

Pendekatan Dua Tahap dalam Mengkaji Efisiensi dan Determinan Ketidakefisienan Pembangkit Listrik Berbasis Fosil

Hafidz Nusantara Dahana Putra¹, Bambang Eko Afiatno²

Universitas Airlangga, Indonesia

Email: Hafidzndp@gmail.com, afiatno@yahoo.com

Abstrak

Dominasi pembangkit listrik berbahan bakar fosil dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali menimbulkan tantangan besar di tengah surplus kapasitas daya, tekanan transisi energi, dan urgensi dekarbonisasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi teknis pembangkit listrik berbahan bakar fosil milik subholding PLN yang beroperasi di sistem kelistrikan Jawa-Bali selama periode 2014–2023. Latar belakang kajian ini adalah kondisi surplus daya yang berkepanjangan di Jawa-Bali, di tengah tekanan transisi energi dan ketergantungan terhadap energi fosil yang tidak ramah lingkungan serta rentan terhadap fluktuasi harga. Metode yang digunakan adalah *Stochastic Frontier Analysis* (SFA) dengan estimasi *Maximum Likelihood*, menggunakan model produksi Translog sebagai spesifikasi terbaik berdasarkan pengujian perbandingan *log-likelihood*. Studi ini juga menganalisis faktor-faktor determinan inefisiensi, seperti rata-rata umur mesin, pemakaian listrik untuk operasional sendiri (*self-consumption*), penerapan campuran biomassa, jenis bahan bakar (batubara atau bukan), penggunaan teknologi supercritical, serta kondisi eksternal seperti kapasitas pembangkit yang menganggur (*idle capacity*) dan pertumbuhan ekonomi di wilayah Jawa-Bali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi teknis bervariasi antar unit pembangkit. Faktor seperti teknologi supercritical dan pemakaian sendiri terbukti meningkatkan efisiensi, sementara campuran biomassa dan bahan bakar batubara justru menurunkannya. Temuan ini memberikan masukan strategis bagi pengelolaan pembangkit agar lebih adaptif terhadap dinamika energi dan dekarbonisasi.

Kata Kunci: efisiensi teknis, pembangkit listrik, *subholding* PLN, SFA, energi fosil

Abstract

The dominance of fossil fuel power plants in the Java-Bali electricity system poses a major challenge amid surplus power capacity, energy transition pressures, and the urgency of decarbonization. This study aims to measure the technical efficiency of fossil-fueled power plants owned by PLN's subholding entities operating within the Java-Bali electricity system during the period 2014–2023. The research is motivated by the persistent electricity surplus in the region, alongside the pressures of energy transition and continued reliance on fossil fuels, which are environmentally challenging and vulnerable to price and supply volatility. The analytical approach employs Stochastic Frontier Analysis (SFA) using Maximum Likelihood Estimation, with the Translog production function selected as the best model specification based on log-likelihood comparison tests. Beyond efficiency estimation, the study also examines several inefficiency determinants, including average machine age, internal electricity use (self-consumption), biomass cofiring practices, fuel type (coal or gas), implementation of supercritical technology, as well as external factors such as idle

capacity and regional economic growth in Java-Bali. The results show substantial variation in technical efficiency across power plant units. Factors such as supercritical technology adoption and higher levels of self-consumption contribute positively to efficiency. In contrast, biomass cofiring and coal usage are associated with reduced efficiency. These findings offer strategic insights for power plant asset management and operational optimization in the context of energy system decarbonization and sustainable electricity supply planning.

Keywords: *technical efficiency, power plant, subholding PLN, SFA, fosil fuel*

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi yang memadai adalah faktor penentu bagi kemajuan dan kekuatan suatu bangsa. Nugroho (2010:3) menjelaskan “Ketahanan energi (energy security) digambarkan dengan indikator 4A: ketersediaan fisik (availability), kemudahan akses (accessibility), keterjangkauan harga (affordability), serta kualitas (acceptability). Ketahanan energi juga digambarkan melalui elemen bauran energi (energy mix) serta keberlanjutan (sustainability) dari sistem penyediaan-permintaan energi yang ada.” Sektor energi di Indonesia khususnya untuk tenaga listrik didominasi oleh energi fosil. Data Kementerian ESDM (2024:16) menunjukkan pada tahun 2023 bauran energi primer berbahan bakar fosil yang digunakan untuk ketenagalistrikan seperti minyak bumi, batu bara, dan gas menyumbang 86,9% dari produksi secara keseluruhan dengan kontribusi minyak bumi sebesar 30,18%, batubara 40,46%, dan gas bumi 16,28%.

Ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil membuat ketahanan energi Indonesia menjadi lemah. Cadangan energi fosil yang terbatas membuat negara rentan terhadap krisis energi. Laporan Kinerja Kementerian ESDM (2024) menunjukkan cadangan energi fosil kian menipis. Cadangan batubara (proven reserve) pada tahun 2023 sekitar 33,87 miliar ton dengan realisasi 775,2 juta ton, sehingga berdasarkan rasio diprediksi akan habis selama 49 tahun kedepan. Stok minyak saat ini sebesar 2,41 juta barrel dan realisasi produksi tahun 2023 sebanyak 221 ribu barrel diprediksi akan habis 11 tahun mendatang. Bahan bakar gas mengalami penurunan cadangannya sebesar 1.04 triliun cubic feet (TCF) menjadi 35.30 TCF dan realisasi produksi gas bumi 2,42 TCF sehingga realisasi rasio diprediksi akan habis 15 tahun mendatang.

Tabel 1. Rasio Cadangan dan Produksi Energi Primer 2023

Jenis energi	<i>Proven reserve/ cadangan terbukti</i>	Produksi tahun 2023	Realisasi rasio
1. Batubara	33,865 miliar ton	775,2 juta ton	48,76 tahun
2. Minyak	2,41 juta barrel	221 ribu barrel	10,92 tahun
3. Gas	35,30 TCF	2,47 TCF	14,57 tahun

Sumber: Direktorat Jenderal Minerba dan Batubara (2024)

Indrawan (2024:8) dalam penelitiannya menjelaskan volatilitas harga seperti yang terjadi pada tahun 2021 dimana harga batu bara mengalami kenaikan yang signifikan

menjadi tambahan risiko yang dapat melemahkan ketahanan energi Indonesia (Wijaya et al., 2025). Kenaikan harga tersebut membuat pemasok batu bara lebih memilih ekspor sehingga berdampak pada kebutuhan batu bara pembangkit listrik tidak terpenuhi (Widayati, 2023). Risiko operasional juga menjadi salah satu aspek krusial dalam sektor ini. Infrastruktur energi seperti pembangkit listrik, jaringan distribusi, dan fasilitas penyimpanan sangat rentan terhadap gangguan.” Risiko ini selaras dengan penelitiannya van de Ven & Fouquet, (2017) yang meneliti guncangan harga energi selama 310 tahun ke belakang, penelitian ini mendapatkan hasil bahwa guncangan harga energi meningkatkan kerentanan dan ketahanan energi, berbeda halnya jika bauran energi terbarukan ditingkatkan akan mengurangi kerentanan dan ketahanan energi.

Tuntutan menggunakan energi bersih menjadi isu yang mengancam keberadaan pembangkit fosil. Dorongan tersebut tertuang didalam komitmen negara-negara internasional dalam forum COP28 (2023) yang sepakat untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Pemerintah Indonesia menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 sebagai bentuk komitmen mengurangi emisi karbon. Perpres ini bertujuan untuk mempercepat transisi energi salah satunya dengan memberi dukungan fiskal untuk percepatan pemensiun pembangkit listrik. PLN (2021) juga telah mengeluarkan dokumen Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) periode 2021–2030 yang mencakup rencana pensiun dini untuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sebesar 1,1 GW serta penggantian pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), gas (PLTG), dan mesin gas (PLTMG) sebesar 3,6 GW.

Mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil bukanlah hal yang mudah mengingat porsi pembangkit listrik berbahan bakar fosil di Indonesia masih dominan. Laporan tahunan PLN (2023) menunjukkan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang beroperasi berjumlah 135 unit dengan jumlah kapasitas 20.440 MW. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil lainnya seperti PLTG, PLTGU, dan PLTMG memiliki jumlah kapasitas sebesar 16.924 MW serta Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang memiliki kapasitas terpasang 3.521 MW. Pembangkit listrik non-fosil seperti PLTA, PLTM, PLTMH, PLTP, PLTS, PLTB, dan PLTBm hanya memiliki jumlah kapasitas sebesar 4.210 MW.

Dominasi PLTU di Indonesia merupakan hasil dari mandat pemerintah kepada PLN yang dimulai sejak tahun 2006. Melalui Peraturan Presiden (Perpres) No. 71 tahun 2006, pemerintah menugaskan PLN untuk membangun Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara tahap pertama (FTP I) dengan kapasitas 10.000 MW. Pada tahun 2010, PLN kembali diberi tugas untuk mempercepat pembangunan pembangkit listrik tahap kedua (FTP II), mencakup pembangunan pembangkit berbahan bakar batu bara, gas, dan panas bumi. Pada tahun 2015, PLN mengumumkan rencana pembangunan pembangkit listrik dengan kapasitas 35.000 MW, yang mencakup pembangkit berbahan bakar batu bara, gas, dan panas bumi, dengan target penyelesaian lima tahun.

Tantangan lain dalam transisi energi di Indonesia adalah kondisi surplus kapasitas pembangkit listrik. Pertumbuhan pembangkit yang pesat tidak sebanding dengan

peningkatan konsumsi energi listrik. Analisis DPR (2023) menunjukkan tren peningkatan berkelanjutan pada cadangan daya terhadap beban puncak. Reserve margin listrik Indonesia mengalami peningkatan signifikan dari 27,87% pada tahun 2017 menjadi 47,67% pada tahun 2022 dimana standar reserve margin diberbagai negara berkisar antara 15%-40%. Laporan PT PLN (2023:2) menunjukkan bahwa surplus produksi listrik Indonesia sebagian besar terjadi di Jawa. Surplus produksi listrik di Pulau Jawa tahun 2022 mencapai sekitar 27.659 GWh atau sebesar 81% dari total surplus secara nasional. Terlihat pada Gambar 1.2 mengenai perkiraan reverse margin sistem Jawa-Bali yang sangat tinggi.

Surplus kapasitas yang terjadi saat ini tidak hanya membebani keuangan negara karena sistem take or pay, tetapi juga menghambat investasi pada energi terbarukan. Percepatan pensiun dini pembangkit listrik yang tidak efisien menjadi salah satu solusi. Pensiun dini memiliki manfaat yang jelas, namun masih terdapat tantangan karena pengalihan dari pembangkit berbahan bakar fosil menuju sumber energi yang lebih bersih membutuhkan investasi besar dan perubahan infrastruktur. Kemitraan Transisi Energi atau Just Energy Transition Partnership (JETP, 2023:3) menjelaskan pensiun dini atau managed phase-out Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) membutuhkan investasi sekitar US\$ 2,4 miliar hingga tahun 2030. Upaya ini dianggap penting untuk mengurangi ketergantungan pada batu bara, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sektor energi di Indonesia. Pulau Jawa sebagai wilayah yang mengalami oversupply menjadi salah satu area yang dapat dilakukan untuk pensiun dini pembangkit listrik. Pemilihan pembangkit listrik untuk pensiun dini merupakan proses yang kompleks dan memerlukan analisis multidimensional. Proses seleksi harus dilakukan secara hati-hati dan berbasis data, dengan mempertimbangkan kondisi spesifik masing-masing pembangkit dan dampaknya terhadap sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Pemilihan pembangkit listrik tenaga fosil yang akan dipensiunkan secara dini memerlukan penetapan kriteria seleksi yang objektif dan terukur. Berbagai kajian kebijakan dan temuan penelitian menunjukkan bahwa umur mesin suatu pembangkit listrik merupakan indikator yang relevan untuk menentukan prioritas pensiun dini. Tillman (2018:162) menyatakan “Pembangkit yang telah beroperasi dalam jangka waktu yang lama umumnya memiliki efisiensi yang lebih rendah dan potensi nilai ekonomi sisa yang lebih kecil.” Pernyataan tersebut juga didukung oleh penelitian Sarma, (2024) yang melakukan penelitian untuk pembobotan indikator early retirement menggunakan Analytic Hierarchy Process (AHP) yang mendapati umur memiliki pembobotan tertinggi sekitar 30% di antara indikator lainnya seperti factor kapasitas pembangkit, efisiensi, harga jual, potensi biaya buy-out, emisi $[[CO]]_2$ dan polusi udara.

Bobot tinggi tidak serta merta menjadikan PLTU dengan umur tertua menjadi urutan pertama untuk early retirement. Indikator lain yang dipertimbangkan dalam menentukan early-retirement yaitu efisiensi pembangkit. Efisien secara teoritis dijadikan sebagai indikator kinerja yang menggambarkan progres sebuah organisasi dalam melakukan pekerjaan untuk menghasilkan output. Penelitian Widiyatnya, (2019)

menjelaskan efisiensi pada pembangkit listrik bisa dihitung berdasarkan tara kalor yang merupakan kinerja terkait dengan kemampuan pembangkit untuk melakukan konversi energi primer menjadi energi listrik atau rasio energi yang dihasilkan dari energi yang dimasukan. Pengukuran efisiensi berdasarkan tara kalor telah menjadi acuan dalam berkompetisi antar pembangkit. Pengukuran efisiensi tersebut baru sebatas input bahan baku belum mengukur faktor input lainnya seperti sumber daya manusia yang bekerja, kemampuan operasi dan pemeliharaan yang dilakukan untuk mempertahankan kinerja pembangkit ataupun faktor lainnya yang menjadi input di dalam proses bisnis.

Strategi lain yang dapat digunakan yaitu penerapan campuran bahan bakar biomassa menjadi pendekatan strategis dan berkelanjutan dalam menurunkan emisi karbon di sektor energi Indonesia. Biomassa yang berasal dari limbah pertanian, limbah kehutanan, serta sampah organik, menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan batubara. Penerapan campuran bahan bakar biomassa dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara juga memiliki keuntungan lain, seperti mengurangi ketergantungan pada batubara impor, meningkatkan diversifikasi energi, dan mendorong pengembangan industri biomassa domestik. Laporan penelitian Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA) (2022), Program campuran bahan bakar biomassa di Indonesia menggunakan rasio 3-5% biomassa pada 114 pembangkit batubara menunjukkan reduksi biaya produksi listrik (Rp 21,26/kWh). Penelitian ini menekankan bahwa campuran bahan bakar biomassa tidak hanya mengurangi emisi, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Keunggulan lainnya berasal dari sumber pasokan biomassa yang memungkinkan keseimbangan karbon nol bersih karena karbon dioksida yang dilepaskan selama pembakaran hampir sepenuhnya digunakan kembali dalam fotosintesis (Jonsson & Hillring, 2006).

Terlihat adanya tren peningkatan partisipasi PLTU dan realisasi biomassa setiap tahunnya. Peningkatan signifikan terjadi pada 2024, di mana realisasi mencapai 3 juta ton biomassa hingga kuartal ketiga, melebihi target tahunan 2,2 juta ton. Hal ini menunjukkan potensi besar dari skema campuran bahan bakar biomassa, sekaligus mencerminkan respon positif terhadap kebijakan dekarbonisasi sektor kelistrikan nasional. Proyeksi target 10 juta ton pada 2025 masih menjadi tantangan. Masalah logistik, stabilitas pasokan biomassa, serta belum meratanya infrastruktur pengolahan dan distribusi biomassa menjadi hambatan utama (Karimi, 2015). Studi oleh Zhai et al., (2025) memberi rekomendasi untuk mendorong investasi dalam rantai pasok biomassa yaitu, insentif bagi operator pembangkit dan regulasi untuk memastikan standar kualitas biomassa.

Ketahanan energi dan perubahan iklim telah mendorong terjadinya transformasi mendasar dalam sektor energi, terutama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendukung agenda pembangunan berkelanjutan. Penjelasan di atas menunjukkan terdapat dua skema utama yang diadopsi sebagai strategi transisi energi untuk pembangkit fosil, yaitu: penghentian atau pensiun dini pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil atau penggantian sebagian bahan bakar fosil dengan biomassa. Pemilihan jenis pembangkit yang akan dipensiunkan atau dioptimalisasi dengan bahan bakar biomassa tidak dapat dilakukan secara sembarangan.

Menurut Ferlia et al., (2023) hasil data yang didapat yaitu 60-70% polusi udara disebabkan oleh gas emisi buang dari kendaraan bermotor. Oleh karena itu dibutuhkan suatu upaya untuk mengurangi emisi karbon salah satunya menggunakan kendaraan listrik.

Keputusan tersebut harus didasarkan pada analisis menyeluruh terhadap efisiensi operasional masing-masing pembangkit. Strategi ini tidak hanya meminimalkan dampak lingkungan secara berkelanjutan, tetapi juga memastikan pengelolaan asset yang lebih optimal. Indikator atau parameter kinerja pembangkit menjadi faktor krusial dalam mengukur tingkat efisiensi pembangkit. Pemilihan pembangkit yang akan dipensiunkan atau dioptimalkan harus didasarkan pada analisis mendalam terhadap tingkat efisiensi operasionalnya, guna memastikan optimalisasi penggunaan sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan.

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut menganalisis efisiensi teknis pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang dioperasikan oleh subholding PLN di wilayah Jawa-Bali, mengukur elastisitas hubungan antara input dan output, sehingga dapat diketahui sejauh mana perubahan faktor input seperti modal, bahan bakar, dan tenaga kerja berpengaruh terhadap produksi Listrik, menguji pengaruh variabel umur mesin, variabel pemakaian sendiri, variabel campuran Bahan bakar biomassa, variabel penggunaan bahan bakar batu bara, variabel penggunaan teknologi boiler supercritical, variabel cadangan kapasitas, variabel gangguan tidak terencana dan variabel pertumbuhan ekonomi Jawa-Bali, terhadap efisiensi teknis pembangkit Listrik dan membandingkan tingkat efisiensi teknis antara pembangkit listrik yang dikelola oleh PT PLN Nusantara Power dan PLN Indonesia Power untuk mengetahui perbedaan kinerja dan potensi perbaikan pada masing-masing entitas.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan gambaran empiris mengenai efisiensi pembangkit listrik tenaga fosil di subholding PLN, mendorong pengembangan studi pada jenis pembangkit lain, serta menjadi acuan bagi akademisi dalam kajian pengurangan energi fosil dan transisi menuju energi bersih di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kuantitatif dengan model stokastik. Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu eksploratif. Biasanya para peneliti memanfaatkan metode eksploratif pada penelitian jenis kuantitatif stokastik untuk menemukan hasil baru melalui fakta-fakta yang telah diakui.

Penelitian ini menggunakan metode pengukuran SFA dengan model fungsi produksi transcendental logaritmik (translog). Model Translog menawarkan fleksibilitas dan kemampuan analisis yang lebih mendalam dalam studi fungsi produksi. Penelitian ini menggunakan data sekunder. Penelitian ini menggunakan data yang diperoleh dari berbagai sumber publikasi seperti Badan Pusat Statistik (BPS) untuk pengambilan data Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) dan Pembentuk Modal Tetap Bruto (PMTB), Begitu juga dari Kementerian ESDM untuk data kondisi kelistrikan di sistem Jawa-Bali seperti Kapasitas Cadangan. Serta internal PLN grup untuk data kinerja pembangkit.

Observasi dilakukan dalam bentuk penelusuran data teknis terkait faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi pada literatur sebelumnya. Penelitian ini menggunakan metode studi kepustakaan, dengan memperoleh data dari laporan tahunan dan data statistik pada website masing-masing perusahaan. Penelitian ini juga memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari sumber-sumber eksternal, seperti laporan tahunan Kementerian ESDM dan BPS. Data sekunder ini memberikan wawasan tambahan karena telah dipublikasikan oleh pihak lain dan memungkinkan peneliti untuk menganalisis informasi secara lebih luas dan obyektif.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data panel. Data panel merupakan data yang dikumpulkan dari beberapa sampel (data) pada runtut waktu (time-series) yang mendeskripsikan keadaan sampel pada lintas waktu (Jusdienar dkk, 2024:232). Pilihan penggunaan data panel dalam penelitian ini mengambil periode tahun 2014 - 2023. Metode pengambilan sampel yang digunakan adalah Probability/Random Sampling. Langkah pertama dalam pengambilan sampel secara acak adalah menyusun atau memperoleh kerangka sampel, yang dikenal sebagai "sampling frame". Kerangka sampel ini adalah daftar yang mencakup semua elemen populasi yang dapat dipilih sebagai sampel. Jumlah sampel yang diambil adalah pembangkit listrik berbahan bakar fosil milik PLN Nusantara Power dan PLN Indonesia Power yang terdiri dari:

Tabel 1. Sampel unit pembangkit PLN Nusantara Power

No	Unit	Lokasi	Bahan Bakar
1	UP Paiton	Jawa Timur	Batubara
2	UP Muara karang	Jakarta	Gas/BBM
3	UP Muara Tawar	Jawa Barat	Gas/BBM
4	UP Gresik	Jawa Timur	Gas/BBM

Sumber: Data diolah

Tabel 2. Sampel unit pembangkit PLN Indonesia Power

No	Unit	Lokasi	Bahan Bakar
1	UBP Suralaya	Banten	Batubara
2	UBP Priok	Jakarta	Gas/BBM
3	UBP Semarang	Jawa Tengah	Gas/BBM
4	UBP Grati	Jawa Timur	Gas/BBM
5	UBP Bali	Bali	Gas/BBM

Sumber: Data diolah

Teknik Analisis dan Pengolahan Data

Data yang digunakan di dalam penelitian ini diambil dari buku statististik dan laporan tahunan PLN grup dari tahun 2014-2023 seperti pada Lampiran 3-5 dan data yang dipublikasi oleh BPS seperti yang tercantum pada Lampiran 6.

a. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan memanfaatkan Microsoft Excel dan program STATA MP 17. Microsoft Excel digunakan untuk pengorganisasian data, perhitungan

dasar, dan penyusunan data mentah ke dalam format yang siap untuk dianalisis. Fasilitas dalam Excel seperti formula, grafik, dan tabel pivot mempermudah manipulasi data serta visualisasi awal hasil analisis. Program STATA MP 17 digunakan untuk estimasi parameter model produksi, khususnya untuk penerapan metode Maximum Likelihood (ML) dan analisis efisiensi teknis. Program ini memiliki keunggulan dalam menangani model frontier produksi, termasuk model stokastik yang lebih kompleks. Data yang telah terorganisir di Excel diimpor ke STATA untuk estimasi lanjutan dan perhitungan parameter model. Kombinasi kedua perangkat ini memungkinkan proses pengolahan data menjadi lebih efisien dan hasil analisis yang lebih akurat.

b. Pemilihan Model Fungsi Produksi

Setelah dilakukan pengolahan data, selanjutnya dilakukan uji hipotesis. Uji hipotesis ini dilakukan untuk menentukan fungsi produksi stokastik yang layak dan mampu mewakili data.

c. Persamaan Estimator Maximum-Likelihood

Setelah model produksi dipilih, langkah selanjutnya adalah mengestimasi parameter model dengan metode Maximum Likelihood (ML).

d. Uji t-Statistik

Uji t-Statistik adalah sebuah metode statistik yang digunakan untuk mengetahui variabel independen terkait tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel dependen.

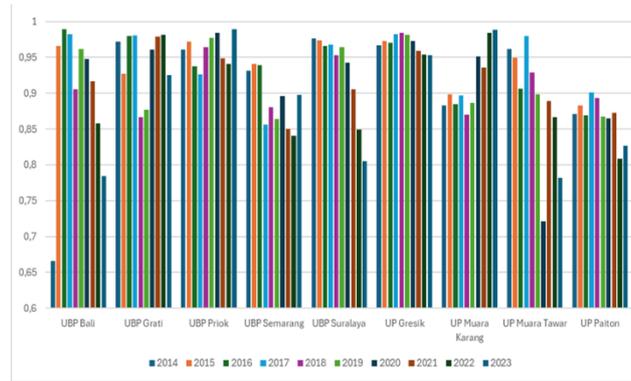
e. Uji Mann Whitney

Merujuk pada tujuan penelitian untuk membandingkan efisiensi teknis di antara dua perusahaan maka perlu dilakukan uji Mann Whitney. Uji Mann-Whitney (sering disebut juga dengan Mann-Whitney U test atau Wilcoxon rank-sum test) adalah uji statistik non-parametrik yang digunakan untuk membandingkan perbedaan median antara dua kelompok independen. Uji ini digunakan ketika data tidak berdistribusi normal atau skala pengukurannya ordinal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi Teknis Pada Pembangkit Fosil Jawa – Bali

Setelah dilakukan LR test untuk menentukan model produksi terbaik seperti yang dibahas pada Subba 4.3.1, maka selanjutnya menghitung rata-rata capaian efisiensi teknis pembangkit di Jawa-Bali untuk menjawab rumusan masalah poin a. Hasil efisiensi teknis menggunakan model translog didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 1. Hasil Efisiensi Teknis

Gambar 1 menunjukkan sebagian besar unit beroperasi dengan efisiensi yang beragam. Unit dengan rata-rata efisiensi tertinggi adalah UP Gresik (0,9723), sedangkan efisiensi terendah tercatat di UP Paiton (0,8511). Variabilitas efisiensi antar tahun juga terlihat dari nilai minimum dan maksimum, di mana efisiensi terendah (0,6564) terjadi di UBP Bali pada tahun 2014, dan efisiensi tertinggi (0,99) di UBP Priok pada tahun 2023. Tren efisiensi secara keseluruhan menunjukkan stabilitas dengan sedikit penurunan di beberapa unit dalam tahun-tahun terakhir, terutama pada UBP Suralaya, UP Muara Tawar dan UP Paiton.

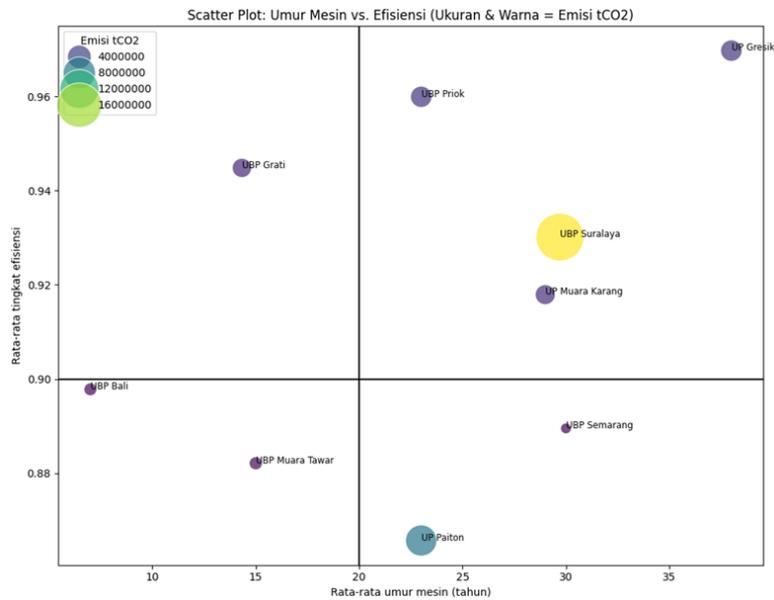
Tabel 3. Penurunan Efisiensi

Tahun	UBP Bali	UBP Grati	UBP Priok	UBP Semarang	UBP Suralaya	UP Gresik	UP Muara Karang	UP Muara Tawar	UP Paiton
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	45.10%	-4.64%	1.16%	1.03%	-0.30%	0.60%	1.68%	-1.33%	1.46%
2016	2.39%	5.70%	-3.57%	-0.25%	-0.79%	-0.25%	-1.46%	-4.55%	-1.64%
2017	-0.68%	0.02%	-1.21%	-8.82%	0.16%	1.20%	1.36%	8.17%	-1.76%
2018	-7.84%	-11.63%	4.10%	2.84%	-1.48%	0.17%	-3.05%	-5.21%	-0.83%
2019	6.22%	1.18%	1.40%	-1.87%	1.18%	-0.28%	1.97%	-3.32%	-2.80%
2020	6.22%	9.61%	0.72%	3.68%	-2.25%	-0.83%	7.31%	-19.68%	-0.13%
2021	-4.69%	1.89%	-3.61%	-5.50%	-3.39%	-1.41%	-1.68%	23.20%	0.87%
2022	-6.40%	0.24%	-0.85%	-1.19%	-6.26%	-0.53%	5.22%	-2.53%	-7.34%
2023	-8.58%	-5.71%	5.15%	6.83%	-5.18%	-0.17%	0.40%	-9.78%	2.27%
Rata-rata	3.17%	-0,33%	0,33%	-0,28%	-1,89%	-0,15%	-1,17%	-1,50%	-0,47%

Sumber: Data diolah

Tabel 4. menunjukkan fluktuasi efisiensi dari tahun ke tahun. Beberapa unit mengalami peningkatan signifikan, seperti UBP Bali pada tahun 2015 sebesar +45,37% dan UP Muara Tawar pada tahun 2021 sebesar +23,38%. Penurunan tajam terjadi di UP Muara Tawar pada tahun 2020 sebesar -19,82% dan UBP Grati pada tahun 2018 sebesar -11,63%. Unit yang mencatat rata-rata perbaikan efisiensi adalah UBP Bali (+3,17%), UP Muara Karang (+1,17%), dan UBP Priok (+0,33%). Sebagian besar unit lainnya menunjukkan rata-rata perubahan negatif yang mencerminkan tantangan dalam menjaga efisiensi teknis secara konsisten.

Pendekatan Dua Tahap dalam Mengkaji Efisiensi dan Determinan Ketidakefisienan Pembangkit Listrik Berbasis Fosil



Gambar 2. Klasifikasi Pembangkit Berdasarkan Efisiensi

Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan unit pembangkit diklasifikasikan dalam empat kategori, yaitu Andal, Evaluasi, Observasi, dan Layak Pensiun. Klasifikasi ini didasarkan pada rekomendasi IESR yang menyarankan percepatan masa pensiun pembangkit berbasis fosil menjadi 20 tahun (Then et al., 2024), serta menggunakan batas efisiensi teknis sebesar 90% yang merujuk pada standar kinerja teknis yang umum diterapkan dalam industri pembangkitan listrik. Kategori Andal menunjukkan pembangkit dengan efisiensi tinggi dan performa yang baik, sehingga tidak memerlukan tindakan khusus selain pemeliharaan rutin. Observasi mencakup pembangkit berumur tua, namun masih efisien, sehingga belum perlu dipensiunkan, namun harus terus dipantau karena memasuki masa pensiun. Evaluasi diberikan pada pembangkit yang memiliki usia mesin rata-rata masih muda, namun memiliki efisiensi rendah. Kategori ini memerlukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi dan memperbaiki penyebab penurunan kinerja. Kategori Layak Pensiun ditujukan bagi pembangkit dengan efisiensi rendah dan memiliki umur mesin rata-rata di atas dua puluh tahun sehingga sudah tidak layak dipertahankan dan dapat direkomendasikan untuk segera dipensiunkan.

Hasil di atas menunjukkan kategori Observasi memiliki empat unit yaitu UP Gresik menempati posisi tertinggi dari sisi efisiensi sebesar 0,9697 dengan umur mesin yang sangat tua, yakni 38 tahun, dan menghasilkan emisi sebesar 3,16 juta ton $[[CO]]_2$. UBP Priok yang memiliki umur mesin 23 tahun menunjukkan efisiensi hampir setara, yaitu 0,9599 dengan emisi 3,12 juta ton $[[CO]]_2$. UBP Suralaya memiliki efisiensinya masih cukup baik 0,9301 namun menyumbang emisi $[[CO]]_2$ terbesar yaitu sebesar 18,46 juta ton. UP Muara Karang juga masuk dalam kategori ini dengan efisiensi 0,9179 dan rata-rata umur mesin 29 tahun, serta emisi sebesar 2,65 juta ton $[[CO]]_2$. Keempat unit ini masih layak beroperasi, namun perlu strategi pengendalian emisi dan peningkatan efisiensi energi untuk mempertahankan kinerja dan mengurangi dampak lingkungan.

Kategori Andal diwakili oleh satu unit, yaitu UBP Grati. Unit tersebut memiliki rata-rata umur mesin yang relatif muda yaitu 14 tahun dengan efisiensi tinggi sebesar 0,9448 dan emisi sebesar 2,41 juta ton $[[CO]]_2$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa UBP Grati memiliki kinerja yang baik. UBP Bali dan UP Muara Tawar masuk kategori Evaluasi. UBP Bali dengan rata-rata umur mesin 7 tahun, mencatat efisiensi sebesar 0,8979 dan emisi sebesar 704.711 ton $[[CO]]_2$. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tergolong baru tidak menjamin efisien. UP Muara Tawar dengan umur 15 tahun dan efisiensi 0,8882, serta emisi sebesar 766.603 ton $[[CO]]_2$. Evaluasi dapat dilakukan baik dari sisi teknis, manajerial, maupun strategi operasional agar efisiensinya dapat ditingkatkan kembali.

Kategori Layak Pensiun diperoleh UBP Semarang dan UP Paiton. UBP Semarang sudah berumur 30 tahun dan mencatat emisi paling rendah (283.270 ton $[[CO]]_2$), dengan efisiensi sebesar 0,8895. UP Paiton menempati posisi paling kritis, dengan efisiensi terendah di antara semua unit (0,8657) dan emisi yang sangat tinggi (7.472.681 ton $[[CO]]_2$), menunjukkan bahwa unit ini sangat tidak efisien dari sisi energi maupun lingkungan.

Klasifikasi ini memberikan pijakan awal dalam merumuskan kebijakan operasional dan strategi transisi energi yang berkelanjutan. Unit dalam kategori Observasi dan Evaluasi dapat diarahkan pada program efisiensi dan peningkatan performa, sementara unit dalam kategori Layak Pensiun harus menjadi prioritas dalam agenda pensiun dini dan unit dalam kategori Andal dapat dipertahankan.

Elastisitas Input Terhadap Output

Elastisitas input terhadap output merupakan analisis ekonomi dan produksi yang mengukur seberapa sensitif perubahan input terhadap perubahan output. Hasil elastisitas input terhadap output sebagai berikut:

Tabel 4. Elastisitas Input terhadap Output

Variabel	Rata-rata elastisitas
Elastitas Modal (ϵ_k)	0,0097576
Elastisitas Bahan Bakar (ϵ_e)	0,9661882
Elastisitas Tenaga Kerja (ϵ_l)	0,0368223
Elastisitas Keseluruhan (ϵ)	1,012768

Sumber: Data diolah

Hasil estimasi menunjukkan bahwa elastisitas bahan bakar (ϵ_e) sebesar 0,9662 yang berarti peningkatan konsumsi bahan bakar sebesar 1% akan meningkatkan output listrik sebesar 0,9662%. Bahan bakar memiliki elastisitas yang tertinggi dibandingkan input lainnya, menandakan bahwa bahan bakar merupakan faktor produksi yang paling responsif terhadap perubahan output. Kondisi ini normal karena bahan bakar merupakan

input utama dan langsung digunakan dalam proses pembangkitan. Elastisitas modal (ϵ_k) memperoleh rata-rata elastisitas sebesar 0,0098 dan tenaga kerja (ϵ_l) 0,0368. Perubahan pada kedua input ini memiliki dampak yang jauh lebih kecil terhadap output. Hal ini dapat dimaklumi karena modal dan tenaga kerja cenderung bersifat tetap dalam jangka pendek, dan tidak secara langsung menentukan volume listrik yang dihasilkan. Tingginya peran bahan bakar dalam proses produksi membuatnya menjadi variabel yang paling elastis di antara ketiga input. Elastisitas secara keseluruhan (ϵ) sebesar 1,012768 lebih dari 1 menunjukkan bahwa sistem masih berada dalam kondisi Increasing Return to Scale (IRS), di mana peningkatan seluruh input produksi bersama-sama sebesar 1% akan meningkatkan output sebesar 1.0128%.

Pengaruh Faktor Inefisiensi

Setelah diketahui tingkat efisiensi masing-masing unit, selanjutnya menganalisis faktor yang mempengaruhi inefisiensi untuk dapat menjawab rumusan masalah poin b. Merujuk pada hasil analisis regresi Tabel 4.8 menunjukkan hasil variabel Pemakaian sendiri (ps) memiliki koefisien positif sebesar 0,0001048 ($p = 0,000$). Hasil ini menjelaskan peningkatan pemakaian hasil produksi sendiri berkontribusi positif pada efisiensi pembangkit. Pemakaian sendiri mampu menghasilkan output tambahan sehingga mendukung efisiensi skala dalam jangka panjang. Pemakaian sendiri juga dapat dioptimalisasi dengan menggunakan solar rooftop sehingga tidak memerlukan bahan bakar tambahan. Penelitian Xia et al., (2022) menyimpulkan pemanfaatan solar rooftop sebagai sumber energi internal di 458 unit PLTU di China berpotensi menghemat 28,47 jt ton batu bara dan 12.08 miliar RMB pertahun atau setara 27,3 triliun rupiah. .

Faktor lainya yaitu implementasi campuran bahan bakar biomassa (cof) sebagai pendekatan transisi energi menunjukkan hasil signifikan negatif ($-0,0543158$, $p = 0,003$) yang berarti penerapan campuran biomassa justru menurunkan efisiensi. Hasil ini sejalan dengan penelitiannya Xie et al., (2023) dimana penggunaan biomassa dalam co-firing mengurangi performa pembakaran, menyebabkan penurunan efisiensi termal dan eksergi, kerugian terbesar terjadi di proses pembakaran dan jaringan pertukaran panas. Begitu juga dengan penelitiannya Cebucean et al., (2020) yang menyatakan implementasi campuran bahan bakar biomassa mengurangi efisiensi bersih sekitar 1% pada tingkat 30% campuran bahan bakar biomassa. Penggunaan campuran bahan bakar biomassa yang dikombinasikan dengan teknologi CCS juga dapat menambah efek negatif terhadap efisiensi termal sebesar 2,92–3,49%. Dampak lainnya yaitu meningkatnya konsumsi bahan bakar sebesar 59%. Ketidakefisienan ini berpotensi disebabkan oleh ketidaksesuaian desain boiler konvensional dengan karakteristik biomassa serta tingginya biaya penanganan dan pengolahan biomassa. Dampak positif dari campuran bahan bakar biomassa yaitu memberikan manfaat dari sisi lingkungan, yang dibuktikan dengan penurunan emisi CO_2 sebesar 268.000 ton pada tahun 2021 dan 96 ribu ton pada tahun 2022 (Christian et al., 2022). Peningkatan kualitas biomassa dan modifikasi teknologi pembakaran menjadi tantangan utama untuk keberhasilan cofiring.

Penggunaan batu bara sebelum dicampur dengan biomassa juga sudah menurunkan efisiensi. Hal itu dibuktikan dari hasil Tipe bahan bakar (tbb) yang memiliki koefisien negatif dan signifikan ($-0,110359$ $p = 0,000$). Hasil ini didukung dari berbagai studi komparatif yang menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) memiliki efisiensi termal yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit yang menggunakan bahan bakar gas alam dalam konfigurasi turbin gas Combined Cycle. Penelitian Fu et al., (2015) menemukan hasil bahwa efisiensi thermal pembangkit batu bara secara aktual sebesar 45,5% berbeda dengan teori yang bisa mencapai 65,3%. Kehilangan efisiensi (*irreversibility*) terjadi karena proses pembakaran, perpindahan panas, dan siklus uap. Rendahnya efisiensi termal berdampak langsung pada meningkatnya intensitas konsumsi energi primer. Kondisi tersebut mengakibatkan lebih banyak penggunaan bahan bakar dibandingkan pembangkit lain sehingga menghasilkan beban ekonomi dan lingkungan yang lebih besar. Hal ini memperkuat temuan bahwa ketergantungan pada batubara, tanpa dukungan teknologi pembakaran canggih, dapat menurunkan efisiensi dan memperbesar jejak karbon sistem kelistrikan nasional.

Variabel Tipe teknologi yang digunakan (tech) memiliki koefisien positif dan signifikan yaitu sebesar 0,0387923 ($p = 0,029$). Seperti pembahasan sebelumnya bahwa teknologi seperti supercritical berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi. Hasil ini mendukung penelitian Liu et al., (2019) yang menyatakan bahwa teknologi supercritical memiliki efisiensi lebih tinggi 2,39% - 2,84% dibanding dengan subcritical. Penelitian Cebucean et al., (2020) juga menjelaskan, teknologi supercritical dapat meningkatkan efisiensi listrik bersih sebesar 2,4% dibanding dengan subcritical. Efisiensi ini terjadi karena berkurangnya proses perpindahan panas boiler dan siklus uap. Teknologi supercritical juga mampu menurunkan emisi $[\text{CO}]_2$, NO_x , SO_x , dan partikulat.

Gangguan tidak terencana (efor) memiliki koefisien negatif dan signifikan pada tingkat toleran 10% yaitu $-0,2292466$ ($p = 0,075$). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin banyak gangguan tidak terencana berkontribusi terhadap penurunan efisiensi teknis. Keterkaitan ini belum dibahas secara eksplisit dalam banyak literatur, namun secara teknis keandalan peralatan utama merupakan faktor kritis yang menentukan stabilitas operasi. Hasil penelitian Wahyuningtyas & Asrol, (2022) menjelaskan banyaknya pemeliharaan berdasarkan waktu (*time-based maintenance*) pada pembangkit berpengaruh terhadap kesiapan pembangkit dalam memproduksi beban. Strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dan *predictive maintenance* perlu ditingkatkan karena lebih akurat dibanding *time-based maintenance*.

Variabel kapasitas cadangan (idle) juga memiliki koefisien negatif dan signifikan pada tingkat toleran 10% yaitu sebesar 0,0422945 ($p = 0,097$). Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar porsi kapasitas cadangan maka akan membuat pembangkit listrik fosil semakin tidak efisien. Kondisi idle yang semakin tinggi membuat pembangkit tidak mampu bekerja mencapai kemampuan maksimalnya sehingga banyak aset yang terbengkalai. Penelitian Wang et al., (2023) menunjukkan pada beban 30% ditemukan penurunan efisiensi sebesar 3,31% akibat kehilangan kerja tak reversibel. Penelitiannya Azubuiké et al., (2023) juga menemukan penurunan beban membuat efisiensi juga

semakin menurun di mana pada beban 100% efisiensi mencapai 42,8%, lalu diturunkan ke 75% efisiensi menurun menjadi 42,5% dan ketika beban 50% efisiensi menjadi 41,8%.

Dua variabel lain tidak signifikan seperti Rata-rata umur mesin pembangkit (*age*) dan Pertumbuhan ekonomi Jawa-Bali (*pdrb*), sehingga variabel ini belum cukup kuat untuk mempengaruhi tingkat ketidakefisienan pembangkit listrik dalam sampel yang dianalisis. Temuan ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa pembangunan pembangkit listrik baru berbasis batubara ditengah kondisi idle yang tinggi semakin tidak feasibel, baik dari segi efisiensi maupun keberlanjutan lingkungan. Solusi seperti penggantian batubara dengan biomassa (*wood pellet*) belum dapat dijadikan alternatif utama, karena justru berpotensi menurunkan efisiensi pembangkit.

Strategi transisi untuk pembangkit fosil pra-FTP saat ini yang lebih tepat adalah dengan merevitalisasi teknologi subcritical menjadi supercritical, serta menerapkan sistem pemeliharaan berbasis kondisi (*condition- base maintenance*) untuk menjaga efisiensi. Strategi jangka panjang yang dapat diterapkan yaitu mengganti teknologi pembakaran boiler menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) seperti yang diusulkan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (Ananda et al., 2025). Energi nuklir memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, dengan Energy Return on Energy Invested (EROEI) sekitar 75 atau setiap 1 energi yang digunakan dapat menciptakan 75 kali energi yang dihasilkan. Tantangan utama dalam pengembangan energi nuklir adalah biaya investasinya (Da Mata et al., 2017). Dengan memanfaatkan unit pembangkit yang telah ada maka biaya investasi tersebut dapat dipangkas menjadi lebih murah.

Perbandingan Efisiensi Teknis antar Sub-holding PLN

Hasil uji Mann-Whitney menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan dalam efisiensi operasional antara PLN Indonesia Power (PLN IP) dan PLN Nusantara Power (PLN NP) pada tingkat kepercayaan 5% ($p = 0,2263$). PLN NP memiliki jumlah peringkat lebih rendah (1.671) dibandingkan PLN IP (2.424), hasil ini belum cukup kuat untuk menyimpulkan adanya perbedaan signifikan. Kedua perusahaan sebagai subholding PLN memiliki sistem pengelolaan yang sama, meskipun terdapat perbedaan strategis, seperti fokus geografis, struktur organisasi, dan strategi bisnis.

PLN Indonesia Power memiliki portofolio aset yang lebih tersebar, sementara PLN Nusantara Power lebih banyak berfokus di Jawa-Bali. Perbedaan lain mencakup pendekatan pengawasan, lini bisnis, serta sistem pengadaan. PLN Indonesia Power menekankan manajemen risiko dan value for money dalam pengadaan, sementara PLN Nusantara Power memiliki sistem pengadaan yang lebih terstruktur.

Hasil ini menunjukkan bahwa prinsip tata kelola pembangkit masih dipertahankan dalam operasionalnya. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi dampak jangka panjangnya terkait holding-subholding di PLN grup. Kecenderungan perbedaan yang ditunjukkan dapat menjadi indikasi bahwa perubahan dalam efisiensi operasional mungkin akan terlihat seiring bertambahnya waktu. Pendekatan tambahan, seperti analisis regresi, dapat digunakan untuk menggali lebih dalam faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi kedua subholding sebelum maupun setelah restrukturisasi

KESIMPULAN

Penelitian ini membahas Efisiensi teknis pembangkit fosil pra-FTP pada sistem jaringan Jawa-Bali menggunakan basis data tahun 2014-2023. Metode yang digunakan dalam analisis ini yaitu SFA dengan model produksi translog menggunakan pendekatan Maximum-Likelihood. Merujuk pada hasil analisis, penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut: Hasil pengukuran efisiensi teknis menunjukkan bahwa secara keseluruhan rata-rata di atas 88%. Berdasarkan hasil klasifikasi, UBP Bali dan UP Muara Tawar perlu dilakukan evaluasi untuk meningkatkan efisiensinya, sedangkan UP Paiton dan UBP Semarang masuk dalam kategori unit yang layak dipertimbangkan untuk pensiun dini. Kajian lebih mendalam dan spesifik untuk menilai kesiapan pensiun dini perlu dilakukan, baik dari segi prosedural maupun dampak sosial-ekonominya. Hasil estimasi elastisitas menunjukkan bahwa bahan bakar merupakan input yang paling berpengaruh terhadap peningkatan output. Modal dan tenaga kerja juga berpengaruh positif, namun relatif kecil. Hasil keseluruhan mengindikasikan bahwa sistem masih berada dalam kondisi Increasing Return to Scale (IRS). Hasil analisis terhadap faktor-faktor inefisiensi menunjukkan bahwa variabel pemakaian sendiri dan penggunaan teknologi supercritical berkontribusi pada peningkatan efisiensi. Faktor lain seperti campuran bahan bakar biomassa, gangguan tak terencana, jenis bahan bakar, dan kondisi idle memberikan dampak negatif terhadap efisiensi pembangkit. Temuan ini menjelaskan bahwa pembangkit berbasis batubara semakin tidak relevan. Strategi optimalisasi paling efektif untuk pembangkit fosil pra-FTP adalah revitalisasi teknologi dari subcritical ke supercritical dan untuk jangka panjang diganti dengan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Campuran batubara dengan biomassa justru cenderung mempercepat penurunan efisiensi. Hasil analisis perbandingan dua subholding PLN mengindikasikan tidak adanya perbedaan efisiensi teknis yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa PLN NP dan PLN IP meskipun beda entitas, namun menerapkan tatakelola pembangkit yang sama atau mendekati. Implikasi Penelitian bagi Perusahaan (PLN grup) PLN grup perlu segera mengevaluasi unit pembangkit yang tidak efisien seperti UBP Bali dan UP Muara Tawar. Produksi sangat dipengaruhi oleh bahan bakar sehingga upaya efisiensi bisa ditingkatkan dengan pengelolaan bahan bakar yang lebih optimal. Program campuran biomassa juga perlu dikaji ulang karena justru bisa menurunkan efisiensi pembangkit. Pembaruan teknologi dari subcritical ke supercritical atau penggantinya boiler menjadi reaktor nuklir serta menerapkan sistem pemeliharaan berbasis kondisi dan prediktif perlu menjadi fokus dalam menjaga efisiensi. PLN grup juga perlu mempersiapkan pensiun dini untuk unit UP Paiton dan UBP Semarang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananda, J. R., Annisa, R. S., Agustin, R. N., & Putra, A. S. (2025). Analisis Rasio Likuiditas untuk Menilai Kinerja Keuangan PT. Campina Ice Cream Industry Periode 2023-2024. *Musytari: Jurnal Manajemen, Akuntansi, dan Ekonomi*, 18(8), 21–30. <https://doi.org/10.2324/p5yx8950>
- Azubuikwe, U. G., Egbuhuzor, L. C., Njoku, H. O., & Ekechukwu, O. V. (2023). Exergy Analysis of A Steam Power Plant at Full and Partial Load Conditions. *International Journal of Exergy*, 40(2), 182–197. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2023.128784>
- Cebucean, D., Cebucean, V., & Ionel, I. (2020). Modeling and Performance Analysis of Subcritical and Supercritical Coal-Fired Power Plants with Biomass Co-Firing and CO₂ Capture. *Clean Technologies And Environmental Policy*, 22, 153–169.
- Christian, E., Geges, S., & Zailami, F. (2022). Aplikasi Sistem Pencatatan Keuangan Berbasis Website. *Journal Of Information Technology and Computer Science*, 2(1), 29–36. <https://doi.org/10.47111/jointecom.v2i1.8832>
- Da Mata, J. F. C., Neto, R. O., & Mesquita, A. Z. (2017). *Comparison of The Performance, Advantages and Disadvantages of Nuclear Power Generation Compared to Other Clean Sources of Electricity*.
- Ferlia, S. A., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Analisis Efisiensi Kendaraan Listrik Sebagai Salah Satu Transportasi Ramah Lingkungan Pengukuran Emisi Karbon. *Optika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 356–365. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3282>
- Fu, C., Anantharaman, R., Jordal, K., & Gundersen, T. (2015). Thermal Efficiency of Coal-Fired Power Plants: from Theoretical to Practical Assessments. *Energy Conversion and Management*, 105, 530–544. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.019>
- Jonsson, A., & Hillring, B. (2006). Planning For Increased Bioenergy Use—Evaluating The Impact On Local Air Quality. *Biomass and Bioenergy*, 30(6), 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.01.002>
- Karimi, H. (2015). Optimization Models to Integrate Production and Transportation Planning for Biomass Co-Firing In Coal-Fired Power Plants. *Iie Transactions*, 48(10).
- Liu, M., Zhang, X., Yang, K., Wang, B., & Yan, J. (2019). Comparison and Sensitivity Analysis of The Efficiency Enhancements of Coal-Fired Power Plants Integrated With Supercritical CO₂ Brayton Cycle And Steam Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 198, 111918. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111918>
- Sarma, A. Y. (2024). *Pemilihan Prioritas Early Retirement Cfpp (Coal Fired Power Plant) dengan Menggunakan Metode Ahp Promethee*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Then, J. A., Pratikno, R. V., & Pattinussa, J. M. Y. (2024). *Implementasi Hasil Konferensi Perubahan Iklim Ke-26 (COP26) terhadap Pengembangan Sektor Pertambangan dan Kebijakan Lingkungan Di Indonesia*.

- Van De Ven, D. J., & Fouquet, R. (2017). Historical Energy Price Shocks And Their Changing Effects on The Economy. *Energy Economics*, 62, 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.12.009>
- Wahyuningtyas, D., & Asrol, M. (2022). The Implementation Of K-Means Clustering In Coal-Fired Power Plant Performance. *International Journal of Emerging Technology And Advanced Engineering*, 12(3), 1–8.
- Wang, C., He, S., Liu, L., Li, X., & Gao, L. (2023). Tradeoff Between The Efficiency Penalty and Load Depth In A Coal-Fired Power Plant With Co2 Capture Under Partial Load Conditions. *Energy Conversion and Management*, 278, 116608.
- Widayati, A. E. (2023). *Pengaruh Kebijakan Domestic Market Obligation Terhadap Industri Batubara di Indonesia Tahun 2012–2021*. Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Widiyatnya, I. (2019). *Pengukuran Efisiensi Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Two Stage Modeling Data Envelopment Analysis dan Artificial Neural Network (Studi Kasus Pembangkit di PT X)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wijaya, H., Asyifa, T. N., Salmabila, K. A., Oktaviani, T. B., Ibrahim, D. M., & Putra, O. E. (2025). Sentimen Politik Dan Volatilitas Pasar: Reaksi Indeks Pefindo 25 Terhadap Pemilu Presiden 2024. *Rashid: Journal Of Economic*, 1(1), 1–12.
- Xia, Y., Deng, J., Hu, B., Yang, Q., Li, J., Gu, H., & Zhou, G. (2022). Ready-To-Implement Low-Carbon Retrofit of Coal-Fired Power Plants In China: Optimal Scenarios Selection Based on Sludge And Photovoltaic Utilization. *Environmental Science And Ecotechnology*, 9, 100147.
- Xie, S., Yang, Q., Wang, Q., Zhou, H., Bartocci, P., & Fantozzi, F. (2023). Coal Power Decarbonization Via Biomass Co-Firing with Carbon Capture and Storage: Tradeoff Between Exergy Loss and Ghg Reduction. *Energy Conversion And Management*, 288, 117155.
- Zhai, M., Tian, X., Liu, Z., Zhao, Y., Deng, Y., & Yang, W. (2025). Advancing Just Transition: The Role of Biomass Co-Firing in Emission Reductions and Employment for Coal Regions. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 75, 104246. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104246>