

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Menghitung Kondisi Eksisting

Kondisi eksisting dianalisis untuk menggambarkan kinerja awal *boiler* sebelum diterapkannya proses *balancing* dan optimasi bahan bakar. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat efisiensi aktual *boiler* serta mengevaluasi apakah kinerja tersebut telah memenuhi standar operasional pabrik. Dengan mengetahui kondisi awal efisiensi, langkah perbaikan yang tepat dapat dirumuskan secara sistematis. Selain itu, hasil kondisi eksisting juga digunakan sebagai acuan pembandingan dalam menilai efektivitas metode optimasi pada tahap selanjutnya.

Berdasarkan tahapan perhitungan yang telah dijelaskan pada Bab III, perhitungan efisiensi kondisi eksisting dilakukan untuk setiap periode pengamatan. Sebagai contoh, berikut disajikan tahapan perhitungan pada periode 20 Januari 2025. Metode perhitungan yang sama diterapkan pada seluruh periode lainnya.

##### 1. Pada periode 20 Januari 2025

$$\begin{aligned} \text{Energi Input} &= (\dot{m}_{\text{coal}} \times HHV_{\text{coal}}) + (\dot{m}_{\text{bark}} \times HHV_{\text{bark}}) + (\dot{m}_{\text{EFB}} \times HHV_{\text{EFB}}) \\ &\quad + (\dot{m}_{\text{sludge}} \times HHV_{\text{sludge}}) + (\dot{m}_{\text{brown fiber}} \times HHV_{\text{brown fiber}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energi Input} &= (15,17 \times 24.606,10) + (21,41 \times 7.581,41) + (0,79 \times 5.003,17) \\ &\quad + (10,46 \times 5.331,13) + (0,00 \times 5.564,72) \end{aligned}$$

$$\text{Energi Input} = 595.413,91 \text{ kJ / s}$$

$$\text{Energi Output} = AVG_{\text{SteamFlow}} \times (\text{Enthalpy Steam} - \text{Enthalpy Water})$$

$$\text{Energi Output} = 134,60 \times (3.453 - 558,5)$$

$$\text{Energi Output} = 389.599,70 \text{ kJ / s}$$

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Energi Output}}{\text{Energi Input}} \times 100\%$$

$$\text{Efficiency} = \frac{389.599,70 \text{ kJ / s}}{595.413,91 \text{ kJ / s}} \times 100\%$$

$$\text{Efficiency} = 65,43\%$$

Nilai Rincian lengkap proses perhitungan setiap periode disajikan pada Lampiran A-1. Untuk memudahkan analisis, ringkasan hasil perhitungan energi *input*, energi *output*, dan efisiensi *boiler* pada kondisi eksisting disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Hasil Perhitungan Kondisi Eksisting

Date	Energi <i>Input</i> (kJ/s)	Energi <i>Output</i> (kJ/s)	<i>Efficiency</i> Kondisi Eksisting(%)
20 januari 2025	595.413,91	389.599,70	65,43
21 januari 2025	713.529,53	465.949,65	65,30
22 januari 2025	722.189,03	459.833,25	63,67
23 januari 2025	522.579,52	321.444,70	61,51
24 januari 2025	497.208,76	310.083,75	62,36
25 januari 2025	572.423,23	347.389,25	60,69
26 januari 2025	603.701,92	365.612,00	60,56
27 januari 2025	613.111,38	358.132,95	58,41
28 januari 2025	620.561,37	367.636,75	59,24
29 januari 2025	759.607,08	482.935,75	63,58
30 januari 2025	792.660,24	496.019,50	62,58

Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 4.1, terlihat bahwa nilai efisiensi *boiler* pada kondisi eksisting berada pada rentang 58,41-65,43%. Berdasarkan pedoman pabrik [8] nilai tersebut berada di bawah rentang efisiensi optimal operasional *boiler* yang ditetapkan oleh pabrik, yaitu 80-85%. Kondisi ini menunjukkan bahwa kinerja *boiler* belum optimal dan masih berpotensi untuk ditingkatkan. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan melalui proses *balancing* komposisi bahan bakar, yang akan dibahas pada subbab berikut ini.

#### 4.2 Perhitungan *Balancing* Bahan Bakar

Perhitungan kondisi *balancing* merupakan tahap lanjutan setelah diketahui bahwa efisiensi *boiler* pada kondisi eksisting belum memenuhi standar operasional pabrik. Tujuan utama dari proses *balancing* adalah menyesuaikan distribusi massa bahan bakar agar pemanfaatan energi panas menjadi lebih optimal dan efisiensi *boiler* dapat meningkat.

Tahap awal dalam proses *balancing* adalah menghitung nilai *Steam to fuel Ratio* untuk setiap jenis bahan bakar. Parameter ini menunjukkan kemampuan masing-masing bahan bakar dalam menghasilkan uap (*steam*) terhadap massa bahan bakar yang digunakan. Perhitungan dilakukan dengan mengacu pada Persamaan (2.4). Sebagai contoh, perhitungan untuk periode 20 Januari 2025 dijabarkan terlebih dahulu, sementara periode lainnya menggunakan metode perhitungan yang sama.

1. Pada periode 20 Januari 2025

$$\begin{aligned} SFR_{coal} &= \dot{m}_{coal,i} \times SG_{coal} \\ &= 15,17 \times 6,4 \\ &= 97,11 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SFR_{EFB} &= \dot{m}_{EFB,i} \times SG_{EFB} \\ &= 0,79 \times 1,8 \\ &= 1,42 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SFR_{sludge} &= \dot{m}_{sludge,i} \times SG_{sludge} \\ &= 10,46 \times 2,2 \\ &= 23,02 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SFR_{brown fiber} &= \dot{m}_{brown fiber,i} \times SG_{brown fiber} \\ &= 0,00 \times 1,2 \\ &= 0,00 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SFR_{bark} &= \dot{m}_{bark,i} \times SG_{bark} \\ &= 21,41 \times 1,8 \\ &= 38,54 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

Ringkasan hasil perhitungan *Steam to fuel Ratio* untuk seluruh periode pengamatan disajikan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Hasil Perhitungan *Steam to Fuel Ratio* tiap Bahan Bakar

Date	<i>Steam To Fuel Ratio</i> i (kg/s)				
	<i>Coal</i>	<i>EFB</i>	<i>Sludge</i>	<i>Brown fiber</i>	<i>Bark</i>
20 Januari 2025	97,11	1,42	23,02	0,00	38,54
21 Januari 2025	116,96	1,19	26,41	0,00	46,67
22 Januari 2025	116,59	1,06	21,77	2,51	49,04
23 Januari 2025	74,81	0,94	21,36	0,64	42,17
24 Januari 2025	67,41	0,58	13,55	0,40	47,90
25 Januari 2025	77,70	0,00	8,61	0,25	59,75
26 Januari 2025	89,78	0,00	24,93	0,74	46,23
27 Januari 2025	86,15	0,00	25,72	0,76	51,29
28 Januari 2025	97,19	0,00	24,22	0,72	43,90
29 Januari 2025	135,93	0,71	21,13	2,40	41,00
30 Januari 2025	142,89	1,19	23,50	1,51	41,79

Setelah diperoleh nilai *Steam to fuel Ratio* untuk setiap bahan bakar (Tabel 4.2), langkah selanjutnya adalah menentukan kontribusi empat bahan bakar utama selain *bark*, yaitu *coal*, *EFB*, *sludge*, dan *brown fiber*. Nilai kontribusi keempat bahan bakar tersebut diperoleh dengan menjumlahkan nilai *steam generation* masing-masing bahan bakar, kemudian dibandingkan terhadap nilai *average steam flow* awal pada setiap periode. Dengan cara ini, kontribusi bahan bakar *bark* dapat dipisahkan dari total aliran uap yang dihasilkan.

Hasil perhitungan jumlah kontribusi empat bahan bakar tersebut disajikan dalam Tabel 4.3.

UIN SUSKA RIAU

Table 4. 3 Data Hasil Jumlah Empat Bahan Bakar

Date	$\Sigma SG_{fuel,i}$ (kg/s)				
	Coal	EFB	Sludge	Brown fiber	Total
20 januari 2025	97,11	1,42	23,02	0,00	121,55
21 januari 2025	116,96	1,19	26,41	0,00	144,56
22 januari 2025	116,59	1,06	21,77	2,51	141,94
23 januari 2025	74,81	0,94	21,36	0,64	97,75
24 januari 2025	67,41	0,58	13,55	0,40	81,94
25 januari 2025	77,70	0,00	8,61	0,25	86,56
26 januari 2025	89,78	0,00	24,93	0,74	115,44
27 januari 2025	86,15	0,00	25,72	0,76	112,63
28 januari 2025	97,19	0,00	24,22	0,72	122,12
29 januari 2025	135,93	0,71	21,13	2,40	160,17
30 januari 2025	142,89	1,19	23,50	1,51	169,09

Selanjutnya, selisih laju aliran uap dihitung menggunakan Persamaan (2.5), yaitu dengan mengurangi laju aliran uap total terhadap kontribusi empat bahan bakar selain *bark*. Selisih ini merepresentasikan kontribusi aktual dari bahan bakar *bark* dalam menghasilkan *steam*.

$$\begin{aligned}
 \Delta AVG_{steam\ flow\ 20\ januari\ 2025} &= AVG_{steam\ flow\ awal} - \sum SG_{fuel,i} \\
 &= 134,60 - 121,55 \\
 &= 13,05\ kg / s
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, kemudian dapat diperoleh nilai aktual dari *bark* untuk setiap periode penelitian sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{bark\ aktual} &= \Delta AVG_{steam\ flow\ periode} \div Steam\ Ratio\ Bark\ (1,8) \\
 \dot{m}_{bark\ aktual\ 20\ Januari\ 2025} &= 13,05 \div 1,8 \\
 \dot{m}_{bark\ aktual\ 20\ Januari\ 2025} &= 7,25\ kg / s
 \end{aligned}$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai massa bahan bakar *bark* aktual untuk setiap periode penelitian. Perhitungan rinci untuk seluruh periode disajikan pada Lampiran A-2, sedangkan ringkasan hasilnya ditampilkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Data Hasil Perhitungan Massa Bahan Bakar *Bark* Aktual

Date	Massa Bahan Bakar <i>Bark</i> Aktual (kg/s)
20 Januari 2025	7,25
21 Januari 2025	8,97
22 Januari 2025	9,31
23 Januari 2025	7,58
24 Januari 2025	14,20
25 Januari 2025	18,63
26 Januari 2025	6,09
27 Januari 2025	6,26
28 Januari 2025	2,77
29 Januari 2025	3,29
30 Januari 2025	0,84

Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif, nilai massa bahan bakar *bark* aktual kemudian digabungkan dengan massa bahan bakar lainnya. Dengan demikian, distribusi massa seluruh bahan bakar setelah proses *balancing* dapat diamati secara menyeluruh untuk setiap periode pengamatan. Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Data Hasil Perhitungan *Balancing* Seluruh Bahan Bakar

Date	Jumlah Bahan Bakar Keseluruhan Setelah <i>Balancing</i> (kg/s)				
	<i>Coal</i>	<i>Bark</i>	EFB	<i>Sludge</i>	<i>Brown fiber</i>
20 Januari 2025	15,17	7,25	0,79	10,46	0,00
21 Januari 2025	18,28	8,97	0,66	12,00	0,00
22 Januari 2025	18,22	9,31	0,59	9,90	2,09

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Date	Jumlah Bahan Bakar Keseluruhan Setelah <i>Balancing</i> (kg/s)				
	<i>Coal</i>	<i>Bark</i>	EFB	<i>Sludge</i>	<i>Brown fiber</i>
23 Januari 2025	11,69	7,58	0,52	9,71	0,53
24 Januari 2025	10,53	14,20	0,32	6,16	0,34
25 Januari 2025	12,14	18,63	0,00	3,91	0,21
26 Januari 2025	14,03	6,09	0,00	11,33	0,61
27 Januari 2025	13,46	6,26	0,00	11,69	0,64
28 Januari 2025	15,19	2,77	0,00	11,01	0,60
29 Januari 2025	21,24	3,29	0,39	9,61	2,00
30 Januari 2025	22,33	0,84	0,66	10,68	1,26

Tabel 4.5 di atas merupakan massa tiap bahan bakar yang sesuai atau sama yang dihasilkan dengan data *avg steam flow* yang di tampilkan pada Tabel 3.4. di mana dari tabel tersebut setelah dilakukan generate menjadi steam, nilai massa Tabel 4.5 itu sesuai.

Sehingga setelah diperoleh data massa bahan bakar hasil *balancing*, perhitungan efisiensi *boiler* kembali dilakukan dengan menggunakan metode yang sama seperti pada kondisi eksisting, yaitu berdasarkan persamaan (2.8). Perhitungan ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak proses *balancing* terhadap peningkatan kinerja *boiler*. Hasil perhitungan efisiensi setelah *blancing* disajikan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Data Hasil Perhitungan Efisiensi Setelah *Balancing*

Date	Efisiensi Setelah <i>Balancing</i>		
	<i>E input</i>	<i>E output</i>	Efisiensi (%)
20 Januari 2025	488.061,3	389.599,7	79,8
21 Januari 2025	584.973,2	465.949,7	79,7
22 Januari 2025	586.222,9	459.833,3	78,4
23 Januari 2025	402.450,9	321.444,7	79,9
24 Januari 2025	403.133,4	310.083,8	76,9
25 Januari 2025	462.028,7	347.389,3	75,2
26 Januari 2025	455.143,0	365.612,0	80,3

Hak Cipta Diinanggr Udaang-Udaang

Date	Efisiensi Setelah <i>Balancing</i>		
	E <i>input</i>	E <i>output</i>	Efisiensi (%)
27 Januari 2025	444.546,0	358.133,0	80,6
28 Januari 2025	456.640,7	367.636,8	80,5
29 Januari 2025	611.890,5	482.935,8	78,9
30 Januari 2025	622.987,2	496.019,5	79,6

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.6, terlihat bahwa proses *balancing* memberikan peningkatan efisiensi *boiler* dibandingkan kondisi eksisting. Nilai efisiensi setelah *balancing* berada pada rentang 75,2-80,6%, yang menunjukkan adanya perbaikan kinerja pembakaran. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa penyesuaian distribusi bahan bakar, khususnya *bark*, mampu meningkatkan pemanfaatan energi panas terhadap energi keluaran.

Perbandingan efisiensi dilakukan dengan mengambil nilai efisiensi paling optimal pada masing-masing kondisi operasi. Pada kondisi eksisting, efisiensi tertinggi yang dicapai sebesar 65,43% dengan komposisi bahan bakar berupa coal 15,17 kg/s, bark 21,41 kg/s, EFB 0,79 kg/s, sludge 10,46 kg/s, dan brown fiber 0,00 kg/s. Total laju aliran massa bahan bakar yang digunakan untuk mencapai efisiensi tersebut adalah 47,83 kg/s. Sementara itu, pada kondisi setelah dilakukan *balancing*, efisiensi meningkat menjadi 80,6% dengan komposisi bahan bakar coal 13,46 kg/s, bark 6,26 kg/s, EFB 0,00 kg/s, sludge 11,01 kg/s, dan brown fiber 0,64 kg/s, dengan total laju aliran massa bahan bakar sebesar 31,36 kg/s. Perbedaan total penggunaan bahan bakar antara kedua kondisi tersebut mencapai 16,47 kg/s. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan metode *balancing* tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi boiler secara signifikan, tetapi juga menurunkan kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan tingkat efisiensi yang lebih tinggi.

Walaupun demikian, sebagian nilai efisiensi kondisi setelah *balancing* ini masih berada di bawah batas rentang efisiensi optimal pabrik. Oleh karena itu, diperlukan tahap lanjutan berupa optimasi komposisi dan jumlah bahan bakar untuk mencapai efisiensi yang lebih optimal. Proses optimasi tersebut dibahas pada subbab berikut ini.

#### 4.3 Perhitungan Optimasi

dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel melalui penyesuaian laju aliran massa masing-masing bahan bakar. Penetapan batasan (*constraint*) pada bahan bakar EFB dan *brown fiber* didasarkan pada kondisi balancing dengan kinerja terbaik, serta mempertimbangkan penghematan pasokan bahan bakar yang dibeli dari luar pabrik. Kondisi tersebut terjadi pada periode 27 Januari 2025, yang menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 80,6% sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Pada kondisi balancing yang paling optimal tersebut, massa EFB dan *brown fiber* berada pada 0,00 kg/s dan 0,64 kg/s. Selanjutnya, jumlah bahan bakar lainnya disesuaikan berdasarkan nilai *baseline* pabrik [8] masing-masing bahan bakar dengan tujuan agar efisiensi sistem berada pada rentang optimal operasional pabrik, yaitu 80-85%. Hasil penyesuaian dan pengekanan massa bahan bakar tersebut disajikan dalam Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Data Hasil Optimasi Massa Bahan Bakar

Date	Optimasi Massa Bahan Bakar				
	kg/s				
Target	Coal	Bark	EFB	Sludge	Brown fiber
	<12,73	>17,36	>3,47	>4,62	>8,10
Skenario 1	12,71	17,37	0,00	4,63	0,64
Skenario 2	12,68	23,06	0,00	13,84	0,64
Skenario 3	11,35	28,23	0,00	8,98	0,64
Skenario 4	4,83	26,92	0,00	11,72	0,64
Skenario 5	8,42	17,37	0,00	6,07	0,64
Skenario 6	10,00	18,20	0,00	4,63	0,64
Skenario 7	9,69	17,90	0,00	9,96	0,64
Skenario 8	9,20	17,37	0,00	11,41	0,64
Skenario 9	9,86	18,20	0,00	10,74	0,64
Skenario 10	12,72	24,80	0,00	13,04	0,64
Skenario 11	11,99	27,98	0,00	13,90	0,64

Berdasarkan Tabel 4.7, terlihat bahwa variasi komposisi bahan bakar pada masing-masing skenario menghasilkan perbedaan kebutuhan massa bahan bakar. Nilai EFB dan *brown fiber* dipertahankan konstan sesuai kondisi optimal hasil *balancing*, sementara bahan bakar lainnya disesuaikan untuk mencapai efisiensi sistem yang diharapkan dengan tetap berada di rentang nilai *baseline* nya.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Selanjutnya, efisiensi *boiler* setelah optimasi dihitung kembali dengan metode yang sama seperti tahapan sebelumnya, yaitu dengan membandingkan energi panas masuk dan energi panas keluar, kemudian dinyatakan dalam persen. Hasil perhitungan efisiensi setelah optimasi disajikan dalam Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Data Hasil Perhitungan Efisiensi Setelah Optimasi

Date	Efisiensi Setelah Optimasi		
Target	E <i>input</i> (kj/s)	E <i>output</i> (kj/s)	Efisiensi (%)
Skenario 1	472.677,2	389.599,7	82,4
Skenario 2	564.176,9	465.949,7	82,6
Skenario 3	544.737,4	459.833,3	84,4
Skenario 4	388.981,2	321.444,7	82,6
Skenario 5	374.793,8	310.083,8	82,7
Skenario 6	412.287,2	347.389,3	84,3
Skenario 7	430.799,8	365.612,0	84,9
Skenario 8	422.454,8	358.133,0	84,8
Skenario 9	441.415,5	367.636,8	83,3
Skenario 10	574.087,9	482.935,8	84,1
Skenario 11	584.819,1	496.019,5	84,8

Berdasarkan Tabel 4.8, efisiensi paling optimal diperoleh pada Skenario 7 dengan nilai sebesar 84,9%. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan efisiensi tertinggi pada kondisi *balancing*, yaitu 80,6% yang terjadi pada periode 27 Januari 2025. Meskipun kondisi *balancing* tersebut telah memenuhi batas bawah efisiensi optimal pabrik, namun kebutuhan energi panas masuk pada kondisi tersebut masih relatif lebih besar dibandingkan kondisi setelah optimasi.

Hal ini ditunjukkan oleh energi panas masuk pada kondisi *balancing* yang mencapai 444.546,0 kJ/s, sedangkan pada kondisi optimasi Skenario 7 hanya sebesar 430.799,8 kJ/s. Dengan energi panas masuk yang lebih rendah, kondisi optimasi justru mampu menghasilkan energi panas keluar berupa *steam* yang lebih besar, yaitu 365.612,0 kJ/s, dibandingkan kondisi *balancing* sebesar 358.133,0 kJ/s. Hasil ini menunjukkan bahwa proses optimasi berhasil meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan bakar secara signifikan.

#### 4.4 Perhitungan Performa Bahan Bakar

Pada tahap ini dilakukan evaluasi performa bahan bakar melalui dua parameter utama, yaitu SFC dan HR. Kedua parameter tersebut dihitung dengan menggunakan daya

listrik bersih (Pnett) yang dihasilkan oleh turbin generator, yang dalam penelitian ini hanya berasal dari pembangkit PB3.

Berdasarkan data pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.9, daya listrik bersih yang dihasilkan dari *steam* adalah sebesar 86,8 MW atau 86.800 kW. Nilai daya ini selanjutnya digunakan sebagai *input* utama dalam perhitungan SFC dan HR sesuai dengan persamaan yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan masing-masing parameter disajikan dan dianalisis pada subbab berikut.

#### 4.4.1 Specific Fuel Consumption

Analisis SFC dilakukan untuk mengukur besarnya kebutuhan bahan bakar terhadap energi listrik yang dihasilkan pada setiap skenario operasi. Data yang digunakan meliputi nilai SFC pada kondisi eksisting dan nilai SFC setelah dilakukan optimasi komposisi bahan bakar. Perhitungan SFC dilakukan dengan menggunakan data laju aliran massa bahan bakar serta daya keluaran bersih (Pnett) dari pembangkit.

Tujuan utama dari proses optimasi ini adalah menurunkan konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik yang dihasilkan, sehingga efisiensi pembangkit dapat meningkat. Sebagai dasar perhitungan, terlebih dahulu ditentukan total massa bahan bakar pada kondisi eksisting dan kondisi optimal untuk masing-masing skenario, yang disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Total Massa Bahan Bakar Kondisi Eksisting dan Optimal

Target (kg/MW)	Total Massa Bahan Bakar	
	Kondisi Eksisting (kg/h)	Kondisi Optimal (kg/h)
Skenario SFC 1	172.208,33	127.260
Skenario SFC 2	204.708,33	180.792
Skenario SFC 3	208.958,33	177.120
Skenario SFC 4	165.166,67	158.796
Skenario SFC 5	158.250,00	117.000
Skenario SFC 6	178.041,67	120.492
Skenario SFC 7	185.958,33	137.484
Skenario SFC 8	195.416,67	139.032
Skenario SFC 9	184.250,00	141.984
Skenario SFC 10	201.666,67	184.320
Skenario SFC 11	209.333,33	196.236

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Berdasarkan data pada Tabel 4.9, dapat dilihat perbedaan total massa bahan bakar yang digunakan pada setiap skenario antara kondisi eksisting dan kondisi setelah optimasi. Data ini selanjutnya digunakan sebagai *input* dalam perhitungan nilai SFC.

Sebagai contoh, dengan menggunakan data Skenario SFC 1 pada Tabel 4.9, langkah perhitungan nilai SFC dilakukan sesuai dengan persamaan yang telah ditetapkan sebelumnya. Tahapan perhitungan ini diterapkan secara seragam pada seluruh skenario yang dianalisis.

$$SFC_{Eksisting \text{ skenario } 1} = \frac{172.208,33 \text{ kg} / h}{86.800 \text{ kWh}}$$

$$SFC_{Eksisting \text{ skenario } 1} = 1,98 \text{ kg} / kW$$

$$SFC_{Optimasi \text{ skenario } 1} = \frac{127.260 \text{ kg} / h}{86.800 \text{ kWh}}$$

$$SFC_{Optimasi \text{ skenario } 1} = 1,47 \text{ kg} / kW$$

Hasil perhitungan nilai SFC pada kondisi eksisting dan setelah optimasi untuk masing-masing skenario, beserta selisih perubahan yang terjadi, disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Data Hasil Perhitungan Skenario SFC Sesudah dan Sebelum Optimasi

Target (kg/kW)	SFC Kondisi Eksisting (kg/kW)	SFC Setelah Optimalisasi (kg/kW)	Selisih
Skenario SFC 1	1,98	1,47	0,52
Skenario SFC 2	2,36	2,08	0,28
Skenario SFC 3	2,41	2,04	0,37
Skenario SFC 4	1,90	1,83	0,07
Skenario SFC 5	1,82	1,35	0,48
Skenario SFC 6	2,05	1,39	0,66
Skenario SFC 7	2,14	1,58	0,56
Skenario SFC 8	2,25	1,60	0,65
Skenario SFC 9	2,12	1,64	0,49
Skenario SFC 10	2,32	2,12	0,20
Skenario SFC 11	2,41	2,26	0,15

Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 4.10, nilai SFC pada kondisi eksisting berada pada rentang 1,82-2,41 kg/kWh, sedangkan setelah dilakukan optimasi nilai SFC

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

menurun dan berada pada rentang 1,35-2,26 kg/kWh. Penurunan nilai SFC pada seluruh skenario berkisar antara 0,07 hingga 0,66 kg/kWh, yang menunjukkan adanya peningkatan efisiensi penggunaan bahan bakar setelah proses optimasi diterapkan.

Penurunan nilai SFC terbesar terjadi pada skenario dengan selisih sebesar 0,66 kg/kWh, sedangkan penurunan terkecil sebesar 0,07 kg/kWh tetap menunjukkan adanya perbaikan kinerja dibandingkan kondisi eksisting. Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa optimasi komposisi dan jumlah bahan bakar mampu meningkatkan performa termal pembangkit secara konsisten. Oleh karena itu, kondisi operasi setelah optimasi dinilai lebih efisien dan layak untuk dianalisis lebih lanjut melalui parameter *Heat Rate* (HR).

#### 4.4.2 Heat Rate

Analisis *Heat Rate* (HR) dilakukan untuk mengevaluasi kinerja konversi energi secara menyeluruh, yaitu dengan membandingkan energi panas yang masuk dari pembakaran bahan bakar terhadap energi listrik bersih yang dihasilkan oleh turbin. Nilai HR menjadi indikator penting efisiensi termal pembangkit, di mana nilai HR yang lebih kecil menunjukkan bahwa pembangkit memerlukan energi panas yang lebih rendah untuk menghasilkan jumlah energi listrik yang sama.

Perhitungan HR menggunakan data energi *input* hasil pembakaran bahan bakar dan daya listrik bersih pada masing-masing skenario. Data energi *input* pada kondisi eksisting dan kondisi setelah optimasi disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Data Energi *Input* dan *Output*

Target (kJ/kW)	Energi <i>Input</i> Kondisi Eksisting	Energi <i>Input</i> Setelah Optimalisasi
Skenario HR 1	595.413,91	472.677,18
Skenario HR 2	713.529,53	564.176,89
Skenario HR 3	722.189,03	544.737,37
Skenario HR 4	522.579,52	388.981,22
Skenario HR 5	497.208,76	374.793,82
Skenario HR 6	572.423,23	412.287,21
Skenario HR 7	603.701,92	430.799,80
Skenario HR 8	613.111,38	422.454,80
Skenario HR 9	620.561,37	441.415,54
Skenario HR 10	759.607,08	574.087,88
Skenario HR 11	792.660,24	584.819,07

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Data pada Tabel 4.11 selanjutnya digunakan untuk melakukan perhitungan nilai *Heat Rate* sesuai dengan persamaan yang telah ditetapkan. Sebagai contoh, perhitungan HR dilakukan untuk salah satu skenario, dan metode yang sama diterapkan pada seluruh skenario lainnya.

$$HR_{Eksisting_{skenario1}} = \frac{595.413,91 \text{ kJ} / \text{h}}{86.800 \text{ kWh}}$$

$$HR_{Eksisting_{skenario1}} = 6,86 \text{ kJ} / \text{kWh}$$

$$HR_{Optimasi_{skenario1}} = \frac{595.413,91 \text{ kJ} / \text{h}}{86.800 \text{ kWh}}$$

$$HR_{Optimasi_{skenario1}} = 5,45 \text{ kJ} / \text{kWh}$$

Hasil perhitungan nilai *Heat Rate* pada kondisi eksisting dan setelah optimasi, beserta selisih perubahannya, disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Data Hasil Perhitungan *Heat Rate* Sesudah dan Sebelum Optimasi

Target	HR Kondisi Eksisting	HR Setelah Optimalisasi	Selisih
Skenario HR 1	6,86	5,45	1,41
Skenario HR 2	8,22	6,50	1,72
Skenario HR 3	8,32	6,28	2,04
Skenario HR 4	6,02	4,48	1,54
Skenario HR 5	5,73	4,32	1,41
Skenario HR 6	6,59	4,75	1,84
Skenario HR 7	6,96	4,96	1,99
Skenario HR 8	7,06	4,87	2,20
Skenario HR 9	7,15	5,09	2,06
Skenario HR 10	8,75	6,61	2,14
Skenario HR 11	9,13	6,74	2,39

Berdasarkan data pada Tabel 4.12, seluruh skenario menunjukkan penurunan nilai *Heat Rate* setelah penerapan optimasi komposisi bahan bakar. Pada kondisi eksisting, nilai *Heat Rate* berada pada rentang 5,73-9,13, sedangkan setelah optimasi nilai tersebut menurun menjadi 4,32-6,74. Penurunan nilai *Heat Rate* pada masing-masing skenario berkisar antara

1,41 hingga 2,39, yang menunjukkan adanya peningkatan kinerja sistem konversi energi secara konsisten.

Penurunan nilai HR mengindikasikan bahwa jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik menjadi lebih kecil setelah optimasi dilakukan. Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi pembakaran dan efektivitas pemanfaatan energi panas pada *boiler*. Dengan demikian, hasil analisis HR ini sejalan dengan hasil analisis SFC dan tujuan optimasi, yaitu meningkatkan efisiensi termal pembangkit secara keseluruhan.

#### 4.5 Perhitungan Harga Produksi Bahan Bakar

Tahap selanjutnya adalah perhitungan harga produksi bahan bakar, yang dilakukan untuk membandingkan biaya bahan bakar yang dibutuhkan dalam menghasilkan *steam* pada kondisi eksisting dan kondisi setelah optimasi. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui dampak optimasi bahan bakar terhadap biaya operasional pembangkit.

Pada Tabel 4.13 disajikan kondisi operasi yang digunakan sebagai dasar perhitungan, yaitu kondisi eksisting pada tanggal 27 Januari 2025 serta kondisi optimal berdasarkan Skenario 7 yang telah mencapai rentang efisiensi optimal boiler. Penentuan biaya bahan bakar didasarkan pada harga masing-masing bahan bakar per kilogram yang mengacu pada data harga terbaru, dengan pendekatan nilai Higher Heating Value (HHV) yang setara dan mendekati nilai HHV bahan bakar yang digunakan oleh pihak RAPP. Sementara itu, bahan bakar *bark* dan *sludge* diasumsikan memiliki harga sebesar Rp 0,00/kg karena merupakan pasokan limbah internal perusahaan yang telah tersedia dan siap digunakan, yang berasal dari proses pengolahan air di *Water Treatment Plant* serta unit pengolahan pada pabrik pulp dan kertas. Dengan asumsi tersebut, perhitungan biaya bahan bakar pada kedua kondisi dilakukan secara setara (*apple to apple*) sehingga hasil analisis dapat dibandingkan secara objektif.

Tabel 4. 13 Data Harga tiap Bahan Bakar

Biaya Produksi Bahan Bakar						
Periode		Coal	Bark	EFB	Sludge	Brown Fiber
kondisi eksisting	27 januari 2025	13,46	6,26	0,00	11,69	0,64
kondisi optimalisasi	Skenario 7	9,69	17,90	0,00	9,96	0,64
Harga Setiap bahan bakar (Rp/Kg)		Rp 1.499,00	Rp -	Rp 300,00	Rp -	Rp 1.582,00

Berdasarkan Tabel 4.13, diketahui bahwa setiap jenis bahan bakar memiliki harga per kilogram yang berbeda. Batubara (*coal*) ditetapkan seharga Rp 1.499,00/kg, EFB sebesar Rp 300,00/kg, dan *brown fiber* sebesar Rp 1.582,00/kg, sedangkan *bark* dan *sludge* bernilai Rp 0,00/kg. Nilai harga ini selanjutnya digunakan sebagai *input* dalam perhitungan biaya produksi bahan bakar dengan mengalikan harga per kilogram dan nilai SFC masing-masing bahan bakar.

Nilai SFC masing-masing bahan bakar pada kondisi eksisting dan kondisi optimal disajikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Data Nilai SFC Tiap Bahan Bakar Efisiensi yang Optimal

SFC Masing-masing bahan bakar						
Periode		coal	bark	EFB	sludge	brown fiber
kondisi eksisting	27 januari 2025	0,15508	0,07213	0,00000	0,13468	0,00737
kondisi optimalisasi	Skenario 7	0,11164	0,20622	0,00000	0,11475	0,00737

Perhitungan pada Tabel 4.14 dilakukan dengan metode yang sama seperti perhitungan SFC sebelumnya. Perbedaannya terletak pada data masukan yang digunakan,

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

yaitu laju aliran masing-masing bahan bakar yang dinyatakan secara spesifik terhadap daya bersih keluaran generator *steam* PB3.

Selanjutnya, biaya produksi bahan bakar dihitung menggunakan Persamaan (2.11) dengan mengalikan nilai SFC masing-masing bahan bakar dengan harga per kilogramnya. Untuk mempermudah analisis, hasil perhitungan biaya produksi bahan bakar disajikan pada Tabel 4.15.

$$\begin{aligned}
 B_{eksisting_{batu\ bara}} &= SFC_{batu\ bara} \times H_{bb} \\
 &= 0,15508 \times Rp.1.499,00 \\
 &= Rp.232,46 \\
 B_{eksisting_{bark}} &= SFC_{bark} \times H_{bb} \\
 &= 0,07213 \times Rp.0,00 \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{eksisting_{EFB}} &= SFC_{EFB} \times H_{bb} \\
 &= 0,00000 \times Rp.300,- \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{eksisting_{Sludge}} &= SFC_{Sludge} \times H_{bb} \\
 &= 0,13468 \times Rp.0,00 \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{eksisting_{brown\ fiber}} &= SFC_{brown\ fiber} \times H_{bb} \\
 &= 0,00737 \times Rp.1.582,00 \\
 &= Rp.11,66
 \end{aligned}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\begin{aligned}
 B_{optimasi_{batu\ bara}} &= SFC_{batu\ bara} \times H_{bb} \\
 &= 0,11164 \times Rp.1.499,00 \\
 &= Rp.167,34 \\
 B_{optimasi_{bark}} &= SFC_{bark} \times H_{bb} \\
 &= 0,20622 \times Rp.0,00 \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{optimasi_{EFB}} &= SFC_{EFB} \times H_{bb} \\
 &= 0,00000 \times Rp.300,- \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{optimasi_{Sludge}} &= SFC_{Sludge} \times H_{bb} \\
 &= 0,11475 \times Rp.0,00 \\
 &= Rp.0,00 \\
 B_{optimasi_{brown\ fiber}} &= SFC_{brown\ fiber} \times H_{bb} \\
 &= 0,00737 \times Rp.1.582,00 \\
 &= Rp.11,66
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas agar lebih mudah menganalisa dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 15 Harga Biaya Produksi Bahan Bakar

Harga Ekonomis Keseluruhan						
Periode		coal	bark	EFB	sludge	brown fiber
kondisi eksisting	27 januari 2025	Rp232,46	Rp-	Rp-	Rp-	Rp11,66
kondisi optimalisasi	21 januari 2025	Rp167,34	Rp-	Rp-	Rp-	Rp11,66

Berdasarkan Tabel 4.15, terlihat adanya perbedaan biaya bahan bakar antara kondisi eksisting dan kondisi setelah optimasi. Bahan bakar *bark* dan *sludge* memiliki nilai biaya Rp 0,00 karena berasal dari pasokan limbah internal. Nilai biaya EFB juga bernilai Rp 0,00 karena pada kondisi efisiensi optimal laju aliran EFB bernilai 0,00 kg/s. Sementara itu, biaya bahan bakar batubara (coal) pada kondisi eksisting lebih tinggi dibandingkan setelah

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

optimasi, yang menunjukkan keberhasilan skenario optimasi dalam menurunkan biaya produksi bahan bakar.

Selisih total biaya produksi bahan bakar antara kondisi eksisting dan kondisi setelah optimasi disajikan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Selisih Biaya Produksi Bahan Bakar

Total (per kg/s)	
kondisi eksisting	Rp 244,12
kondisi optimalisasi	Rp 179,01
selisih	Rp 65,12

Berdasarkan Tabel 4.16, total biaya produksi bahan bakar pada kondisi eksisting tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi setelah optimasi. Penerapan skenario optimasi menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp 65,12 per kg dari total kebutuhan bahan bakar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa strategi *balancing* dan optimasi komposisi bahan bakar tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis pembangkit, tetapi juga memberikan dampak ekonomi yang positif melalui penurunan biaya produksi bahan bakar secara keseluruhan.

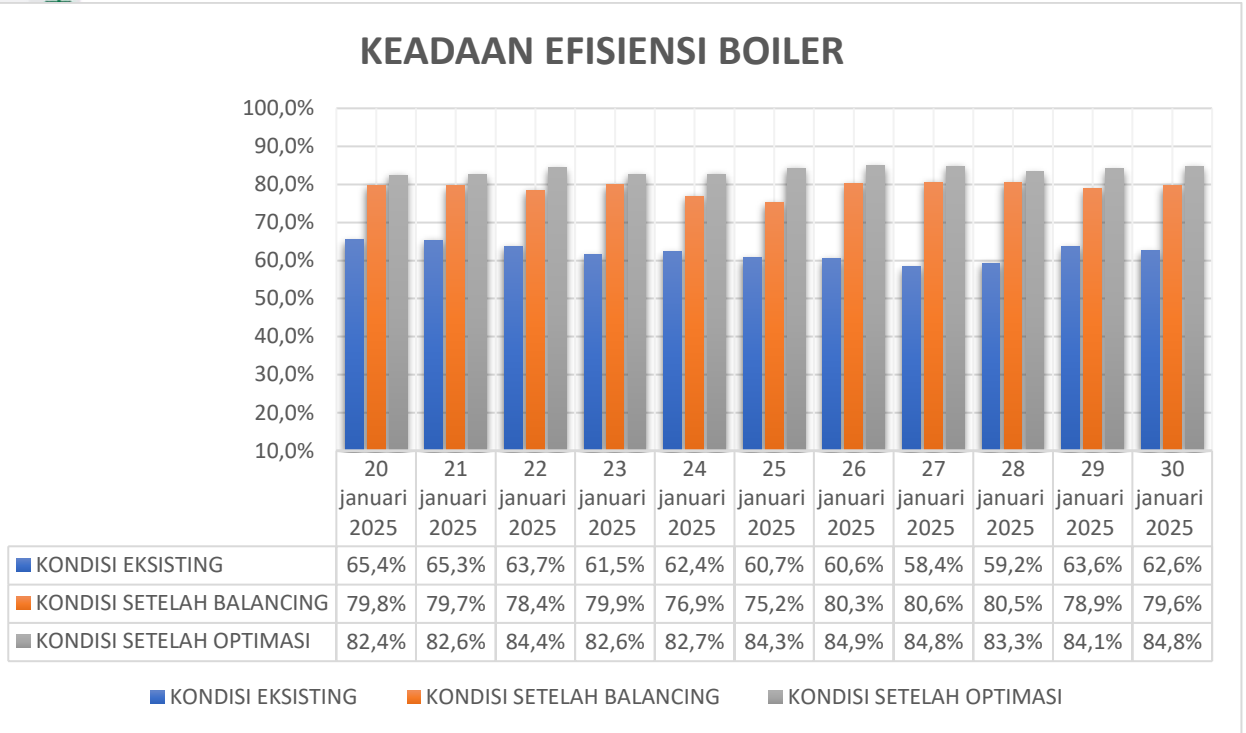
#### 4.6 Hasil Pembahasan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Subbab ini menyajikan rangkuman hasil analisis terhadap seluruh rumusan masalah yang telah dibahas pada bagian sebelumnya. Pembahasan difokuskan pada perubahan karakteristik kinerja sistem yang ditunjukkan melalui perbandingan grafik antara kondisi eksisting dan kondisi setelah penerapan optimasi. Penyajian grafik tersebut bertujuan untuk memperjelas kecenderungan perubahan performa pembangkit sebagai dampak dari optimasi yang dilakukan, tanpa mengulang proses perhitungan yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.

##### 4.6.1 Keadaan Efisiensi *Boiler*

Grafik efisiensi *boiler* digunakan untuk menunjukkan perubahan kinerja *boiler* pada kondisi eksisting, setelah *balancing*, dan setelah optimasi selama periode 20-30 Januari 2025.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 4. 1 Grafik Keadaan Efisiensi *Boiler*

Berdasarkan Gambar 4.1 Grafik Keadaan Efisiensi *Boiler*, terlihat bahwa efisiensi selalu meningkat dari kondisi eksisting, balancing, dan setelah optimasi. Efisiensi pada kondisi eksisting berada pada kisaran 58,41%-65,43%. Rendahnya efisiensi ini berkaitan langsung dengan besarnya energi *input* yang tidak sebanding dengan energi *output* yang dihasilkan, sebagaimana terlihat pada Grafik Energi *Input* dan Energi *Output Boiler*.

Sebagai contoh, pada 27 Januari 2025, efisiensi kondisi eksisting mencapai nilai terendah yaitu 58,41%. Pada hari tersebut, energi *input* sebesar 613.111,38 kJ/s, sedangkan energi *output* hanya 358.132,95 kJ/s. Selisih yang besar antara energi *input* dan *output* menunjukkan adanya kehilangan energi panas yang signifikan di dalam sistem *boiler*.

Setelah dilakukan *balancing* suplai bahan bakar, efisiensi *boiler* pada tanggal yang sama meningkat hingga 80,6%. Peningkatan ini terjadi karena energi *input boiler* menurun, sementara energi *output* relatif tetap. Penurunan energi *input* tersebut berkaitan dengan pengaturan ulang proporsi massa bahan bakar bark, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5, dimana pada 27 Januari 2025 massa bahan bakar tersusun dari *coal* 13,46 kg/s, bark 6,26 kg/s, dan sludge 11,69 kg/s. Komposisi ini menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan mengurangi kelebihan suplai energi panas. Berdasarkan hal tersebut, peningkatan