Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia p–ISSN: 2541-0849
e-ISSN: 2548-1398
Vol. 10, No. 2, Februari 2025

STUDI PERBANDINGAN *IN-FURNACE AND OUT-FURNACE COAL BLENDING* TERHADAP PERFORMANCE ACCEPTANCE PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP BATUBARA ULTRA SUPERKRITIS

Tito Kurniawan[1], Ridho Hantoro[2]
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia[1,2]
Email: titokurniawan@gmail.com[1], hantoro@its.ac.id[2]

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas bahan bakar di PLTU ultra-superkritis melalui strategi pencampuran batubara (coal blending) yang optimal. Hal ini penting karena pembangkit listrik jenis ini menghadapi tantangan dalam ketersediaan batubara, keandalan operasional, dan efisiensi energi, serta harus mematuhi peraturan emisi yang semakin ketat. Meski demikian, menentukan campuran batubara yang ideal masih menjadi tantangan karena sulitnya menyeimbangkan aspek performa, tingkat emisi, biaya produksi, dan dampak operasional secara keseluruhan. Dalam penelitian ini, digunakan metode Multi Criteria Decision Making (MCDM) dengan pendekatan goal programming untuk mengoptimalkan proporsi pencampuran batubara di dalam (in-furnace) dan di luar (out-furnace) boiler. Penelitian ini penting untuk memastikan bahwa PLTU ultra-superkritis dapat memenuhi permintaan energi dengan lebih fleksibel, efisien, dan berkelanjutan dalam menghadapi perubahan kondisi pasokan batubara dan kebijakan lingkungan. enelitian menguji berbagai nilai kalori batubara (dari 5200 hingga 4200 kCal/kg) optimal digunakan secara individual (single coal) dan campuran, Optimasi coal blending dilakukan terhadap 4 parameter yang menggunakan lima jenis batubara untuk mengisi lima silo boiler mendapatkan improvement parameter sulfur 6,3%, parameter harga batuabra 0,85 %, parameter HHV 0,54 % dan parameter slagging-fouling index 5,64 %.

Kata kunci: Coal Blending, PLTU, Optimisasi, Operasional

Abstract

This research aims to enhance fuel flexibility in ultra-supercritical coal-fired power plants through optimal coal blending strategies. This is important because such power plants face challenges related to coal availability, operational reliability, and energy efficiency, while also needing to comply with increasingly strict emission regulations. However, determining the ideal coal mixture remains a challenge due to the difficulty in balancing performance aspects, emission levels, production costs, and overall operational impact. This study employs a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method with a goal programming approach to optimize the proportion of coal blending both in-furnace and out-of-furnace. The research is crucial to ensure that ultra-supercritical power plants can meet energy demands more flexibly, efficiently, and sustainably in the face of changing coal supply conditions and environmental policies. The study tests various calorific values of coal (ranging from 5200 to 4200 kCal/kg) used individually (single coal) and in mixtures. The optimization of coal blending is conducted for four parameters using five types of coal to fill five boiler silos, resulting in improvements of 6.3% for the sulfur parameter, 0.85% for the coal price parameter, 0.54% for the HHV parameter, and 5.64% for the slagging-fouling index parameter.

Keywords: *Coal Blending, PLTU, Optimization, Operations*

Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara memegang peran penting dalam program penyediaan listrik 35.000 MW di Indonesia, dengan target bauran energi sebesar 58,6% untuk batubara pada tahun 2027 (Syahputera et al., 2018a) seperti ditunjukkan tabel 1. Mengingat biaya batubara mencapai 60-80% dari total biaya produksi listrik, penggunaan batubara dengan peringkat lebih rendah menjadi pilihan ekonomis bagi PLTU batubara di Indonesia (Wahyono & Teguh, 2015). Untuk memanfaatkan batubara peringkat rendah ini secara efisien, penerapan coal blending atau pencampuran batubara dengan nilai kalori beragam menjadi solusi yang memungkinkan. Coal blending dilakukan untuk mengoptimalkan parameter penting seperti kalori, abu, kelembaban, dan kandungan sulfur, guna menjaga efisiensi dan mengontrol biaya (Aziz & Hasan, 2015; Yörükoğlu, 2017). Pencampuran ini dapat dilakukan baik di dalam furnace maupun di luar furnace (Ikeda et al., 2008). Secara umum, penelitian ini berfokus pada penentuan parameter batubara yang diterima (performance acceptance) PLTU batubara ultra superkritis dan proporsi batubara yang tepat untuk dicampurkan dalam coal blending di PLTU batubara ultra superkritis, dengan tujuan memastikan komposisi batubara dengan parameter tertentu masuk ke boiler ultra superkritis (Baskoro et al., 2022; Toloie-eshlaghy, 2011; Tsuji et al., 2015).

Coal blending adalah proses pencampuran batubara dengan karakteristik yang berbeda, baik dari tambang yang sama atau berbeda, untuk mencapai kualitas yang diinginkan. Optimalisasi coal blending di PLTU telah banyak dikaji, termasuk studi yang menyoroti bagaimana variasi kalori dan kadar air pada setiap elevasi pembakar dapat mengurangi emisi NOx dan kandungan karbon yang tidak terbakar pada fly ash (Ikeda et al., 2008).

Mengendalikan emisi adalah aspek penting dalam coal blending, terutama terkait regulasi lingkungan. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 21 Tahun 2008 yang menetapkan batasan emisi seperti Sulfur Dioksida (SOx), Nitrogen Oksida (NOx), dan partikulat untuk menjaga kualitas udara (Syahputera et al., 2018b). Dalam hal ini, coal blending diharapkan dapat membantu memenuhi standar emisi tersebut tanpa mengurangi efisiensi kinerja unit. Batas nilai baku mutu lingkungan ditunjukkan pada tabel 2.

NPHR merupakan indikator efisiensi energi yang dipengaruhi oleh nilai kalori batubara. Coal blending dengan batubara kalori rendah memiliki implikasi pada konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi, sehingga perlu dioptimalkan untuk menjaga biaya tetap rendah (Syahputera et al., 2018b).

Coal blending diterapkan sebagai upaya penghematan biaya dengan cara menyesuaikan penggunaan batubara kalori rendah. Kenaikan harga batubara global mendorong operator PLTU untuk mengombinasikan batubara dengan harga lebih kompetitif guna mengurangi Biaya Pokok Produksi (BPP) (Poullikkas, 2011; Tillman et al., 2016).

Tabel 1. Komposisi Energi Mix Pembangkitan Tenaga Listrik Indonesia

No.	Jenis Bahan Bakar	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
1	**Air**	6.9%	6.0%	5.7%	5.8%	5.5%	6.2%	6.8%	9.9%	9.5%	9.3%
2	**Panas Bumi**	5.4%	5.6%	5.5%	5.7%	6.2%	6.2%	6.4%	11.7%	10.7%	9.8%
3	**EBT Lain**	0.2%	0.8%	0.9%	0.9%	0.9%	0.8%	0.9%	1.5%	1.4%	1.3%
4	**Gas**	20.8%	23.2%	24.0%	21.6%	22.1%	21.8%	20.9%	22.2%	21.1%	20.6%
5	**BBM**	4.2%	3.9%	2.2%	1.1%	0.5%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%

No.	Jenis Bahan Bakar	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
6	**Batubara**	62.0%	60.0%	61.3%	64.7%	64.8%	64.6%	64.6%	54.4%	56.8%	58.6%
7	**Impor**	0.5%	0.5%	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Jumlah	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**	**100.0%**

Parameter Dampak Operasional

Implementasi coal blending juga menimbulkan tantangan operasional seperti slagging dan fouling pada boiler, yang dapat mempercepat korosi pipa akibat reaksi senyawa alkali (Na dan K) dengan sulfur (Shimizu et al., 2009).

Tabel 2. Baku Mutu Emisi PLTU Batubara

No	Parameter	Satuan	Kategory A (< 2008)	Kategory B (> 2008)
1	**SOx**	Mg/m3	750	750
2	**NOx**	Mg/m3	850	750
3	**Particulat**	Mg/m3	150	100
4	**Opacity**	%	20	20

Kandungan Na2O yang rendah (<1%) dapat mengurangi risiko fouling, tetapi K yang tinggi (>10%) meningkatkan risiko slagging yang menurunkan efisiensi.

Metode Pengambilan Keputusan Multi-Variabel

Proses melakukan analisis menjadi dasar untuk mengambil keputusan ketika memilih opsi terbaik dari lebih dari satu opsi yang dapat dikenal sebagai analisis keputusan. Jika dalam proses pengambilan keputusan terdapat banyak fungsi dan tujuan serta variabel yang mempengaruhi, maka optimalisasi keputusan yang diambil harus dilakukan.

Analisis optimalisasi dengan metode Multi Criteria Decision Making (MCDM) memungkinkan pemilihan opsi terbaik dengan mempertimbangkan berbagai parameter penting, terutama dalam situasi dengan tujuan yang berkonflik.

MCDM adalah pendekatan analisis keputusan yang mempertimbangkan banyak kriteria atau tujuan yang sering bertentangan. MCDM cocok untuk situasi di mana beberapa parameter, seperti efisiensi dan biaya, tidak dapat dioptimalkan secara bersamaan tanpa kompromi tertentu.

Dalam penelitian ini, keputusan untuk memilih jenis batubara campuran didasarkan pada optimalisasi antara emisi yang lebih rendah dan biaya yang lebih rendah, yang keduanya dapat saling bertentangan.

Goal programming adalah metode dalam Multi Criteria Decision Making (MCDM) yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem dengan berbagai tujuan yang ingin dicapai secara bersamaan. Dalam konteks penelitian ini, goal programming membantu menentukan proporsi optimal coal blending berdasarkan beberapa kriteria, seperti emisi, biaya produksi, efisiensi energi, dan risiko operasional.

Dalam menetapkan proporsi campuran batubara, goal programming digunakan untuk meminimalkan kandungan sulfur guna mengurangi emisi SOx sambil menjaga biaya produksi agar tetap ekonomis.

Selanjutnya, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas bahan bakar di PLTU ultra-superkritis melalui strategi pencampuran batubara (coal blending) yang optimal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pencampuran batubara dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi emisi, seperti yang diungkapkan oleh

Wahyono & Teguh (2015) yang menekankan pentingnya penggunaan batubara peringkat rendah untuk mengurangi biaya produksi listrik. Selain itu, penelitian oleh Baskoro et al. (2022) menunjukkan bahwa optimasi parameter pencampuran batubara dapat meningkatkan performa pembangkit listrik. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan metode Multi Criteria Decision Making (MCDM) dengan pendekatan goal programming untuk mengoptimalkan proporsi pencampuran batubara di dalam (in-furnace) dan di luar (out-furnace) boiler, serta pengujian berbagai nilai kalori batubara untuk mencapai parameter performa yang lebih baik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih fleksibel dan efisien dalam menghadapi tantangan ketersediaan batubara dan peraturan emisi yang ketat.

Metode Penelitian

Model optimisasi goal programming dikembangkan untuk mengoptimalkan coal blending. Studi ini menggunakan lima jenis batubara dengan rentang nilai kalori 5200 sampai 4200 kCal/kg, kandungan sulfur, harga batubara, dan dampak operasional pada boiler. Pengoptimalan ini bertujuan untuk meminimalkan kandungan sulfur, indeks slagging-fouling, biaya dan efisiensi energi. Model matematika menggabungkan variabel keputusan yang mewakili proporsi batubara, kendala berdasarkan parameter kinerja operasional, dan tujuan untuk pengendalian emisi, biaya, dan kinerja boiler.

Dalam penelitian ini, in-furnace coal blending dan out-furnace coal blending dipandang sebagai tahapan dalam satu proses blending yang komprehensif, yang bekerja bersama-sama untuk mempengaruhi kinerja PLTU batubara ultra superkritis. Kedua metode ini tidak dievaluasi secara terpisah, melainkan dilihat sebagai bagian dari satu kesatuan sistem yang memiliki tujuan utama, yaitu mengoptimalkan performance acceptance dari pembangkit. Diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Pengumpulan Data

Tiga kelompok data utama yang digunakan dalam optimisasi coal blending dengan metode goal programming, yaitu: data variabel keputusan, data kendala/tujuan, dan data variabel input. Variabel keputusan yang digunakan meliputi jenis batubara "i" dan jenis batubara "j" dalam boiler.

Data kendala/objektif yang dioptimalkan mencakup emisi SOx, Biaya Pokok Pengusahaan Tenaga Listrik (BPP) komponen C (bahan bakar), NPHR (Net Plant Heat Rate), dan potensi kerak pengotor (slagging-fouling index). Sementara itu, variabel input untuk masing-masing kendala meliputi: kandungan sulfur untuk SOx, harga batubara untuk komponen BPP, nilai kalor batubara (HHV) untuk NPHR, dan nilai Na2O batubara untuk potensi slagging fouling (slagging fouling index).

NPHR adalah ukuran efisiensi energi di pembangkit listrik, yang menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam listrik. Semakin rendah nilai NPHR, semakin efisien pembangkit dalam menggunakan batubara (Li & Yao, 2017; Sahu et al., 2014; Xia et al., 2014).

Slagging-fouling index adalah indikator potensi pembentukan kerak atau endapan di dalam boiler yang bisa mengganggu efisiensi operasional dan menyebabkan kerusakan. Nilai ini sangat bergantung pada komposisi abu dalam batubara.

Kandungan sulfur dalam batubara adalah faktor utama yang memengaruhi emisi SOx. Semakin tinggi kandungan sulfur, semakin tinggi potensi emisi SOx, yang dapat memperburuk kualitas udara dan menambah biaya penanganan emisi.

Data variabel input dari jenis batubara menggunakan data pada PLTU batubara ultra-superkritis "XYZ" seperti ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data on input variables of coal type

No	Parameter	Unit	Coal - HHV				
			X1 5200	**X2 4900**	**X3 4700**	**X4 4500**	**X5 4200**
1	**Sulphur Content**	%	0,28	0,44	0,57	0,5	0,11
2	**Coal Price**	Rp/kg	780,3	755,2	646,2	620,2	562,9
3	**HHV**	kCal/kWh	5.329	4.912	4.753	4.478	4.208
4	**Slagging-Fouling Index**	%	1.39	0.03	0.49	0.42	0.21

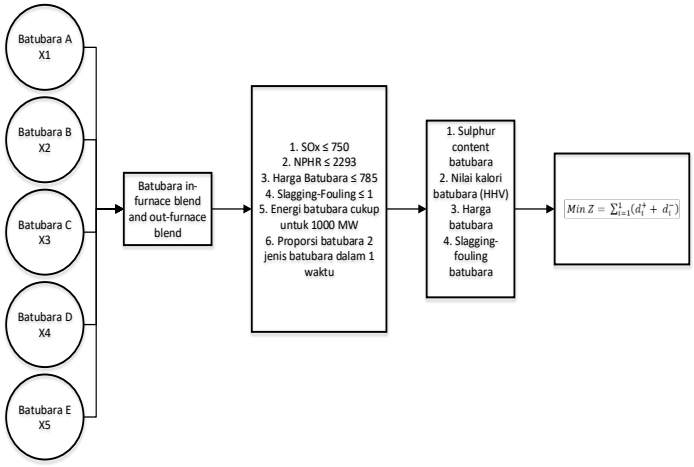
Konsep model matematis optimisasi coal blending di PLTU batubara ultra superkritis berdasarkan proporsi dan energi batubara xij adalah seperti pada gambar 2.

1) Variabel Keputusan

x = aliran batubara

i = jenis batubara " i "

j = jenis batubara " j "



Gambar 1. Konsep model matematis optimisasi

Variabel jenis batubara "i" memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan optimisasi coal blending di PLTU, dimana setiap perubahan pada jenis batubara "i" yang digunakan dalam proses optimisasi coal blending akan berdampak langsung pada pencapaian masing-masing tujuan. Sementara itu, in-furnace dan out-furnace coal blending merupakan variabel jenis pasangan batubara "j" berkaitan dengan jalur pengisian batubara ke boiler. Variabel ini mempengaruhi strategi pemilihan jalur konveyor yang dilakukan oleh operator PLTU batubara ultra superkritis dalam proses pengisian batubara ke silo boiler, namun tidak memiliki pengaruh langsung terhadap pencapaian tujuan optimisasi coal blending.

2) Susunan Prioritas

Prioritas 1 = Mencegah agar nilai emisi SOx dibawah ambang batas baku mutu lingkungan. Dengan variabel input meminimumkan Sulphur Content (S) sebagai goal.

Prioritas 2 = Mencegah agar nilai BPP komponen C dibawah target kinerja korporat. Dengan variabel input meminimumkan harga batubara (HBB).

Prioritas 3 = Mencegah agar nilai NPHR tidak melebihi nilai Kontrak Kinerja Unit. Dengan variabel input memaksimumkan nilai kalor batubara (HHV).

Prioritas 4 = Mencegah agar nilai slagging/fouling index abu batubara masuk dalam range aman potensi slagging dan fouling. Dengan variabel input meminimumkan nilai slagging-fouling index (SF).

3) Kendala

Tabel 4. Kendala dalam optimisasi coal blending

Prioritas	Objektif	Fungsi Objektif	Tujuan Sasaran
1	Minimumkan Sulphur Content (S) batubara	$\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} S_{ij} \,.\, (x_{ij}) + n1 - p1 = S$	$Min\ w_1^+(p1)$
2	Minimumkan Harga batubara (HBB)	$\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} HBB_{ij} \,.\, (x_{ij}) + n2 - p2 = HBB$	$Min\ w_2^+(p2)$
3	Maksimumkan nilai kalor batubara (HHV)	$\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} HHV_{ij} \,.\, (x_{ij}) + n3 - p3 = HHV$	$Min\ w_3^-(n3)$
4	Minimumkan slagging fouling index (SF)	$\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} SF_{ij} \,.\, (x_{ij}) + n4 - p4 = SF$	$Min\ w_4^+(p4)$

Sedangkan kendala sistem yang harus dipenuhi dalam optimisasi ini meliputi: jumlah energi yang dihasilkan boiler harus memenuhi permintaan dan proporsi masing-masing jenis batubara harus memenuhi batasan tertentu.

4) Fungsi Tujuan

……..…. (1)

Data variabel input jenis batubara yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan data tahun 2023 pada PLTU batubara ultra superkritis “XYZ”, seperti pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 5. Data Variabel Input Jenis Batubara

Parameter	Satuan	Batubara - HHV				
		X1	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**
		5200	**4900**	**4700**	**4500**	**4200**
Sulphur Content	%	0,28	0,44	0,57	0,5	0,11
Harga batubara	Rp/kg	780,3	755,2	646,2	620,2	562,9
HHV	kCal/kWh	5.329	4.912	4.753	4.478	4.208
Slagging-Fouling Index	%	1.39	0.03	0.49	0.42	0.21

Identifikasi Parameter Optimisasi Penelitian

Tahap pertama penelitian terkait optimalisasi coal blending pada PLTU ultra superkritis adalah mengumpulkan data batubara dan data operasi pembangkit serta data pendukung lainnya, kemudian mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi coal blending. Optimisasi coal blending ini memanfaatkan model matematika goal programming, sehingga identifikasi dan analisis parameter didasarkan pada unsur-unsur model. Model matematis goal programming melibatkan tiga komponen utama, yaitu: variabel keputusan (*decision variable*), parameter pembatas sistem (*constraint*), serta tujuan (*objective*).

Parameter yang digunakan dalam optimisasi ini didasarkan pada parameter umum yang ada dalam pengoperasian PLTU batubara ultra superkritis. Emisi SOx dihasilkan dari campuran batubara yang memiliki kandungan sulfur berbeda-beda. Efisiensi operasional (NPHR) yang diukur berdasarkan variasi nilai kalor batubara dalam campuran. Potensi slagging-fouling yang didasarkan pada variasi properties penyusun batubara yang mempengaruhi indeks slagging-fouling.

Data kendala atau target dalam penelitian ini adalah emisi gas buang SOx, komponen BPP C, NPHR, dan nilai sifat batubara untuk indeks slagging fouling. Data variabel keputusan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. 5 jenis batubara "i" yang digunakan untuk coal blending, yaitu: HHV 5200, HHV 4900, HHV 4700, HHV 4500, dan HHV 4200.
b. 5 jenis batubara "j" yang digunakan untuk coal blending, yaitu: batubara HHV 5200, HHV 4900, HHV 4700, HHV 4500, dan HHV 4200.

Kemungkinan variasi dalam variabel keputusan ini digambarkan pada tabel 4 yang menggambarkan hubungan antara jenis batubara dalam coal blending.

Tabel 6. Variasi Coal Blending

Blending pattern	X3	X1	X2	X5	X4
X3	X3:X3	X3:X1	X3:X2	X3:X5	X3:X4
X1		X1:X1	X1:X2	X1:X5	X1:X4
X2			X2:X2	X2:X5	X2:X4
X5				X5:X5	X5:X4
X4					X4:X4

Dari tabel 6 ditemukan terdapat 15 variasi campuran batubara (10 variasi beda jenis batubara dan 5 variasi sama jenis batubara/single coal).

Penentuan Model Matematika Optimisasi

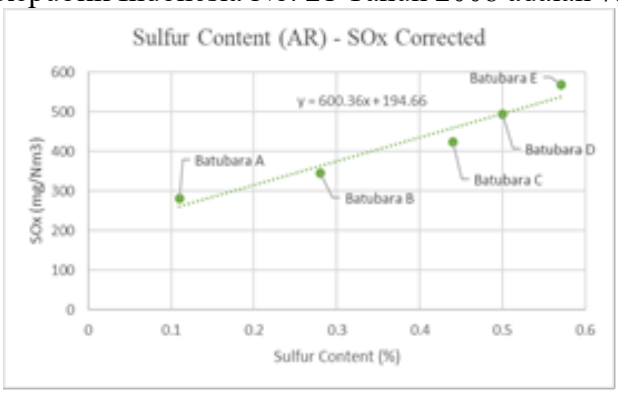
Proses penentuan model matematika dalam optimisasi coal blending terdiri dari variabel keputusan dalam goal programming model matematika adalah tujuan penelitian. Sementara itu, parameter constraint sistem adalah parameter objektif yang dioptimalkan. Selain tujuan yang dioptimalkan, parameter pembatasan juga mencakup fungsi batasan non-negatif serta kendala pengoptimalan sistem lainnya. Dari dua parameter awal, persamaan matematika untuk fungsi objektif dibuat. Kendala yang harus dipenuhi dalam pengoptimalan ini meliputi: meminimalkan tingkat SOx, BPP C, nilai NPHR, dan potensi indeks slagging-fouling.

Sementara itu, kendala sistem yang harus dipenuhi dalam optimisasi ini antara lain: jumlah energi yang dihasilkan oleh boiler harus memenuhi permintaan dan proporsi masing-masing jenis batubara harus memenuhi batas tertentu.

Hasil dan Pembahasan

Penentuan Konstrain Goal Sulphur Content (S)

Batasan emisi gas buang SOx untuk PLTU batubara berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 21 Tahun 2008 adalah 750 mg/Nm3.



Gambar 3. Grafik SOx terhadap Sulfur Content pada PLTU batubara "XYZ"

Berdasarkan data pengukuran uji bakar PLTU batubara "XYZ" tahun 2023, maka diperoleh grafik hubungan antara sulphur content dan emisi gas buang SOx seperti pada gambar 4.2. Dari grafik tersebut, maka diperoleh persamaan y = 359.56x + 53.37, dimana "y" adalah SOx dan "x" adalah Sulphur Content batubara. Untuk mencari batasan maksimum nilai "x" dengan constraint nilai "y" adalah ≤ 750 mg/Nm3, maka persamaan tersebut menjadi: y = 600.36x + 194.66 ... (2)

maka x ≤ 0,9 atau S ≤ 0,9.

B. Penentuan Konstrain Goal Slagging-Fouling Index (SF)

Berdasarkan data analisa batubara di PLTU batubara ultra superkritis "XYZ" tahun 2023, diperoleh data kandungan Na2O sebagai slagging-fouling index seperti pada tabel 7. Natrium dan kalium juga berkontribusi terhadap korosi panas, khususnya di lingkungan dengan senyawa yang mengandung sulfur (seperti SO3 dalam pembakaran batu bara). Jika kadar Na_2O di bawah 1%, risiko fouling dapat dikurangi, namun sebaliknya, jika kandungan kalium (K) melebihi 10%, risiko pembentukan slagging dan fouling meningkat secara signifikan, yang sering menyebabkan kerusakan pipa boiler ultra superkritis dan penurunan efisiensi (Shimizu et al., 2009).

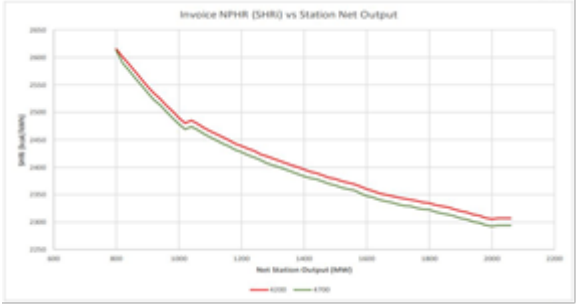
Tabel 7. Slagging Fouling Index

	X1	X2	X3	X4	X5
Slagging-Fouling Index(%wt)	1.39	0.03	0.49	0.42	0.21

Hal ini menyebabkan percepatan degradasi pipa boiler. Seperti, natrium oksida (Na2O) dapat bereaksi dengan sulfur dan unsur-unsur lain untuk membentuk senyawa korosif, yang mengurangi masa pakai material yang digunakan dalam boiler ultra superkritis. Kadar logam alkali yang tinggi memengaruhi suhu fusi abu, menyebabkan abu menempel pada permukaan pada suhu yang lebih rendah. Hal ini dapat meningkatkan kerusakan pipa boiler ultra superkritis. Dari data tersebut, maka diperoleh constraint nilai Na2O adalah ≤ 1%.

Penentuan Konstrain Goal Nilai Kalor Batubara (HHV)

Parameter constraint NPHR pada penelitian ini ditentukan berdasarkan invoice pada NPHR-HHV di 100% ECR NPHR PLTU batubara "XYZ", yaitu 2293 kCal/kWh seperti pada gambar 4.

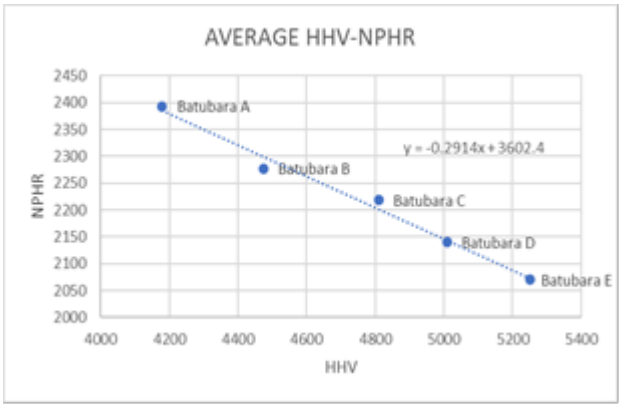


Gambar 4. NPHR - HHV PLTU batubara "XYZ" 100% ECR

Berdasarkan laporan performance test PLTU batubara "XYZ" tahun 2023, maka diperoleh grafik hubungan antara NPHR dan HHV seperti pada gambar 5. Dari grafik tersebut, maka diperoleh persamaan y = -0,2914x + 3602,4 , dimana "y" adalah NPHR dan "x" adalah HHV batubara. Untuk mencari batasan minimum nilai "x" dengan constraint nilai "y" adalah 2293 kCal/kWh, maka persamaan tersebut menjadi: y = -0.2914x+3602,4 ……. (3)

jika y = 2293 maka x = 4.570.

Jadi untuk constraint NPHR, maka variabel input HHV minimum 4.570 kCal/kWh (HHV ≥ 4.570 kCal/k



Gambar 5. Grafik NPHR - HHV PLTU batubara "XYZ"

Penentuan Konstrain Goal Harga batubara (HBB)

Dalam penelitian ini, nilai batasan BPP komponen C untuk NPHR pada 100% ECR NPHR PLTU batubara di sistem kelistrikan Jawa Bali pada Mei 2024. Target BPP komponen C adalah mencapai merit order.

Jika BPP komponen C ditetapkan sebesar 394 Rp/kWh, dengan nilai HHV batubara sebesar 4.570 kCal/kg dan NPHR sebesar 2.293 kCal/kWh, maka harga batubara dapat dihitung Rp785.25/kg. Oleh karena itu, untuk memenuhi batasan BPP komponen C, harga batubara harus lebih kecil dari 785,25 Rp/kg (Harga BB ≤ 785,25 Rp/kg).

Analisa Data dan Hasil Optimisasi

Prioritas dalam model ini diberikan pada empat batasan utama yang menjadi tujuan, yaitu: kinerja unit (NPHR), tingkat emisi (SOx), faktor finansial (BPP komponen C), dan faktor kendala operasi unit (potensi slagging/fouling). Sedangkan batasan yang menjadi syarat pembatas model matematis ini adalah terdapat 2 jenis batubara yang digunakan dalam coal blending yang dipilih diantara 5 jenis batubara yang telah disediakan, dimana dimungkinkan menggunakan satu jenis batubara dalam satu waktu pengisian silo batubara.

Berdasarkan analisa data optimisasi coal blending PLTU batubara pada Tabel 5, optimisasi campuran batubara dilakukan menggunakan Excel Solver. Proses optimisasi ini bertujuan untuk menentukan kombinasi batubara yang paling sesuai berdasarkan parameter utama, yaitu kandungan sulfur (S), harga batubara per kilogram (HBB), nilai kalor atau heating value (HHV), dan indeks slagging/fouling (SF). Setiap parameter digunakan sebagai batasan (constraint) atau fungsi objektif (objective function) dalam model optimisasi.

Tabel 8. Analisa data optimisasi coal blending PLTU batubara

Proporsi	S (Prioritas 1)	HBB (Prioritas 2)	HHV (Prioritas 3)	SF (Prioritas 4)	Optimisasi
X1:X2	0.36	0.21	0.12	0.05	0.74
X1:X3	0.32	0.18	0.11	0.04	0.65
X1:X4	0.34	0.21	0.1	0.05	0.70
X1:X5	0.28	0.18	0.1	0.035	0.595
X2:X3	0.36	0.195	0.12	0.04	0.715
X2:X4	0.34	0.18	0.1	0.045	0.665
X2:X5	0.3	0.165	0.1	0.035	0.6
X3:X4	0.368	0.225	0.13	0.05	0.773
X3:X5	0.34	0.18	0.11	0.045	0.675
X4:X5	0.24	0.165	0.1	0.04	0.545
X1:X1	0.2	0.119	0	0.1	0.419
X2:X2	0.124	0.237	0.039	0	0.400
X3:X3	0.099	0.4	0.168	0.038	0.706
X4:X4	0.062	0.346	0.208	0.031	0.647
X5:X5	0	0	0.2	0.016	0.216

Setelah menjalankan Excel Solver, hasil optimisasi proporsi batubara dapat dikelompokan dalam bentuk tabel 9.

Tabel 9. Hasil optimisasi proporsi batubar

Kelompok Blending Pattern	Total Cost (Rp/kg)	Total HHV (kcal/kg)	Total Sulfur (%)	Slag-Foul (%)
X1:X2 (20:80)	650	4750	0.35	0.30
X1:X2 (40:60)	670	4850	0.33	0.28
X1:X3 (50:50)	690	4900	0.30	0.35
X3 (100)	646	4750	0.57	0.49
X2:X5 (Optional)	660	4600	0.25	0.33
X5:X5 (NO)	700	4200	0.50	0.50

Berdasarkan hasil optimisasi yang ditampilkan pada tabel di atas, proporsi batubara kemudian ditabelkan untuk memudahkan implementasi seperti ditunjukkan dalam tabel 10.

Tabel 10. Kategori proporsi batubara yang direkomendasikan

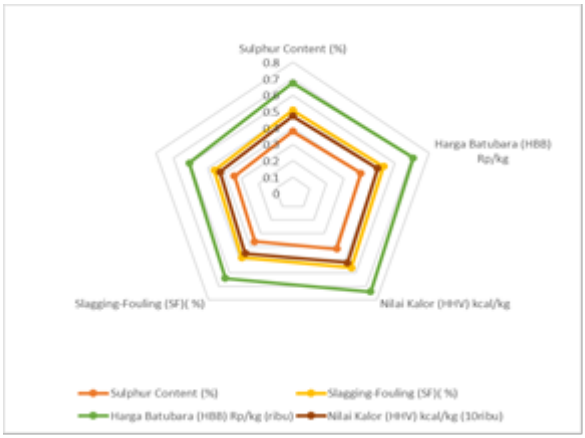
Blending pattern	X3	X1	X2	X5	X4
X3	100	optional	(20:80-80:20)	(20:80-80:20)	50:50
X1		NO	(20:80-40:60)	40:60	optional
X2			100	40:60	(20:80-40:60)
X5				NO	(20:80-40:60)
X4					100

Dari analisis sensitivitas di gambar 6, parameter yang paling sensitif adalah Sulphur Content (kandungan sulfur). Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor utama yaitu dampak lingkungan berupa emisi SOx yang tinggi memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan, yang membuat parameter ini sangat penting untuk dipertahankan dalam batas yang ketat.

Tabel 11. Hasil Analisa

Proporsi	S	Harga	HHV	Fouling
X1:X2	3.64%	0.81%	0.14%	3.36%
X1:X3	4.58%	0.81%	1.15%	5.20%
X1:X4	5.33%	0.81%	1.59%	5.90%
X1:X5	8.80%	0.87%	0.77%	4.94%
X2:X3	6.98%	0.80%	1.02%	6.75%
X2:X4	5.85%	0.84%	0.14%	7.44%
X2:X5	11.05%	0.84%	0.52%	2.00%
X3:X4	3.67%	0.87%	0.40%	7.62%
X3:X5	3.87%	0.90%	0.05%	7.03%
X4:X5	7.03%	0.91%	0.22%	6.91%
X1:X1	8.00%	0.79%	0.50%	4.44%
X2:X2	15.00%	0.81%	0.40%	7.27%
X3:X3	4.71%	0.88%	0.41%	7.32%
X4:X4	2.55%	0.85%	0.71%	7.94%
X5:X5	4.00%	0.99%	0.10%	0.50%
Improvement	6.34%	0.85%	0.54%	5.64%

Dan biaya pengendalian emisi untuk menjaga emisi SOx tetap dalam batasan yang aman, diperlukan teknologi pengendalian tambahan seperti FGD jika kandungan sulfur tinggi. Ini berpotensi menambah biaya operasional secara signifikan.



Gambar 6. Analisa sensitivitas proporsi batubara

Kesimpulan

Berdasarkan analisa dalam studi ini dapat disimpulkan bahwa batubara yang optimal digunakan secara individual (single coal) yang optimal pada 5 jenis batubara secara berurutan dari yang paling optimal sampai pada yang kurang optimal adalah X3 100%, X4 100%, X1 100%, X2 100%, dan X5 100%. Dan pada pencampuran 2 jenis batubara dalam in-furnace atau out-furnace coal blending, pencampuran batubara X3 X4 menempati urutan teratas dan campuran batubara terbaik selanjutnya adalah X1 X2, dan X2 X3. Di sisi lain, X5 100% dan X1 100% tidak dapat dipilih karena kurangnya energi panas dan resiko fouling.

Optimasi coal blending dilakukan terhadap 4 parameter yang menggunakan lima jenis batubara untuk mengisi lima silo boiler mendapatkan improvement parameter sulfur 6,3%, parameter harga batuabra 0,85 %, parameter HHV 0,54 % dan parameter slagging-fouling index 5,64 %. Saran dari penulis untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah penggabungan lebih banyak parameter kualitas batubara ke dalam model optimisasi dan mengenai dampak jangka panjang dari strategi optimisasi ini, seperti dampak pada keausan peralatan atau umur pakai.

BIBLIOGRAFI

Aziz, A., & Hasan, A. R. (2015). Evaluation of Heat Rate and Efficiencies of a Steam Power Plant Using the Different Coal Spesification From the Design Spesification. *Energi Lingkung*, *11*(1), 1–6.

Baskoro, F. R., Takahashi, K., Morikawa, K., & Nagasawa, K. (2022). Multi-objective optimization on total cost and carbon dioxide emission of coal supply for coal-fired power plants in Indonesia. *Socio-Economic Planning Sciences*, *81*. https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101185

Ikeda, M., Makino, H., Morinaga, H., Higashiyama, K., & Kozai, Y. (2008). Development of reduction technology of both emissions of NOx and unburned carbon by in-furnace blended method. *Central Research Institute of Electric Power Industry*.

Li, Q., & Yao, G. (2017). Improved coal combustion optimization model based on load balance and coal qualities. *Energy*, *132*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.068

Poullikkas, A. (2011). Heat rate curve approximation for power plants without data measuring devices. *International Journal of Energy and Environment*, *3*(5).

Sahu, S. G., Mukherjee, A., Kumar, M., Adak, A. K., Sarkar, P., Biswas, S., Tiwari, H. P., Das, A., & Banerjee, P. K. (2014). Evaluation of combustion behaviour of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *Applied Thermal Engineering*, *73*(1). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.071

Shimizu, M., Bao, G., & Fukuda, Y. (2009). High temperature corrosion properties of candidate materials for 700°C ultra super critical boilers. *NACE - International Corrosion Conference Series*.

Syahputera, M. I., Kamal, D. M., & Ekayuliana, A. (2018a). Analisis pengaruh nilai kalori batubara terhadap konsumsi bahan bakar dan biaya produksi listrik. *Semin. Nas. Tek. Mesin*, 474–483.

Syahputera, M. I., Kamal, D. M., & Ekayuliana, A. (2018b). Analisis pengaruh nilai kalori batubara terhadap konsumsi bahan bakar dan biaya produksi listrik. *Semin. Nas. Tek. Mesin*, 474–483.

Tillman, D. A., Dobrzanski, A., & Wong, J. (2016). Selecting and implementing a fuel blend for scrubbed units at a pulverized coal power plant. *Fuel Processing Technology*, *141*. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.002

Toloie-eshlaghy, A. (2011). MCDM Methodologies and Applications : A Literature Review from 1999 to 2009. *Research Journal of Internatıonal Studıes*, *21*(21).

Tsuji, H., Tanno, K., Nakajima, A., Yamamoto, A., & Shirai, H. (2015). Hydrogen sulfide formation characteristics of pulverized coal combustion - Evaluation of blended combustion of two bituminous coals. *Fuel*, *158*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.001

Wahyono, & Teguh, H. (2015). Penggunaan Mix Coal Terhadap Efisiensi Pembangkit Dan Biaya Produksi Listrik (BPL) Di Pltu Tanjung Jati B Unit 3 Semarang. In *EKSERGI Jurnal Teknik Energi* (Vol. 11, Issue 2).

Xia, J., Chen, G., Tan, P., & Zhang, C. (2014). An online case-based reasoning system for coal blends combustion optimization of thermal power plant. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *62*. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.036

Yörükoğlu, M. (2017). Coal blending for thermal power stations. In *Madencilik* (Vol. 56, Issue 3). https://doi.org/10.30797/madencilik.390317

Copyright holder:
Tito Kurniawan, Ridho Hantoro (2025)

First publication right:
Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia

This article is licensed under:

