistem. Pada tahun 2022, tahapan ini dilanjutkan dengan implementasi dan pemantauan sistem yang telah dipilih dan dipersiapkan. Pada tahun 2023, dilakukan uji coba (*commissioning*) terhadap sistem THERMEX untuk mengevaluasi efektivitas dan keberhasilannya dalam mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Pada tahun 2024, implementasi penuh sistem THERMEX dijalankan. Proses tindak lanjut hasil tinjauan energi ini dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Proses Tindak Lanjut Hasil Tinjauan Energi 2019

Perubahan yang Dilakukan dari Sistem yang Lama

Thermal Heat Rate Management Expert System (THERMEX) adalah sebuah aplikasi untuk memantau kinerja pembangkit secara real-time yang didasarkan pada pemodelan termodinamika dan pembelajaran mesin (*machine learning*). Aplikasi ini dikembangkan menggunakan perangkat lunak EtaPRO dan dilengkapi dengan beberapa modul yang terintegrasi, seperti *dashboard* pemantauan real-time, APR (*Advanced Pattern Recognition*), VirtualPlant, dan ISB (*Intelligent Soot Blower*), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 3. Integrasi Fitur *THERMEX*

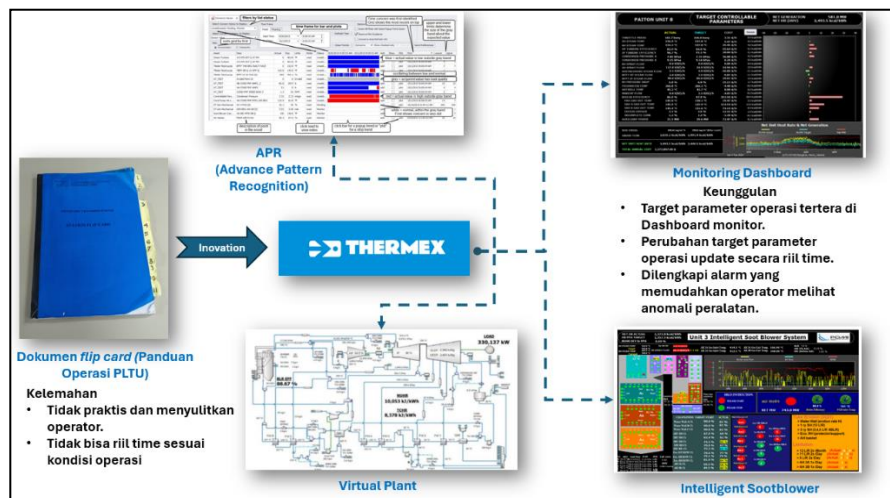
Monitoring dashboard memberikan tampilan *real-time* mengenai kinerja pembangkit, membantu operator dalam memantau dan mengelola operasi secara efisien. APR digunakan untuk mendeteksi anomali pada peralatan, yang memungkinkan masalah diidentifikasi dan ditangani lebih awal sebelum mempengaruhi

kinerja peralatan secara signifikan. VirtualPlant memodelkan proses termodinamika pembangkit, memungkinkan insinyur pembangkit untuk mensimulasikan berbagai skenario operasional dan dampaknya terhadap kinerja pembangkit guna menemukan potensi perbaikan pada Heat Rate. Sementara ISB memberikan rekomendasi mengenai pengoperasian soot blower untuk membersihkan area tube boiler yang terindikasi kotor.

Tujuan dari implementasi THERMEX adalah untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan menurunkan emisi dengan mengoptimalkan parameter operasional pada berbagai tingkat pembebanan. Dengan menyediakan deteksi dini dan rekomendasi berbasis data real-time, sistem ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik oleh operator dan insinyur, meningkatkan keandalan serta ketersediaan pembangkit, dan mengurangi biaya operasional melalui pemeliharaan yang lebih proaktif dan prediktif.

Penerapan Sistem Thermex pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

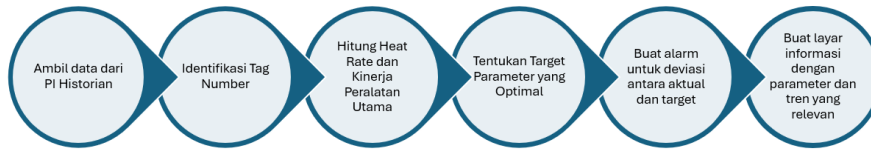
Thermal Heat Rate Management Expert System (THERMEX) merupakan inovasi digital yang dikembangkan untuk menyederhanakan dan meningkatkan efisiensi operasional di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sebelumnya, parameter operasi disajikan dalam bentuk dokumen fisik yang kurang praktis dan menyulitkan operator dalam mengakses informasi dengan cepat. Melalui THERMEX, informasi tersebut diubah menjadi *Dashboard* digital yang memungkinkan akses real-time terhadap parameter operasional. Sistem ini juga dilengkapi dengan kemampuan untuk mendeteksi anomali pada peralatan, mensimulasikan kondisi operasional, serta memberikan panduan operasional *sootblower* yang lebih tepat sesuai kebutuhan pembangkit listrik. Inovasi ini tidak hanya mempercepat pengambilan keputusan di lapangan, tetapi juga meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional PLTU secara keseluruhan.



Gambar 4. Skema kondisi sebelum dan sesudah THERMEX

THERMEX - Monitoring Dashboard

Tahapan perancangan real-time monitoring *dashboard* dari *THERMEX* dapat dilihat pada alur diagram gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 5. Tahapan Perancangan Monitoring *Dashboard*

Langkah pertama adalah mengintegrasikan sistem untuk memastikan data historis yang ada di PI historian dapat diakses dan diproses secara *real-time* oleh EtaPRO. Setelah data berhasil diambil, langkah berikutnya adalah mengidentifikasi tag number yang berkaitan dengan parameter pemantauan, seperti temperatur, tekanan, dan aliran pada peralatan utama. Identifikasi ini penting untuk memastikan bahwa setiap parameter yang diukur memiliki tag yang tepat dan akurat, sehingga data yang dikumpulkan dan ditampilkan di *dashboard* benar-benar mewakili kondisi yang sebenarnya.

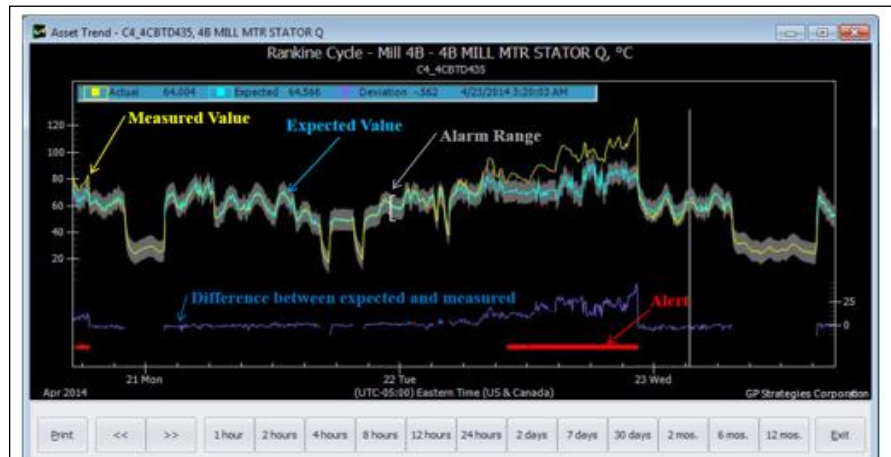
operasional yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, juga ditentukan target parameter operasi yang optimal, yang didasarkan pada desain, hasil pengujian, dan kinerja terbaik historis dari peralatan tersebut.

Tahap akhir dalam desain *dashboard* adalah pembuatan tampilan layar yang informatif dan interaktif. *Dashboard* harus menyajikan informasi terkait parameter operasi yang berhubungan dengan heat rate dan kinerja peralatan utama, yang mencakup nilai aktual, nilai target, serta dampak deviasi setiap parameter terhadap perubahan heat rate (dalam kcal/kWh) dan biaya bahan bakar (dalam USD/jam), sebagaimana yang terlihat pada gambar 4.2. Selain itu, sistem alarm harus diterapkan untuk memberikan peringatan jika terdapat deviasi antara nilai aktual dan target. *Dashboard* juga menyajikan grafik tren heat rate untuk mempermudah pemantauan perubahan kinerja seiring waktu. Dengan fitur-fitur tersebut, *dashboard* akan memberikan wawasan menyeluruh yang memungkinkan operator untuk mengambil langkah proaktif dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja operasional.

THERMEX - APR (Advance Pattern Recognition).

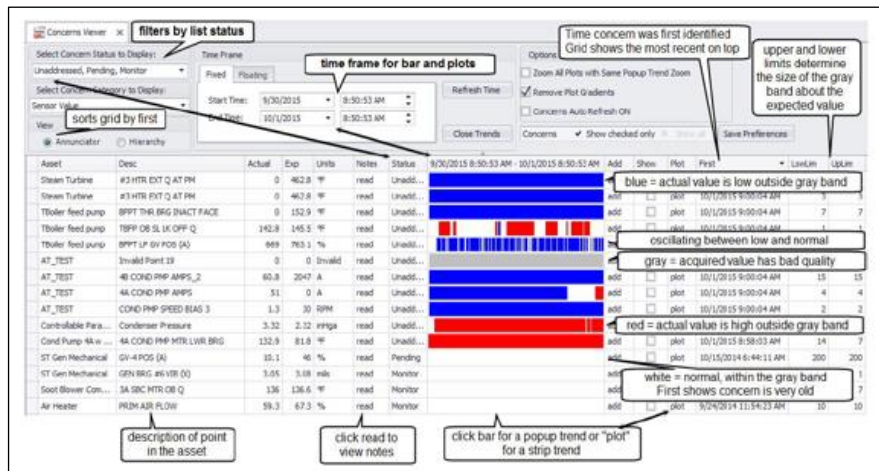
Tahapan perancangan APR dalam perangkat lunak EtaPRO melibatkan beberapa langkah yang dirancang untuk mendeteksi, mengelola, dan mendokumentasikan anomali pada proses dan peralatan pembangkit. Langkah pertama adalah penerapan model yang dipilih berdasarkan data historis yang paling mewakili mode operasi peralatan saat ini. Modeling ini sangat penting karena dapat menghilangkan pengaruh catatan historis yang tidak relevan, sehingga meningkatkan akurasi dan mengurangi alarm palsu.

Peringatan dini mengenai degradasi atau kegagalan peralatan, sekaligus mengurangi alarm palsu. APR mengaplikasikan metode machine learning dengan pendekatan near neighbors untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan tetap relevan dan akurat, yang masih tergolong baru di Indonesia, seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik APR

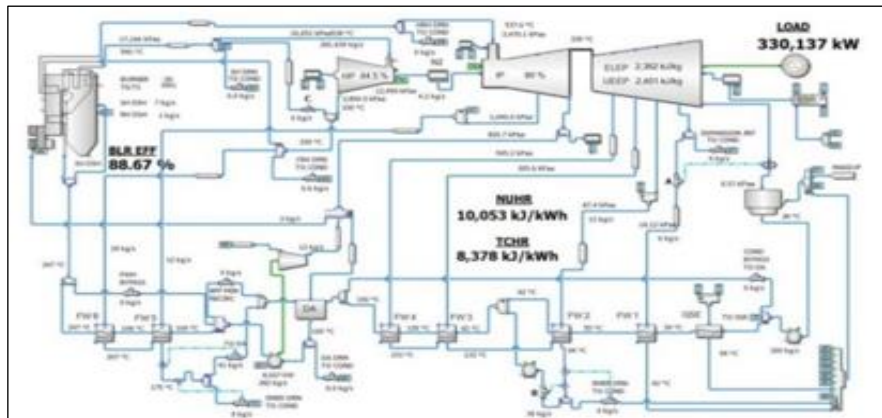
APR akan menyediakan nilai prediksi bagi semua sensor dalam aset. *Dashboard* APR yang *user-friendly* memungkinkan operator dan enjiner untuk mengatasi anomali yang muncul secara proaktif dengan riwayat pelacakan hingga resolusi. Dengan memanfaatkan informasi dari *dashboard* APR seperti yang terlihat pada gambar 4.4, pengguna dapat mendokumentasikan dan melacak riwayat anomali hingga penyelesaiannya, memastikan bahwa setiap masalah diidentifikasi, dianalisis, dan diselesaikan dengan cara yang sistematis dan terdokumentasi dengan baik. Dengan demikian, APR memberikan kerangka kerja yang komprehensif untuk mendeteksi dan mengelola anomali secara efektif, memastikan operasi pembangkit yang lebih handal dan efisien.



Gambar 8. Dashboard alarm APR

THERMEX - Virtual Plant.

VirtualPlant adalah modul pemodelan termodinamika untuk pembangkit yang memungkinkan pengguna untuk menganalisis keseimbangan energi dan massa, serta efisiensi pembangkit baik secara *offline* maupun *online*, yang masih tergolong baru di Indonesia. Dengan *VirtualPlant*, pengguna dapat mendapatkan wawasan mendalam tentang cara energi dialirkan dan digunakan dalam proses pembangkitan, serta memahami bagaimana berbagai parameter operasional mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, *VirtualPlant* menjadi alat yang sangat berharga bagi insinyur dan operator dalam merencanakan dan mengoptimalkan operasi pembangkit. Proses pengembangan *VirtualPlant* dimulai dengan pembuatan model berdasarkan diagram *heat & mass balance*, seperti yang terlihat pada gambar 9. Model ini menjadi dasar bagi *VirtualPlant* untuk mensimulasikan kinerja pembangkit secara keseluruhan, serta aliran massa dan energi, untuk mengevaluasi perubahan parameter operasi dan perbaikan desain peralatan serta efisiensi.



Gambar 9. Pemodelan VirtualPlant

VirtualPlant mempunyai fitur *parametric study* yang memungkinkan pengguna untuk mengubah beberapa parameter dan menjalankan setiap parameter dengan berbagai skenario. Fitur ini bekerja dalam spreadsheet excel, di mana setiap kolom mewakili satu run model baru. *Parametric study* memungkinkan pengguna untuk melakukan evaluasi yang mendalam terhadap berbagai perubahan operasional dan desain peralatan, seperti yang terlihat pada gambar 4.8. Selain itu, VirtualPlant juga memiliki fitur ***What-If Analysis*** yang merupakan model teknik yang mengintegrasikan model komponen individual untuk mensimulasikan dampak dari perubahan operasional atau perubahan desain peralatan. Setiap komponen dapat diatur ulang atau didesain ulang untuk memodelkan dan mengevaluasi berbagai skenario yang berbeda. Hasil output dari Analisa ini dapat digunakan untuk pengambilan keputusan dari perubahan parameter operasi atau modifikasi peralatan untuk meningkatkan kinerja energi.

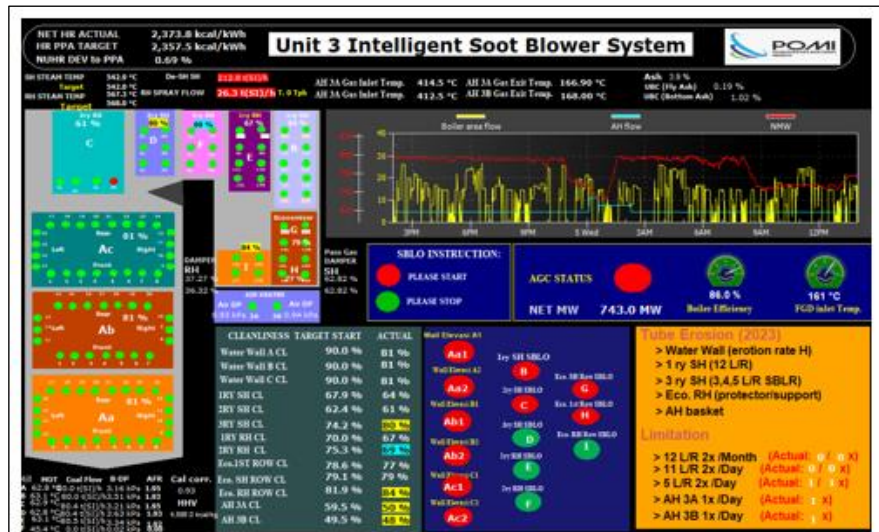
The screenshot shows the 'Parametric Study Data' window in VirtualPlant. It displays a table with columns for Variable Name, Unit/Description, and Base Value. The table lists various boiler parameters such as temperatures, pressures, and flows, with their respective units and base values. The interface includes a menu bar at the top and a toolbar with various icons for file operations and simulation control.

Variable Name	Unit/Description	Base Value
1. Inlet Air Temp	3000 Inlet Air Temperature	Temp °F 59
2. Inlet Air Pressure	3000 Inlet Air Pressure	LongPress MPa 205.2424
3. Inlet Air Flow	3000 Inlet Air Flow	LongPress M³/s 254.8548
4. Inlet Air Velocity	3000 Inlet Air Velocity	LongPress m/s 254.8548
5. Inlet Air Density	3000 Inlet Air Density	LongPress kg/m³ 1.2041
6. Inlet Air Viscosity	3000 Inlet Air Viscosity	LongPress Pa·s 1.81e-05
7. Inlet Air Thermal Conductivity	3000 Inlet Air Thermal Conductivity	LongPress W/m·K 0.0261
8. Inlet Air Specific Heat	3000 Inlet Air Specific Heat	LongPress J/kg·K 1005
9. Inlet Air Enthalpy	3000 Inlet Air Enthalpy	LongPress kJ/kg 209.19
10. Inlet Air Entropy	3000 Inlet Air Entropy	LongPress kJ/kg·K 0.7017
11. Inlet Air Mass Flow	3000 Inlet Air Mass Flow	LongPress kg/s 305.85
12. Inlet Air Molar Flow	3000 Inlet Air Molar Flow	LongPress kmol/s 13.5
13. Inlet Air Molar Fraction	3000 Inlet Air Molar Fraction	LongPress kmol/kmol 0.21
14. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
15. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
16. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
17. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
18. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
19. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
20. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
21. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
22. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
23. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
24. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
25. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
26. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
27. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
28. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
29. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
30. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
31. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
32. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
33. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
34. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
35. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
36. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
37. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
38. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
39. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
40. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
41. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
42. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
43. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
44. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
45. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
46. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
47. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
48. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
49. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
50. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
51. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
52. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
53. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
54. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
55. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
56. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
57. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
58. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
59. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
60. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
61. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
62. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
63. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
64. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
65. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
66. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
67. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
68. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
69. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
70. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
71. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
72. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
73. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
74. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
75. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
76. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
77. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
78. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
79. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
80. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
81. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
82. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
83. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
84. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
85. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
86. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
87. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
88. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
89. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
90. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
91. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
92. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
93. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
94. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
95. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
96. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
97. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9
98. Inlet Air Molar Enthalpy	3000 Inlet Air Molar Enthalpy	LongPress kJ/kmol 20919
99. Inlet Air Molar Entropy	3000 Inlet Air Molar Entropy	LongPress kJ/kmol·K 7017
100. Inlet Air Molar Specific Heat	3000 Inlet Air Molar Specific Heat	LongPress kJ/kmol·K 20.9

Gambar 10. VirtualPlant Parametric Study

THERMEX - ISB (Intelligent Soot Blower)

Proses pengembangan ISB dimulai dengan pengumpulan dan analisis data historis terkait parameter operasi boiler dan *soot blower*. Data tersebut mencakup nilai *cleanliness factor* dari berbagai area dalam boiler yang diperoleh melalui sensor dan perhitungan yang baru-baru ini diterapkan di Indonesia. Analisis terhadap data historis ini memungkinkan penetapan target *cleanliness factor* yang optimal untuk setiap area boiler, berdasarkan performa terbaik yang tercatat sebelumnya. Algoritma yang digunakan membandingkan nilai aktual dengan target yang sudah ditentukan, serta memberikan peringatan jika nilai aktual berada di bawah target, seperti yang terlihat pada gambar 11.



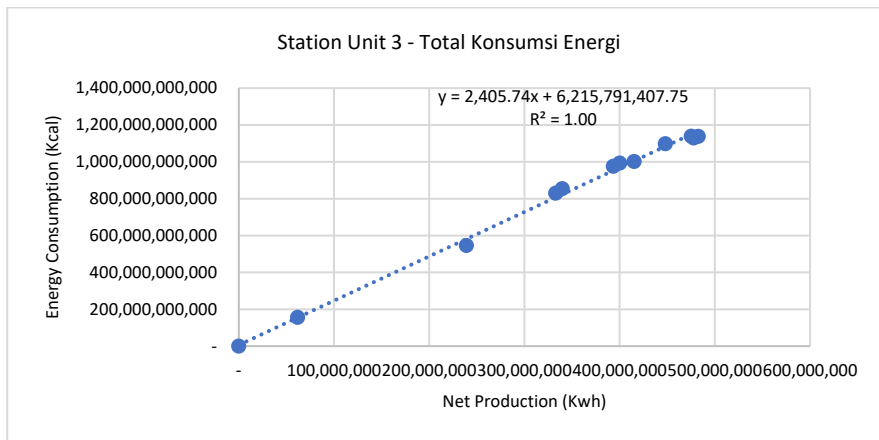
Gambar 11. Dashboard Intelligent Soot Blower (ISB)

Setelah integrasi analisis dan alarm, langkah selanjutnya adalah mengembangkan *dashboard* yang memberikan rekomendasi operasional untuk soot blower, yang dapat diakses oleh operator. Operator dapat mengikuti rekomendasi ini untuk mengoperasikan soot blower secara efisien, dengan fokus pada area-area yang terdeteksi kotor. Pendekatan ini memungkinkan ISB untuk menjaga parameter operasi boiler tetap optimal, mengurangi frekuensi pembersihan yang tidak diperlukan, dan meningkatkan efisiensi kinerja boiler.

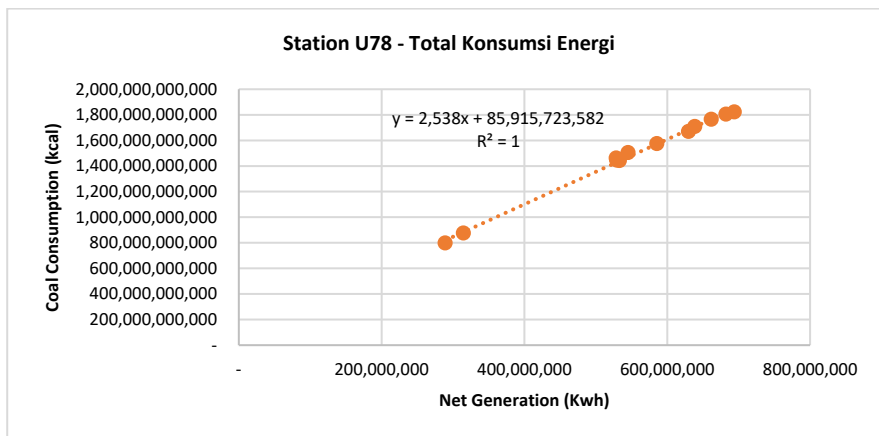
Kuantifikasi Informasi Efisiensi Energi Akibat Perubahan Komponen dan Menunjukkan Kuantifikasi Informasi Penurunan Biaya

THERMEX mulai diimplementasikan secara penuh pada tahun 2024, dengan tujuan untuk mengukur efisiensi energi yang dihasilkan. Untuk mengkuantifikasi efisiensi tersebut, konsumsi energi dan produksi listrik pada tahun 2023 digunakan sebagai *baseline*. Melalui analisis regresi linier, diperoleh persamaan *baseline* energi untuk masing-masing unit sebagai berikut:

(a)



(b)

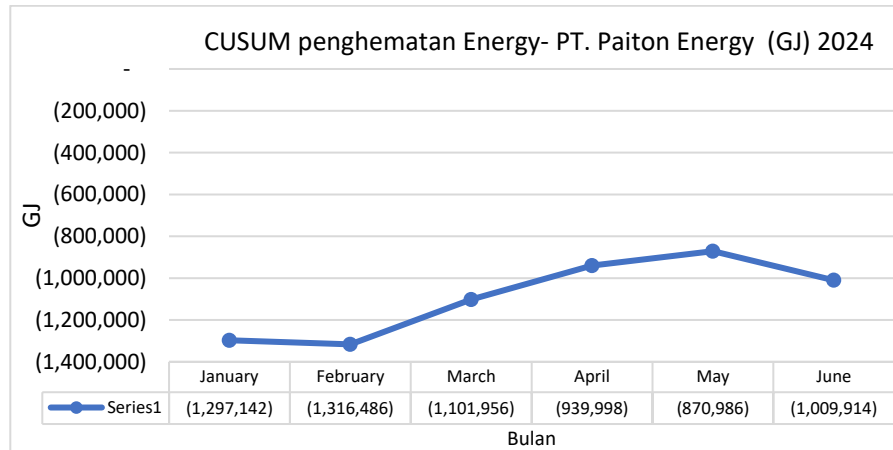


Gambar 12. *Baseline* konsumsi energi 2023 (a) Station Unit 3
(b) Station Unit 78.

Berdasarkan *baseline* 2023 maka digunakan untuk mengevaluasi penghematan yang didapatkan pada tahun 2024, di mana penghematan dihitung melalui:

$$\text{Penghematan Energi (Kcal)} = [\text{Konsumsi Energi Baseline} - \text{Konsumsi Energi}], \dots (1)$$

Dengan persamaan satu di atas, maka digunakan untuk menghitung akumulasi penghematan yang diperoleh oleh PT. Paiton Energy dari station unit 3,7 dan 8 dari pada tiap bulan. Sehingga trend CUSUM penghematan ditunjukkan pada gambar 13 sebagai berikut.



Gambar 13. Cusum penghematan energi di tahun 2024

Penerapan THERMEX terbukti berhasil menurunkan *heat rate* sebagai EnPI, dengan total penghematan energi PT. Paiton Energy mencapai 1.009.914 GJ. Persentase penghematan tersebut diperoleh melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Prosentase penghematan (\%)} = \left[\frac{\text{Nilai Cusum Penghematan 1 tahun (Kcal)}}{\text{Total Konsumsi Energi Baseline (kwh)}} \right] \times 100, \dots, (2)$$

Selanjutnya **nilai penghematan dalam Gcal dihitung untuk mendapatkan nilai dari penghematan biaya bahan bakar dan nilai dari *payback period*.** Hasil dari perhitungan di perlihatkan pada tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan penghematan dan payback period inovasi

Parameter	Satuan	Nilai
A. Kalori batubara	GJ/kg	0,02
B. Harga batubara	Rp/ton	1.050.000,00
C. Harga energi batubara	Rp/GJ	52.500.000,00
D. Penghematan energi Jan-Jun 2024	GJ	1.009.913,92
E. Penghematan Batu bara (D/A)	Ton	50.496
F. Penghematan biaya batubara pertahun (E*B)	Rp/Tahun	53.020.480.738,58
G. CAPEX (Hardware, Software, and license)	Rp	10.491.511.320,00
H. Payback period (G/F)	Tahun	0,20

Nilai penghematan bahan bakar yang diperoleh sebesar Rp 53,020 Milyar per tahun dan nilai *Payback period* dari inovasi ini adalah 0,2 tahun.

Program *Peningkatan Performa Pembangkit dengan THERMEX (Thermal Heat Rate Management Expert System)* dapat menunjukkan adanya Nilai Tambah, di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Perubahan Rantai Nilai (*Proses Improvement*)

Implementasi teknologi digital dalam THERMEX telah membawa perubahan signifikan pada rantai nilai dengan meningkatkan proses perbaikan berkat kemudahan dalam menjalankan operasi pembangkit listrik di PLTU PT. Paiton Energy. Parameter operasi yang sebelumnya terdapat dalam manual dan prosedur kini tersedia dalam monitoring *dashboard*, memudahkan operator untuk memantau proses dan target produksi. APR (*Advanced Pattern Recognition*) memiliki kemampuan untuk mendeteksi anomali pada peralatan, memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi kerusakan sehingga tim pemeliharaan dapat merencanakan perbaikan dengan lebih efektif. Virtual Plant dapat mensimulasikan prediksi kinerja pembangkit listrik melalui program komputer, membantu para *engineer* untuk menganalisis perubahan pola operasi sebelum diterapkan secara langsung di pembangkit, sehingga meminimalkan risiko kesalahan atau kerugian. *Intelligent Sootblower* memberikan rekomendasi waktu yang tepat untuk

pengoperasian *sootblower*, meningkatkan efektivitas operasional dan menghemat uap, berbeda dengan sistem sebelumnya yang bergantung pada pengoperasian berdasarkan timer.

2. Perubahan Layanan Produk

Program THERMEX menawarkan berbagai keuntungan dalam pengelolaan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). THERMEX mengubah cara layanan produk dengan menyajikan target parameter operasi secara real-time melalui monitoring *dashboard*, menggantikan format sebelumnya yang berupa buku, sehingga mempermudah pengawasan dan pengendalian kinerja PLTU dengan lebih efisien. Fitur *Advanced Pattern Recognition* memungkinkan deteksi dini kerusakan peralatan melalui alarm, memberikan kesempatan bagi teknisi untuk melakukan pemeriksaan dan perbaikan sebelum kerusakan lebih lanjut terjadi. Teknologi Virtual Plant memungkinkan simulasi perilaku pembangkit listrik, memberikan kesempatan bagi engineer untuk menguji skenario operasi tanpa mempengaruhi sistem secara langsung. Selain itu, *Intelligent Sootblower* memberikan panduan mengenai waktu terbaik untuk pengoperasian *sootblower*, membantu menjaga efisiensi pembakaran dan mengurangi konsumsi bahan bakar. Secara keseluruhan, program ini meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keamanan operasional PLTU.

3. Perubahan Perilaku

Sebelum adanya inovasi dengan pengaplikasian THERMEX, proses operasional mengacu pada manual dan prosedur yang berupa buku, yang sulit diakses dengan cepat oleh operator. Namun, dengan hadirnya THERMEX, target operasional kini tersedia di layar monitor secara real-time, memudahkan operator dalam memantau kondisi pembangkit. Selain itu, dalam aspek pemeliharaan, penggunaan THERMEX juga memberikan kemudahan bagi teknisi untuk mendeteksi tanda-tanda kerusakan lebih awal, di mana sebelumnya kerusakan peralatan baru diketahui setelah masalah terjadi. Para engineer juga lebih mudah dalam mengambil

keputusan mengenai perubahan pola operasi pembangkit karena sistem ini mampu mensimulasikan proses pembangkit listrik menggunakan komputer. Dengan demikian, inovasi THERMEX telah membawa perubahan dalam perilaku operator, teknisi, dan engineer dalam mengelola unit pembangkit listrik di PT. Paiton Energy.

Peningkatan Performa Pembangkit dengan *Thermal Heat Rate Management Expert System* (Thermex) dalam Mencapai Tujuan Keberlanjutan.

Manajemen laju panas termal merupakan metrik penting dalam pengoperasian pembangkit listrik, yang mengukur jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit energi listrik. Pengukuran ini penting karena berkorelasi langsung dengan efisiensi pembangkit; laju panas yang lebih rendah menandakan operasi yang lebih efisien. Signifikansi laju panas melampaui sekadar perhitungan efisiensi, memengaruhi dinamika pasar dengan memungkinkan penentuan biaya variabel yang terkait dengan produksi energi. Dalam konteks ini, Electric Power Research Institute (EPRI) telah melakukan penelitian ekstensif untuk mengeksplorasi strategi inovatif yang bertujuan untuk meningkatkan laju panas. Dengan menunjukkan peningkatan di area ini, EPRI bertujuan untuk memfasilitasi pengurangan emisi udara, konsumsi bahan bakar, dan biaya produksi keseluruhan, sehingga memposisikan manajemen laju panas termal sebagai landasan praktik energi berkelanjutan (Stewart, 2024) (Sam, 2022). Sistem pakar THERMEX dirancang khusus untuk meningkatkan pemahaman dan penerapan prinsip termodinamika di kalangan mahasiswa teknik, khususnya mereka yang menghadapi tantangan dalam memahami konsep yang kompleks. Alat pendidikan ini menggunakan strategi pengajaran sistematis yang tidak hanya membantu dalam pemecahan masalah tetapi juga menumbuhkan pemahaman yang lebih dalam tentang proses termodinamika (Marcos *et al.*, 1990). Selain aplikasi pendidikan, THERMEX menyediakan kerangka kerja bagi para profesional industri, khususnya di Thermax Global, yang mengkhususkan diri dalam

mengoptimalkan operasi dan pemeliharaan pembangkit listrik. Dengan memanfaatkan kemampuan THERMEX, pembangkit listrik dapat mencapai efisiensi dan kinerja yang lebih baik, menyelaraskan prosedur operasional dengan praktik terbaik dalam manajemen laju panas termal.

Penerapan THERMEX dalam pembangkit listrik telah menghasilkan manfaat yang signifikan, khususnya terkait konservasi energi dan penghematan biaya. Studi menunjukkan bahwa upaya konservasi energi yang difasilitasi oleh THERMEX dapat menghasilkan pengurangan hingga lebih dari 80%, sementara inisiatif pengoptimalan dapat menghasilkan penghematan biaya lebih dari 4,65 juta dolar AS (Jimin *et al.*, 2021). Lebih jauh lagi, integrasi THERMEX berkontribusi pada berbagai keuntungan operasional, termasuk pengurangan biaya tetap, perpanjangan umur pembangkit, peningkatan fleksibilitas operasional, dan peningkatan keselamatan selama operasi pembangkit. Manfaat-manfaat ini berpuncak pada peningkatan kinerja secara keseluruhan, memposisikan THERMEX sebagai kekuatan transformatif dalam sektor pembangkit listrik (Marcos *et al.*, 1990).

Tujuan THERMEX selaras dengan tujuan keberlanjutan yang lebih luas, khususnya dalam konteks transisi energi di India. Thermax, sebagai pelopor dalam teknologi bersih, menekankan praktik energi yang bertanggung jawab yang selaras dengan kebijakan energi nasional. Komitmen untuk mencapai 100 persen konsumsi energi bebas bahan bakar fosil pada tahun 2040 menggarisbawahi dedikasi Thermax terhadap pembangunan berkelanjutan dan pengelolaan lingkungan (Jessica & Nancy, 2018). Selain itu, THERMEX memfasilitasi pembuatan laporan audit komprehensif yang memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti yang ditujukan untuk mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi energi, sehingga berkontribusi pada upaya keberlanjutan industri. Efektivitas THERMEX selanjutnya divalidasi melalui berbagai studi kasus yang menggambarkan penerapan praktisnya dalam skenario dunia nyata. Salah satu analisis penting menggunakan pendekatan multi-aspek yang dikenal sebagai analisis 4E—mencakup penilaian energi, eksergi, eksergoekonomi, dan eksergolingkungan—yang menunjukkan dampak mendalam dari manajemen laju panas termal pada

efisiensi operasional (Muhammad *et al.*, 2021). Selain itu, studi kasus yang melibatkan sistem penyimpanan energi termal berbasis es mengungkapkan keberhasilan prediksi beban pendinginan, yang menyoroti keserbagunaan dan efektivitas THERMEX dalam berbagai aplikasi (Xiao *et al.*, 2024). Pelajaran yang diambil dari studi kasus ini memberikan wawasan berharga bagi para administrator inisiatif STEM, yang memperkuat pentingnya solusi inovatif dalam mengejar efisiensi dan keberlanjutan (Krystle *et al.*, 2022).

Meskipun memiliki banyak keuntungan, penerapan sistem pakar THERMEX bukannya tanpa tantangan. Salah satu kendala utama adalah hambatan teknis dan finansial awal yang terkait dengan penerapan sistem baru. Organisasi harus menavigasi kompleksitas dalam mengintegrasikan THERMEX ke dalam operasi yang ada, yang sering kali melibatkan investasi awal yang signifikan dalam teknologi dan pelatihan (Serkan *et al.*, 2024). Lebih jauh, sementara THERMEX menyederhanakan pengelolaan proses laju panas termal dengan mengurangi kompleksitas dan biaya penerapan, validasi, pemeliharaan, dan pelatihan, transisi dari sistem tradisional ke THERMEX masih dapat memicu resistensi dalam tenaga kerja (Trish *et al.*, 2008). Resistensi ini sering kali berasal dari rasa takut akan perubahan, terutama jika karyawan merasa bahwa sistem baru dapat mengancam keamanan pekerjaan mereka atau mengubah alur kerja yang sudah ada secara negatif (Khai *et al.*, 2022). Keberhasilan penerapan THERMEX tidak hanya bergantung pada kemampuan teknisnya tetapi juga pada pengembangan budaya yang reseptif terhadap perubahan dan inovasi.

Melihat ke depan, masa depan manajemen laju panas termal dan sistem pakar THERMEX menjanjikan, terutama karena industri semakin memprioritaskan keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan. Dalam bidang elektronika daya, manajemen termal yang efektif menjadi penting untuk memastikan umur panjang perangkat dan efisiensi operasional (Giovanni, 2024). Seiring berkembangnya teknologi, integrasi teknologi termal terbaru akan memainkan peran penting dalam perjalanan sektor industri menuju dekarbonisasi, yang selaras dengan tujuan keberlanjutan global (Jason *et al.*, 2024). Lebih jauh lagi, kemajuan dalam

sistem manajemen termal baterai (BTMS) kemungkinan akan meningkatkan kinerja dan keandalan sistem penyimpanan energi, yang menggarisbawahi pentingnya pengaturan suhu untuk baterai lithium-ion (Joris & Joeri, 2020). Karena teknologi ini terus berkembang, sangat penting bagi pembangkit listrik untuk mengadopsi sistem inovatif seperti THERMEX, yang dapat beradaptasi dengan perubahan ini dan mendukung transisi industri ke praktik yang lebih berkelanjutan.

BAGIAN 4

PENURUNAN KONSUMSI ARUS LISTRIK MOTOR DARI PROGRAM METODE PEMELIHARAAN INSTRUMENTASI *FURNACE DRAFT PRESSURE* TRANSMITER

Fajar Dwi Saksana, Puspita Rukmi, Widjanarko

Editor: Fajar Dwi Saksana

Energi merupakan faktor krusial dalam mencapai pembangunan berkelanjutan (Khan *et al.*, 2020). Batu bara, minyak, dan gas bumi adalah sumber energi fosil yang digunakan dalam proses pembangkitan energi. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara masih mendominasi penyediaan energi di Indonesia. Berdasarkan data Dewan Energi Nasional (DEN), pada tahun 2023, proporsi bauran energi terbesar masih didominasi batu bara sebesar 40,46 persen, diikuti minyak bumi 30,18 persen, gas bumi 16,28 persen, dan energi terbarukan 13,09 persen, menurut IESR (*Institute for Essential Services Reform*). Peningkatan penggunaan energi fosil berkontribusi pada kenaikan emisi gas rumah kaca, yang menyebabkan ketidakstabilan iklim, serta meningkatnya suhu bumi dan permukaan air laut (Pertamina, 2020). Penelitian menunjukkan bahwa emisi CO₂ memberikan kontribusi terbesar terhadap perubahan iklim antara tahun 1750 hingga 2005 (Luo & Wu, 2016).

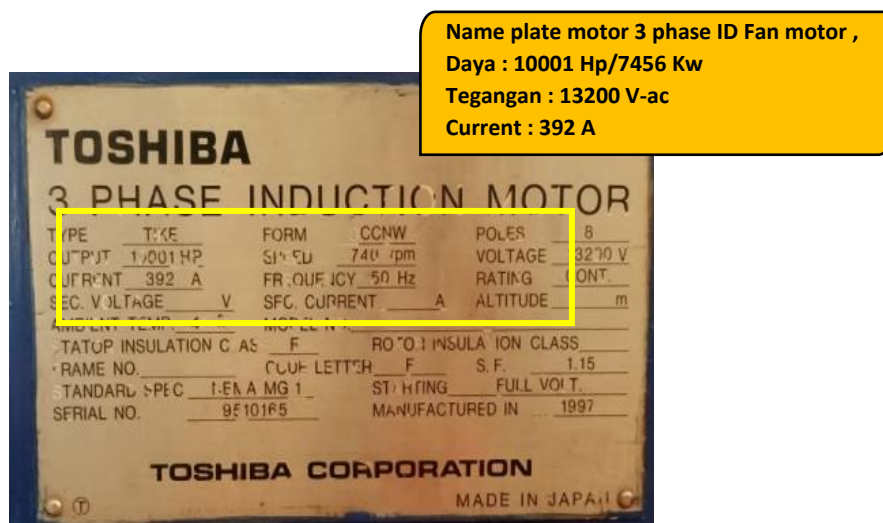
PLTU Paiton Unit 7&8, yang dimiliki oleh PT. Paiton Energy, merupakan salah satu pembangkit listrik swasta pertama di Indonesia yang didirikan pada tahun 1994. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar fosil batu bara dengan kapasitas pembangkitan sebesar 2 × 615 MW. Pada tahun 2023, PLTU Paiton Unit 7&8 mengkonsumsi 3.696.532,00 ton batu bara dan menghasilkan energi listrik sebesar 7.096.271,90 MWh. Batu bara sebagai sumber energi fosil menghasilkan emisi gas buang, termasuk SO₂, NO_x, PM, serta gas rumah kaca (GRK). GRK, terutama karbon dioksida (CO₂), berkontribusi besar terhadap perubahan iklim, sehingga konservasi energi di PLTU perlu ditingkatkan. Hal ini sejalan

dengan kajian LCA yang menunjukkan dampak lingkungan akibat emisi dari proses produksi di PLTU Paiton Energy.

Konservasi energi adalah upaya untuk mengurangi konsumsi energi dengan cara meningkatkan efisiensi penggunaannya. Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi, disebutkan bahwa "Penyedia Energi" yang memanfaatkan sumber energi lebih besar atau sama dengan 6.000 ton setara minyak per tahun, wajib melaksanakan kegiatan konservasi energi melalui manajemen energi. Secara umum, efisiensi energi bertujuan untuk mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk mencapai hasil optimal, baik dalam penggunaan peralatan maupun sistem yang terkait dengan energi. Dengan adanya program efisiensi energi, diharapkan dapat menurunkan emisi, yang dapat dihitung berdasarkan nilai intensitas emisi tahunan.

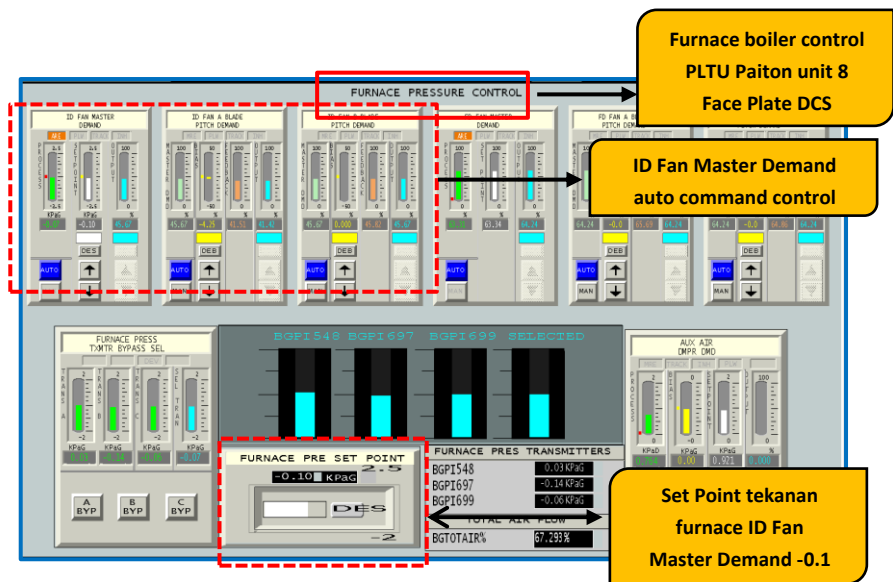
Asal Usul Ide Perubahan atau Inovasi

PLTU Paiton Energy Unit 7&8 dengan kapasitas 615 MW tidak hanya fokus pada produksi energi listrik, tetapi juga berupaya mengoptimalkan pemakaian energi listrik dalam proses pembangkitan, sehingga energi yang digunakan menjadi lebih efisien dan mengurangi pemborosan energi selama proses produksi. Untuk itu, kinerja perangkat pendukung produksi ditingkatkan, baik dari segi program pemeliharaan maupun penggunaan unit operasional, khususnya pada perangkat yang membutuhkan konsumsi energi listrik besar. Sebagai contoh, motor listrik 3 phase ID Fan dengan kapasitas 10.001 HP, yang setara dengan 7.456 KW, beroperasi pada tegangan 13.800 V-AC. Setiap unit di PLTU Paiton Energy Unit 7&8 memiliki dua motor ID Fan.



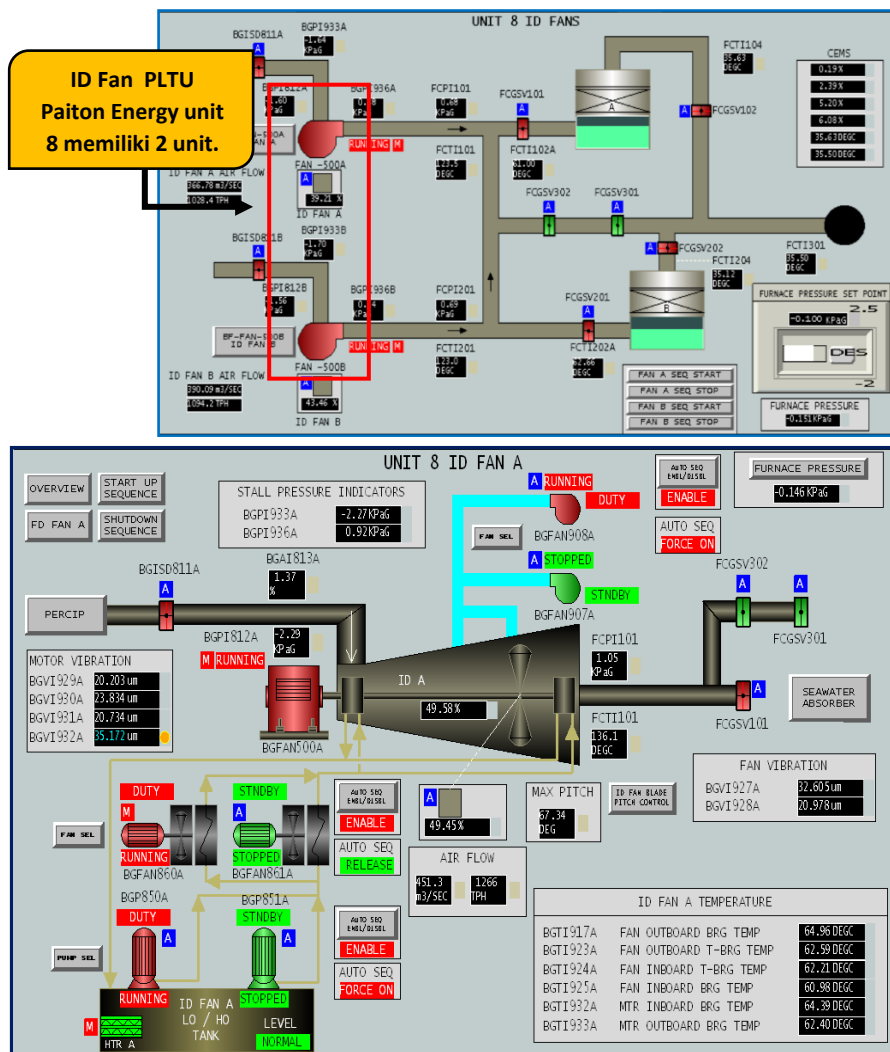
Gambar 1. Name plate motor induksi 3 phase ID Fan PLTU

Fan yang berfungsi sebagai pengendali tekanan furnace boiler bertugas untuk menjaga tekanan pembakaran dalam boiler agar tetap sedikit lebih rendah dari tekanan atmosfer (*slight-negative*) dan mengalirkan gas sisa pembakaran (*flue-gas*) keluar dari boiler ke udara bebas. Proses pembakaran yang beroperasi dengan tekanan negatif atau di bawah tekanan atmosfer selalu melibatkan *Force Draft Fan (FD Fan)* dan *Induced Draft Fan (ID Fan)* untuk menjaga agar alur tekanan tetap pada nilai *set-point*, yaitu -0,10 kPa. Akurasi pembacaan dari peralatan instrumentasi, seperti Furnace Pressure Transmitter di ruang pembakaran boiler, harus dipastikan agar tetap handal. Pembacaan dari furnace pressure transmitter ini mempengaruhi konsumsi energi yang dibutuhkan oleh motor ID Fan dalam sistem kontrol yang mengatur ID Fan Master Demand set point.



Gambar 2. Face plate DCS Operating Control ID Fan Demand set point

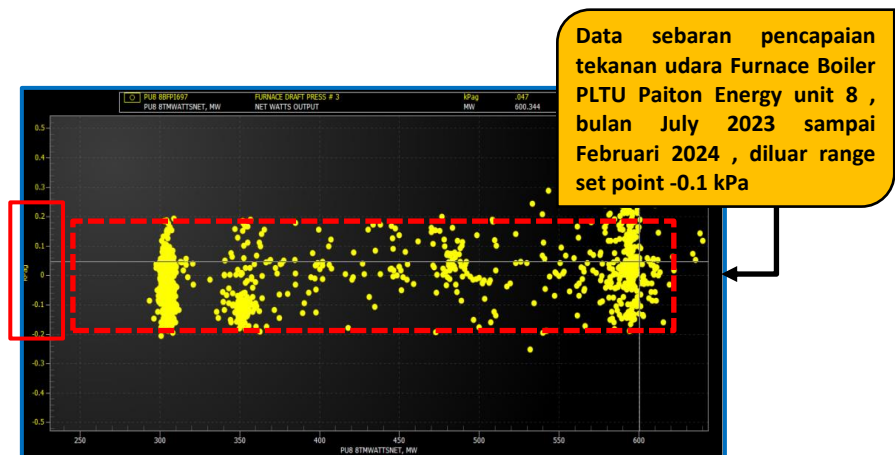
Induce Draft FAN (ID Fan) adalah kipas yang digerakkan oleh motor 3 Phase dengan kapasitas 10.001HP-13.8Kv, yang menghisap udara dari dalam boiler keluar menuju cerobong, menghasilkan tekanan negatif pada boiler. *ID Fan* memiliki baling-baling kipas (*fan blades*) yang dipasang di sebuah *Rotor Fan Wheel*. Besarnya tekanan dan volume flue-gas yang dihisap oleh *ID Fan* diatur oleh besarnya sudut dari *blade pitch ID Fan*, semakin besar sudut bukannya maka tekanan yang dihisap semakin besar, begitu pula energi yang dibutuhkan juga secara linier akan mengikuti perubahan yang terjadi, besarnya derajat putar *blade pitch* digerakkan oleh *actuator hydraulic servo* menggunakan oil bertekanan untuk menggerakkan *regulating disc moving blade*.



Gambar 3. ID Fan pada PLTU

Fungsi operasional motor induksi 3-phase ID Fan dalam mencapai nilai set point tekanan udara di furnace boiler -0,1 kPa menjadi ide awal untuk mengoptimalkan penggunaan energi listrik yang berpotensi menghemat energi. Berdasarkan data kondisi operasional PLTU PT Paiton Energy unit 8, yang dipantau melalui *EtaPRO-Asset Performance and Condition Monitoring*, tercatat dari awal Juli 2023 hingga Februari 2024

terdapat pencapaian tekanan udara furnace boiler yang melebihi nilai set point -0,1 kPa. Pembacaan tekanan udara *furnace boiler* di PLTU Paiton Energy unit 8 diperoleh melalui perangkat instrumentasi, yakni furnace pressure transmitter untuk furnace boiler 8BF-PT-697. Untuk memastikan kehandalan pembacaan tekanan udara yang terjadi dalam furnace boiler, perangkat instrumentasi ini secara rutin menjalani pemeliharaan, termasuk proses kalibrasi guna menjaga linieritas pembacaan tidak melebihi batas error 0,25%, sesuai dengan prosedur PI-10-01-05 "*Calibration of Rosemount Model 11551 Smart Pressure Transmitter.*"



Gambar 4. Data etaPRO Tekanan udara furnace pressure boiler PLTU Unit 8 bulan July 2023 – February 2024

INSTRUCTION	CALIBRATION OF ROSEMOUNT MODEL 1151 SMART PRESSURE TRANSMITTER	PI-10-01-105
-------------	--	--------------

POMI	DOCUMENT MANAGEMENT	PI-10-01-105
CALIBRATION OF ROSEMOUNT MODEL 1151 SMART PRESSURE TRANSMITTER		3 YEARLY REVIEW CYCLE

APPROVAL of Revision < 5 >

	POSITION	NAME	SIGNATURE	DATE
Prepared By:	Maintenance Supervisor	Purwo Budiarto/ Benny SW		30 AUG 2023
Reviewed by HS Svr: (for review HS aspect)	HS Supervisor	Rolyan M.F.A		10 OCT 2023
Approved by HOD:	Maintenance Manager	Nurfais		20 OCT 2023
Approved by:				
Approved for:				

PAITON UNIT 7&8

Instrument ID SHF-PT-697
Description UNIT-8 BOILER PART SYSTEM
Calibrated 3/15/2022

Manufacturer Rosemount	Model Number
Location	Calibration Type
Building	Document ID
Department MAINTENANCE	Certificate #
Equipment ID 760P22	Temp Humidity

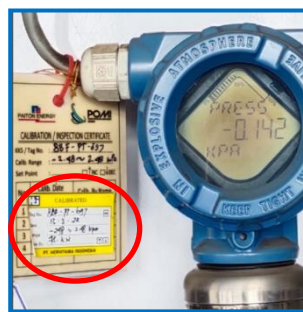
Calibration Specifications

Group # 1
Group Name
Stated Accuracy Pit of Range

Num In Val / In Val	Unit	In Type	Out Val	Out Type	End As	Lift As	Dev%	Pass/Fail
-2.48 / -2.48	kPa	4.000	mA	3.996	3.996	-0.10%	Pass	
-1.24 / -1.24	kPa	8.000	mA	7.996	7.996	-0.05%	Pass	
0.00 / 0.00	kPa	12.000	mA	11.993	11.993	-0.06%	Pass	
1.24 / 1.24	kPa	16.000	mA	15.993	15.993	-0.04%	Pass	
2.48 / 2.48	kPa	20.000	mA	19.990	19.990	-0.05%	Pass	
2.48 / 2.48	kPa	20.000	mA	19.990	19.990	-0.05%	Pass	
1.24 / 1.24	kPa	16.000	mA	15.987	15.987	-0.08%	Pass	
0.00 / 0.00	kPa	12.000	mA	11.993	11.993	-0.06%	Pass	
-1.24 / -1.24	kPa	8.000	mA	7.994	7.994	-0.08%	Pass	
-2.48 / -2.48	kPa	4.000	mA	3.996	3.996	-0.10%	Pass	

Prosedur instruksi pemeliharaan perangkat instrumentasi pressure transmitter kalibrasi

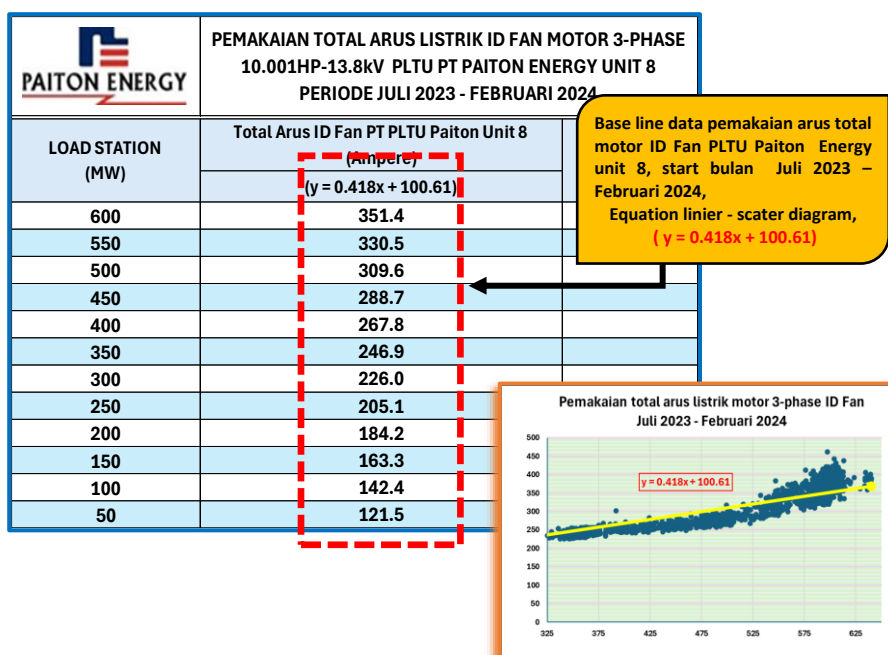
Instrumentasi kalibrasi report, terakhir dijalankan bulan Maret 2022



pembakaran boiler dapat mengubah struktur *fauling* atau *slaging* menjadi padatan yang mudah dihancurkan, namun kondisi ini dapat menyebabkan sedimentasi pada dinding *furnace boiler*, termasuk pada jalur pipa menuju *pressure transmitter furnace*. Hal ini dapat menghambat proses *sensing impuls furnace* dan mempengaruhi kinerja ID Fan dalam mencapai *set point pressure furnace boiler* di -0,1 kPa. Ketika tekanan udara yang terbaca pada *furnace pressure transmitter* 8BF-PT-697 tidak akurat, ID Fan harus meningkatkan bukaan blade untuk menyesuaikan tekanan *furnace*, yang linier dengan peningkatan arus listrik yang diperlukan oleh motor induksi 3-phase ID Fan.

Dengan menerapkan metode pemeliharaan pada jalur impuls line atau pemipaan menuju *furnace boiler*, diharapkan dapat mengurangi pemakaian total arus listrik motor 3-phase ID Fan, yang pada gilirannya mengarah pada penghematan energi. Data pemakaian arus listrik motor induksi 3-phase ID Fan kapasitas 10.001 hp-13,8 kV di PLTU Paiton Energy unit 8, dari Januari 2024 hingga 10 Agustus 2024, digunakan sebagai *baseline* sebelum implementasi program inovasi. Data ini dipantau melalui pencapaian tekanan *furnace boiler* yang kurang mampu mencapai *set point pressure* di -0,1 kPa. Pengambilan data melibatkan total arus dari motor ID Fan unit 8 terhadap perubahan *unit generation* (MW), yang kemudian dianalisis pola linearitasnya menggunakan metode perhitungan persamaan *excel* pada *scatter diagram plot linier*.

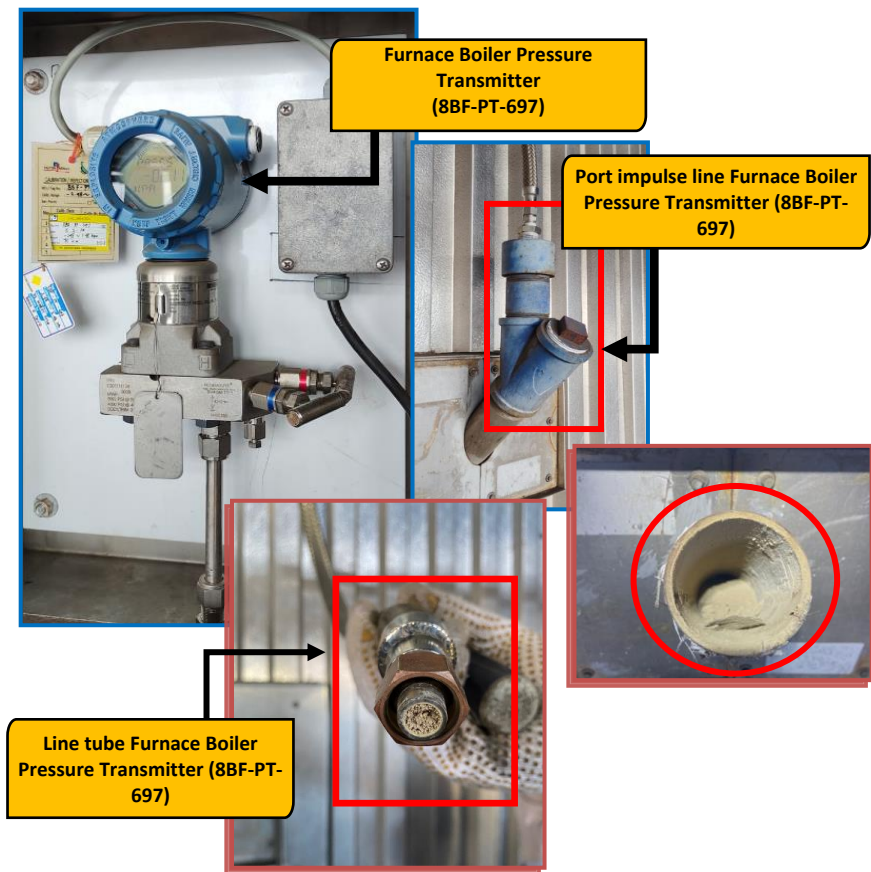
Tabel 1. Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sebelum Program Inovasi



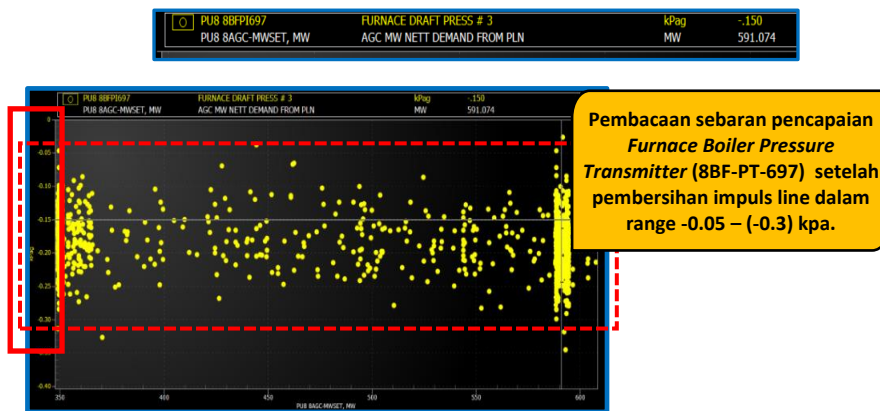
Perubahan yang Dilakukan dari Sistem yang Lama

Furnace pressure transmitter 8BF-PT-697, yang berfungsi untuk mengukur tekanan dalam boiler, menjalani pemeliharaan rutin berupa kalibrasi ulang secara berkala untuk memastikan bahwa toleransi error pada pembacaan linieritas tidak lebih dari 0,25%, sesuai dengan prosedur PLTU PT Paiton Energy PI-10-01-105. Namun, hal ini tidak menjamin bahwa pembacaan yang tercatat akan selalu mencerminkan kondisi aktual dalam furnace boiler, terutama jika jalur sensing impuls tidak dijaga kebersihannya. Kondisi tersebut dapat menyebabkan pembacaan tekanan udara yang tidak valid, yang pada gilirannya membuat motor ID Fan bekerja lebih keras untuk mengejar set point furnace boiler di -0,1 kPa dengan membuka *blade damper*, yang otomatis meningkatkan konsumsi arus listrik. Oleh karena itu, diperlukan program baru untuk meningkatkan metode pemeliharaan perangkat instrumentasi pada *pressure transmitter furnace boiler*, dengan menambahkan pembersihan jalur impuls sensing

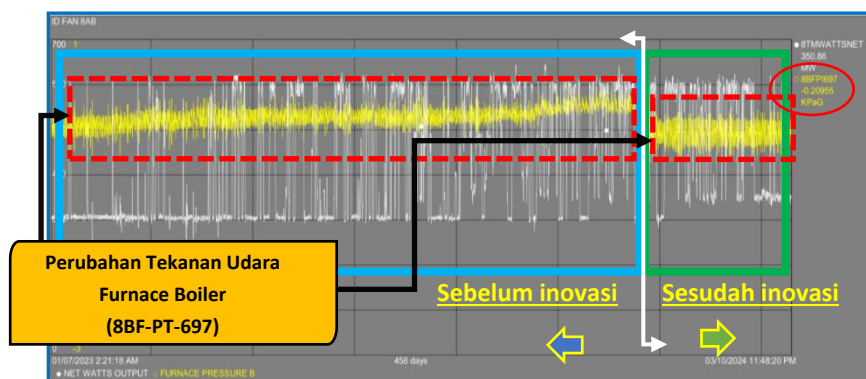
secara berkala saat unit dalam kondisi online, agar memperoleh data yang lebih akurat dari proses pengoperasian ID Fan. Sebelumnya, pemeliharaan hanya fokus pada kalibrasi rutin perangkat instrumentasi di bagian transmitter. Pembersihan jalur impuls sensing di unit online memiliki risiko tinggi, karena jika urutan kegiatan tidak dilakukan dengan benar, bisa menyebabkan unit trip. Program pemeliharaan untuk pembersihan jalur *impuls sensing* pada *furnace pressure transmitter* 8BF-PT-697 dilaksanakan pada boiler unit 8 pada Februari 2024, dan data monitoring mulai dijalankan dari Maret 2024 hingga September 2024.



Gambar 6. Furnace pressure transmitter 8BF-PT-697 dan line impuls sensing dalam kondisi plugging



Gambar 7. Pembacaan Furnace pressure transmitter 8BF-PT-697 setelah dilakukan pembersihan

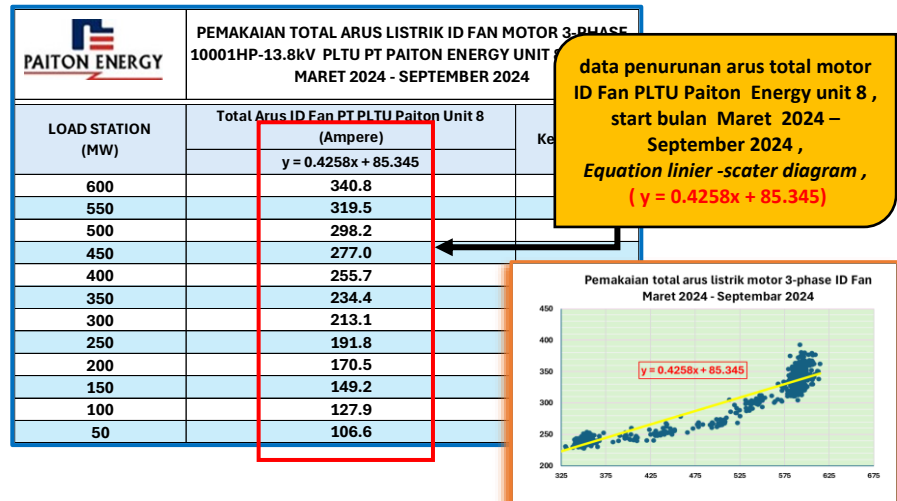


Gambar 8. Kondisi perubahan tekanan udara furnace boiler sebelum dan sesudah program inovasi dari data software PI-processBook

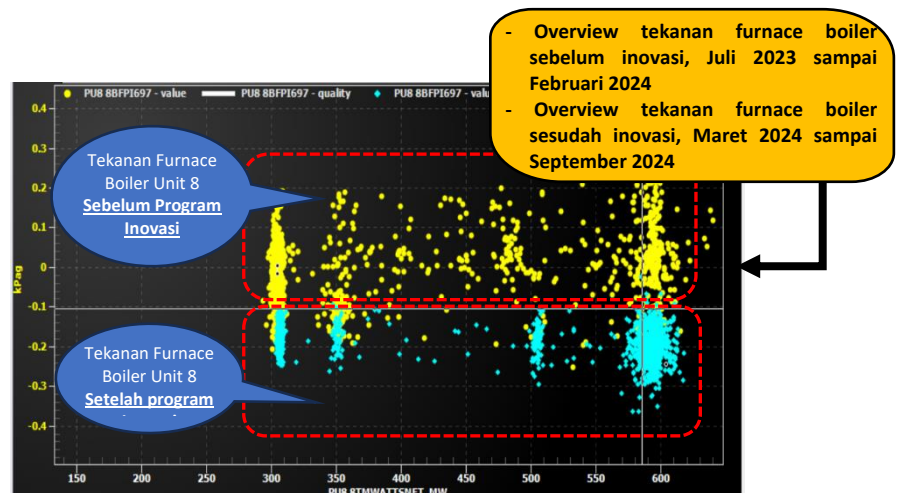
Data pengurangan konsumsi arus listrik pada motor induksi 3-phase ID Fan kapasitas 10.001 hp-13.8 kV PLTU Paiton Energy unit 8 selama periode Maret 2024 hingga September 2024 digunakan sebagai data pemantauan dan evaluasi setelah implementasi program inovasi. Pemantauan ini menunjukkan bahwa tekanan *furnace boiler* PLTU PT Paiton unit 8 dapat mencapai *set point pressure* di -0,1 kPa. Data yang dikumpulkan mencakup total arus yang digunakan oleh motor ID Fan unit 8 seiring dengan perubahan output unit pembangkit listrik (MW), yang kemudian dianalisis menggunakan *software* PI-processbook. Pola

linearitasnya dihitung dengan metode persamaan rumus pada diagram pencar (*scatter diagram*) dengan plot linier menggunakan Excel.

Tabel 2. Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sesudah Program Inovasi



Gambaran Skematis atau Visual Inovasi yang Dilakukan



Gambar 9. Total Pemakaian Arus listrik ID Fan PLTU sebelum Program Inovasi

Tabel 3. Total Pemakaian Arus listrik Motor ID Fan PLTU sebelum dan sesudah Program Inovasi

PERUBAHAN PENURUNAN PEMAKAIAN DARI TOTAL ARUS ID FAN MOTOR 3-PHASE 10001HP 13.8KV PLTU PAITON ENERGI UNIT 8 PERIODE SEBELUM INOVASI (JULI 2023 - FEBRUARI 2024) DENGAN SESUDAH INOVASI (MARET 2024-SEPTEMBER 2024)				
LOAD STATION (MW)	Total Arus ID Fan PT PLTU Paiton Unit 8 (Ampere)		Selisih Total Arus ID Fan PLTU Paiton Unit 8 (Amp)	Keterangan
	Juli 2023-Febuari 2024 (Sebelum Inovasi)	Maret 2024 - September 2024 (Setelah Inovasi)		
	$(y = 0.418x + 100.61)$	$y = 0.4258x + 85.345$		
600	351.4	340.8	10.6	
550	330.5	319.5	11.0	
500	309.6	298.2	11.4	
450	288.7	277.0	11.8	
400	267.8	255.7	12.1	
350	246.9	234.4	12.5	
300	226.0	213.1	12.9	
250	205.1	191.8	13.3	
200	184.2	170.5	13.7	
150	163.3	149.2	14.1	
100	142.4	127.9	14.5	
50	121.5	106.6	14.9	
Rata-rata kenaikan Arus listrik			12.7	

Nilai perubahan total arus ID Fan dari sebelum dan sesudah program inovasi di jalankan

Rata-rata perubahan penurunan total arus listrik sebagai nilai dasar perhitungan penghematan energi listrik

Kuantifikasi Informasi Penurunan Emisi yang Dilakukan Akibat Penambahan Komponen dan Menunjukkan Kuantifikasi Informasi Penurunan Biaya; Serta Dapat Menunjukkan Nilai Tambah

Program pengembangan metode pemeliharaan peralatan instrumentasi furnace pressure transmitter pada sisi impuls *line sensing furnace boiler* yang dilakukan saat PLTU PT Paiton Energy unit 8 masih dalam kondisi *online* bertujuan untuk menjaga kebersihan *impuls line sensing*. Program ini dapat mengoptimalkan konsumsi energi yang digunakan oleh motor ID Fan di PLTU Paiton unit 8, agar sesuai dengan target *set point furnace pressure boiler* yang sesungguhnya. Setelah dilakukan pengurangan arus listrik (*Ampere*) yang digunakan motor ID Fan, nilai tersebut dikonversikan menjadi konsumsi daya (kWh), yang kemudian menghasilkan total penghematan energi (Gj) dan penurunan emisi (ton). Perubahan ini menambahkan langkah pemeliharaan pada instrumen pressure transmitter yang sebelumnya hanya difokuskan pada kalibrasi rutin dan inspeksi tanpa melibatkan pembersihan impuls line sensing hingga ke *furnace boiler*. Akibatnya, perubahan aktual dalam proses *furnace boiler* unit 8 tidak dapat direspons dengan baik oleh *transmitter*, karena adanya hambatan pada line akibat ash combustion,

yang menyebabkan konsumsi arus listrik motor ID Fan menjadi tidak stabil dan lebih besar, terutama pada beban tinggi 600 MW. Kuantifikasi penghematan biaya dan penurunan emisi yang diperoleh dari program ini akan ditunjukkan oleh pengurangan konsumsi arus listrik pada motor ID Fan 3-phase di PLTU Paiton Energy unit 8:

Penurunan emisi dari perhitungan total efisiensi energi

Berdasarkan **rekomendasi kajian LCA**, diperlukan upaya untuk menurunkan emisi yang dihasilkan oleh proses pembangkitan listrik. Berikut adalah kuantifikasi informasi penurunan emisi dari perhitungan Penghematan energi (GJ) yang dikonversi dari besaran pemakaian daya energi listrik (KWh), yang diperoleh dari rata-rata total penurunan konsumsi arus listrik ID Fan Motor 3 phase berkapasitas 10001 Hp-13.8 kV.

Tabel 4. Total Penghematan perhitungan program energi

TOTAL PENGHEMATAN STATION 7&8			
Tahun	Penghematan (GJ)	Penghematan Batubara (ton)	Penghematan (Rp)
2023	-	-	-
2024 (Maret-September)	4,474.42	271.97	1,823,674,910.15

Tabel 5. Total penurunan emisi bahan pencemar udara konvensional dan gas rumah kaca

Parameter	Penurunan Beban Emisi 2024 (Maret - September)	Penghematan (Rp)
CO2 eq (ton)	1.143,08	34.292.418,63
SO2 (ton)	0,09	20.251.072,37
NOX (ton)	1,21	126.882.789,50
PM (ton)	0,05	58.109.542,38

Inovasi yang dilakukan PLTU PT Paiton Energy unit 8 melalui program Penurunan Arus Listrik Motor ID Fan 10001 HP 13.8 Kv, dengan meningkatkan metode pemeliharaan instrumentasi saat unit online untuk

Furnace Draft Pressure Transmitter di sisi impul line yang telah dilakukan memiliki nilai tambah berupa:

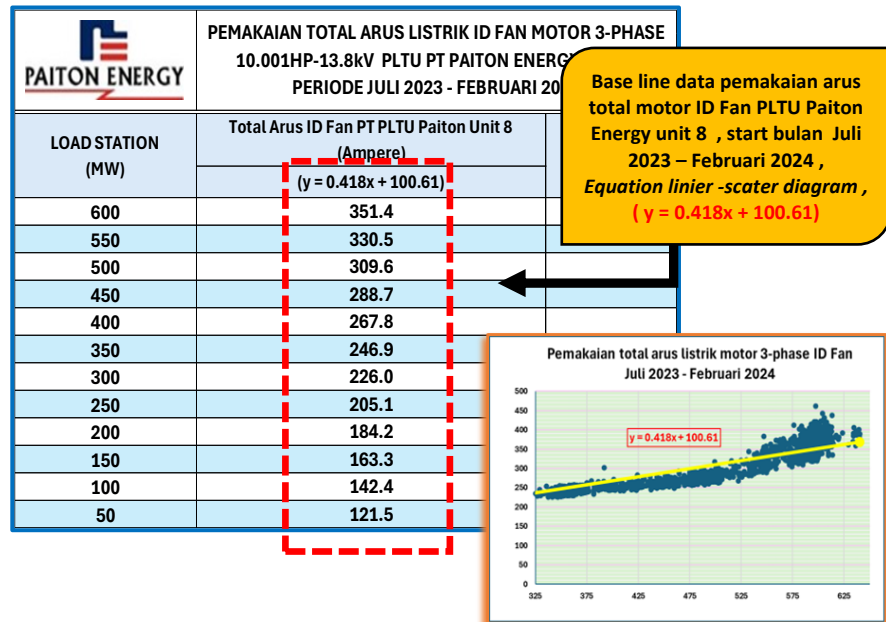
1. Perubahan Layanan Produk

Motor induksi 3-phase ID Fan berkapasitas 10.001 HP-13.8 kV yang dimiliki oleh PLTU PT Paiton Energy Unit 8 berfungsi untuk menjaga tekanan furnace boiler di set point -0.1 kPa. Untuk mencapai hal tersebut, keakuratan dan kecepatan *respons furnace pressure transmitter* (8BF-PT-697) dalam membaca tekanan boiler sangat penting, karena transmitter ini berperan sebagai umpan balik (*feedback*) untuk memastikan pencapaian set point sesuai dengan perubahan beban pembangkitan unit. Jika terdapat keterlambatan, kesalahan, atau respons yang kurang handal, hal ini dapat mengakibatkan ketidaksesuaian konsumsi arus listrik pada motor ID Fan, yang pada akhirnya menyebabkan kehilangan energi (*energy loss*).

Dengan menambahkan program pemeliharaan pada perangkat instrumentasi, yang sebelumnya hanya melibatkan kalibrasi rutin pada pressure transmitter furnace, kini metode pemeliharaan diperluas mencakup pembersihan jalur impuls (*impulse line*) atau jalur pemipaan pada *furnace pressure transmitter*. Proses pemeliharaan tambahan ini dilakukan saat unit pembangkit dalam kondisi *online*, sehingga terjadi perubahan layanan pemeliharaan perangkat. Hasilnya, konsumsi arus listrik pada motor induksi 3-phase ID Fan berkapasitas 10.001 HP-13.8 kV mengalami penurunan rata-rata sebesar 12.7 Ampere, atau setara dengan penghematan daya sekitar 243.132,82 Watt pada setiap perubahan beban pembangkitan (MWatt).

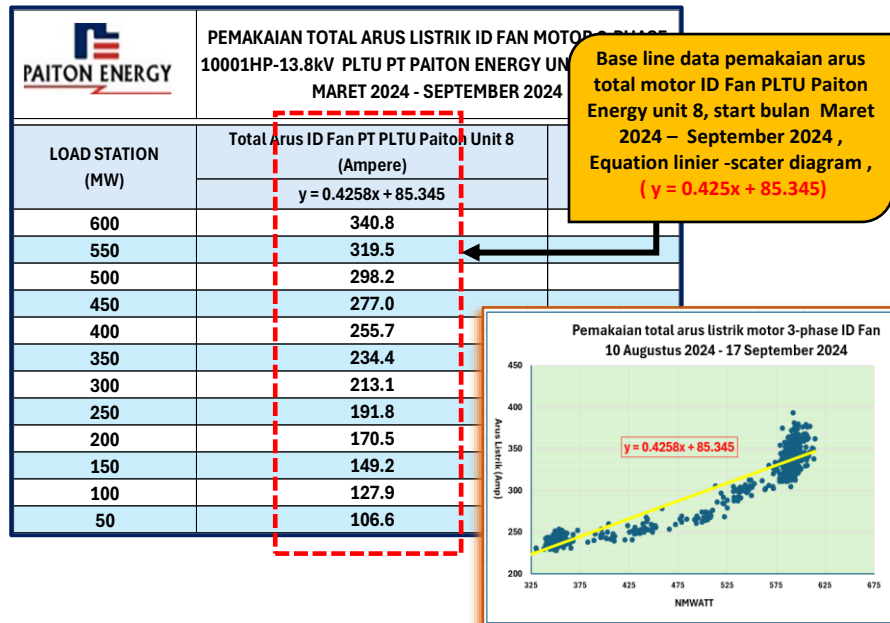
Data pengurangan konsumsi arus listrik dari inovasi ini diambil dari total arus motor induksi 3-phase ID Fan (dalam Ampere) terhadap perubahan *unit generation* (MW). Sebagai *baseline*, digunakan data operasional dari Juli 2023 hingga Februari 2024, yang kemudian dianalisis menggunakan metode scatter plot linier dengan persamaan *excel equation*.

Tabel 6. Kondisi pemakaian arus Listrik motor induksi ID Fan sebelum dilakukan program



Data penurunan arus Listrik dari pengoperasian Motor 3-phase ID Fan setelah implementasi program, diambil dari data tanggal 17 Agustus – 17 september 2024, yang dikonversi menggunakan *equation* dari *excel Scatter plot Linier*.

Tabel 7. Kondisi pemakaian arus Listrik motor induksi ID Fan setelah dilakukan program



Penurunan konsumsi arus listrik pada motor ID Fan 3-phase berkapasitas 10.001 HP-13.8 kV di PLTU Paiton Energy Unit 8 dalam mencapai set point tekanan furnace boiler sebesar -0.1 kPa, dicapai melalui implementasi metode pemeliharaan tambahan pada perangkat instrumentasi. Metode ini melibatkan pembersihan jalur impuls (impulse line) atau jalur pemipaan pada furnace pressure transmitter yang dilakukan saat unit dalam kondisi online. Hasilnya, rata-rata penurunan arus listrik sebesar 12.7 Ampere tercatat pada setiap perubahan beban pembangkitan (generation load) di unit tersebut. Setelah dikonversi ke konsumsi daya selama periode Maret 2024 hingga September 2024, penghematan energi yang dihasilkan mencapai 1.242.894,96 kWh.

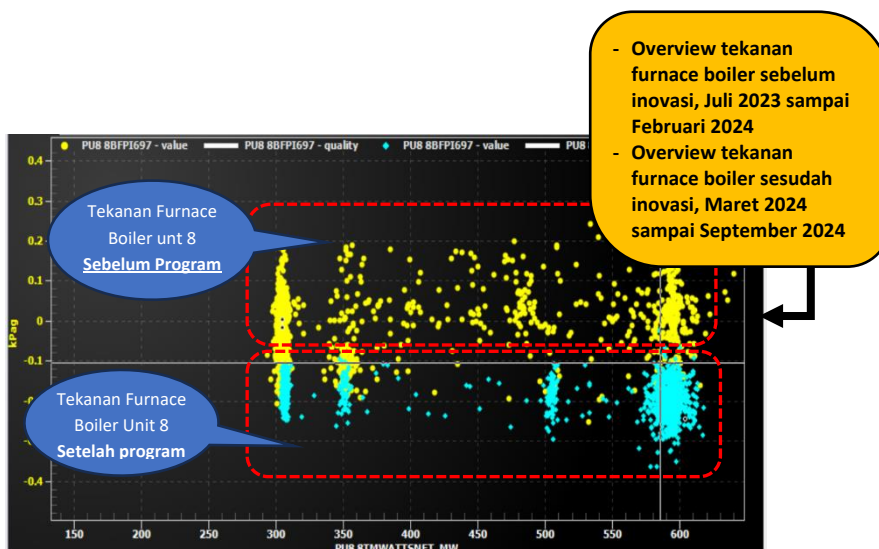
Tabel 8. Kondisi penurunan dan rata-rata total arus Listrik motor induksi ID Fan

 PERUBAHAN PENURUNAN PEMAKAIAN DARI TOTAL ARUS ID FAN MOTOR 3-PHASE 10001HP-13.8KV PLTU PAITON ENERGI UNIT 8 PERIODE SEBELUM INOVASI(JULI 2023 - FEBRUARI 2024) DENGAN SESUDAH INOVASI (MARET 2024-SEPTEMBER 2024)				
LOAD STATION (MW)	Total Arus ID Fan PT PLTU Paiton Unit 8 (Ampere)		Selisih Total Arus ID Fan PLTU Paiton Unit 8 (Amp)	Keterangan
	Juli 2023-Februari 2024 (Sebelum Inovasi)	Maret 2024 - September 2024 (Setelah Inovasi)		
	$(y = 0.418x + 100.61)$	$y = 0.4258x + 85.345$		
600	351.4	340.8	10.6	Rata-rata penurunan total arus listrik (ampere) ID Fan motor unit 8 dari kondisi sebelum dan sesudah program inovasi dijalankan.
550	330.5	319.5	11.0	
500	309.6	298.2	11.4	
450	288.7	277.0	11.8	
400	267.8	255.7	12.1	
350	246.9	234.4	12.5	
300	226.0	213.1	12.9	
250	205.1	191.8	13.3	
200	184.2	170.5	13.7	
150	163.3	149.2	14.1	
100	142.4	127.9	14.5	
50	121.5	106.6	14.9	
Rata-rata kenaikan Arus listrik			12.7	

Penurunan konsumsi arus listrik pada motor 3-phase ID Fan sejalan dengan pencapaian tekanan *furnace boiler* yang berada dalam rentang *set point* -0.1 kPa. Data monitoring tekanan *furnace boiler* PLTU PT Paiton Energy Unit 8, baik sebelum maupun setelah implementasi program inovasi, diperoleh melalui *software* PI-Processbook dan EtaPRO - Asset Performance and Condition Monitoring. Dalam proses ini, pembacaan tekanan dari *furnace pressure transmitter* (8BF-PT-697) dibandingkan dengan perubahan beban pembangkitan (*unit generation*) dalam satuan MW.



Gambar 10. Kondisi perubahan tekanan udara *furnace boiler* sebelum dan sesudah program inovasi dari data software PI.



Gambar 11. Kondisi perubahan *furnace pressure boiler* sebelum dan sesudah program inovasi dari data software **etaPRO**

2. Perubahan Perilaku

PLTU PT Paiton Energy Unit 7 dan 8 berupaya mengurangi pemakaian *house load* melalui optimasi penggunaan energi peralatan listrik, baik dengan meningkatkan metode pemeliharaan aset maupun

mengatur proses pengoperasian unit. Salah satu langkah optimasi dilakukan pada motor ID Fan 3-phase di Unit 8 yang memiliki kapasitas 10.001 HP-13,8 kV, dengan fokus pada perubahan proses tekanan udara di furnace boiler. Upaya ini bertujuan menurunkan konsumsi arus listrik, mengingat pada periode Juli 2023 hingga Februari 2024, motor ID Fan di Unit 8 bekerja di luar *set point* tekanan -0,1 kPa. Hal ini terjadi akibat ketidakakuratan pembacaan *furnace pressure transmitter* (8BF-PT-697), yang lambat dalam merespons perubahan proses, sehingga menyebabkan konsumsi arus listrik yang tinggi.

Program baru yang diperkenalkan adalah metode pemeliharaan yang ditingkatkan, mencakup pembersihan jalur impuls (*impulse line*) atau jalur pemipaan *pressure transmitter furnace boiler* saat *unit online*. Sebelumnya, pemeliharaan hanya terbatas pada kalibrasi rutin peralatan *pressure transmitter*. Dengan menambahkan pembersihan rutin pada jalur impuls, proses sensing menjadi lebih andal, sehingga pembacaan tekanan *furnace boiler* lebih cepat dan akurat sebagai umpan balik operasional untuk mencapai *set point* ID Fan demand di -0,1 kPa.

Ketepatan dan kecepatan pembacaan *feedback* tekanan *furnace boiler* meningkatkan efisiensi penggunaan energi oleh ID Fan, yang berdampak pada penurunan konsumsi arus listrik. Selain menghasilkan penghematan energi yang dapat dikonversi ke penurunan emisi (ton) dan penghematan biaya (Rp), program ini juga memberikan keuntungan tambahan berupa peningkatan umur motor 3-phase akibat beban energi yang lebih rendah.

Penurunan Konsumsi Arus Listrik Motor dari Program Metode Pemeliharaan Instrumentasi Furnace Draft Pressure Transmitter Dalam Mencapai Tujuan Keberlanjutan

Motor listrik memainkan peran penting dalam aplikasi industri, yang mencakup sebagian besar konsumsi daya. Hal ini dapat dideskripsikan sebagai perubahan konsumsi energi listrik oleh konsumen pengguna akhir, di mana konsumen berkomitmen untuk mengubah pola konsumsi mereka yang biasa untuk mengoptimalkan penggunaan energi. Statistik menunjukkan bahwa motor listrik secara umum bertanggung

jawab atas sekitar dua pertiga konsumsi daya industri di setiap negara, yang mewakili sekitar 40% dari keseluruhan penggunaan daya (Rahman, 2010). Tingginya permintaan motor listrik mengharuskan pengembangan alat ukur yang tepat untuk memantau dan menganalisis kinerjanya. Penganalisis daya frekuensi tinggi yang presisi merupakan instrumen penting untuk mengukur daya mekanik dan listrik, yang memberikan wawasan tentang seberapa efisien motor beroperasi dan di mana penghematan energi dapat diwujudkan (Bill, 2014).

Pemancar tekanan draft tungku merupakan komponen penting dalam mengelola operasi tungku industri, yang berdampak signifikan pada konsumsi energi. DR800, misalnya, merupakan contoh solusi canggih yang dirancang untuk pengukuran draft tungku industri, yang menampilkan kemampuan yang menjadikannya pilihan terbaik untuk aplikasi ini. Mengukur tekanan draft tungku secara akurat merupakan salah satu aspek yang paling menantang dalam pengukuran proses, karena tekanan ini secara langsung memengaruhi campuran udara-bahan bakar dan efisiensi pembakaran secara keseluruhan. Dengan memanfaatkan pemancar ini, industri dapat secara tepat mengendalikan dan mempertahankan kondisi suhu dan tekanan di dalam tungku, yang mengarah pada peningkatan efisiensi operasional dan pengurangan konsumsi energi. Lebih jauh lagi, sistem ini menggunakan teknologi listrik canggih yang meningkatkan akurasi dan keandalan pengukuran.

Untuk secara efektif mengurangi konsumsi arus, berbagai metode instrumentasi digunakan dalam pengaturan industri. Tantangan yang terkait dengan manajemen daya sangat signifikan, sebagaimana diuraikan dalam panduan elektronik komprehensif yang menjelaskan 11 masalah utama yang dihadapi saat merancang, memvalidasi, atau menguji perangkat IoT. Selain itu, survei terperinci tentang perangkat pengukuran daya dan energi menyoroti kemajuan yang telah dibuat selama beberapa dekade di bidang ini, yang memperlihatkan bagaimana kemajuan teknologi berkontribusi pada pengurangan konsumsi (Aniket *et al.*, 2021). Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa mengidentifikasi dan mengoreksi inefisiensi operasional dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan, dengan pengurangan

penggunaan energi bangunan berkisar antara 5% hingga 20% atau lebih (Naoya *et al.*, 2003). Pendekatan proaktif terhadap manajemen energi ini penting untuk mencapai tujuan keberlanjutan dan meminimalkan dampak lingkungan. Integrasi teknologi memainkan peran penting dalam mengurangi konsumsi saat ini, khususnya melalui otomatisasi dan kontrol presisi. Peningkatan efisiensi energi tercapai karena teknologi ini memaksimalkan penggunaan energi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Nurul, 2024). Analisis data waktu nyata memberdayakan konsumen untuk mengadopsi praktik hemat energi, yang mengarah pada pengurangan tagihan energi dan jejak karbon yang lebih rendah. Lebih jauh lagi, solusi perangkat lunak hemat energi berperan penting dalam mengurangi dampak teknologi terhadap lingkungan. Solusi ini tidak hanya memfasilitasi penghematan biaya bagi individu dan organisasi, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan pola konsumsi energi secara keseluruhan (Rui, 2023).

Hubungan antara keberlanjutan lingkungan dan pengurangan konsumsi saat ini semakin diakui dalam konteks operasi industri. Sebuah studi yang meneliti dampak konsumsi energi terbarukan dan tak terbarukan terhadap keberlanjutan lingkungan mengungkapkan wawasan penting tentang praktik berkelanjutan (Elvis *et al.*, 2022). Tujuan 12 dari Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa menekankan pentingnya memastikan pola konsumsi dan produksi berkelanjutan, yang sangat penting untuk mempertahankan mata pencaharian generasi sekarang dan mendatang. Kepatuhan terhadap peraturan lingkungan memastikan bahwa operasi manufaktur tidak merusak lingkungan, mengurangi risiko hukum, dan menumbuhkan budaya keberlanjutan dalam industri (Andrew, 2024). Pengurangan konsumsi arus listrik motor tidak hanya mengatasi masalah lingkungan tetapi juga mengatasi berbagai tantangan sosial. Karena lembaga dan organisasi berusaha untuk mempromosikan praktik berkelanjutan, mereka semakin bergantung pada wawasan dari upaya kolaboratif, seperti yang terinspirasi oleh intervensi Dewan. Inisiatif ini telah secara signifikan memengaruhi penelitian kebijakan Perserikatan Bangsa-Bangsa, mendorong pengembangan kerangka kerja baru yang bertujuan untuk

mencapai keberlanjutan. Dalam beberapa tahun terakhir, telah ada pengakuan yang berkembang bahwa model ekonomi tradisional harus beradaptasi untuk secara efektif mengatasi perubahan iklim dan dampak terkaitnya (Patrik, 2020). Dengan merangkul pendekatan inovatif dan melibatkan masyarakat lokal, organisasi dapat mengatasi tantangan lingkungan sambil menumbuhkan budaya hidup berkelanjutan. Kolaborasi ini tidak hanya meningkatkan ketahanan masyarakat tetapi juga memberdayakan individu untuk terlibat dalam praktik yang berkontribusi pada tujuan keberlanjutan yang lebih luas (Anna, 2023).

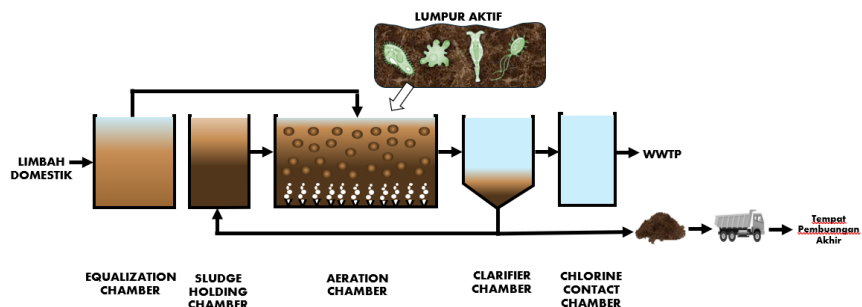
Ke depannya, tren masa depan dalam mengurangi konsumsi arus listrik motor diharapkan didorong oleh kemajuan teknologi yang signifikan. Transisi yang sedang berlangsung menuju efisiensi, perampingan, dan keberlanjutan dalam teknologi motor sedang membentuk kembali lanskap industri. Inovasi seperti motor hemat energi, sistem kontrol canggih, dan desain ramah lingkungan membuka jalan bagi era baru teknologi motor listrik yang memprioritaskan pengurangan konsumsi energi dan dampak lingkungan (Akash, 2024). Selain itu, keterlibatan pemangku kepentingan menjadi semakin penting di sektor energi, karena memastikan keberhasilan perencanaan, pelaksanaan, dan pengoperasian proyek yang bertujuan untuk mengurangi konsumsi arus listrik (Michael *et al.*, 2024). Dengan merangkul tren ini, industri tidak hanya dapat mencapai tujuan keberlanjutan mereka tetapi juga menetapkan preseden untuk penggunaan energi yang bertanggung jawab yang bergema di seluruh pasar global.

BAGIAN 5

TEKNOLOGI *MOVING BED BIOFILM REACTOR* (MBBR) DAN REMOVAL *TOTAL SUSPENDED SOLID* (TSS) PADA *SEWAGE WATER TREATMENT PLANT* (SWTP) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)

M. Yusuf, Totok Widiyanto, Najmi Umaroh, Firmandhana Khrisna,
Dimas Sistian A, Donny Effendi
Editor: Totok Widiyanto

Sejak tahun 1997, pengelolaan air limbah domestik di PT Paiton Energy dilakukan menggunakan sistem *Sewage Water Treatment Plant* (SWTP) yang memanfaatkan teknologi lumpur aktif. Proses pengolahan limbah domestik dengan metode ini secara prinsip menghasilkan lumpur (*sludge*), yang menjadi penyebab utama peningkatan kadar *Total Suspended Solid* (TSS) (Gambar 1). TSS ini berasal dari pembentukan lumpur aktif baru serta lumpur aktif yang sudah ada sebelumnya (*eksisting*) di *Aeration Chamber*.



Gambar 1. Skematik Flow Diagram SWTP dengan teknologi lumpur aktif

Seiring waktu, efisiensi teknologi lumpur aktif mengalami penurunan akibat penambahan unit pembangkit baru, yaitu Unit 3 pada tahun 2011, yang menyebabkan peningkatan debit limbah domestik. Hal ini mengakibatkan pengolahan limbah dengan teknologi lumpur aktif menjadi kurang optimal. Tabel 1 menunjukkan potensi sumber TSS pada sistem SWTP dengan teknologi lumpur aktif.

Tabel 1. Potensi Sumber TSS pada SWTP Lumpur Aktif

SUMBER TSS	SWTP LUMPUR AKTIF
Terbentuk lumpur aktif baru	✓
Lumpur aktif <i>existing</i> di <i>Aeration Chamber</i>	✓

Tabel 2 menunjukkan kadar TSS SWTP pada tahun 2022 sebesar 14,39 mg/L atau 0,609 Ton. Kadar TSS dari keluaran proses SWTP tersebut cukup tinggi meskipun belum melewati ambang baku mutu pada Tabel 3.

Tabel 2. Kualitas keluaran SWTP lumpur aktif parameter TSS

Tahun	Jenis sistem pengolahan limbah SWTP	Total Outlet SWTP	Kadar Pencemar TSS	Beban Pencemar TSS
		m3/tahun	mg/l	ton
2022 (baseline)	Lumpur Aktif	42.344	14,39	0,609

Tabel 3. Baku mutu keluaran limbah domestik (Permen LHK Nomor. P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016)

Air Limbah Domestik

No	Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
1	pH	-	6-9
2	BOD	mg/L	30
3	COD	mg/L	100
4	TSS	mg/L	30
5	Minyak dan Lemak	mg/L	5
6	Amoniak	mg/L	10
7	Total Coliform	mg/L	3 000

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan program inovasi guna mengurangi beban pencemar TSS. Berdasarkan perkembangan teknologi saat ini, metode pengolahan air limbah domestik menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)* telah terbukti efektif dalam mereduksi kadar TSS.

Program inovasi ini sejalan dengan rekomendasi hasil perhitungan *Life Cycle Assessment (LCA)* tahun 2022 yang menyarankan langkah-langkah untuk menurunkan potensi dampak lingkungan, khususnya pada kategori dampak pencemaran. Rekomendasi tersebut mencakup pelaksanaan program dan inovasi yang secara spesifik bertujuan untuk mengurangi parameter TSS.

Inovasi Pengolahan Air Limbah Domestik dengan Teknologi *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)* untuk Optimalisasi Penurunan Parameter TSS

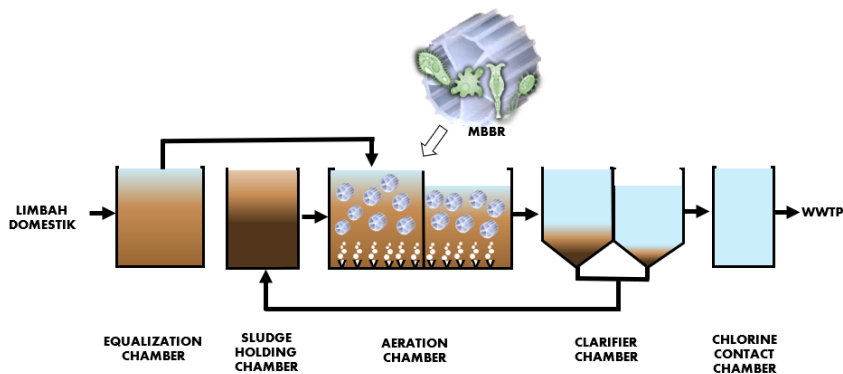
Sistem pengolahan air limbah SWTP dengan teknologi lumpur aktif dianggap kurang efektif dalam menurunkan parameter Total Suspended Solid (TSS). Kondisi ini berpotensi meningkatkan pencemaran air dan mengurangi tingkat kepatuhan perusahaan terhadap regulasi yang berlaku. Masalah tersebut menjadi dasar pengembangan program inovasi, yang kemudian diarahkan pada pencarian metode pengolahan limbah domestik yang lebih efisien, yaitu melalui penerapan teknologi *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)*.

Landasan pemikiran inovasi ini merujuk pada sejumlah referensi ilmiah, di antaranya:

Application of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) for Treatment of Industrial Wastewater: A mini Review, Journal of Physics: Conference Series, Hatem A Gzar, Wisam S. Al-Rekabi², Zahraa K. shuhaieb.

Moving bed biofilm reactor as an alternative wastewater treatment process for nutrient removal and recovery in the circular economy model, ELSEVIER, J.C. Leyva-Díaz a, A. Monteoliva-García b, J. Martín-Pascual b, M.M. Munio c, J.J. García-Mesa c, J.M. Poyatos

PT Paiton Energy mengimplementasikan teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) untuk meningkatkan efisiensi dalam menurunkan parameter TSS. Penerapan sistem SWTP baru ini telah terbukti efektif dalam mengurangi kadar TSS pada air limbah domestik. Gambar 2 menggambarkan proses pengolahan air limbah menggunakan teknologi MBBR pada SWTP yang dioperasikan.



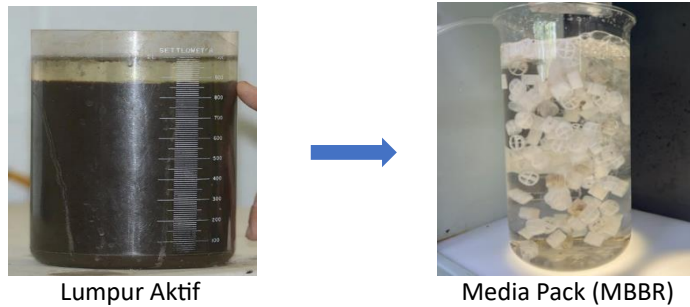
Gambar 2. Skematik Flow Diagram SWTP dengan teknologi MBBR

Tabel 4. Potensi Sumber TSS pada SWTP MBBR

SUMBER TSS	SWTP MBBR
Terbentuk lumpur aktif baru	x
Lumpur aktif <i>existing</i> di <i>Aeration Chamber</i>	x

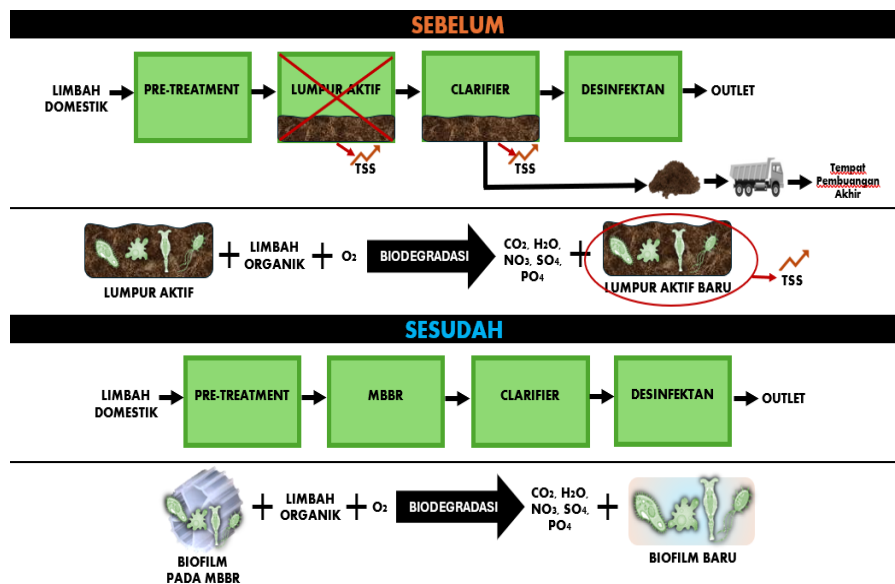
Perbandingan Sistem SWTP Teknologi Lumpur Aktif dan MBBR dalam Pengolahan Air Limbah Domestik

Perubahan yang diterapkan pada sistem sebelumnya melibatkan penggantian unit SWTP dengan teknologi yang lebih maju, yaitu Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Implementasi teknologi ini terbukti lebih efisien dalam mengolah limbah domestik, dengan hasil yang menunjukkan kadar TSS yang lebih rendah. Perbedaan antara sistem lama dan sistem baru dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 3.



Gambar 3. Visualisasi Lumpur Aktif dan Media Pack MBBR

Sebelum program inovasi diterapkan, operasi SWTP menggunakan teknologi lumpur aktif. Lumpur aktif menjadi penyebab utama tingginya kadar TSS pada hasil pengolahan limbah domestik di sistem SWTP. Prinsip kerja lumpur aktif secara terus-menerus menghasilkan massa biologis kompleks selama proses pengolahan limbah organik. Gambar 4 memperlihatkan perbedaan antara sistem SWTP dengan teknologi lumpur aktif dan MBBR.



Gambar 4. Perbedaan Sistem SWTP Teknologi Lumpur Aktif dan MBBR

Proses pengolahan air limbah domestik dengan teknologi MBBR menggunakan *media packing MBBR* sebagai tempat menempelnya bakteri dalam bentuk biofilm (Gambar 5). Teknologi MBBR dipilih karena tidak menghasilkan lumpur, berbeda dengan lumpur aktif yang membentuk lumpur aktif baru sebagai hasil sampingan dari reaksi biodegradasi limbah organik. Pembentukan lumpur aktif baru pada sistem SWTP lumpur aktif, yang ditambah dengan lumpur aktif yang ada di *Aeration Chamber* serta *transfer recycle* lumpur yang mengendap di *Clarifier Chamber*, akan meningkatkan kadar TSS pada air limbah yang diolah. Sebaliknya, pada sistem SWTP MBBR, proses biodegradasinya menghasilkan biofilm baru pada media packing yang menjadi inti dari biodegradasi limbah organik dengan menghasilkan sedikit lumpur.



Gambar 5. Simulasi Media Packing MBBR tersuspensi pada Aeration Chamber



Gambar 6. Media Packing MBBR

Packing MBBR yang digunakan dalam SWTP baru adalah tipe Kaldness dengan luas permukaan $\geq 750 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Gambar 6). Packing MBBR memiliki massa jenis yang setara dengan air, sehingga dapat tersuspensi dan tidak tenggelam dalam air (Gambar 5). Hal ini memungkinkan packing MBBR bergerak bebas dalam air limbah yang ter-aerasi, sehingga bakteri yang menempel pada permukaannya dapat bergerak secara dinamis, mempercepat kontak antara air limbah dan bakteri. Proses ini memungkinkan bakteri untuk mengakses seluruh area di dalam *Aeration*

Chamber, secara efektif mendegradasi pencemar dalam air limbah domestik. Efisiensi degradasi pencemar lebih tinggi karena dilakukan oleh bakteri yang menempel pada packing MBBR serta bakteri bebas yang ada dalam air limbah. Akibatnya, proses pengolahan air limbah menjadi lebih lama, namun menghasilkan lumpur yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan sistem pengolahan menggunakan teknologi lumpur aktif. Kualitas air pada outlet SWTP dengan teknologi lumpur aktif pada tahun 2022 dan teknologi MBBR pada tahun 2023 dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Pengolahan Air Limbah pada Sewage Water Treatment dengan Teknologi Lumpur Aktif

Month	Outlet SWTP					
	2022 (Baseline)		2023		2024	
	Debit (m3)	TSS (mg/L)	Debit (m3)	TSS (mg/L)	Debit (m3)	TSS (mg/L)
Januari	2.520	15,328	3.872	18,871	3.801	12,240
Februari	2.077	19,360	4.131	7,500	3.978	9,150
Maret	2.568	17,048	4.642	9,817	3.976	6,073
April	2.451	10,488	4.683	8,660	4.884	4,991
Mei	2.864	14,067	3.256	9,691	3.353	8,032
Juni	2.517	12,542	2.623	7,101	2.287	10,001
Juli	4.468	12,951	3.936	8,897		
Agustus	4.417	7,863	2.768	8,489		
September	4.516	22,047	3.992	9,999		
Oktober	4.296	12,503	2.816	19,521		
November	4.898	14,609	3.000	5,013		
Desember	4.753	13,820	3.195	10,864		
Total	42.344	172,628	42.913	124,422	22.279	50,487
Average	3.529	14,386	3.576	10,369	3.713	8,415

Tabel 6. Hasil Pengolahan Air Limbah pada Sewage Water Treatment dengan teknologi MBBR

Month	Outlet SWTP					
	2022 (Baseline)		2023		2024	
	Debit (m3)	TSS (mg/L)	Debit (m3)	TSS (mg/L)	Debit (m3)	TSS (mg/L)
Januari	2.520	15,328	3.872	18,871	3.801	12,240
Februari	2.077	19,360	4.131	7,500	3.978	9,150
Maret	2.568	17,048	4.642	9,817	3.976	6,073
April	2.451	10,488	4.683	8,660	4.884	4,991
Mei	2.864	14,067	3.256	9,691	3.353	8,032
Juni	2.517	12,542	2.623	7,101	2.287	10,001
Juli	4.468	12,951	3.936	8,897		
Agustus	4.417	7,863	2.768	8,489		
September	4.516	22,047	3.992	9,999		
Oktober	4.296	12,503	2.816	19,521		
November	4.898	14,609	3.000	5,013		
Desember	4.753	13,820	3.195	10,864		
Total	42.344	172,628	42.913	124,422	22.279	50,487
Average	3.529	14,386	3.576	10,369	3.713	8,415

Kuantifikasi Informasi Efisiensi Air Dan/Atau Penurunan Beban yang Dilakukan Akibat Perubahan Sub System dan Menunjukan Kuantifikasi Informasi Penurunan Biaya

Program inovasi yang berfokus pada Efektivitas Teknologi MBBR dalam Pengurangan TSS pada SWTP PLTU Paiton Unit 3, 7, & 8 merupakan perubahan tipe inovasi pada sub-sistem dan termasuk dalam kategori Optimisasi Rantai Nilai (*Value Chain Optimisation*). Inovasi tipe perubahan sub-sistem ini menekankan pada transformasi rantai proses dan perubahan sektor. Rantai proses pengolahan air limbah dengan SWTP baru (MBBR) berhasil memodifikasi dan memangkas rantai proses limbah domestik, sehingga mengurangi jumlah limbah domestik pada sektor limbah non-B3.

Program inovasi ini dimulai pada tahun 2023. Tabel 7 menyajikan kuantifikasi informasi terkait efisiensi pengurangan beban pencemar TSS dari program Efektivitas Teknologi MBBR dalam pengurangan TSS pada SWTP PLTU Paiton Unit 3, 7, & 8. Sementara itu, Tabel 5 menunjukkan penghematan biaya yang dihasilkan dari program inovasi efektivitas teknologi MBBR.

Tabel 7. Data Perbandingan Efisiensi SWTP antara teknologi lumpur aktif dengan teknologi MBRR

Tahun	Jenis sistem pengolahan limbah SWTP	Total Outlet SWTP	Kadar Pencemar TSS	Beban Pencemar TSS
		m3/tahun	mg/l	ton
2022 (baseline)	Lumpur Aktif	42.344	14,39	0,609
2023	MBBR	42.913	10,37	0,445
2024 *	MBBR	22.279	8,41	0,187

*) data 2024 sampai bulan juni

Kesimpulan yang didapatkan dari Program adalah penghematan biaya sebagai berikut:

Tabel 8. Penghematan Biaya dari Program Inovasi

Tahun	Penurunan Beban Pencemar TSS	Produksi Listrik	Normalitas	Biaya Penghematan
	Ton	GJ	Ton/GJ	Rp
2023	0,164	41.048.010	0,000000004	18.741
2024 *	0,117	19.942.863	0,000000006	13.366

Parameter	Desain Kadar	Desain Kadar	Biaya Investasi
PO4	20	10	4.565.438
TSS	500	100	114.136
Fe	10	3	6.522.055

*) data 2024 sampai bulan juni

Program Efektivitas Teknologi MBRR Terhadap Removal TSS Pada SWTP PLTU Paiton Unit 3, 7 & 8 telah berhasil menunjukkan adanya nilai tambah yang signifikan, yang dapat dilihat dari beberapa aspek, antara lain:

1. Perubahan Rantai Nilai

Penerapan teknologi MBRR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) dalam pengolahan air limbah domestik menggantikan teknologi lumpur aktif yang sebelumnya digunakan, membawa perubahan signifikan pada rantai

proses pengolahan air limbah, khususnya dalam hal optimisasi rantai nilai. Teknologi MBBR tidak menghasilkan sludge (lumpur) seperti pada teknologi lumpur aktif, yang selama ini berperan sebagai sumber utama peningkatan TSS. Dengan tidak adanya timbunan lumpur, proses pengangkutan dan penyimpanan sludge dapat dihindari, yang pada gilirannya mengurangi beban operasional dan meningkatkan efisiensi pengolahan.

2. Perubahan Layanan Produk

Dengan beralihnya teknologi pengolahan limbah domestik dari lumpur aktif ke MBBR, terjadi penurunan signifikan pada kadar TSS yang dihasilkan dalam setiap siklus pengolahan. Perubahan ini berdampak positif terhadap kualitas lingkungan sekitar dan penilaian kepatuhan perusahaan terhadap peraturan perundang-undangan. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan kualitas lingkungan, tetapi juga menunjukkan bahwa pengolahan limbah domestik kini lebih efisien dan efektif, serta memberikan layanan produk yang lebih baik dibandingkan sebelum teknologi MBBR diterapkan.

3. Perubahan Perilaku

Pada sistem SWTP lama yang menggunakan teknologi lumpur aktif, personil yang bertugas diwajibkan untuk melakukan pengurasan lumpur tua dan penambahan bakteri starter secara rutin minimal setahun sekali. Selain itu, perlu dilakukan pembersihan lumpur aktif yang terbawa ke Clarifier Chamber setiap bulan. Namun, dengan beralih ke teknologi MBBR, tidak lagi diperlukan kegiatan pengurasan lumpur, karena MBBR tidak menghasilkan lumpur. Perubahan teknologi ini juga memberikan dampak pada penurunan biaya operasional serta peningkatan keselamatan pekerja, karena kegiatan yang lebih sederhana dan lebih aman dilakukan dalam pengolahan limbah.

Teknologi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan *Removal Total Suspended Solid* (TSS) pada *Sewage Water Treatment Plant* (SWTP) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dalam Mencapai Tujuan Keberlanjutan

Teknologi MBBR menggunakan pembawa plastik yang direndam dalam lingkungan pengolahan air limbah, dengan biofilm yang berkembang di permukaannya untuk memfasilitasi penguraian limbah. Metode ini tidak hanya efektif untuk menghilangkan zat organik tetapi juga berfungsi sebagai pendekatan baru untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi, yang sangat penting untuk menghilangkan nitrogen dalam sistem pengolahan air limbah (Tom, 2019). Pentingnya biofilm bakteri dan zat polimer ekstraseluler dalam sistem MBBR telah terdokumentasi dengan baik, yang menggambarkan peran mereka dalam meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dengan mendorong pertumbuhan mikroorganisme yang memecah polutan (Alessandro *et al.*, 2019). Kombinasi proses biologis dan fisik ini memungkinkan MBBR untuk mencapai tingkat kemanjuran pengolahan yang tinggi, menjadikannya pilihan yang lebih disukai dalam aplikasi pengolahan limbah modern.

Penghapusan Total Suspended Solids (TSS) dalam sistem MBBR melibatkan pendekatan multifaset yang mengintegrasikan oksidasi, filtrasi fisik, koagulasi, flokulasi, dan pengolahan aerobik dan anaerobik. Proses-proses ini bekerja secara sinergis untuk secara signifikan mengurangi kadar TSS dalam air limbah (Tom, 2024). Penelitian menunjukkan bahwa teknologi MBBR mengungguli sistem Bioreaktor Membran (MBR) tradisional dalam hal efisiensi penghilangan polutan, menunjukkan tingkat penghilangan yang lebih tinggi untuk *Chemical Oxygen Demand* (COD), Ammonia Nitrogen (AN), dan TSS dibandingkan dengan sistem Lumpur Aktif Konvensional (CAS) (Duduku *et al.*, 2021). Secara khusus, MBBR mencapai tingkat penghilangan TSS hingga 80%, dibandingkan dengan hanya 69% dalam sistem CAS, yang menggarisbawahi kinerja yang unggul dalam mengolah air limbah.

Meskipun biaya desain dan konstruksi awal reaktor MBBR mungkin lebih tinggi daripada sistem tradisional, reaktor ini menawarkan keuntungan luar biasa dalam hal biaya operasi dan pemeliharaan. Sistem

MBBR dikenal karena efisiensinya, yang dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dari waktu ke waktu. Selain itu, sistem MBBR yang dirancang dengan baik dapat mengoptimalkan pemanfaatan ruang dalam fasilitas pengolahan, sehingga mengurangi keseluruhan tapak dan memastikan kemampuan pengolahan air yang efektif tanpa mengorbankan kinerja. Selain itu, teknologi MBBR memadukan aspek-aspek yang menguntungkan dari proses lumpur aktif dengan filter intermiten, yang secara efektif mengurangi kekurangan masing-masing dan meningkatkan keseluruhan proses pengolahan.

Penerapan teknologi MBBR yang berhasil di berbagai instalasi pengolahan limbah (IPAL) menyoroti keserbagunaan dan efektivitasnya. Misalnya, studi kasus telah menunjukkan bahwa sistem MBBR tidak hanya membutuhkan lebih sedikit ruang tetapi juga menggunakan lebih sedikit bahan kimia, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah. Sebuah studi kasus penting dari instalasi pengolahan air limbah besar di Mansoura mengungkapkan bahwa sistem Lumpur Aktif Terpadu (IFAS) mengungguli sistem konvensional dan MBBR dalam hal penghilangan BOD, COD, dan TSS, yang menunjukkan kemampuan adaptasi teknologi MBBR dalam konteks metodologi pengolahan yang lebih luas (Hamdy *et al.*, 2024). Lebih jauh, pembahasan seputar prinsip-prinsip dasar pengolahan MBBR, termasuk pengembangan dan pelepasan biofilm, menyoroti kelebihan dan keterbatasannya, yang memberikan wawasan berharga tentang aplikasi praktisnya (Christian *et al.*, 2009). Total Suspended Solids (TSS) merupakan masalah lingkungan yang signifikan, karena mencakup polutan padat di badan air yang dapat berdampak buruk pada ekosistem perairan. TSS yang berlebihan dapat mengurangi penetrasi cahaya ke dalam air, yang menyebabkan efek merugikan pada fotosintesis dan kehidupan perairan. Selain itu, pengolahan air limbah yang efektif, khususnya melalui penghilangan TSS, telah terbukti berkontribusi pada pencapaian berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), dengan fokus yang signifikan pada peningkatan kualitas dan ketersediaan air (Khaled *et al.*, 2022). Dampak lingkungan dari penghilangan TSS melampaui sekadar pengurangan polutan; tetapi juga memainkan peran

penting dalam menjaga habitat perairan yang sehat dengan mencegah mati lemasnya organisme bentik dan memastikan kadar oksigen yang cukup di badan air.

Implikasi sosial dari teknologi MBBR melampaui sekadar efisiensi teknis; teknologi ini mencakup kontribusi yang signifikan terhadap kesehatan publik dan kesejahteraan masyarakat, khususnya di negara-negara berkembang. Teknologi MBBR merupakan pendekatan transformatif untuk pengolahan air limbah industri, yang memungkinkan negara-negara ini untuk mengatasi tantangan kualitas air yang mendesak secara efektif (Hemen *et al.*, 2024). Dengan meningkatkan proses pengolahan air limbah, sistem MBBR berkontribusi untuk mencapai berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya yang menargetkan tujuan terkait air bersih dan sanitasi, yang secara langsung memengaruhi kualitas hidup masyarakat (Khaled *et al.*, 2022). Analisis menunjukkan bahwa pengolahan air limbah melalui MBBR dapat membantu memenuhi hingga 11 dari 17 SDGs, dengan penekanan utama pada potensinya untuk meningkatkan ketersediaan air dan memperbaiki kondisi sanitasi (Khaled *et al.*, 2022). Pergeseran ini tidak hanya menguntungkan ekosistem tetapi juga meningkatkan kesehatan masyarakat, mendorong pembangunan ekonomi, dan mendorong kesetaraan sosial dengan memastikan akses air bersih untuk semua.

Ke depannya, teknologi MBBR akan mengalami kemajuan yang signifikan, khususnya dalam meningkatkan efisiensinya dalam menangani beban organik dan nutrisi yang tinggi, serta kontaminan yang membandel. Karena peraturan lingkungan menjadi semakin ketat, kebutuhan akan solusi pengolahan air limbah yang inovatif akan meningkat. Sistem MBBR telah dikenal karena kinerjanya yang unggul dalam skenario seperti itu, yang menunjukkan peningkatan efisiensi pembuangan dibandingkan dengan metode tradisional (Gupta *et al.*, 2022). Penelitian yang sedang berlangsung difokuskan pada penyelidikan kinerja dan mekanisme yang mendasari sistem MBBR, dengan studi yang menunjukkan bahwa Moving Bed Membrane Biofilm Reactor (MBMBR) dapat mengungguli sistem Membrane Bioreactor (MBR) konvensional dalam pembuangan polutan (Duduku *et al.*, 2021). Inovasi dalam bahan

pembawa biofilm dan desain sistem juga diantisipasi, yang selanjutnya dapat mengoptimalkan proses pengolahan dan memperluas penerapan teknologi MBBR di berbagai sektor industri.

BAGIAN 6

PENGURANGAN LIMBAH SARUNG TANGAN TERKONTAMINASI MENGGUNAKAN *HYFLEX* *REUSEABLE HAND GLOVE*

Galih Nurchary Adhji, Dini Pertiwi, Fian Shalihin

Editor: Galih Nurchary Adhji

Operasional produksi listrik di PT Paiton Energy melibatkan penggunaan sarung tangan sekali pakai sebagai alat pelindung diri untuk mengurangi risiko kontak dengan bahan berbahaya dan beracun. Namun, penggunaan sarung tangan ini dinilai kurang efisien dalam beberapa aspek, salah satunya adalah tingginya frekuensi penggantian meskipun sarung tangan tersebut masih dalam kondisi layak pakai. Hal ini menyebabkan peningkatan jumlah limbah sarung tangan yang masuk dalam kategori majun terkontaminasi dengan kode limbah B110d, yang pada gilirannya turut meningkatkan biaya pengelolaan limbah.

Penggunaan sarung tangan sekali pakai sering kali tidak tepat guna karena sifatnya yang boros, yang dipengaruhi oleh kebiasaan berbeda dari setiap tenaga kerja. Selain itu, tingginya kebutuhan pengadaan sarung tangan sekali pakai berkontribusi terhadap peningkatan biaya operasional. Penggunaan sarung tangan sekali pakai yang berlebihan juga menyebabkan meningkatnya timbulan limbah B3 dengan kode limbah B110d, yang berdampak pada pengeluaran biaya pengelolaan limbah. Sarung tangan sekali pakai yang terbuat dari bahan katun dengan pvc dot juga cenderung licin pada bagian telapak tangan jika terkena bahan pelumas atau hidrokarbon, yang dapat membuat pengguna merasa tidak nyaman dan memicu penggantian sarung tangan lebih cepat. Faktor-faktor ini menunjukkan perlunya dilakukan perbaikan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sarung tangan sekaligus menekan biaya operasional yang ditimbulkan.

Inovasi dilakukan dengan mengganti penggunaan sarung tangan sekali pakai dengan sarung tangan yang dapat digunakan kembali (*reusable*) di departemen Maintenance, yang sering berinteraksi dengan bahan pelumasan dan hidrokarbon. Program inovasi pengurangan limbah terkontaminasi ini diterapkan dengan menyediakan sarung tangan merek “Hyflex”, yang memiliki berbagai keunggulan, seperti dapat digunakan berulang kali, mudah dicuci dengan air, dan memiliki usia pakai hingga satu bulan.



Gambar 1. *Hyflex Reusable Hand Glove.*

Dengan penerapan inovasi penggunaan sarung tangan *Hyflex reusable*, timbulan limbah terkontaminasi (B110d) dapat dikurangi, begitu pula dengan timbulan limbah B3 secara keseluruhan, berkat usia pakai yang lebih lama. Hal ini tidak hanya menurunkan biaya pengadaan sarung tangan, tetapi juga mengurangi biaya pengelolaan limbah B3, serta berkontribusi pada upaya perlindungan lingkungan secara lebih efisien.



Sebelum ada inovasi



Setelah ada inovasi

Program Inovasi Pengurangan Limbah B3 melalui Penggunaan *Hyflex Reuseable Hand Glove*: Pengaruh Terhadap Rantai Nilai, Layanan, dan Perilaku

Program inovasi pengurangan limbah terkontaminasi dengan menggunakan *Hyflex reusable hand glove* menghadirkan perubahan yang memberi nilai tambah melalui transformasi rantai nilai. Perubahan ini mencakup peningkatan dalam proses (*process improvement*), di mana penggantian sarung tangan sekali pakai yang sebelumnya menghasilkan volume limbah B3 tinggi, frekuensi penggantian sering, dan biaya pengelolaan limbah yang besar, kini digantikan dengan penggunaan *Hyflex reusable hand glove*. Hal ini mengarah pada pengurangan limbah yang dihasilkan dan meningkatkan usia pakai sarung tangan yang dapat digunakan kembali. Selain itu, penggunaan *Hyflex reusable hand glove* juga mengurangi frekuensi pengadaan sarung tangan untuk mendukung pekerjaan *maintenance* di lapangan. Berikut adalah kuantifikasi informasi mengenai pengurangan limbah B3 yang terjadi akibat perubahan komponen pada program pengurangan timbulan limbah sarung tangan sekali pakai dengan menggunakan *Hyflex reusable hand glove*:

Pengurangan *Absolut Hand Glove*

Diketahui:

- a. Jumlah timbunan sarung tangan bekas tahun 2023
= 1.024 kg
- b. Jumlah timbunan sarung tangan bekas tahun 2024 - Juni
= 19,75 kg

$$\begin{aligned}\text{Absolut pengurangan limbah sarung tangan bekas} &= \frac{a}{2} - b \\ &= \frac{1.024 \text{ Kg}}{2} - 19,75 \text{ Kg} \\ &= 492,25 \text{ kg} \\ &= 0,492 \text{ ton}\end{aligned}$$

Berdasarkan kuantifikasi informasi absolut pengurangan sarung tangan bekas dari program Pengurangan Timbunan Sarung Tangan Bekas Menggunakan Hyflex Reusable Hand Glove, diperoleh data terkait penurunan biaya (penghematan) dengan cara menghitung harga pembelian grease dan biaya pengolahan grease, dengan rincian perhitungan sebagai berikut:

Pengelolaan Limbah Hand Glove

Diketahui:

Harga pengelolaan 1 Kg = Rp5.600

Absolut Pengurangan limbah sarung tangan bekas (kg) x Harga pengelolaan

$$492,25 \text{ kg} \times \text{Rp}5.600 = \text{Rp}2.756.600$$

Penghematan Pengelolaan limbah = Rp2.756.600

- Penurunan penggunaan sarung tangan :

Tahun	Penggunaan Sarung tangan (Kg)	Absolut Pengurangan (Ton)	Intensitas Absolut	Total Penghematan (Rp)
2023 <i>baseline</i>	1.024			
2024-juni	19,75	0,49225	2,47 x10 ⁻⁸	Rp2.756.600

Program penggunaan *Hyflex reusable hand gloves* yang telah dilaksanakan menunjukkan beberapa nilai tambah, di antaranya:

- Perubahan Rantai Nilai (Proses Perbaikan)

Program pengurangan limbah terkontaminasi B3 dengan menggunakan *Hyflex reusable hand gloves* dimulai untuk menggantikan sarung tangan sekali pakai yang sebelumnya memiliki kualitas standar, mudah kotor, dan sering diganti. Hal ini berpengaruh pada peningkatan volume limbah terkontaminasi B3 (B110d) dan biaya pengelolaan limbah secara keseluruhan. Dengan adanya inovasi ini, masalah yang sebelumnya dialami oleh bagian *maintenance* sebagai pengguna dapat diselesaikan berkat keunggulan *Hyflex Reusable Hand Gloves*. Perubahan signifikan yang dirasakan oleh pengguna adalah kemudahan dalam bekerja dibandingkan sebelum program diterapkan. Oleh karena itu, program ini memberikan nilai tambah dalam hal peningkatan produktivitas kerja melalui perbaikan proses, yang juga berdampak pada penurunan volume limbah B3 yang dihasilkan, berupa sarung tangan sekali pakai yang terkontaminasi oli atau hidrokarbon, yang dapat dikategorikan sebagai limbah B110d.

- Perubahan Layanan

Inovasi penggunaan *Hyflex Reusable Hand Gloves* untuk menggantikan sarung tangan sekali pakai telah membawa perubahan dalam layanan perusahaan. Sebelum implementasi program ini, PT Paiton Energy hanya menyediakan sarung tangan sekali pakai dengan kualitas standar. Namun, setelah adanya program penggunaan *Hyflex Reusable Hand Gloves*, perusahaan menyediakan sarung tangan berkualitas lebih baik, yang dilengkapi

dengan pegangan tangan untuk kenyamanan penggunaannya. Selain itu, sarung tangan ini tidak menyerap hidrokarbon, sehingga lebih mudah dicuci dan memiliki usia pakai lebih lama. Hal ini secara tidak langsung berkontribusi dalam pengurangan volume limbah B3 (B110d).

- **Perubahan Perilaku**

Penggunaan *Hyflex reusable hand gloves* sebagai pengganti sarung tangan sekali pakai telah menunjukkan perubahan perilaku pengguna, terutama bagi karyawan di bagian *maintenance*. Perubahan ini tampak pada berkurangnya frekuensi penggantian sarung tangan, yang sebelumnya cepat kotor dan harus diganti, menjadi sarung tangan yang lebih tahan lama. Perubahan perilaku ini turut mengurangi timbulan limbah terkontaminasi B3 (B110d), yang pada akhirnya berpengaruh positif terhadap pengurangan biaya pengelolaan limbah B3 secara keseluruhan.

Pengurangan Limbah Sarung Tangan Terkontaminasi Menggunakan *Hyflex Reuseable Hand Glove* dalam Mencapai Tujuan Keberlanjutan.

Limbah sarung tangan yang terkontaminasi dapat menimbulkan dampak lingkungan yang besar jika dibuang sembarangan. Penelitian terbaru bertujuan untuk mengukur sejauh mana pembuangan sarung tangan yang tidak tepat dapat mencemari lingkungan. Pembuangan yang tidak tepat ini meliputi membuang sarung tangan ke aliran limbah biasa, sampah sembarangan, atau toilet, yang dapat mencemari air dan tanah. Sarung tangan sekali pakai umumnya terbuat dari bahan sintesis yang sulit terurai di tempat pembuangan sampah dan dapat melepaskan partikel mikro, logam berat, serta senyawa organik ke lingkungan. Pelepasan mikroplastik dari sarung tangan juga bisa diperburuk oleh abrasi pasir, yang meningkatkan pencemaran mikroplastik di laut dan sungai (Gutierrez *et al.*, 2019) (Zheng *et al.*, 2022). Untuk mengurangi dampak ini, disarankan untuk menggunakan teknik pelepasan yang tepat dan mencuci tangan setelah melepas sarung tangan guna meminimalkan risiko kontaminasi.

Sarung tangan HyFlex yang dapat digunakan kembali merupakan solusi yang praktis untuk mengatasi masalah limbah sarung tangan yang terkontaminasi. Sarung tangan HyFlex® 11-800 dari Ansell dirancang untuk memberikan kenyamanan dan kemampuan bernapas yang lebih baik, cocok untuk tugas ringan. Sementara itu, HyFlex® 11-840 adalah sarung tangan yang dapat digunakan kembali, terkenal karena daya tahannya yang tinggi dan cengkraman yang lebih baik. Sarung tangan ini bisa dicuci dan digunakan berulang kali, sehingga mengurangi limbah yang dihasilkan dibandingkan sarung tangan sekali pakai. Dengan meningkatnya kesadaran industri terhadap keberlanjutan, penggunaan sarung tangan HyFlex berpotensi mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan sarung tangan sekali pakai.

Manfaat lingkungan dari sarung tangan HyFlex sangat signifikan, salah satunya adalah pengurangan biaya pengelolaan limbah. Dengan masa pakai yang lebih lama, bisnis dapat mengurangi penggunaan tempat pembuangan sampah dan biaya terkait pengelolaan limbah (Victoria, 2024). Selain itu, proses produksi bahan yang lebih ramah lingkungan untuk sarung tangan HyFlex biasanya membutuhkan lebih sedikit energi dan menghasilkan lebih sedikit gas rumah kaca dibandingkan pembuatan sarung tangan sekali pakai. Sarung tangan yang dapat digunakan kembali ini mendukung perusahaan dalam mencapai tujuan keberlanjutan dan memberikan manfaat ekonomi. Organisasi yang beralih ke sarung tangan ini dapat mengurangi biaya pembelian sarung tangan sekali pakai, serta mengurangi biaya pengolahan dan pembuangan limbah, karena berkurangnya volume limbah yang perlu diproses (Willis, 2024). Pasar untuk Sarung Tangan Elektronik juga menunjukkan potensi pertumbuhan bagi teknologi sarung tangan yang dapat digunakan kembali, memperlihatkan pentingnya inovasi untuk mencapai tujuan ekonomi dan lingkungan.

Dampak sosial dari pengurangan limbah sarung tangan dengan menggunakan HyFlex sangat besar. Dengan mengurangi bahan berbasis minyak bumi dan bahan kimia berbahaya, sarung tangan yang ramah lingkungan dapat mengurangi pencemaran tanah dan air, yang membantu meningkatkan kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan.

Pengenalan sarung tangan berkelanjutan ini juga menyelaraskan kebutuhan keselamatan kesehatan dengan pengelolaan lingkungan, mendorong budaya keberlanjutan dalam organisasi. Untuk keberhasilan inisiatif daur ulang, penting untuk meningkatkan kesadaran masyarakat dan karyawan tentang pentingnya menggunakan sarung tangan yang dapat digunakan kembali dan daur ulang untuk mendukung keberlanjutan.

Meskipun banyak manfaat yang ditawarkan, adopsi sarung tangan HyFlex yang dapat digunakan kembali tetap menghadapi tantangan. Salah satunya adalah fungsionalitas sarung tangan tahan potong, yang bisa ditingkatkan dengan menambahkan bahan seperti spons nitril, PVC, neoprena, dan lateks karet alami. Peningkatan ini dapat meningkatkan daya tahan sarung tangan sekaligus menjaga keselamatan di lingkungan kerja. Kemajuan teknologi bahan juga penting untuk membuat sarung tangan yang tahan terhadap potongan, panas, dan bahan kimia. Selain itu, transisi dari sarung tangan sekali pakai ke yang dapat digunakan kembali memerlukan perubahan budaya dalam organisasi, di mana penting untuk mendidik pengguna tentang perawatan dan pemeliharaan sarung tangan HyFlex (Vanessa, 2021). Program pendidikan yang baik akan membantu mengatasi ketidaknyamanan yang terkait dengan penggunaan sarung tangan yang dapat digunakan kembali, dibandingkan dengan sarung tangan sekali pakai yang lebih praktis dibuang.

Studi kasus dan kisah sukses menunjukkan dampak positif penggunaan sarung tangan yang dapat digunakan kembali pada praktik keberlanjutan di berbagai industri. Salah satu contoh adalah peluncuran Teknologi INTERCEPT oleh Ansell, yang menawarkan sarung tangan dengan ketahanan potong dan cengkeraman lebih baik, yang memperlihatkan bagaimana inovasi dapat meningkatkan fungsionalitas dan keselamatan produk. Program kemitraan Pengelolaan Material Berkelanjutan antara 2018 hingga 2021 menunjukkan keberhasilan penerapan sarung tangan yang dapat digunakan kembali dalam mengurangi limbah. Salah satu studi kasus menunjukkan bahwa sebuah fasilitas mengurangi limbah medis sebesar 30% dalam setahun setelah mengadopsi sarung tangan HyFlex, serta menurunkan total produksi

limbah mereka. Hal ini menggarisbawahi keuntungan praktis dari penggunaan sarung tangan yang dapat digunakan kembali dan dampaknya terhadap tujuan keberlanjutan.

BAGIAN 7

INOVASI SOSIAL DAN PEMBERDAYAAN MASYARAKAT MELALUI *WATER INTEGRATED SUSTAINABILITY* *PROGRAMME FOR LIVELIHOOD (WIS POL)* DALAM MENANGGULANGI TANTANGAN LINGKUNGAN DAN SOSIAL DI ERA PANDEMI

Nina Ari W

Editor: Nina Ari W

Pandemi Covid-19 telah mendorong sektor bisnis untuk melakukan serangkaian perubahan dalam pendekatan dan strategi pelaksanaan tanggung jawab sosial lingkungan. Hal ini karena bisnis tidak hanya dihadapkan pada tantangan untuk beradaptasi dengan perubahan eksternal yang disebabkan oleh penyebaran virus, tetapi juga perlu mempertimbangkan perubahan mendasar tersebut sebagai dasar dalam pengembangan masyarakat di sekitar wilayah operasionalnya. Perubahan ini kemudian mendorong penyesuaian dalam berbagai kriteria penyelenggaraan *Corporate Social Responsibility* (CSR) di masa pandemi. Misalnya, dalam program PROPER, ketahanan bencana berbasis masyarakat menjadi faktor penting yang mempengaruhi efektivitas CSR. Pada akhir tahun 2020, sejumlah perusahaan mendapatkan penilaian dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), yang menunjukkan kemampuan mereka dalam menerapkan strategi adaptasi.

Pelajaran berharga dari tahun 2020 harus diinstitusionalisasikan oleh semua pemangku kepentingan, khususnya sektor bisnis vital negara. Kemampuan untuk membangun ketahanan pasca-Covid-19 harus dijadikan dasar agar praktik baik ini dapat terus berlanjut dalam jangka panjang. Hal ini menjadi penting mengingat tantangan dan dinamika eksternal, termasuk kompleksitas bisnis sektor migas hulu, yang diperkirakan akan semakin berat dan lebih menantang. Pada titik ini,

aspek prediktif perlu diperhitungkan dengan matang, karena tantangan yang akan dihadapi dalam menciptakan ekosistem bisnis yang resilient masih akan dipengaruhi oleh berbagai isu lain yang signifikan, seperti perubahan iklim dan upaya percepatan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs). Untuk merespons tantangan tersebut, bisnis perlu mempersiapkan sistem yang solid, terutama dalam menghadapi isu sosial, politik, ekonomi, dan lingkungan di masa depan.

Dengan pemikiran ini, PT Paiton Energy menyadari bahwa perusahaan tidak boleh terjebak dalam posisi trade-off saat menciptakan dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan. Artinya, ketiga pilar keberlanjutan tersebut harus dapat terintegrasi dalam praktik CSR yang berdampak luas dan memiliki dasar yang kuat. Masalah sosial ekonomi harus diperlakukan sama pentingnya dengan isu keberlanjutan bisnis, termasuk aspek keamanan bisnis. Inovasi yang telah dilakukan diharapkan dapat mempercepat terbentuknya sistem yang responsif terhadap berbagai dinamika tersebut, terutama dalam pengelolaan isu-isu sosial melalui praktik pemberdayaan masyarakat. Inovasi sosial yang diimplementasikan di salah satu wilayah sekitar operasi Paiton Energy menghasilkan solusi yang unik, berbeda dari wilayah lainnya. Mengingat pentingnya keterlibatan masyarakat dalam pelaksanaan inovasi sosial, perusahaan berupaya untuk menginstitusionalisasikan inovasi berbasis komunitas ke dalam kerangka yang berkelanjutan. Dengan demikian, keberlanjutan sosial, ekonomi, dan lingkungan menjadi landasan utama dalam menghasilkan hasil jangka panjang.

Inovasi Sosial

Inovasi dapat dipahami secara sederhana sebagai upaya untuk memperkenalkan sesuatu yang baru ke dalam masyarakat. Karena sifatnya yang baru, pendivusian inovasi perlu dilakukan dengan cermat. Everett M. Rogers adalah tokoh pertama yang mengembangkan pemahaman tentang proses difusi inovasi. Dalam penelitiannya, Rogers mempelajari bagaimana inovasi disebarkan melalui saluran-saluran tertentu dalam suatu sistem sosial hingga tercipta kesamaan persepsi. Kesamaan persepsi ini kemudian menjadi dasar bagi adopsi ide-ide

inovatif ke dalam perilaku masyarakat dalam sistem sosial yang ada (Rogers, 2003).

Namun, inovasi sosial sering menghadapi hambatan dalam proses adopsinya. Masalah tersebut muncul dari beberapa faktor. Pertama, sejauh mana inovasi tersebut mampu memenuhi kebutuhan masyarakat sebagai sasaran ide tersebut, dan kedua, adanya hambatan internal berupa sikap dan perilaku masyarakat terhadap perubahan yang melibatkan mereka (Oldenberg, B dan Glanz, K, 2008). Rogers (2003) menjelaskan bahwa keputusan masyarakat untuk mengadopsi inovasi dipengaruhi oleh pengetahuan tentang inovasi tersebut, serta pengetahuan prosedural mengenai cara menggunakan dan cara kerja inovasi tersebut.

Proses difusi inovasi sering disalahpahami sebagai hambatan, padahal menurut Rogers, adopsi inovasi tidak bersifat instan dan memerlukan waktu yang cukup lama. Waktu yang dibutuhkan pun bervariasi di setiap konteks masyarakat. Perbedaan tersebut disebabkan oleh keberagaman karakter masyarakat dalam mengadopsi inovasi. Rogers mengelompokkan karakter tersebut dalam lima kategori: *Innovator, early adopters, early majority adopters, late majority adopters, late adopters, dan laggards* (Rogers, 1995). Hal penting yang perlu dicatat dalam setiap upaya inovasi adalah ketidakpastian yang menyertai inovasi itu sendiri (Hanafi, 1986). Sebab, inovasi pada awalnya adalah ide dan gagasan baru yang belum menjadi bagian dari struktur dan sistem sosial masyarakat di suatu wilayah, bukan sesuatu yang sudah tertanam dalam jangka panjang. Oleh karena itu, inovasi memerlukan perlakuan khusus serta proses pemantauan untuk memastikan adanya transfer nilai dan adopsi serta adaptasi terhadap nilai-nilai baru tersebut.

Memberikan ruang bagi kemandirian masyarakat dapat dilakukan melalui pencarian peluang inovasi dalam pengembangan masyarakat di suatu daerah. Pengembangan masyarakat dapat dikategorikan sebagai inovasi karena memberikan rangkaian hal baru kepada masyarakat dengan tujuan untuk menciptakan keberdayaan. Proses ini dikenal dengan istilah pemberdayaan masyarakat. Inovasi dan pemberdayaan masyarakat adalah dua hal yang saling terkait. Individu yang diberdayakan

adalah individu yang sebelumnya berada dalam posisi tidak berdaya. Hal baru yang dimaksud adalah dua hal pokok dalam pemberdayaan tersebut: daya dan kuasa. Kedua hal ini kemudian mengubah pola perilaku masyarakat untuk mengakses kebutuhan hidupnya, mengelola persoalan sosialnya, dan memainkan perannya dalam masyarakat.

Sebagai suatu upaya yang terencana, inovasi dalam pengembangan masyarakat memerlukan fasilitator eksternal untuk merumuskan perubahan ke arah yang lebih baik (Soetomo, 2011). Namun, tantangannya adalah tidak semua masyarakat dapat mengadopsi misi inovasi tersebut. Ini adalah hal yang wajar mengingat keputusan untuk mengadopsi inovasi biasanya dibuat oleh segelintir orang dalam suatu sistem sosial (Dobbins *et al.*, 2002). Oleh karena itu, dibutuhkan agen inovasi yang benar-benar berasal dari masyarakat itu sendiri. Pigg (2002) menyatakan bahwa pemberian peran dan kuasa kepada masyarakat adalah dasar dari pemberdayaan yang efektif dalam suatu komunitas. Pemberian kuasa ini memungkinkan keterlibatan masyarakat secara utuh dalam sistem sosial yang ada, sehingga mereka memiliki kemampuan untuk mengatur dirinya sendiri, mengendalikan situasi, serta memiliki rasa kepemilikan terhadap komunitasnya. Ini adalah bagian dari misi inovasi, di mana perubahan sikap dan kapasitas masyarakat menjadi kunci keberhasilan inovasi. Studi ini berfokus pada peluang hadirnya inovasi dalam pengembangan masyarakat, sehingga diperlukan alat untuk mengidentifikasi dan merencanakan inovasi tersebut secara terstruktur.

Rogers dan Soemakers (dalam Hanafi, 1986) menyebutkan lima hal yang mempengaruhi jalannya upaya inovasi dalam pengembangan masyarakat, yaitu sebagai berikut.

1. *Nature of social system*: Inovasi hadir dengan pemahaman terhadap potensi lingkungan tempat masyarakat hidup.
2. *Perceived attribute of innovation*: Potensi tersebut dikembangkan melalui berbagai komponen atau atribut baru, yang mengubah keadaan yang sebelumnya statis menjadi dinamis.
3. *Type of innovation decision*: Keputusan untuk menerapkan inovasi dalam sektor tertentu dengan memanfaatkan potensi lingkungan yang ada. Arah inovasi dapat terlihat melalui keputusan tersebut.

4. *Communication channel*: Terjadi proses pertukaran informasi yang melibatkan banyak pihak, yang mengarah pada penyebaran ide dan gagasan untuk memulai inovasi serta menginformasikan perubahan tersebut kepada masyarakat lainnya.
5. *Agents*: Kelompok masyarakat yang mengelola inovasi dan mengakselerasi potensi yang ada untuk dikembangkan.

Tujuan Inovasi Sosial

Inovasi sosial yang dilaksanakan melalui program *Water Integrated Sustainability Program for Livelihood* (WIS POL) secara umum bertujuan untuk memberikan solusi terhadap berbagai tantangan yang dihadapi oleh masyarakat. Program ini berfokus pada transfer pengetahuan mengenai penggunaan energi terbarukan, khususnya solar sel, dalam distribusi air bersih. Selain itu, WIS POL juga dihadirkan sebagai langkah untuk mengatasi permasalahan lingkungan, ekonomi, kesehatan, dan sosial yang muncul akibat pandemi Covid-19. Upaya ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas dan kemampuan sumber daya masyarakat di Desa Binor dan Desa Selobanteng dengan cara yang lebih efektif dan berkelanjutan. Potensi lokal yang ada di kedua desa, yang selama ini belum terkelola dengan baik, akan dimanfaatkan secara maksimal untuk mendukung keberhasilan program ini. Tak kalah pentingnya, program ini juga berfokus pada peningkatan hubungan antar masyarakat, serta memperkuat kemitraan antara masyarakat dengan pihak luar, guna mendukung terciptanya keberlanjutan dan perkembangan bersama.

Program Pengembangan Masyarakat

Pemberdayaan masyarakat adalah suatu proses yang bertujuan untuk mendorong masyarakat agar dapat mengidentifikasi posisi mereka secara proporsional dan berperan aktif dalam memanfaatkan potensi lingkungan untuk mencapai tujuan jangka panjang. Program *Water Integrated Sustainability Program for Livelihood* (WIS POL) merupakan program besar yang melibatkan dua desa, yakni Desa Binor dan Desa Selobanteng, yang bertujuan untuk mengatasi masalah air yang ada di kedua desa tersebut. Salah satu pendekatan yang dilakukan adalah

memperbaiki sumber air di hulu, yang terletak di Desa Selobanteng, melalui penanaman tanaman dan perbaikan ekosistem air. Dengan adanya perbaikan di bagian hulu, Desa Binor yang berada di hilir akan merasakan dampak positif, karena aliran sungai yang ada di Desa Selobanteng juga mengalir ke Desa Binor. Sebelumnya, Desa Binor sering menghadapi masalah kekeringan akibat air payau yang ada, yang membutuhkan teknologi khusus untuk memperoleh air tawar. Program WIS POL yang dimulai sejak tahun 2020, diawali dengan kegiatan penanaman pohon di Desa Selobanteng dan dilanjutkan dengan pembangunan sumur artesis di tiga dusun di Desa Binor, yaitu Dusun Krajan, Dusun Pesisir, dan Dusun Klompangan. Dengan adanya sumur artesis ini, distribusi air bersih ke rumah-rumah di Desa Binor dapat teratasi. Selain manfaat lingkungan yang diperoleh dari perbaikan mata air, masyarakat di Desa Selobanteng juga merasakan keuntungan ekonomi dari hasil kayu yang ditanam di kawasan hutan rakyat.

Implementasi Program *Water Integrated Sustainability Program for Livelihood* (WIS POL): Menjawab Tantangan Ketersediaan Air Bersih dan Pemberdayaan Masyarakat

Hal baru yang diterapkan dalam program ini yaitu adanya inovasi penggunaan energi baru terbarukan berupa solar panel dalam proses distribusi air yang ada di Desa Binor. Sebelumnya, mereka memanfaatkan listrik dari PLN untuk distribusi air dari sumur artesis di masing-masing dusun ke rumah pelanggan.

Inovasi Menjawab Kebutuhan Masyarakat dan Menciptakan Hal Baru

Hasil pemetaan sosial menunjukkan bahwa salah satu masalah utama yang dihadapi oleh kedua desa, Selobanteng dan Binor, adalah kekurangan pasokan air bersih, yang mengarah pada kekeringan. Melalui program ini, kebutuhan air bersih di kedua desa dapat terbantu. Inovasi yang diperkenalkan dalam program ini adalah penggunaan panel surya untuk mengurangi biaya operasional. Sebelumnya, pompa air yang digunakan untuk distribusi digerakkan dengan tenaga listrik, namun

dengan adanya panel surya, pompa kini dapat beroperasi menggunakan energi matahari yang melimpah di Binor.

Unsur Keunikan dalam Program

Keunikan program ini terletak pada integrasi dua desa melalui upaya perbaikan kondisi hutan. Hutan rakyat yang dikelola oleh masyarakat, dengan dukungan perusahaan, telah ditanami pohon untuk merehabilitasi kawasan tangkapan air. Hasilnya, sejumlah daerah di Selobanteng kini menjadi lebih hijau, yang berimbas pada peningkatan debit air di desa tersebut. Selain itu, aliran air dari mata air Selobanteng mengalir menuju sungai dan sistem perairan yang ada di Desa Binor. Secara tidak langsung, upaya masyarakat Selobanteng untuk menjaga lingkungan berkontribusi pada kemudahan akses air bagi masyarakat Binor.

Menciptakan Akses Bagi Kelompok Rentan

Program ini berhasil menyediakan akses air bersih bagi 230 KK di Desa Binor dan 78 KK di Desa Selobanteng. Sebagian besar masyarakat Binor, yang berada di daerah pesisir, sebelumnya kesulitan dengan air payau. Dengan adanya program ini, mereka kini bisa mendapatkan air bersih dengan mudah dan terjangkau, hanya membayar Rp 1.500/m². Di sisi lain, di Desa Selobanteng, akses air bersih masih sulit karena mereka tinggal di daerah perbukitan yang tandus. Sebelumnya, warga harus berjalan jauh dan membawa jerigen untuk mendapatkan air bersih. Sekarang, 78 KK di desa ini sudah menikmati akses air bersih yang dialirkan melalui pipa ke rumah masing-masing dengan biaya Rp2.000/m².

Terbentuk Regulasi dan Organisasi Baru

Telah terbentuk regulasi baru dalam pengelolaan air, di mana di Desa Binor, pengelolaan air dilakukan oleh koperasi dan BUMdes. Kedua organisasi ini bertanggung jawab sebagai pengelola program air bersih di desa tersebut. Sementara itu, di Desa Selobanteng, pengelolaan air bersih masih dilakukan secara mandiri oleh kelompok masyarakat yang ditunjuk oleh kepala desa. Di desa ini juga telah terbentuk regulasi terkait pengelolaan hutan rakyat yang dilakukan bersama dengan kelompok tani.

Unsur Core Competency

Transfer Pengetahuan

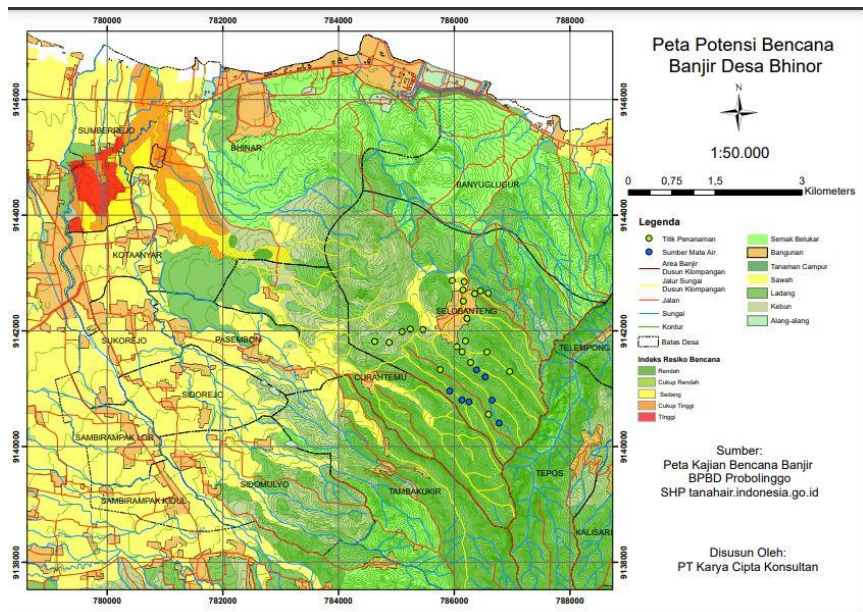
Terdapat proses transfer pengetahuan terkait dengan penerapan teknologi baru, yakni penggunaan panel surya untuk menggerakkan pompa air. Sebagai pengelola, Koperasi dan Bumdes kini memahami teknologi ini serta cara-cara pemeliharannya.

Implementasi Daur Hidup

Dalam operasi bisnis perusahaan, terdapat aki yang kondisinya sudah tidak optimal. Ke depannya, aki tersebut akan dimanfaatkan oleh masyarakat untuk menambah daya dalam proses distribusi air.

Unsur Sensitifitas dan Daya Responsif terhadap Kondisi Krisis di Masyarakat Akibat Bencana

Program ini merespons potensi bencana kekeringan yang dihadapi oleh kedua desa, Binor dan Banyuglugur. Selain itu, Desa Binor juga berisiko mengalami banjir saat musim hujan besar, sebagaimana yang pernah terjadi beberapa tahun lalu. Berikut adalah peta terkait.



Status

Keberlanjutan

Program masih berlanjut dan akan *exit* di tahun 2024. Secara lingkungan program juga membantu pengkayaan jenis flora dan fauna yang ada di hutan selobanteng

Scaling/ Replikasi Program

Program air bersih dan sanitasi sebelumnya hanya diterapkan di Desa Binor. Namun, setelah berhasil direplikasi, program ini kini juga dilaksanakan di Desa Selobanteng. Meskipun demikian, jumlah pengguna air bersih di Desa Selobanteng masih belum mencapai angka yang optimal.

Perubahan Sistemik

Program ini berhasil meningkatkan kapabilitas dan kohesivitas masyarakat marginal, khususnya di Desa Selobanteng, yang sebelumnya harus menempuh jarak jauh melalui bukit untuk mendapatkan air bersih. Kini, mereka tidak hanya memperoleh akses yang lebih mudah, tetapi juga berperan aktif dalam membantu masyarakat Desa Binor dengan menjaga hutan di hulu guna meningkatkan debit air. Selain itu, program ini memberikan nilai inovasi sosial yang tidak hanya berdampak pada aspek ekonomi, tetapi juga lingkungan, sosial, dan budaya masyarakat.

Manfaat ekonomi tercermin dari penghematan dalam pemenuhan air bersih serta nilai ekonomi yang diperoleh dari kayu yang tidak ditebang di Desa Selobanteng. Di sisi sosial dan lingkungan, program ini mampu mengatasi masalah kekeringan dan bencana banjir, dengan peningkatan jumlah pohon yang ditanam di kawasan hutan rakyat yang turut berpengaruh pada peningkatan stok karbon dan pengurangan emisi. Tak kalah penting, pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) berhasil memberikan kontribusi terhadap pengurangan jejak karbon.

Program ini juga berfungsi sebagai sumber pembelajaran bagi berbagai kawasan hutan rakyat, mengajarkan bagaimana kelompok masyarakat secara swadaya mengelola hutan yang membawa dampak luas pada lingkungan, ekonomi, serta sosial dan budaya. Masyarakat juga

menjadi lebih paham tentang upaya konservasi flora, fauna, serta pengelolaan air. Selain itu, mereka memperoleh pengetahuan tentang cara mengatasi bencana kekeringan dan banjir, serta memahami pentingnya pemanfaatan panel surya dalam operasional pengelolaan air.

Air Terpadu untuk Mata Pencapaian (WIS POL) dalam Mencapai Tujuan Berkelanjutan

Program Keberlanjutan Air Terpadu untuk Mata Pencapaian (WIS POL) beroperasi berdasarkan prinsip Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu (IWRM), yang mengutamakan pengelolaan sumber daya air, tanah, dan sumber daya terkait secara terkoordinasi. Tujuannya adalah untuk memaksimalkan manfaat sosial dan ekonomi sambil memastikan kelestarian lingkungan. Program ini berfokus pada Daerah Aliran Sungai Yahara di Wisconsin selatan dan digunakan sebagai studi kasus untuk menangani masalah yang lebih luas di kawasan Upper Midwest. Salah satu inti dari program ini adalah partisipasi pemangku kepentingan dalam pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan, dengan tujuan untuk membangun tata kelola yang lebih baik melalui upaya kolektif dalam pengelolaan sumber daya alam (Lay *et al.*, 2015). WIS POL berupaya menciptakan suatu sistem yang membantu masyarakat berkembang sambil mengelola sumber daya alam mereka secara efektif.

Selama pandemi, WIS POL berperan penting dalam mengatasi tantangan lingkungan yang timbul, seperti pembangunan sistem penyimpanan limbah untuk memperbaiki kualitas tanah dan air. Selain itu, penerapan praktik konservasi sangat membantu dalam mengurangi dampak negatif pandemi terhadap lingkungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa gangguan sosial besar, seperti pandemi, bisa memengaruhi upaya pelestarian keanekaragaman hayati (Ruth *et al.*, 2021). WIS POL menganggap ada hubungan yang erat antara masyarakat, lingkungan, dan kesehatan, sehingga program ini menjadi kerangka kerja yang menyatukan ketiga aspek tersebut untuk menangani masalah kesehatan lingkungan yang muncul (Xi & Kevin, 2021). Dengan pendekatan ini, WIS POL tidak hanya menangani masalah lingkungan langsung, tetapi juga mendorong keberlanjutan jangka panjang.

Program ini juga telah berkontribusi pada pemberdayaan sosial dengan mendorong inisiatif yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan seperti pemerintah, sektor swasta, organisasi nirlaba, dan masyarakat setempat (Sarah, 2014). Inisiatif ini bertujuan untuk memastikan bahwa sumber daya digunakan dengan efektif dan dapat memenuhi kebutuhan lokal. Selain itu, pengembangan kapasitas masyarakat dalam WIS POL difokuskan pada area seperti kepemimpinan, organisasi masyarakat, dan peningkatan keterampilan (Robert, 1999). Hal ini sangat penting, terutama di wilayah yang sering dilanda ketegangan sosial dan konflik, yang dapat menghambat kemajuan sosial. Dengan memperkuat ikatan komunitas dan kapasitas lokal, WIS POL memberdayakan individu untuk berperan aktif dalam pengambilan keputusan, sehingga menciptakan rasa kepemilikan dan tanggung jawab terhadap keberlanjutan.

Menilik dari segi ekonomi, WIS POL berkontribusi besar pada kesejahteraan ekonomi lokal dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat di Wisconsin. Program ini mendukung pengembangan kewirausahaan dan usaha kecil, yang penting untuk menjaga ekonomi lokal tetap kompetitif di tengah ketidakpastian dan perubahan cepat (Michael, 2023). Dengan demikian, program ini tidak hanya memenuhi kebutuhan ekonomi langsung, tetapi juga meletakkan dasar bagi keberlanjutan ekonomi jangka panjang.

Namun, WIS POL menghadapi tantangan besar selama pandemi, terutama terkait gangguan pada anggaran operasional dan program yang mengancam keberlanjutan upaya mereka. Selain itu, tantangan manajerial dan kesulitan dalam mengalokasikan sumber daya serta menjalankan program di tengah perubahan kebijakan kesehatan masyarakat turut menambah kesulitan (Will, 2020). Ini menunjukkan pentingnya strategi adaptif yang bisa menanggapi situasi tak terduga namun tetap mendukung keberlanjutan pembangunan.

Ada beberapa pendekatan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efektivitas WIS POL. Pertama, penerapan teknologi terbaru seperti aplikasi seluler untuk pengumpulan data waktu nyata dan keterlibatan masyarakat bisa meningkatkan efisiensi operasional (Brett,

2016). Kedua, penting untuk mendorong partisipasi perempuan dalam pengambilan keputusan, dengan menyediakan program pelatihan yang memberdayakan mereka (Amy & Julie, 2015). Terakhir, melibatkan berbagai pemangku kepentingan dalam desain dan pelaksanaan program dapat memastikan bahwa program ini lebih inklusif dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

Prospek WIS POL ke depan dalam mencapai tujuan keberlanjutan cukup menjanjikan, terutama dengan adanya pendanaan swasta yang dapat memperluas program pendidikan lingkungan dan meningkatkan kesadaran akan praktik berkelanjutan di masyarakat. Selain itu, perubahan yang dipimpin oleh masyarakat, bisnis, dan pemerintah lokal bisa mempercepat pencapaian tujuan keberlanjutan (Enayat *et al.*, 2020). Dengan menggerakkan sumber daya lokal dan mendorong kerjasama antar pemangku kepentingan, WIS POL dapat mengatasi tantangan lokal sekaligus mendukung keberlanjutan secara lebih luas. Pendekatan ini tidak hanya memberdayakan masyarakat, tetapi juga memastikan bahwa upaya keberlanjutan dapat relevan dan efektif sesuai konteks lokal. Kolaborasi antara gerakan masyarakat dan dukungan kelembagaan akan membuka jalan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan, memperkuat ketahanan masyarakat dalam menghadapi tantangan sosial dan lingkungan.

DATAR PUSTAKA

- Achuo, Elvis D., Clovis Wendji Miamo dan Tii N. Nchofoung. 2022. Energy consumption and environmental sustainability: What lessons for posterity?, *Energy Reports*, Volume 8, Pages 12491-12502, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.033>.
- Arnau, José, Debbie Yaver dan Carsten Hjort. 2019. Strategies and Challenges for the Development of Industrial Enzymes Using Fungal Cell Factories. *Grand Challenges in Fungal Biotechnology*, 179–210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_7
- Awad, Hamdy, Mohamed Mossad, Hani Mahanna, Moharram Foad, Amro El-Badawy dan Mohamed Gar Alalm. 2024. Performance and life cycle assessment of moving-bed biofilm and integrated fixed-film reactors to upgrade activated sludge systems. *Journal of Cleaner Production*, Volume 449, 141624, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141624>.
- Babuta, Aniket, Bhavna Gupta, Abhimanyu Kumar dan Souvik Ganguli. 2021. Power and energy measurement devices: A review, comparison, discussion, and the future of research. *Measurement*, Volume 172, 108961, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108961>.
- Baweja, Mehak, Lata Nain, Yutaka Kawarabayasi dan Pratyosh Shukla. 2016. Current Technological Improvements in Enzymes toward Their Biotechnological Applications. *Frontiers in microbiology*, 7, 965. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00965>
- Bell, Jason, Marie Riviere dan Jackie Brew. 2024. Unlocking Industrial Decarbonization: The Role of Renewable Thermal Technologies & State Policies. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.engieimpact.com/insights/unlocking-industrial-decarbonization>
- Biase, Alessandro di, Maciej S. Kowalski, Tanner R. Devlin dan Jan A. Oleszkiewicz. 2019. Moving bed biofilm reactor technology in

- municipal wastewater treatment: A review, *Journal of Environmental Management*, Volume 247, Pages 849-866, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>.
- Black, Stewart. 2024. How Heat Rates Impact Energy Power Prices. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://acclaimenergy.com/how-heat-rates-impact-energy-power-prices/>
- Bramha Gupta, Ashok Kumar Gupta, Partha Sarathi Ghosal, Saurabh Lal, Duduku Saidulu, Ashish Srivastava, Maharishi Upadhyay. 2022. Recent advances in application of moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: Insights into critical operational parameters, modifications, field-scale performance, and sustainable aspects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 10, Issue 3, 107742, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107742>.
- Briz, Vanessa. 2021. How to care for and wash Hyflex® reusable gloves?. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.ansell.com/lac/en/blogs/safety-briefing/lac/como-cuidar-y-lavar-los-guantes-hyflex-reutilizables>
- Cabral, Christian, Eoin Syron, Ray C. Asencio dan Chanler Johnson. 2009. Lessons learned on long-term operation of MBBR for refinery wastewater treatment. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 15, 2479-2494. <https://doi.org/10.2175/193864709802769984>
- Chapman, Brett. 2016. Research on the Impact of Technology on Policing Strategy in the 21st Century. <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/grants/251140.pdf>
- Chaskin, Robert J. 1999. Defining Community Capacity: A Framework and Implications from a Comprehensive Community Initiative. Chicago, IL: Chapin Hall Center for Children at the University of Chicago. https://www.lisc.org/media/filer_public/27/0f/270f0aa3-a66d-4f57-ad8c-f733584dca64/08102018_resource_defining_community_capacity.pdf

- Chettri, Dixita, Ashwani Kumar Verma dan Anil Kumar Verma. 2020. Innovations in CAZyme gene diversity and its modification for biorefinery applications. *Biotechnology Reports*, Volume 28, e00525, ISSN 2215-017X, <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00525>.
- Chou, Willis. 2024. *How Sustainable Practices Affect the Financial Performance of Glove Manufacturers* Doctoral dissertation, California Baptist University. <https://share.calbaptist.edu/server/api/core/bitstreams/6c26920a-7f00-464c-9de5-05e3fb9938c0/content>
- Clare, Victoria. 2024. Eco-Friendly PPE: The Future of Biodegradable Disposable Gloves. Diakses pada tanggal 14 Desember 2025 dari <https://www.sentinel-laboratories.com/blogs/news/eco-friendly-ppe-the-future-of-biodegradable-disposable-gloves?srsId=AfmBOoqqw2z0NuzFkc4brKiQpQtQHFTVaOurR8VJYHm1UxxLKxggmH5w>
- Cobian, Krystle P., Damani Khary White-Lewis, Sylvia Hurtado dan Hector V. Ramos. 2022. Implementing Case Study Design to Evaluate Diverse Institutions and STEM Education Contexts: Lessons and Key Areas for Systematic Study. *New directions for evaluation*, 2022(174), 21–31. <https://doi.org/10.1002/ev.20507>
- Cushman, Will. 2020. Face Masks, Wisconsin's Pandemic Politics And The Limits Of Persuasion. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://pbswisconsin.org/news-item/face-masks-wisconsins-pandemic-politics-and-the-limits-of-persuasion/>
- Direktorat Pengendalian Kebakaran Hutan dan Lahan, Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). SiPongi: Karhutla Monitoring Sistem. Diakses pada <http://sipongi.menlhk.go.id/home/main>
- Dobbins, M., Ciliska, D., Cockerill R, Barnsley, J., DiCenso, A. (2002). A Framework for the Dissemination and Utilization of Research for Health-Care Policy and Practice. 149–160. doi:10.1111/j.1524-475x.2002.00149.x

- Dreujou, Elliot, Charlotte Carrier-Belleau, Jesica Goldsmit, Dario Fiorentino, Radhouane Ben-Hamadou, Jose H. Muelbert, Jasmin A. Godbold, Rémi M. Daigle dan David Beauchesne. 2020. Holistic Environmental Approaches and Aichi Biodiversity Targets: accomplishments and perspectives for marine ecosystems. *PeerJ*, 8, e8171. <https://doi.org/10.7717/peerj.8171>
- Eti, Serkan, Serhat Yüksel, Hasan Dinçer, Hakan Kalkavan, Umit Hacıoglu, Alexey Mikhaylov, Mir Sayed Shah Danish dan Gabor Pinter. 2024. Assessment of technical and financial challenges for renewable energy project alternatives, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 18, 100719, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100719>.
- Ezeh, Michael, Adindu Donatus Ogbu, Augusta Heavens U. Ikevuje dan Emmanuel Paul-Emeka George. 2024. Stakeholder Engagement and Influence: Strategies for Successful Energy Projects. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*. 6. 2375-2395. 10.51594/ijmer.v6i7.1330.
- Frankel, Tom. 2019. What Is MBBR, and How Does It Work?. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.ssiaeration.com/what-is-mbbr-how-does-it-work/>
- Frankel, Tom. 2024. How to Reduce Total Suspended Solids From Wastewater. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.ssiaeration.com/how-to-reduce-total-suspended-solids-from-wastewater/>
- G P, Vinay dan Sathyaprakash M. Ramaiah. 2019. Social media as a Strategic Tool in Creating Awareness on Biodiversity Conservation.
- Gaddamwar, Akash. 2024. Sustainability Trends in Electric Motor Technology. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://gyroindia.com/blog/sustainability-trends-in-electric-motor-technology/>
- Garraway, Eric, John Parnell dan Delano Lewis. 2017. Successful Community-Based Conservation: The Story of Millbank and *Pterourus (Papilio) homerus*. *Insects*, 8(3), 69. <https://doi.org/10.3390/insects8030069>

- Gatheridge, Bill. 2014. Electric Motor Power Measurement and Analysis. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.yokogawa.com/library/resources/media-publications/electric-motor-power-measurement-and-analysis/>
- Gautam, Saransh Kumar. 2024. The Role of Indigenous Knowledge in Biodiversity Conservation: Integrating Traditional Practices with Modern Environmental Approaches. 1. 1-3. <https://doi.org/10.51470/ER.2019.1.2.01>.
- Gutierrez, K.M. Munoz, R.A. Canales, K.A. Reynolds dan M.P. Verhougstraete. 2019. Floor and environmental contamination during glove disposal. *Journal of Hospital Infection*. Volume 101, Issue 3, Pages 347-353, ISSN 0195-6701, <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.10.015>.
- Hanafi, A. (1986). *Memasyarakatkan Ide-ide Baru*. Surabaya: Usaha Nasional.
- He, Ziwen, Ziyang Chen dan Xiao Feng. 2023. The Role of Green Technology Innovation on Employment: Does Industrial Structure Optimization and Air Quality Matter?. *Environ Sci Eur* 35, 59. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00773-w>
- Id Babou, Asma, Sabah Selmaoui, Anouar Alami, Nadia Benjelloun dan Moncef Zaki. 2023. Teaching Biodiversity: Towards a Sustainable and Engaged Education. *Education Sciences*, 13(9), 931. <https://doi.org/10.3390/educsci13090931>
- Jaguemont, Joris dan Joeri Van Mierlo. 2020. A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles, *Journal of Energy Storage*, Volume 31, 101551, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551>.
- Jijingi, Hemen Emmanuel, Sara Kazemi Yazdi, Yousif Abdalla Abakar dan Emma Etim. 2024. Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, Volume 10, 100886, ISSN 2666-0164, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100886>.

- Kementrian Perencanaan Pembangunan Nasional/ BAPPENAS. (2017). Ringkasan Metadata Indikator Tujuan Berkelanjutan Indonesia.
- Khaw, Khai Wah, Alhamzah Alnoor, Hadi Al-Abrow, Victor Tiberius, Yuvara Ganesan dan Nadia Atshan. 2022. Reactions Towards Organizational Change: a Systematic Literature Review. *Current psychology (New Brunswick, N.J.)*, 1–24. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03070-6>
- Khazaei-Pool, Maryam, Tahereh Pashaei, Maryam Zarghani dan Koen Ponnet. 2024. Role of social innovations in health in the prevention and control of infectious diseases: a scoping review. *Infectious diseases of poverty*, 13(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s40249-024-01253-w>
- Korellis, Sam. 2022. Utilities and Industry Continue Learnings Around Benefits of Heat Rate Improvement. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.powermag.com/utilities-and-industry-continue-learnings-around-benefits-of-heat-rate-improvement/>
- Le, Tuyet-Anh T., Kelly Vodden, Jianghua Wu, Ryan Bullock dan Gabriela Sabau. 2024. Payments for ecosystem services programs: A global review of contributions towards sustainability, *Heliyon*, Volume 10, Issue 1, e22361, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22361>.
- Lemke, Amy A. dan Julie N. HarrisWai. 2015. Stakeholder Engagement in Policy Development: Challenges and Opportunities for Human Genomics. *Genetics in Medicine: Official Journal of the American College of Medical Genetics*, 17(12), 949–957. <https://doi.org/10.1038/gim.2015.8>
- Leung, Jessica dan Nancy Meyer. 2018. Sustainable Options for Reducing Emissions from Thermal Energy: Showcasing Successful Outcomes from Six Case Studies. <https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2018/10/sustainable-options-for-reducing-emissions-from-thermal-energy.pdf>
- Manap, Nurul Aliah Abdul. 2024. The Role of Smart Technologies in Reducing Energy Consumption. 10.13140/RG.2.2.20909.70883.

- Marcos, B., Lundgren, K., Boily, A., Thérien, L., Lapointe, J., & Veillette, M. 1990. THERMEX: An educational expert system for thermodynamics students. *Canadian Journal of Learning and Technology*. <https://doi.org/10.21432/T22G73>
- Maria, Giovanni Di. 2024. Future Trends in Thermal Management for Power Electronics. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.powerelectronicsnews.com/thermal-management/>
- Meek, Trish, Séamus Mac Conaonaigh dan Colin Thurston. 2008. The challenge of integrating information management systems into the enterprise: How to make faster, more informed business decisions with data. *American Laboratory*, 40(6), 14. <http://apps.thermoscientific.com/media/SID/Informatics/PDF/Article-The-Challenge-of-Integrating.pdf>
- Milnar, Sarah M. 2014. Community engagement and participation in collective impact initiatives. https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1070&context=cps_professional
- Minshew, Andy. 2019. The Impact of Social Innovation in Education. Diakses pada tanggal 13 Januari 2025 dari <https://www.waterford.org/blog/the-impact-of-social-innovation-in-education/>
- MMuksin, Sahlur. Hamzah. (2020). Kajian Lingkungan Program Tanggung Jawab Sosial & Lingkungan PHE Jambi Merang. Bogor: PT Albahru Enviro Lestari.
- Moallemi, Enayat A., Shirin Malekpour, Michalis Hadjidakou, Rob Raven, Katrina Szetey, Dianty Ningrum, Ahmad Dhiaulhaq dan Brett A. Bryan. 2020. Achieving the Sustainable Development Goals Requires Transdisciplinary Innovation at the Local Scale, *One Earth*, Volume 3, Issue 3, Pages 300-313, ISSN 2590-3322, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.006>.
- Molina-Espeja, Patricia, Julia Sanz-Aparicio, Peter N Golyshin, Ana Robles-Martín, Víctor Guallar, Fabrizio Beltrametti, Markus Mülle *et al.*, 2023. Enzymes for consumer products to achieve climate

- neutrality, *Oxford Open Climate Change*, Volume 3, Issue 1, kgad003, <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad003>
- Moore, Andrew. 2019. Can Genetic Engineering Save Our Planet's Biodiversity?. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://cnr.ncsu.edu/news/2019/06/genetic-engineering-planets-biodiversity/>
- Motegi, Naoya, Mary Ann Piette, Satkartar Kinney dan Jim Dewey. 2003. Case studies of energy information systems and related technology: operational practices, costs, and benefits. <https://www.osti.gov/servlets/purl/838605>
- Nidumolu, Ram, C.K. Prahalad dan M.R. Rangaswami. 2009. Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation. Diakses pada tanggal 13 Januari 2025 dari <https://hbr.org/2009/09/why-sustainability-is-now-the-key-driver-of-innovation>
- Nosta, John. 2022. Innovation And The Power Of Synergy. Diakses pada tanggal 13 Januari 2025 dari <https://johnnosta.medium.com/innovation-and-the-power-of-synergy-afccaf9fb661>
- Obaideen, Khaled, Nabila Shehata, Enas Taha Sayed, Mohammad Ali Abdelkareem, Mohamed S. Mahmoud dan A.G. Olabi. 2022. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, Volume 7, 100112, ISSN 2772-4271, <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>.
- Oldenburg, B., & Glanz, K. (2008). Diffusion of innovations. In K. Glanz, B. K. Rimer, & K. Viswanath (Eds.), *Health behavior and health education: Theory, research, and practice* (p. 313–333)
- Olivero, Anna. 2023. Sustainability engagement: importance and best practices. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://aworld.org/engagement/sustainability-engagement-importance-and-best-practices/>
- Pethybridge, Emma. 2023. 5 Reasons Why Conservation Efforts Need to Support Community Livelihoods in the Decade Ahead. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://earth.org/why-conservation-efforts-need-to-support-community-livelihoods/>

- Pigg, K. E. (2002). Three Faces of Empowerment: Expanding the Theory of Empowerment in Community Development. *Journal of the CommunityDevelopment Society*. 33(1): 107-123
- Rodríguez, Carlos Manuel, Laura Ortiz Montemayor, Mariana Bellot dan Gregory Watson. 2023. Investing in Nature: A Holistic Approach to Biodiversity and Climate Action. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/en/investing-in-nature-a-holistic-approach-to-biodiversity-and-climate-action/>
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations* (4th Ed). New York: Free Press.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (6th Ed). New York: Free Press.
- Rua, Rui António. 2023. Driving Towards Sustainability: The Power of Energy-Efficient Software. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.linkedin.com/pulse/driving-towards-sustainability-power-energy-efficient-software>
- Saidulu, Duduku, Abhradeep Majumder dan Ashok Kumar Gupta. 2021. A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 9, Issue 5, 106112, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106112>.
- Saidur, Rahman. 2010. A Review on Electrical Motors Energy Use and Energy Savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 3, Pages 877-898, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>.
- Samal, Rajashree dan Madhusmita Dash. 2023. Ecotourism, biodiversity conservation and livelihoods: Understanding the convergence and divergence. *International Journal of Geoheritage and Parks*, Volume 11, Issue 1, Pages 1-20, ISSN 2577-4441, <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.11.001>.
- Sarika M. P. 2024. Enzymes and boats: secret weapon against plastic pollution or eye-catching distractions?. Diakses pada tanggal 13

- Januari 2025 dari <https://repurpose.global/blog/post/enzymes-and-boats-innovations-against-plastic-pollution-or-distractions>
- Sim, Lay Mei, Chan, Ngai Weng Chan dan Masazumi Ao. 2015. Stakeholders' Participation in Sustainable Water Resource Management. New Water Policy and Practice. 2. <https://doi.org/10.18278/nwpp.2.1.5>.
- Söderholm, Patrik. 2020. The Green Economy Transition: the Challenges of Technological Change for Sustainability. *Sustain Earth* 3, 6. <https://doi.org/10.1186/s42055-020-00029-y>
- Soetomo, (2011). Pemberdayaan Masyarakat. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Sparrow, Andrew. 2024. Sustainability & Environmental Compliance in Manufacturing. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://www.linkedin.com/pulse/sustainability-environmental-compliance-manufacturing-andrew-sparrow-t8akf>
- Tahir, Muhammad Faizan, Chen Haoyong dan Han Guangze. 2021. A Comprehensive Review of 4E Analysis of Thermal Power Plants, Intermittent Renewable Energy and Integrated Energy Systems, Energy Reports, Volume 7, Pages 3517-3534, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.006>.
- Thurstan, Ruth H., Kimberley J. Hockings, Johanna S. U. Hedlund, Elena Bersacola, *et al.*, 2021. Envisioning a resilient future for biodiversity conservation in the wake of the COVID-19 pandemic. *People and Nature*, 3(5), 990-1013.
- Tolan, Michael. 2023. Building the outdoor recreation economy in natural resource-dependent communities. Diakses pada tanggal 14 Januari 2025 dari <https://headwaterseconomics.org/outdoor-recreation/diversifying-natural-resource-dependence/>
- USAID. 2024. 2024 USAID Biodiversity Policy. <https://www.usaid.gov/policy/biodiversity>
- Wang, Xiao, Xue Liu, Yanfang Wang, Xuyuan Kang, Ruoxi Geng, Ao Li, Fu Xiao, Changhao Zhang dan Da Yan. 2024. Investigating the deviation between prediction accuracy metrics and control performance metrics in the context of an ice-based thermal energy storage system, *Journal of Energy Storage*, Volume 91,

- 112126, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112126>.
- Wang, Zheng, Chunjiang An, Kenneth Lee, Xiujuan Chen, Baiyu Zhang, Jianan Yin dan Qi Feng. 2022. Physicochemical change and microparticle release from disposable gloves in the aqueous environment impacted by accelerated weathering. *Science of The Total Environment*, Volume 832, 154986, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154986>.
- Whang, Jeong-Bin, Woojung Chang dan Jong-Ho Lee. 2023. Interactive and synergistic relationships among different types of innovations. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 74, 103422. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103422>
- Yang, Xi dan Kevin Lo. 2021. Environmental Health Research and the COVID-19 Pandemic: A Turning Point Towards Sustainability. *Environmental research*, 197, 111157. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111157>
- Zeng, Jimin, Lidong Liu, Xiao Liang, Shihe Chen, Jun Yuan. 2021. Evaluating Fuel Consumption Factor for Energy Conservation and Carbon Neutral on an Industrial Thermal Power Unit, *Energy*, Volume 232, 120887, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120887>.
- Zhu, Baotong, Dong Wang dan Na Wei. 2022. Enzyme discovery and engineering for sustainable plastic recycling, *Trends in Biotechnology*, Volume 40, Issue 1, Pages 22-37, ISSN 0167-7799, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.02.008>.
- Zikargae, Mekonnen Hailemariam, Amanuel Gebru Woldearegay dan Terje Skjerdal. 2022. Assessing the Roles of Stakeholders in Community Projects on Environmental Security and Livelihood of Impoverished Rural Society: A Nongovernmental Organization Implementation Strategy in Focus. *Heliyon*, 8(10), e10987. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10987>

“Membangun Masyarakat Berdaya melalui Teknologi: Langkah Menuju Masa Depan Berkelanjutan” mengajak pembaca untuk menjelajahi peran penting teknologi dalam pemberdayaan masyarakat.

Buku ini menggali beragam cara inovatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas hidup, khususnya dalam sektor industri, tanpa mengorbankan kelestarian lingkungan.

Dengan pendekatan praktis dan didukung oleh contoh-contoh nyata, buku ini menunjukkan bagaimana teknologi dapat menjadi kunci untuk menciptakan masyarakat yang mandiri, tangguh, dan berkelanjutan.

Selain itu, buku ini menawarkan strategi konkret yang dapat diterapkan untuk mengatasi tantangan global, sekaligus membangun fondasi kesejahteraan yang berkelanjutan.

Sebuah bacaan yang menginspirasi bagi siapa saja yang ingin berkontribusi dalam menciptakan dunia yang lebih sejahtera dan ramah lingkungan.

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 : Industri

ISBN 978-634-01-0726-5



9

786340

107265