

Kajian Perhitungan Neraca Energi Pada Unit *Boiler* Untuk Menentukan Kebutuhan Energi (Studi Kasus) di PT. Ciptamas Bumi Selaras – Pabrik Kelapa Sawit Nasal

Zainol Arifin^{1*}, Lia Laila²

^{1,2}Teknologi Pengolahan Sawit, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sains Bandung, Bekasi, Indonesia

Abstrak

Boiler merupakan alat yang memiliki fungsi krusial pada proses produksi di Pabrik Kelapa Sawit (PKS). *Boiler* mengubah air menjadi uap air (*steam*). *Steam* digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik, selain itu *steam* juga digunakan untuk pemanasan dan berbagai proses lain di dalam PKS. Bahan bakar *boiler* menggunakan biomassa yang berupa cangkang (*shell*) dan serabut (*fiber*). Di PKS Nasal, belum ada data perhitungan neraca energi pada *boiler*. Oleh karena itu, diperlukan kajian untuk mengetahui neraca energi pada unit tersebut. Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengetahui neraca energi dan pasokan bahan bakar optimum pada *boiler*. Penelitian ini menggunakan metode observasi lapangan dan teknik pengolahan data kuantitatif deskriptif. Dari pengambilan dan analisis data selama bulan Februari 2023 diperoleh data total energi masuk sebesar $7,95 \times 10^{12}$ kJ, total energi keluar sebesar $1,23 \times 10^{12}$ kJ, dan kehilangan energi sebesar $6,71 \times 10^{12}$ kJ. Dari perhitungan energi tersebut diperoleh efisiensi *boiler* sebesar 80,40%. Pasokan bahan bakar optimum tercapai dengan komposisi serabut 5.850 kg/jam dan cangkang 1.601 kg/jam.

Keywords: *Boiler, neraca energi, bahan bakar*

^{1*} Corresponding author: lia.laila@itsb.ac.id

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Boiler memainkan peran krusial dalam operasional Pabrik Kelapa Sawit (PKS), sering dianggap sebagai "jantung" dari pabrik tersebut. Fungsinya adalah menghasilkan uap yang digunakan dalam proses produksi serta membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik dan perumahan karyawan di sekitarnya^[1]. *Boiler* berbentuk tabung atau bejana menghasilkan *steam* dengan cara memanaskan air hingga menjadi uap^[2]. Untuk memenuhi kebutuhan daya ini, energi yang terkandung dalam bahan bakar seperti serabut (fiber) dan cangkang (shell) kelapa sawit dikonversi menjadi daya yang dibutuhkan.

Biomassa hasil sampingan industri kelapa sawit, seperti cangkang dan serabut, digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada *boiler* di PKS Nasal PT. Ciptamas Bumi Selaras yang berkapasitas 27 ton uap/jam. Di pabrik ini, cangkang menyumbang 6% dan serabut 13% dari TBS (Tandan Buah Segar)^[3]. Nilai kalor spesifik serabut adalah 2.750 kkal/kg, sedangkan cangkang 4.350 kkal/kg^[4].

Energi yang dihasilkan dari proses konversi dalam boiler sering kali tidak seimbang, memaksa perusahaan untuk lebih efisien dalam memanfaatkan sumber energi. Kerugian akibat perpindahan energi perlu dikaji untuk menghitung neraca energi maksimum dan mengidentifikasi penyebab hilangnya energi. Penelitian menunjukkan bahwa boiler sering menjadi penyebab utama kehilangan energi^[5], yang disebabkan oleh penurunan performa atau perhitungan bahan bakar yang tidak akurat. Oleh karena itu, diperlukan perawatan dan perhitungan bahan bakar yang tepat untuk memulihkan performa boiler.

Meski berbagai *maintenance* dilakukan, kesetimbangan energi pada boiler tetap menurun secara bertahap. Akibatnya, operator sering tidak menyadari bahwa kinerja *boiler* telah melemah, sehingga kebutuhan bahan bakar meningkat dan tidak sebanding dengan jumlah uap yang dihasilkan. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan pengambilan data aktual mengenai neraca energi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya melalui metode observasi, kualitatif, dan kuantitatif deskriptif. Panas yang dihasilkan harus sesuai dengan bahan bakar yang digunakan. Oleh karena itu, kajian

perhitungan neraca energi pada unit boiler di PKS Nasal PT. Ciptamas Bumi Selaras menjadi penting untuk menentukan kebutuhan energi yang tepat.

1.2 Tujuan Penelitian

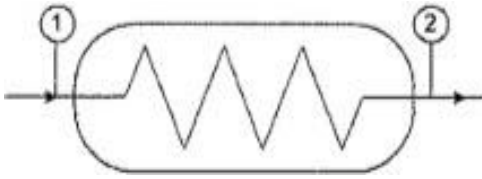
1. Menghitung dan mengetahui setiap nilai energi yang masuk pada unit *boiler* kapasitas 27 ton uap/jam dengan menggunakan campuran bahan bakar *fiber* dan *shell* di PKS Nasal.
2. Menghitung dan mengetahui nilai setiap energi yang keluar pada unit *boiler* kapasitas 27 ton uap/jam dengan menggunakan campuran bahan bakar *fiber* dan *shell* di PKS Nasal.
3. Menghitung dan mengetahui nilai *Supply Steam Consumption* yang dihasilkan boiler kapasitas 27 ton uap/jam dengan menggunakan campuran bahan bakar *fiber* dan *shell*.

1.3 Batasan Masalah

1. Pembahasan Mengenai neraca energi dengan *boiler* beroperasi normal.
2. Bahan bakar (*shell and fiber*) dan air dalam kondisi yang ideal.
3. Kualitas *steam* yang dihasilkan diasumsikan 100%
4. Tidak menghitung perubahan energi potensial uap menjadi energi kinetik.
5. Tidak menghitung perubahan energi kinetik menjadi energi mekanis.

2. Landasan Teori

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat yang berupa tangki/drum/*vessel* tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap atau dengan kata lain mentransfer panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar (baik dalam bentuk padat, cair atau gas) sehingga air berubah wujud menjadi uap. Di dalam *boiler*, energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi panas melalui proses pembakaran dan panas yang dihasilkan sebagian besar diberikan kepada air yang berada di dalam ketel, sehingga air berubah menjadi uap. *Boiler* didukung menggunakan peralatan-peralatan khusus seperti *safety valve*, *sight glass*, *furnace* pembakaran dan alat bantu lainnya^[6]. Skematik *boiler* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik boiler [13]

Dikarenakan, $h_2 > h_1$ energi akan bernilai positif yang menunjukkan energi masuk ke sistem terhadap *massa* bahan bakar dan diserap oleh zat kerja

$$Q = m (h_2 - h_1) \quad 1$$

Dan untuk aliran *massa* tunak

$$m = m_1 + m_2 \quad 2$$

Entalpi

Hukum Pertama Termodinamika berbunyi perubahan energi dalam sebuah sistem tertutup, sama dengan jumlah energi panas masuk ke dalam sistem, dikurangi dengan kerja yang diberikan sistem ke lingkungan sekitarnya^[7]. Dalam banyak analisis termodinamika sering didapatkan penjumlahan dalam U dan perkalian antara tekanan p dengan volume V . Karena penjumlahan $U + pV$ sering muncul. Maka untuk memudahkan diperkenalkan symbol H sebagai entalpi :

$$H = U + pV \quad 3$$

Jenis Aliran Fluida

Bilangan *Reynolds* digunakan untuk menentukan rasio antara gaya inersia terhadap gaya kekentalan khususnya pada bidang mekanika fluida. Nilai yang diperoleh melalui bilangan *Reynolds* merupakan bentuk kuantitas dari hubungan antara kekentalan dan inersia yang diwakili dalam bentuk aliran fluida. Umumnya, bilangan *Reynolds* digunakan untuk menentukan bahwa suatu aliran fluida termasuk ke dalam aliran turbulen atau aliran laminar. Penggunaan bilangan *Reynolds* merupakan akibat dari adanya kemiripan dinamis antara aliran turbulen dan aliran laminar. Kesulitan yang ditemukan ialah pada pola geometri yang mirip meski pada jenis fluida dan laju alir yang berbeda. Keberadaan bilangan *Reynolds* mempermudah penentuan aliran fluida dalam dinamika fluida yang mengalami kemiripan dinamis^[8]. Maka ditulis persamaan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya viskositas}} \quad 4$$

Atau

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad 5$$

Dan

$$= \rho D \cdot A \quad 6$$

Dimana A adalah luas penampang pipa

$$= \pi \cdot r^2 \quad 7$$

Dan V adalah laju alir

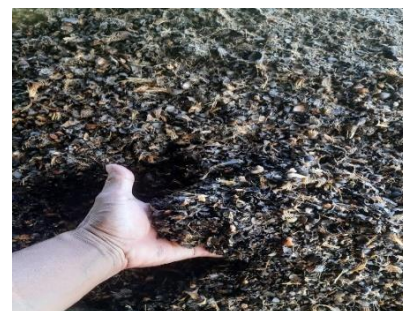
$$v = \frac{Q}{A} \quad 8$$

Untuk mengetahui nilai kalor dari fluida;

$$= m \cdot c_v \cdot \Delta t \quad 9$$

Bahan Bakar

Limbah Pabrik Kelapa Sawit yang berupa serabut dan cangkang dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar *boiler* sebagai penghasil uap yang digunakan untuk penggerak turbin pembangkit tenaga listrik, juga sumber uap digunakan untuk proses pengolahan dan perebusan^[9]. Limbah serabut dan cangkang sawit dapat dimanfaatkan secara optimal untuk peningkatan efisiensi *boiler*^[10], di mana perbandingan pemakaian serabut dan cangkang yang tepat akan mendapatkan pembakaran yang sempurna di dalam *boiler*. Bahan bakar *boiler* dapat dilihat pada gambar 3.(a)



Gambar 3 a. Cangkang (sumber : PKS Nasal)

Efisiensi boiler metode langsung

Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan *steam*) dibandingkan dengan energi yang

terkandung dalam bahan bakar boiler. Metodologi ini dikenal juga sebagai, metode *input-output* karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/output (*steam*) dan panas masuk/input (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi^[12]. Dalam perhitungan efisiensi boiler secara matematis, metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut;

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Energi akumulasi

$$Q_{akumulasi} = Q_{in} + Q_{out}$$

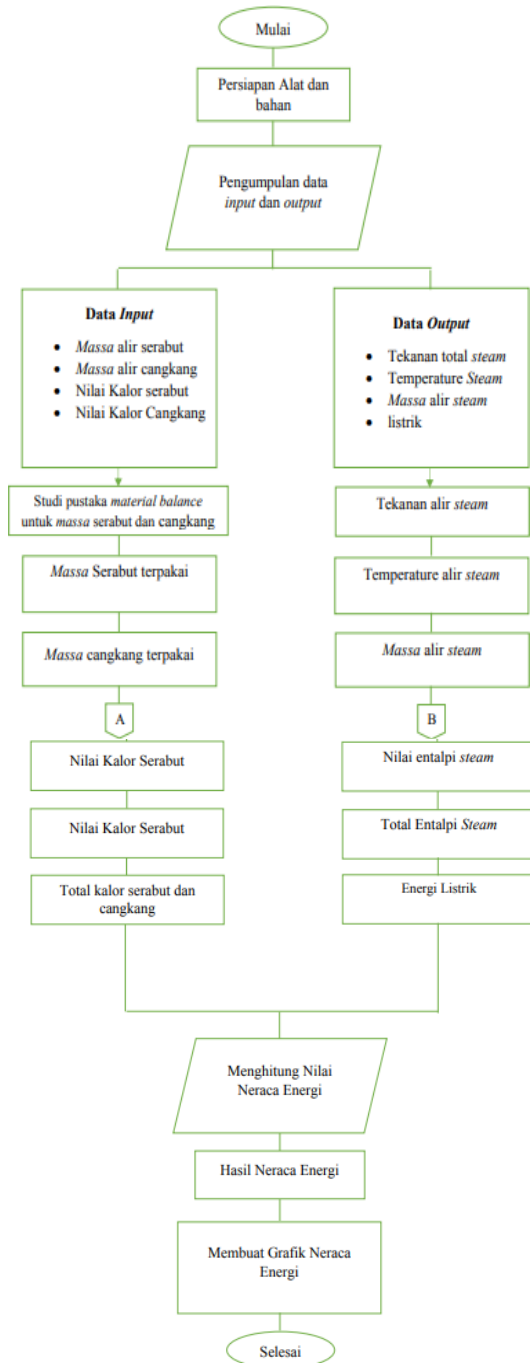
Specific Steam Consumption (SSC)

Konsumsi uap khusus mengacu pada jumlah uap yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan output atau kerja yang berguna. Konsumsi khusus ini biasanya dinyatakan dalam satuan massa per satuan output, misalnya kilogram uap per kilowatt-jam (kg/kWh). Untuk menghitung SSC pada turbine dapat dinyatakan :

$$SSC = Energi listrik \times SSC_{desain} \quad 19$$

3. Metode Penelitian

Dalam memulai penelitian ini, penulis melakukan studi literatur dan observasi lapangan di tempat magang berdasarkan pengalaman yang muncul. Permasalahan yang muncul tersebut kemudian dicari akar penyebab masalah untuk kemudian dapat dirumuskan rekomendasi terbaik atas masalah tersebut. Pada penelitian ini menggunakan metode studi literatur dan observasi lapangan. Data yang diambil adalah data primer dan data sekunder Dan teknik pengolahan data dengan kualitatif deskriptif. Setelah itu, penulis kemudian melakukan persiapan alat dan membuat tahapan penelitian. Tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Tahapan penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengambilan data ini adalah pengambilan data langsung dari observasi lapangan. Data yang diperoleh digunakan sebagai acuan untuk menghitung energi masuk.

4.1 Hasil Pengambilan Data Input

Sebelumnya dijelaskan bahwa persentase cangkang 6% terhadap TBS/ton dan serabut 13% terhadap TBS/ton. Untuk serabut terhadap TBS produksi selama jam olah dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Serabut terhadap TBS produksi

| Februari 2023 | Produksi | Terpakai |
|---------------|-----------|-----------|
| Tanggal | Ton | Ton |
| 2 | 46.080,30 | 46.080,30 |
| 4 | 38.071,40 | 38.071,40 |
| 6 | 35.166,20 | 35.166,20 |
| 7 | 32.946,40 | 32.946,40 |
| 9 | 39.462,10 | 39.462,10 |
| 11 | 37.404,30 | 37.404,30 |
| 14 | 43.728,30 | 43.728,30 |
| 16 | 39.360,30 | 39.360,30 |
| 17 | 28.328,90 | 28.328,90 |
| 20 | 37.693,80 | 37.693,80 |
| 21 | 34.083,20 | 34.083,20 |
| 23 | 40.532,90 | 40.532,90 |
| 25 | 40.585,40 | 40.585,40 |
| 28 | 51.079,10 | 51.079,10 |

Tabel 2 diperoleh dari pengambilan data lapangan saat boiler beroperasi mulai tanggal 02 s/d 28 Februari 2023. Dari penjelasan sebelumnya bahwa serabut digunakan sepenuhnya untuk bahan bakar boiler. Namun, fakta di lapangan saat pengambilan data ini penggunaan serabut tidak sepenuhnya terpakai sehingga terdapat serabut sisa. Dari sisa serabut tersebut nantinya juga tetap akan digunakan sebagai bahan bakar.

Terlepas dari serabut adalah cangkang hasil produksi. Sama halnya dengan serabut, cangkang juga memiliki rasio yang tentunya rasio serabut dan cangkang berbeda. Maka, tabel 3 adalah hasil cangkang terhadap TBS produksi.

Tabel 3. Cangkang terhadap TBS produksi

| Februari 2023 | Produksi | Terpakai |
|---------------|-----------|-----------|
| Tanggal | Ton | Ton |
| 2 | 32.256,21 | 12.156,21 |
| 4 | 26.649,98 | 66.49,98 |
| 6 | 24.616,34 | 48.16,34 |
| 7 | 23.062,48 | 45.62,48 |
| 9 | 27.623,47 | 7.523,47 |
| 11 | 26.183,01 | 6.183,01 |
| 14 | 30.609,81 | 10.609,81 |
| 16 | 27.552,21 | 9.552,21 |
| 17 | 19.830,23 | 4.530,23 |
| 20 | 26.385,66 | 8.385,66 |
| 21 | 23.858,24 | 3.738,24 |
| 23 | 28.373,03 | 6.263,03 |
| 25 | 28.409,78 | 5.409,78 |
| 28 | 35.755,37 | 10.643,37 |

Tabel 3 diperoleh dari pengambilan data lapangan saat boiler beroperasi mulai tanggal 02 s/d 28 Februari 2023. Seperti penjelasan sebelumnya, cangkang tidak sepenuhnya dijadikan bahan bakar. Jadi cangkang sisa produksi yang tidak ikut terbakar dapat dijual untuk menambah omset atau pendapatan perusahaan.

4.2 Nilai Kalor Input

Dalam proses produksi di PKS Nasal dibutuhkan uap panas untuk merebus TBS dan memanaskan mesin-mesin/tangki-tangki agar bekerja dengan optimal. Selain uap panas, PKS Nasal membutuhkan energi listrik untuk menggerakkan motor listrik untuk proses produksi. Jumlah energi listrik yang dibutuhkan cukup besar karena hampir setiap mesin penggeraknya motor listrik. Dengan keadaan tersebut maka sudah sangat tepat jika PKS Nasal mempunyai mesin pembangkit energi uap dan energi listrik (boiler dan Steam turbine). Selain itu, bahan bakar untuk boiler mudah didapat dalam jumlah banyak dari limbah padat proses produksi TBS itu sendiri. Kebutuhan uap dan listrik jumlah berbeda tergantung pada kapasitas olah desain pabrik tersebut. Pada Pabrik Kelapa Sawit Nasal dengan kapasitas olah desain 45 ton TBS/jam umumnya membutuhkan 30 ton

air/jam, 27 ton uap, dan 765 kW setiap jam. Maka dari itu penting untuk mengetahui nilai kalor pada setiap data *input* yaitu serabut dan cangkang. Nilai kalor serabut yang terpakai dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Nilai kalor serabut

| Februari 2023 Tanggal | Nilai Kalor Kilojoule (Kj) |
|--------------------------|-------------------------------|
| 2 | 534.052.262.842,44 |
| 4 | 441.216.194.154,20 |
| 6 | 407.547.891.553,11 |
| 7 | 381.854.768.806,82 |
| 9 | 457.342.046.284,73 |
| 11 | 433.486.340.558,20 |
| 14 | 50.6742.890.233,65 |
| 16 | 456.140.457.232,40 |
| 17 | 328.233.489.906,93 |
| 20 | 436.846.627.799,02 |
| 21 | 395.028.382.807,39 |
| 23 | 469.774.952.695,65 |
| 25 | 470.362.615.807,69 |
| 28 | 592.011.723.943,09 |

Tabel 4 diperoleh dari perhitungan serabut yang terpakai selama *boiler* beroperasi dari tanggal 02 s/d 28 Februari 2023. Pada tabel 4 adalah hasil nilai kalor yang dihasilkan dari jumlah serabut yang terpakai terhadap jam olah. Nilai kalor yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah serabut yang terpakai. Terlepas dari nilai kalor serabut adalah nilai kalor cangkang yang tentunya memiliki energi yang berbeda dengan serabut. Oleh karena itu tabel 5 adalah nilai kalor cangkang.

Tabel 5. Nilai kalor cangkang

| Februari 2023 Tanggal | Nilai Kalor Kilojoule (Kj) |
|--------------------------|-------------------------------|
| 2 | 197.401.412.013,30 |
| 4 | 107.987.229.725,40 |
| 6 | 78.211.244.848,20 |
| 7 | 74.088.880.850,40 |
| 9 | 122.171.597.993,10 |
| 11 | 100.404.229.977,30 |
| 14 | 172.289.839.941,30 |
| 16 | 155.115.759.093,30 |
| 17 | 73.565.181.807,90 |
| 20 | 136.172.468.611,80 |

| | |
|----|--------------------|
| 21 | 60.704.270.035,20 |
| 23 | 101.703.653.151,90 |
| 25 | 87.847.956.779,40 |
| 28 | 172.834.811.720,10 |

Pada tabel 5 adalah hasil kalor yang dihasilkan dari jumlah cangkang yang terpakai selama *boiler* beroperasi dari tanggal 02 s/d 28 Februari 2023. Nilai kalor cangkang berbanding lurus dengan jumlah cangkang yang terpakai.

Pada tabel 5 adalah hasil kalor yang dihasilkan dari jumlah cangkang yang terpakai selama *boiler* beroperasi dari tanggal 02 s/d 28 Februari 2023. Nilai kalor cangkang berbanding lurus dengan jumlah cangkang yang terpakai.

4.3 Laju Alir Air

Laju alir adalah ukuran seberapa cepat suatu substansi (gas, cairan, atau benda padat) bergerak melalui suatu daerah tertentu dalam waktu tertentu. Laju alir sering diukur dalam satuan volume per waktu (m dot), misalnya liter per detik atau meter kubik perjam. Laju alir sangat penting dalam berbagai aplikasi termasuk sistem perpipaan. Penting untuk memahami dan mengukur laju alir untuk mengoptimalkan kinerja sistem dan memastikan operasional yang tepat. Air termasuk fluida yang memiliki laju alir perlu dihitung untuk menentukan jenis aliran terhadap aliran air tersebut. Tabel 6 adalah laju alir air.

Tabel 6. Laju alir air

| Februari 2023 Tanggal | Water Flow Kg/jam | Laju Alir m/s |
|--------------------------|----------------------|------------------|
| 2 | 711.858,30 | 0,64 |
| 4 | 564.513,54 | 0,51 |
| 6 | 758.212,12 | 0,69 |
| 7 | 926.224,71 | 0,84 |
| 9 | 815.271,55 | 0,74 |
| 11 | 697.209,05 | 0,63 |
| 14 | 542.468,84 | 0,49 |
| 16 | 650.515,12 | 0,59 |
| 17 | 650.597,81 | 0,59 |
| 20 | 814.97,95 | 0,74 |
| 21 | 2.262.813,90 | 2,04 |

| | | |
|----|--------------|------|
| 23 | 786.400,84 | 0,71 |
| 25 | 852.954,88 | 0,77 |
| 28 | 1.002.243,64 | 0,90 |

Pada table 6 adalah hasil perhitungan laju alir air dalam hari olah dari jumlah produksi air dalam *massa* dibagi waktu. Nilai *density* dan *viscosity* di atas berdasarkan suhu rata rata air dalam satu hari olah. Nilai *density* digunakan untuk menghilangkan satuan *massa* dibagi waktu menjadi jarak dibagi waktu.

4.4 Nilai Kalor Output (Q_{out} Boiler)

Nilai kalor *output* adalah nilai kalor dari *steam* yang dihasilkan *boiler* saat beroperasi. Dari itu perlu data jumlah *output* aktual yang dihasilkan *boiler*. Jumlah data *output* dapat dilihat pada table 7.

Tabel 7. Jumlah data output

| Februari 2023 | Output | | |
|---------------|----------|-------------|------------|
| Tanggal | Pressure | Superheater | Steam flow |
| | Barg | °C | Ton |
| 2 | 24,61 | 267,25 | 118,75 |
| 4 | 24,26 | 255,11 | 96,66 |
| 6 | 24,58 | 256,7 | 113,60 |
| 7 | 24,50 | 244,25 | 131,16 |
| 9 | 24,38 | 248,90 | 136,00 |
| 11 | 24,29 | 259,50 | 111,20 |
| 14 | 24,21 | 255,63 | 98,00 |
| 16 | 24,28 | 257,40 | 103,90 |
| 17 | 24,58 | 259,57 | 83,42 |
| 20 | 24,48 | 258,11 | 121,88 |
| 21 | 24,47 | 252,90 | 123,60 |
| 23 | 24,15 | 255,81 | 134,09 |
| 25 | 24,30 | 257,91 | 133,33 |
| 28 | 24,43 | 256,66 | 165,26 |

Tabel 7 menunjukkan data output yang diambil secara aktual saat boiler beroperasi dari 2 hingga 28 Februari 2023. Aliran air dan steam, baik dalam hal aliran maupun tekanan, relatif stabil secara kontinu. Bahan bakar yang digunakan adalah campuran serabut dan cangkang, yang masuk ke boiler dalam kondisi ideal dan terus-menerus. Data ini dapat dijadikan acuan untuk menghitung neraca energi.

Secara teori, tekanan *steam* berbanding lurus dengan jumlah bahan bakar yang digunakan

selama boiler beroperasi. Namun, tekanan steam dapat menurun meskipun suplai bahan bakar tetap kontinu. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kevakuman di furnace, pasokan udara, pembersihan kerak sisa pembakaran, dan luas penampang pipa pada main steam.

4.5 Laju Alir Steam

Sama halnya dengan air, *steam* juga termasuk fluida yang memiliki laju alir yang dapat dihitung untuk menentukan jenis aliran terhadap aliran *steam* tersebut. Tabel 9 adalah laju alir *steam*.

Tabel 9. Laju Alir Steam

| Februari 2023 | Steam Flow | Laju Alir |
|---------------|------------|-----------|
| Tanggal | Kg/jam | m/s |
| 2 | 12.019,23 | 0,00014 |
| 4 | 10.068,75 | 0,00012 |
| 6 | 11.474,74 | 0,00013 |
| 7 | 13.806,31 | 0,00018 |
| 9 | 13.229,57 | 0,00017 |
| 11 | 11.982,75 | 0,00014 |
| 14 | 10.051,28 | 0,00011 |
| 16 | 11.634,93 | 0,00945 |
| 17 | 13.390,04 | 0,00012 |
| 20 | 13.802,94 | 0,00016 |
| 21 | 12.459,67 | 0,00016 |
| 23 | 12.673,91 | 0,00016 |
| 25 | 11.563,74 | 0,00016 |
| 28 | 12.500,75 | 0,00019 |

Pada tabel 9 adalah hasil perhitungan laju alir *steam* dalam hari olah dari jumlah produksi *steam* dalam *massa* dibagi waktu. Nilai *density* dan *viscosity* di atas berdasarkan suhu rata rata *steam* dalam satu hari olah. Nilai *density* digunakan untuk menghilangkan satuan *massa* dibagi waktu menjadi jarak dibagi waktu.

4.6. Jenis Aliran Fluida

Bilangan *Reynolds* digunakan untuk menentukan rasio antara gaya inersia terhadap gaya kekentalan khususnya pada bidang mekanika fluida. Nilai yang diperoleh melalui bilangan *Reynolds* merupakan bentuk kuantitas dari hubungan antara kekentalan dan inersia yang diwakili dalam bentuk aliran fluida. Dari hal itu terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai bilang *Reynolds* antara

lain;

1. Kecepatan aliran: Semakin tinggi kecepatan aliran fluida, semakin besar bilangan *Reynolds*-nya. Pada kecepatan aliran tinggi, aliran cenderung bersifat turbulen.
2. Dimensi geometri aliran: Ukuran dan bentuk geometri aliran juga mempengaruhi bilangan *Reynolds*. Semakin besar dimensi karakteristik aliran, seperti diameter pipa, semakin tinggi bilangan *Reynolds*-nya.
3. Kepadatan dan viskositas fluida: Kepadatan dan viskositas fluida mempengaruhi bilangan *Reynolds*. Fluida dengan viskositas rendah, seperti udara, cenderung memiliki bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi daripada fluida dengan viskositas tinggi, seperti minyak atau air yang lebih kental.
4. Sifat aliran: Karakteristik aliran (laminar, transisi, atau turbulen) ditentukan oleh bilangan *Reynolds*. Jika bilangan *Reynolds* rendah, aliran cenderung bersifat laminar (beraturan dan berlapis-lapis). Jika bilangan *Reynolds* meningkat, aliran dapat mengalami transisi menjadi turbulen (*turbulent*), yang ditandai dengan pergerakan acak dan kacau dalam fluida.
5. Suhu dan tekanan: Pada beberapa kasus, suhu dan tekanan dapat mempengaruhi viskositas fluida, yang pada gilirannya akan mempengaruhi bilangan *Reynolds*.

Memahami bilangan *Reynolds* penting karena membantu dalam analisis aliran fluida dan perancangan sistem fluida. Ketika mengerti bilangan *Reynolds* dalam suatu sistem, kita dapat menentukan jenis aliran yang diharapkan terjadi dan memilih ukuran dan tipe perangkat yang sesuai untuk menjaga aliran dalam kondisi yang diinginkan. Tabel 10 adalah jenis aliran fluida pada air.

Tabel 10. Nilai bilangan *Reynolds* air

| Februari 2023 | Water | |
|---------------|------------|------------|
| Tanggal | Re | Keterangan |
| 2 | 140.976,09 | Turbulen |
| 4 | 118.761,65 | Turbulen |
| 6 | 168.402,40 | Turbulen |

| | | |
|----|------------|----------|
| 7 | 203.926,79 | Turbulen |
| 9 | 168.549,65 | Turbulen |
| 11 | 136.637,31 | Turbulen |
| 14 | 117.735,78 | Turbulen |
| 16 | 134.67,66 | Turbulen |
| 17 | 136.709,39 | Turbulen |
| 20 | 172.710,01 | Turbulen |
| 21 | 474.693,29 | Turbulen |
| 23 | 169.224,93 | Turbulen |
| 25 | 174.869,11 | Turbulen |
| 28 | 197.555,13 | Turbulen |

Dan tabel 11 adalah jenis aliran *steam*.

Tabel 11. Nilai bilangan *Reynolds steam*

| Februari 2023 | Steam | |
|---------------|--------|------------|
| Tanggal | Re | Keterangan |
| 2 | 147,68 | Laminer |
| 4 | 123,30 | Laminer |
| 6 | 140,99 | Laminer |
| 7 | 189,43 | Laminer |
| 9 | 179,61 | Laminer |
| 11 | 146,74 | Laminer |
| 14 | 111,54 | Laminer |
| 16 | 140,30 | Laminer |
| 17 | 124,54 | Laminer |
| 20 | 169,45 | Laminer |
| 21 | 169,97 | Laminer |
| 23 | 171,12 | Laminer |
| 25 | 171,33 | Laminer |
| 28 | 198,35 | Laminer |

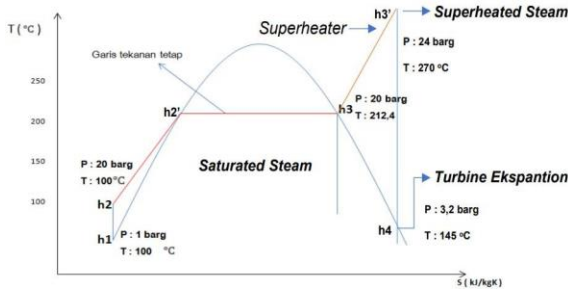
Tabel 10 dan 11 adalah jenis aliran berdasarkan perhitungan nilai bilangan *Reynolds* yang telah diperoleh. Dapat dilihat nilai bilangan *Reynolds* pada air lebih tinggi sehingga bersifat turbulen dibandingkan dengan *steam* lebih rendah sehingga bersifat laminar.

4.6. Neraca Energi

Siklus daya uap adalah siklus *rankine*, pada siklus ini dijelaskan bagaimana uap terbentuk dan berapa jumlah energi yang digunakan untuk menguapkan sejumlah air pada kondisi tertentu. Pada Neraca energi atau neraca *thermal* berguna untuk mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Sebelum memulai perhitungan kita

Research Paper Vol 6, No 1, Tahun 2024

wajib terlebih dahulu mengetahui siklus termodinamika di dalam boiler melalui diagram T-s. Diagram T-s ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram T-s superheated boiler (sumber : ResearchGate.com)

Gambar di atas adalah diagram T-s untuk pembangkit uap Pabrik Kelapa Sawit. Berikut ini penjelasan dari beberapa titik yang harus dipahami untuk dapat menghitung besar energi yang terjadi dalam siklus (enthalpy) :

- h1: adalah kondisi dimana air berada dalam pada tekanan 1 barg dengan temperatur 100 °C.
- h2: Kondisi air baru masuk ke boiler pada tekanan 20 barg namun temperature masih 100 °C
- h3: Semua air telah berubah menjadi uap pada tekanan 20 barg dan temperatur 212,4 °C.
- h3': Kondisi dimana uap diapakanaskan lebih lanjut di Superheater sehingga menjadi uap super panas dengan tekanan 24 barg dan suhunya naik ke 270 °C

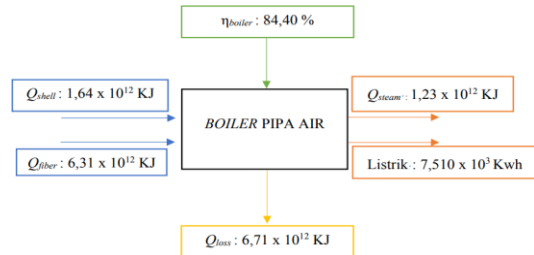
h4: kondisi dimana uap panas telah di ekspansikan oleh turbine sehingga temperaur dan entalpi nya menurun. Untuk mendapat nilai neraca energi (Q_{in} dan Q_{out}) yaitu dengan cara mengkalkulasikan masing masing energi yang sudah diperoleh dari tabel 4, 5, dan 8.

- a. Energi masuk (Q_{in})
: ($Q_{fiber} + Q_{shell}$)
: $6,31 \times 10^{12}$ KJ + $1,64 \times 10^{12}$ KJ
: $7,95 \times 10^{12}$ KJ
- b. Energi keluar (Q_{out})

: (Q_{steam})
: $(1,23 \times 10^{12}$ KJ)

c. Efisiensi boiler
: $\frac{Q_{in}-Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$
 $7,95 \times 10^{12} - 1,23 \times 10^{12}$
: 84,40 %

Perhitungan di atas adalah hasil neraca energi dari hasil pengukuran dan observasi data aktual. Dari nilai tersebut diperoleh efisiensi boiler selama bulan Februari 2023 adalah 80,40 %. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa boiler di PKS Nasal dalam kondisi yang baik, karena secara umum boiler mendapatkan angka efisiensi di antara 55 s/d 65 %. Hasil dari perhitungan di atas disesuaikan dengan sistem yang dipakai untuk kajian neraca energi. Untuk memperjelas hasil dan keseimbangan energi terhadap sistem dapat diilustrasikan dalam gambar 8.



Gambar 8. Sistem neraca energi

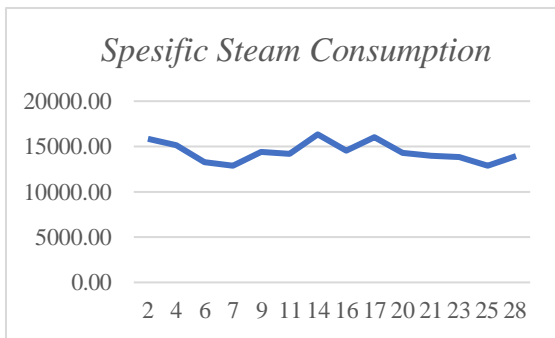
Gambar 8 dijelaskan pada kolom warna biru adalah Q_{in} dengan total energi $7,95 \times 10^{12}$ kJ, kolom warna orange adalah Q_{out} menghasilkan energi $1,23 \times 10^{12}$ kJ dan total energi listrik $7,510 \times 10^3$ kWh, kolom hijau adalah efisiensi boiler yang diperoleh, lalu kolom warna kuning adalah losses energi dari steam yang hilang terhadap Q_{in} $6,71 \times 10^{12}$. Dan kolom hitam adalah sistem di dimana terbentuknya energi energi yang dihasilkan. Dari komponen-komponen di atas merupakan satu kesatuan sistem neraca energi yang saling berkaitan antara satu dengan yang lain yang dimana bagian dari komponen tersebut tidak dapat dihilangkan. Untuk Q_{loss} diupayakan ditekan sekecil mungkin persentasenya agar

Research Paper Vol 6, No 1, Tahun 2024

meminimalisir kekurangan dan kehilangan energi yang sangat besar. Persentase Q_{loss} terhadap Q_{in} adalah : 84,41 % Untuk mengetahui persentase neraca energi boiler dapat dilihat pada gambar grafik 9.

Gambar 9. Grafik neraca energi

Dan *specific steam consumption* dapat dilihat pada gambar grafik 10.



Gambar 10. Grafik specific steam consumption

4.6 Rekomendasi Kebutuhan Bahan Bakar dan Potensi Keuntungan.

➤ Energi Tersedia

- Cangkang : 6 % x 45 ton TBS/jam
: 2,7 ton/jam
- Serabut : 13 % x 45 ton TBS/jam
: 5,85 ton ton perjam
- Air : 30 ton/jam

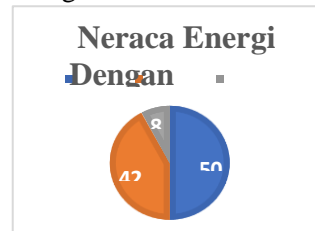
➤ Energi dihasilkan perjam

- Cangkang : 2.700 kg/jam x 4.350 kkal/kg
: 11.745.000 kkal/jam
- Serabut : 5.850 kg/jam x 2.750 kkal/kg
: 16.087.500 kkal/jam
- Total : 27.832.500 kkal/jam

➤ Kebutuhan Energi Perjam

- Entalpi steam 24 barg : 694,77 kkal/kgoc
- Entalpi air pada 80 °C : 80 kkal/kgoc

➤ Dengan efisiensi boiler 80 %, maka



kebutuhan energi :

$$\frac{18.443.100 \text{ kkal/jam}}{80 \%}$$

: 230.538.750 kkl/jam

➤ Kebutuhan bahan bakar perjam

- Serabut diaplikasikan sepenuhnya habis terbakar
: (23.053.875 kkal/jam - 16.087.500 kkal/jam)
: Kekurangan energi : 6.996.375 kkal/jam

➤ Sisa cangkang

: 2.700 kg/jam – 1.601 kg/jam : 1.099 kg/jam

➤ Kebutuhan bahan bakar serabut dan cangkang :

: 5.850 kg/jam + 1.601 kg/jam
: 7.451 kg/jam atau 7,45 ton/jam.

➤ Potensi keuntungan dari

- penghematan cangkang.
: Sisa cangkang : 1.099 kg/jam x 500,-/kg
: 549.500 ,-/jam x 20 jam/hari x 26 hari/bulan
: 285.740.000.00,-/bulan

Dari perhitungan rekomendasi kebutuhan bahan bakar dan energi dapat dilihat potensi keuntungan yang diperoleh sangat besar. Hal ini tentu menjadi perhatian dan perlu penerapan agar keuntungan perusahaan

lebih besar dari penghematan cangkang berdasarkan rekomendasi yang telah dihitung.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada kajian ini. Dengan efisiensi *thermal* 80,40 % untuk *boiler* PKS Nasal dan *specific steam consumption* (SSC) *turbine* shinko PKS Nasal maka diperoleh :

1. Energi masuk pada *boiler* di Pabrik Kelapa Sawit Nasal dengan campuran bahan bakar serabut dan cangkang dapat dilihat pada tabel 11

Tabel 11. Total Energi Masuk

| No | Q_{in} | Kalor |
|----|----------|--------------------------|
| 1 | Serabut | $6,31 \times 10^{12}$ KJ |
| 2 | Cangkang | $1,64 \times 10^{12}$ KJ |
| | Total | $7,95 \times 10^{12}$ KJ |

Tabel 11 menjelaskan bahwa pada bulan Februari 2023 nilai dari energi yang masuk (Q_{in}) ke *boiler* dari campuran bahan bakar serabut dan cangkang adalah $7,95 \times 10^{12}$ KJ.

2. Energi keluar pada *boiler* di Pabrik Kelapa Sawit Nasal dengan Campuran bahan bakar serabut dan cangkang dapat dilihat pada tabel 12

Tabel 12. Total Energi Keluar

| No | Q_{out} | Kalor |
|----|--------------|--------------------------|
| 1 | <i>steam</i> | $1,23 \times 10^{12}$ KJ |

Tabel 12 menjelaskan bahwa pada bulan Februari 2023 nilai dari energi yang keluar (Q_{out}) atau energi yang diproduksi *boiler* dari campuran bahan bakar serabut dan cangkang adalah $1,23 \times 10^{12}$ KJ.

3. Dari hasil perhitungan *Supply Steam Consumption* dapat diketahui bahwa *supply* energi dapat terpenuhi dari *steam* yang

dihasilkan *boiler* di bulan Februari 2023

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada kajian ini. Diperlukan penerapan dari rekomendasi kebutuhan bahan bakar agar efisiensi dan penghematan bahan bakar khususnya cangkang lebih baik serta pendapatan perusahaan dari penghematan cangkang lebih tinggi.

Daftar Pustaka

- [1] Djokoseryardjo, M., J. 1987, Ketel Uap, Jakarta: Pradnya Paramita.
- [2] Mohammed A. Malek 2004 "Power Boiler Design Inspection and Repair". New York : Mc Graw-Hill Professional.
- [3] Ciputra Tbk. 2023. Analaisa material *balance*, Nasal Mill. PT. Ciptamas Bumi Selaras.
- [4] Napitupulu, G. R. dan E. Warman. 2014. Studi kelayakan ekonomis
- [5] El-wakil. 1985. *Power Plant Technology. International Edition*. Singapore : McGraw-Hill.
- [6] Hidayanto, Singgih. 2016. Analisis Performa Water Tube Boiler Kapasitas 115 Ton/Jam di PT. Pertamina Refinery Unit VI Balongan-Indramayu, Skripsi. Semarang. UNNES.
- [7] Moran, M.J. dan Shaparo, H.N, 2004. "Termodinamika Teknik", Jilid 1, Edisi 4, Erlangga, Jakarta.
- [8] Fouz, Infaz (2001), *Fluid Mechanics, Mechanical Engineering Dept.*, University of Oxford, hlm. hlm.96
- [9] Parinduri, L. 2016. Analisa Pemanfaatan *Biomassa* Pabrik kelapa Sawit Untuk Sumber Pembangkit Listrik.
- [10] Djokosetyardjo, M. J. 2003. "Ketel Uap". Edisi Kelima. Penerbit PT.Edisi Pertama. Penerbit CV. Rajawali. Jakarta
- [11] UNEP. 2006 Peralatan Energi Panas *Boiler & Pemanas Fluida Thermis*, Pedoman Efisiensi Energi Untuk Industri Di Asia.
- [12] Pravitasari, Y., Malino, M. B., & Novitasari, M. (2017). Analisis Efisiensi Boiler Menggunakan Metode Langsung. *Prisma Fisika*, 5(01), 9–12
- [13] Qoderi, Yusuf, M. 2017. Analisis Kebutuhan Energi Pabrik Kelapa Sawit Sungai Rungau Mill, Tugas akhir, Bekasi.