

Jurnal Mekanika dan Sistem Termal (JMST)

Journal homepage: <http://e-journal.janabradra.ac.id/index.php/JMST>

Original Article

Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Biomassa Sawit (PLTBS) Kapasitas 5 MW

Ari Wibowo^{1*}

¹ Program Studi Teknik Mesin, Politeknik LPP Yogyakarta, Jl. LPP No1 Yogyakarta 55222

*Corresponding author :

E-mail: ariwibowo.lpp@gmail.com

Abstract –Based on 2014 PLN statistic data, Riau and Riau Island Region peak load reached 261.02 MW, while installed power plant capacity of 166.62 MW capable power only 98.70 MW. This causes frequent rolling blackouts in the Riau city and its surrounding. On the other hand, Riau has huge renewable energy sources derived from oil palm industry. Palm Oil Mill (POM) are scattered throughout the region of Riau, where the plant produces biomass waste called empty fruit bunch (EFB), shell and fiber. These biomass waste especially EFB has very huge potency to be converted to energy. The purpose of this study is to map the potencies of electrical energy generated from the biomass waste produced by two palm oil mills of PTPN V. Lubuk dalam POM and Sei Buatan POM has a very good performance over the last five year, with FFB processed an average over 200.000 ton/year. Biomass samples, then tested in the laboratory to obtain the calorific value. The expected electric power generated then analyzed based on the production data and the caloric value of the biomass waste. The calculation resulting 5 MW electric power can be generated, with only use EFB from both POM as fuel feedstock of the boiler. The biomass power plant based on Rankine Cycle System. Four main equipment in the Rankine cycle, boiler, turbine-generator, condenser and pump, then calculated based on the power generated and availability of feedstock. The biomass power plant system designed with superheated steam with its pressure and temperature of 32 barg 400°C.

Keywords – Power plant, Biomass, Thermodynamic, Palm oil mill

1. Pendahuluan

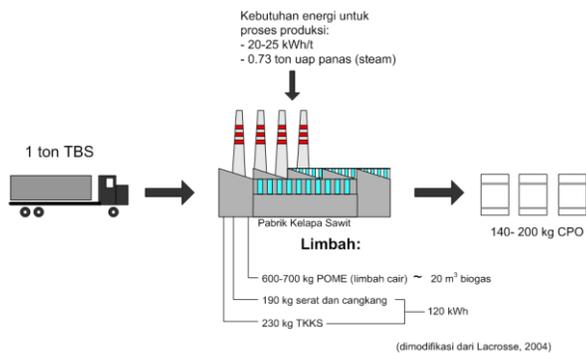
Krisis energi listrik melanda Pulau Sumatera setiap tahun, dengan wilayah Sumatera Utara dan Riau menjadi propinsi dengan kekurangan energi yang cukup parah. Data Statistik PLN 2014 (2015) menunjukkan defisit energi listrik di Wilayah Riau dan Kepulauan Riau, dengan beban puncak tercatat mencapai 261,02 MW, sedangkan kapasitas terpasang pembangkit sebesar 166,62 MW, sementara daya mampu hanya sebesar 98,70 MW. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya pemadaman bergilir yang rutin terjadi di wilayah tersebut (Wibowo, 2015)

Provinsi Riau memiliki Industri perkebunan kelapa sawit yang sangat luas dan memiliki potensi yang cukup besar dalam mendukung kemandirian energi nasional,

karena limbah kelapa sawit ini memiliki kandungan kalori yang cukup tinggi. Setiap 1 ton tandan buah segar (TBS) akan menghasilkan limbah padat berupa serabut (*fibre*) 130 kg (13%), cangkang (*shell*) 65 kg (6,5%), tandan kosong (*empty fruit bunch*) 230 kg (23 %) dan Limbah cair (POME) sekitar 600-700 kg, (60%) (Lacrosse, 2004).

Limbah padat yang dihasilkan oleh Pabrik Kelapa Sawit (PKS) pada umumnya mengalami perlakuan yang berbeda. Seluruh serabut pada umumnya merupakan bahan bakar utama di boiler yang digunakan sebagai sumber energi pada proses pengolahan CPO. Sebagian kecil dari cangkang juga digunakan sebagai bahan bakar boiler, dan masih terdapat sebagian yang tersisa. Pada boiler yang efisien, cangkang masih bisa di hemat atau bahkan tidak

digunakan sama sekali sebagai bahan bakar boiler. Cangkang memiliki nilai ekonomis yang cukup baik, sehingga penghematan penggunaan cangkang akan dapat memberikan tambahan pendapatan bagi PKS. Tandan Kosong merupakan limbah padat yang masih sulit untuk dikelola. Pada proses pengolahan yang lalu, pada umumnya tandan kosong dibakar di incinerator, dan abunya dimanfaatkan sebagai bahan pupuk di lahan. Namun demikian, incinerator telah dilarang digunakan oleh Kementerian Lingkungan Hidup, disebabkan adanya polusi udara pada saat pembakaran limbah. Kondisi tersebut membuat pengolahan tandan kosong dilakukan melalui aplikasi di lahan, dengan cara ditebarkan langsung ke areal kebun kelapa sawit, dengan harapan terjadi pembusukan dan menjadi tambahan pupuk organik bagi tanaman. Hal ini menjadi kendala dengan adanya biaya pengangkutan dan aplikasi ke lahan. Di sisi lain, dengan kondisi tandan kosong yang masih utuh, dan belum berbentuk, sehingga efektifitas pemupukan masih belum teridentifikasi dengan baik.



Gambar 1. Neraca massa pabrik kelapa sawit (Lacrosse, 2004)

Dengan ketersediaan biomassa dalam bentuk tandan kosong dan cangkang sawit tersebut, merupakan potensi yang dimiliki PKS untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Sawit (PLTBS). Teknologi pembangkit menggunakan sistem pembangkit tenaga uap mengikuti siklus Rankine, dengan biomassa digunakan sebagai bahan bakar pembangkit uap di boiler. Dengan demikian perlu dilakukan perancangan sistem pembangkit, untuk masing-masing peralatan utama yang digunakan untuk mendukung PLTBS tersebut.

Dalam perancangan ini diambil studi kasus perancangan sistem pembangkit PLTBS yang didukung oleh dua PKS yang berdekatan yaitu PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan yang terletak di Kabupaten Siak, Riau. Kedua PKS tersebut merupakan unit yang dikelola oleh PT Perkebunan Nusantara V. Jarak kedua PKS kurang lebih sekitar 9 km, sehingga proses pengangkutan bahan bakar masih memungkinkan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan melakukan pengumpulan data-data dari lapangan,

percobaan di laboratorium dan analisis data untuk mendapatkan kesimpulan.

2.1 Metode Pengumpulan Data

Untuk melaksanakan penelitian ini, dilakukan pengumpulan data lapangan dalam bentuk survey dan percobaan di laboratorium. Data lapangan berupa data produksi pabrik PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan, yang terdiri dari data Tandan Buah Segar (TBS) terolah, asal TBS, dan proyeksi produksi TBS. Data produksi tersebut diambil untuk lima tahun terakhir (2011-2015)

Data neraca bahan diambil untuk melihat jumlah limbah yang dihasilkan oleh PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan, khususnya data limbah padat biomassa yaitu tandan kosong, cangkang dan serabut. Untuk mengetahui kandungan energi dari limbah biomassa, maka dilakukan pengujian laboratorium untuk mendapatkan nilai kalor dari tandan kosong, cangkang dan serabut tersebut. Sampel limbah biomassa diambil secara acak, selama penelitian dan kemudian diuji untuk menentukan rerata harga nilai kalor terkandung dalam limbah biomassa.

2.2 Metode Analisis Data

Dari data kuantitatif yang dihasilkan baik data primer dari hasil pengujian maupun data sekunder dari data kinerja pabrik, selanjutnya dianalisis secara kuantitatif untuk mendapatkan nilai potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan dari limbah biomassa yang dihasilkan oleh PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan.

Analisis pertama yang dilakukan adalah analisis ketersediaan bahan bakar untuk pembangkit listrik dari biomassa yang dihasilkan oleh kedua PKS. Analisis dilakukan melalui data-data produksi terolah selama lima tahun terakhir, serta data neraca massa pabrik. Melalui analisis ini diketahui jumlah limbah biomassa tersedia yang mendekati realisasi di PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan.

Analisis kedua adalah analisis potensi energi yang dikandung dalam limbah biomassa. Rangkaian analisis meliputi pengujian laboratorium untuk mendapatkan nilai kalor masing-masing limbah biomassa, yaitu tandan kosong, cangkang dan serabut kelapa sawit. Pengujian nilai kalor dilakukan berdasarkan Hukum I Termodinamika Tertutup, dengan menggunakan alat bom kalorimeter. Selanjutnya dengan menggunakan data hasil analisis ketersediaan bahan bakar, dilakukan analisis potensi energi yang dapat dibangkitkan dengan bahan bakar yang tersedia dari dua pabrik kelapa sawit.

Analisis ketiga adalah perancangan sistem peralatan pendukung pembangkit listrik tenaga biomassa sawit. Dalam tahap ini dilakukan perancangan peralatan-peralatan utama sesuai dengan siklus pembangkit uap Rankine, terutama untuk peralatan Boiler, Turbine, Condenser dan Pompa. Selain itu juga diperlukan peralatan untuk melakukan perlakuan awal terhadap bahan bakar. Hasil analisis ini adalah spesifikasi peralatan-peralatan pendukung PLTBS dengan kapasitas

daya terbangkit sesuai dengan hasil analisis potensi daya terbangkit sebelumnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Proyeksi Produksi Biomassa

Analisis proyeksi produksi biomassa didapatkan berdasarkan produksi TBS terolah dan neraca massa pabrik. PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatn berada di Kabupaten Siak, Propinsi Riau, dengan bahan baku Tandan Buah Segar (TBS) Sawit yang berasal dari kebun sendiri dan dari kebun petani rakyat, baik dalam bentuk petani plasma maupun pembelian langsung.

PKS Lubuk Dalam memiliki kapasitas terpasang 30 ton/jam. TBS diolah selama lima tahun terakhir relatif stabil dengan kapasitas tertinggi didapatkan pada tahun 2013 yaitu sebesar 262.926 ton TBS/tahun. Hal ini menunjukkan PKS Lubuk Dalam sudah mendekati standar untuk pabrik berkapasitas 45 ton/jam sebesar 270.000 ton per tahun. Sumber TBS terolah selama 5 tahun terdiri dari kebun inti, plasma dan pembelian secara total relatif tetap. TBS dari kebun inti menurun sebesar 3%, plasma menurun sebesar 2% dan pembelian meningkat sebesar 8%. Kebun inti berfluktuasi antara 48.928 ton/tahun sampai dengan 65.783 ton/tahun, kebun plasma berfluktuasi dari 127.089 ton/tahun sampai dengan 150.311 ton/tahun sedangkan dari pembelian sebesar 13.157 ton/tahun sampai dengan 66.134 ton/tahun. Dari data tersebut menunjukkan pembelian TBS dari pihak ketiga masih dominan sebagai pemasok bahan baku, sehingga kehandalan pabrik menjadi faktor penting memenangkan persaingan untuk mendapatkan bahan baku.

Berdasarkan data pengolahan di PKS Lubuk Dalam, didapatkan rerata neraca massa dengan prosentase limbah biomassa tandan kosong 22%, Cangkang 6% dan serabut 14%. Tabel 1 menunjukkan data TBS olah dan produksi limbah biomassa di PKS Lubuk Dalam.

Tabel 1. TBS diolah dan Limbah Biomassa di PKS Lubuk Dalam

Jenis Bahan	TBS diolah (Ton)				
	2011	2012	2013	2014	2015
TBS	220.313	244.688	262.926	246.523	223.880
Tankos	48.469	53.831	57.844	54.235	49.254
Cangkang	13.219	14.681	15.776	14.791	13.433
Serabut	30.844	34.256	36.810	34.513	31.343

PKS Sei Buatn memiliki kapasitas terpasang 60 ton/jam, akan tetapi realisasi TBS diolah mendekati realisasi TBS diolah di PKS Lubuk Dalam yang memiliki kapasitas 30 ton/jam. Kapasitas olah tertinggi diperoleh pada tahun 2014, yaitu sebesar 276.670 ton/tahun. Dari data tersebut, PKS Sei Buatn belum dapat memenuhi kapasitas olahnya, dimana untuk PKS 60 ton/jam seharusnya dapat mengolah TBS sebesar 360.000 ton/tahun. Sumber TBS terolah selama 5 tahun terdiri dari

kebun inti, plasma dan pembelian secara total meningkat sebesar 3%. TBS dari kebun inti relatif tetap, plasma meningkat sebesar 2% dan pembelian meningkat sebesar 5%. Kebun inti berfluktuasi antara 83.328 ton/tahun sampai dengan 124.308 ton/tahun, kebun plasma berfluktuasi dari 75.739 ton/tahun sampai dengan 99.735 ton/tahun sedangkan dari pembelian sebesar 24.499 ton/tahun sampai dengan 115.199 ton/tahun. Sama dengan PKS Lubuk Dalam, pembelian TBS dari pihak ketiga masih dominan sebagai pemasok bahan baku, sehingga kehandalan pabrik menjadi faktor penting memenangkan persaingan untuk mendapatkan bahan baku.

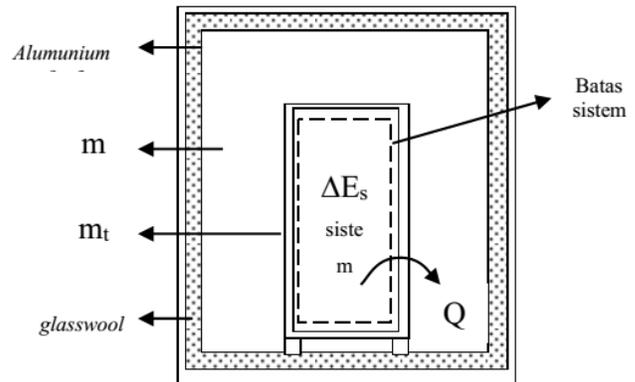
Neraca massa dari data pengolahan di PKS Sei Buatn menunjukkan nilai rerata yang sama dengan neraca massa di PKS Lubuk Dalam, yaitu dengan prosentase limbah biomassa tandan kosong 22%, Cangkang 6% dan serabut 14%. Tabel 2 menunjukkan data TBS olah dan produksi limbah biomassa di PKS Sei Buatn.

Tabel 2. TBS diolah dan limbah biomassa di PKS Sei Buatn

Jenis Bahan	TBS diolah (Ton)				
	2011	2012	2013	2014	2015
TBS	224.546	215.414	270.698	276.670	257.378
Tankos	49.400	47.391	59.554	60.867	56.623
Cangkang	13.473	12.925	16.242	16.600	15.443
Serabut	31.436	30.158	37.898	38.734	36.033

3.2. Potensi Energi Biomassa

Tahap awal dalam analisis ini adalah dilakukan pengujian kandungan energi yang dimiliki oleh masing-masing limbah biomassa dari PKS. Sampel yang digunakan adalah tandan kosong, cangkang dan serabut yang diambil secara acak dari PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatn.



Gambar 2. Analisa termodinamika sistem tertutup dalam Calorimeter Bomb

Penentuan nilai kalor bahan bakar dilakukan berdasarkan pada Hukum I Termodinamika Tertutup, dimana Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa

"Energi adalah Kekal, tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan". Pada kasus ini energi kimia setelah terjadi proses pembakaran akan berubah menjadi energi panas. Energi ini selanjutnya diterima oleh media lain dengan indikasi kenaikan suhu media penyerap energi tersebut. Dalam *Calorymeter Bomb* media penyerap energi kimia bahan bakar adalah air, material bejana sebelah dalam (*bomb*) dan material sebelah luar (*pail*).

Persamaan untuk Hukum I Termodinamika dengan sistem tertutup adalah:

$$\sum E_{dilepas} = \sum E_{diterima} \quad (1)$$

Berdasarkan analisa gambar 2 maka didapat:

$$m_{BB} \cdot HHV_{BB} = C_v \cdot \Delta T - m_{Stimulan} \cdot HHV_{Stimulan} \quad (2)$$

Dimana

$$C_v = (m_a \cdot C_{p_a}) + (m_{tb} \cdot C_{p_{tb}}) \quad (3)$$

Sehingga

$$HHV_{BB} = \frac{C_v \cdot \Delta T - m_{Stimulan} \cdot HHV_{Stimulan}}{m_{BB}} \quad (4)$$

Dengan, $m_{BB} = m_0 - m_1$

dimana:

- m_{BB} : Massa bahan bakar (kg)
- HHV : Nilai kalor pembakaran bahan bakar (kJ/kg)
- m_a : Massa air (kg)
- C_{p_a} : Kalor jenis rata-rata air (= 4,18 kJ/kg.K)
- $C_{p_{tb}}$: Kalor spesifik tabung (= 0,46 kJ/kg.K)
- T_0 : Suhu awal air (°C)
- T_1 : Suhu maksimum air (°C)
- m_0 : Massa bahan bakar sebelum pembakaran (kg)
- m_1 : Massa bahan bakar setelah pembakaran (kg)

Sampel yang di uji adala tandan kosong, cangkang dan serbut kelapa sawiit yang diambil secara acak dari PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan. Khusus untuk tandan kosong, dilakukan pengujian nilai kalor pada kadar air yang berbeda, yaitu kondisi pada kondisi awal (kadar air ±60%) dan kondisi setelah perlakuan (kadar air ±30%). Perlakuan tandan kosong (*EFB Treatment*) diperlukan agar tandan kosong dapat memenuhi kriteria sebagai bahan bakat di boiler. Perlakuan yang dilakukan di lapangan yaitu *shredding* dan *pressing* hingga tandan kosong memiliki bentuk seperti serabut dengan kadar air sekitar 30%. Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian nilai kalor untuk masing-masing sampel.

Selanjutnya dilakukan analisis potensi energi limbah biomassa dengan mengambil data kapasitas olah pada (Tabel 1 dan Tabel 2) dan nilai kalor bahan bakar biomassa. Kapasitas dihitung pada total TBS diolah terendah dalam jangka waktu lima tahun terakhir dengan asumsi potensi daya minimal didapatkan pada kapasitas terendah. Hari

olah dalam setahun adalah 320 hari dan satu hari olah dianggap selama 24 jam mengikuti kinerja pembangkit listrik.

Tabel 3. Hasil pengujian nilai kalor

Sampel	Nilai Kalor (kJ/kg)	
	Lubuk Dalam	Sei Buatan
Tankos (MC60%)	6.675	6.779
Tankos (MC30%)	10.325	10.425
Cangkang	16.563	16.263
Serabut	8.792	8.833

Di PKS Lubuk Dalam, TBS terolah terendah selama lima tahun terakhir diperoleh pada tahun 2011 yaitu sebesar 220.313 ton/tahun, sehingga kapasitas olah per jam dihitung sebagai berikut:

$$Kapasitas \left(\frac{ton}{jam} \right) = \frac{TBS \text{ Terolah}}{(Hari \text{ Olah} \times 24 \text{ Jam})} \quad (5)$$

$$Kapasitas \left(\frac{ton}{jam} \right) = \frac{220.313}{(320 \times 24 \text{ Jam})} = 28,69 \text{ ton/jam}$$

Dengan berdasar neraca massa, maka didapatkan jumlah produksi limbah biomassa per jam sebagai berikut:

- *Tandan kosong*: $22\% \times 28,69 = 6,31 \text{ ton/jam}$
- *Cangkang*: $6\% \times 28,69 = 1,72 \text{ ton/jam}$
- *Serabut*: $14\% \times 28,69 = 4,02 \text{ ton/jam}$

Untuk PKS Sei Buatan dilakukan perhitungan yang sama, pada produksi TBS diolah tahun 2011 sebesar 224.546 ton/tahun, dengan perhitungan sebagai berikut:

$$Kapasitas \left(\frac{ton}{jam} \right) = \frac{224.546}{(320 \times 24 \text{ Jam})} = 29,24 \text{ ton/jam}$$

- *Tandan kosong*: $22\% \times 29,24 = 6,43 \text{ ton/jam}$
- *Cangkang*: $6\% \times 29,24 = 1,75 \text{ ton/jam}$
- *Serabut*: $14\% \times 29,24 = 4,09 \text{ ton/jam}$

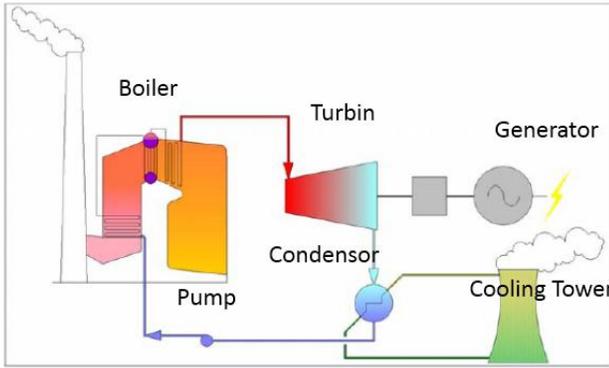
Potensi energi potensi energi yang terkandung merupakan perkalian antara kapasitas dan nilai kalor untuk masing-masing bahan. Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan potensi energi limbah biomassa di PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan.

Tabel 4. Potensi Energi Limbah Biomassa Sawit

Jenis Biomassa	Energi (kJ/jam)	
	Lubuk Dalam	Sei Buatan
Tankos (MC60%)	42.126.000	43.606.000
Tankos (MC30%)	65.162.000	67.057.000
Cangkang	28.507.000	28.529.000
Serabut	35.308.000	36.157.000

3.3. Perancangan Sistem Pembangkit

Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Sawit menerapkan prinsip-prinsip termodinamika dalam bentuk siklus pembangkit uap atau yang biasa disebut siklus Rankine. Dalam sistem pembangkit ini terdapat empat peralatan utama, yaitu boiler, turbin-generator, condenser dan pompa, seperti tampak pada Gambar 2.



Gambar 2. Siklus Pembangkit PLTBS (Harnowo, 2016)

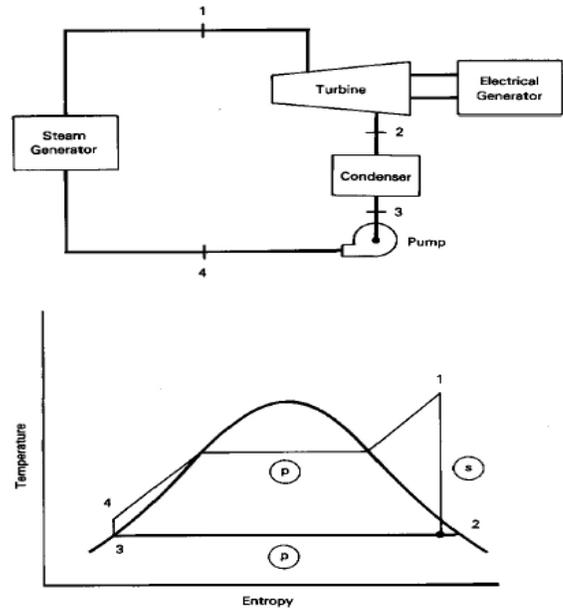
Boiler merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap (penguapan) melalui proses pembakaran bahan bakar di ruang bakar boiler. Uap yang terbentuk dari boiler memiliki tekanan dan temperatur yang tinggi, sehingga memiliki energi yang tinggi. Energi tersebut kemudian diekstrak oleh turbin dan dikonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran dan torsi. Putaran dari turbin tersebut digunakan untuk memutar generator yang menghasilkan energi listrik. Uap yang telah diekstrak energinya oleh turbin menjadi memiliki tekanan yang rendah, yang kemudian didinginkan oleh condenser sehingga kembali ke dalam fasa cair (air). Air tersebut selanjutnya dipompakan kembali ke boiler dengan tekanan yang lebih tinggi. Demikian seterusnya sehingga menjadi sebuah sistem tertutup. Siklus air uap dapat digambarkan dalam diagram T-s seperti pada Gambar 3.

Perancangan sistem pembangkit PLTBS adalah penentuan spesifikasi teknis peralatan-peralatan utama dalam siklus Rankine, dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan bakar dan potensi energi yang telah dianalisis sebelumnya.

A. Boiler

Boiler merupakan peralatan utama sebagai pembangkit uap. Bahan bakar boiler menggunakan limbah biomassa yang tersedia dari sisa pengolahan kelapa sawit di PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan. Dari total limbah biomassa yang tersedia, seluruh serabut dan sebagian cangkang digunakan untuk bahan bakar proses pengolahan CPO. Tandan kosong merupakan biomassa yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pembangkit PLTBS. Dengan asumsi pembakaran tandan kosong harus melalui perlakuan hingga tandan kosong memiliki kadar air 30%, maka potensi energi dari tandan kosong adalah sebesar:

$$\begin{aligned}
 E_{Tankos} &= E_{Tankos\ Lubuk\ Dalam} + E_{Tankos\ Sei\ Buatan} \\
 &= 65.162.000 + 67.057.000\ kJ/jam \\
 &= 132.218.000\ kJ/jam
 \end{aligned}$$



Gambar 3. Diagram T - s Pembangkit (Harnowo, 2016)

Spesifikasi yang pertama ditentukan adalah tekanan dan temperatur uap boiler, yaitu ditentukan tekanan 32 barg dan temperatur 400°C dengan jenis uap *superheated steam*. Sedangkan air masuk boiler ditentukan memiliki temperatur 105°C. Penentuan didasarkan kepada ketersediaan spesifikasi peralatan yang umum dimiliki oleh pabrik. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan kapasitas uap dibangkitkan, dengan menggunakan persamaan efisiensi, yaitu:

$$\eta = \frac{Q (h_1 - h_0)}{E_{BB}} \tag{6}$$

dimana:

- η : Efisiensi boiler (%)
- Q : Kapasitas boiler (kg/jam)
- h_1 : Enthalpy Uap (kJ/kg)
- h_0 : Enthalpy Air (kJ/kg)
- E_{BB} : Energi bahan bakar (kJ/jam)

Enthalpy uap diambil dari data tabel uap (*steam table*) untuk uap *superheated* 400°C, 32 barg, didapat h_1 sebesar 3226,3 kJ/kg. Enthalpy air masuk dihitung pada kondisi cair, temperatur 105°C, 32 barg, didapat h_0 sebesar 442,28 kJ/kg. Dengan mengambil asumsi efisiensi boiler biomassa sebesar 75%, maka kapasitas uap boiler yang dapat dibangkitkan dari bahan bakar tersedia adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{\eta E_{BB}}{(h_1 - h_0)E_{BB}} = \frac{0,75 \times 132.218.000}{(3226,3 - 442,28)} = 35.618 \text{ kg uap/jam}$$

Potensi uap yang dapat dibangkitkan dari bahan bakar tersedia adalah 35.618 kg/jam, sehingga kapasitas boiler ditentukan sebesar 35 ton uap/jam. Dari analisis tersebut, maka spesifikasi boiler ditentukan seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi Boiler hasil rancangan

Keterangan	Spesifikasi
Jenis Boiler	Pipa Air
Tekanan uap	32 barg
Temperatur uap	400 °C
Jenis Uap	Superheated
Temperatur Air	105°C
Efisiensi	75%
Kapasitas uap	35.000 kg/jam
Bahan Bakar	Tandan Kosong
Konsumsi bahan bakar	12,5 ton/jam
Jenis Grate	Reciprocating-water cooled

B. Turbine-Generator

Turbin merupakan peralatan yang mengkonversi energi dari uap dari boiler menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator listrik.

Dengan asumsi bahwa semua aliran masa dan energi yang *steady*, sehingga berlaku hukum konservasi energi, Dengan mendasarkan pada hukum pertama Termodinamika :

$$dQ = dU - dW \tag{7}$$

dimana :

- dQ : kalor yang diterima sistem,
- dU : $U_2 - U_1$ = perubahan energi
- dW : usaha yang dilakukan sistem

Dengan menerapkan konsep diatas bahwa internal energy (U) sebanding dengan entalphy (h) dan Turbin melakukan kerja ekspansi isentropis, maka diperoleh daya turbin uap :

$$W_T = Q (h_1 - h_2) \tag{8}$$

Dimana :

- W_T : Daya Turbin (kW)
- Q : Jumlah uap masuk turbin, kg/detik
- h_1 : Entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)
- h_2 : Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)

Dalam sistem turbin terdapat efisiensi isentropis, dimana selisih entalpy dibandingkan dengan selisih

enthalpy pada kasus ideal isentropis. Persamaan efisiensi isentropis adalah:

$$\eta_s = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \times 100\%$$

Sehingga: $(h_1 - h_2) = \eta_s (h_1 - h_{2s})$

Dimana :

- η_s : Efisiensi Isentropik (%)
- h_1 : Entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)
- h_2 : Entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)
- h_{2s} : Entalpi uap keluar turbin pada kondisi isentropis (kJ/kg)

Dari persamaan (8) dan (9), maka didapatkan daya turbin adalah

$$W_T = Q \eta_s (h_1 - h_{2s}) \tag{10}$$

Kapasitas uap didapat dari kapasitas uap terbangkit, yaitu 35.000 kg/jam. Enthalpy uap masuk adalah enthalpy uap yang dihasilkan boiler pada tekanan 32 barg, temperatur 400°C, yaitu sebesar 3226,3 kJ/kg. Enthalpi isentropik adalah enthalpy pada saat uap keluar turbin dengan kondisi isentropik pada tekanan vaccum 0,5 barg, yaitu sebesar 2395,1 kJ/kg. Dengan asumsi efisiensi isentropik sebesar 70%, maka daya dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_T &= 35000 \cdot 0,7 (3226,3 - 2395,1) \\ &= 20.364.400 \text{ kJ/jam} \\ &= 20.364.400 \times 0,000278 \text{ kWh} \\ W_T &= 5.656 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Daya turbin digunakan untuk menggerakkan generator, dengan asumsi efisiensi generator dan gearbox sebesar 90%, maka potensi daya listrik terbangkit adalah:

$$\begin{aligned} P &= W_T \times 90\% \\ &= 5.656 \times 90\% \\ &= \mathbf{5090,4 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

Tabel 6. Spesifikasi Turbin-Generator hasil rancangan

Keterangan	Spesifikasi
Jenis Turbine	Condensing turbine
Jenis Valve	Multistage
Tekanan uap masuk	32 barg
Temperatur uap masuk	400 °C
Jenis Uap	Superheated
Tekanan uap exhaust	-0,5 barg
Efisiensi isentropik	70%
SSC	6,87
Daya Generator	5 MW

Dengan SSC didapat 6,87 kg/kWh, maka hanya akan didapatkan pada turbin jenis *condensing multistage*. Dari potensi daya yang didapatkan, maka kapasitas turbin-generator dipasang pada daya **5.000 kWh atau 5 MW**. Tabel 6 menunjukkan spesifikasi turbin-generator hasil rancangan.

Selanjutnya dihitung nilai *Specific Steam Consumption* (SSC) untuk menilai efisiensi sistem pembangkit, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{SSC} &= Q/P \\ &= 35.000/5090,4 \\ &= 6,87 \text{ kg uap/kWh} \end{aligned}$$

C. Condenser

Condenser merupakan peralatan yang berfungsi untuk menurunkan suhu uap keluar turbin (*exhaust steam*) sehingga uap berubah fasa menjadi cair berbentuk kondensat pada tekanan vacuum. Dengan proses tersebut akan diperoleh selisih enthalphy yang tinggi antara uap masuk turbin dan uap keluar turbin sehingga dapat menghasilkan daya yang lebih besar untuk menggerakkan generator.

Tipe condenser yang biasa digunakan di pembangkit adalah surface condenser yaitu jenis *shell and tube* yang terintegrasi dengan *cooling tower*. Peralatan lain yang diperlukan adalah steam *ejector* yang berfungsi untuk melepaskan gas – gas yang tidak terkondensasi dalam sistem sekaligus membuat tekanan vacuum pada condenser.

Steam Ejector adalah sebuah pompa yang menggunakan efek venturi dengan membuat nozel convergen dan divergen secara seri. Ejector akan mengkonversi energi tekanan dari uap yang mengalir menjadi energi kinetik yang akan menghasilkan tekanan rendah pada ruang kondenser. Dengan kata lain, fungsi dari ejector adalah sebagai pompa vacuum pada kondenser dengan prinsip venturi.

D. Pompa

Salam sistem siklus pembangkit uap Rankine, pompa memiliki peran melakukan sirkulasi air di dalam siklus. Selain itu, pompa berfungsi meningkatkan tekanan air yang masuk ke dalam drum atas boiler. Spesifikasi pompa pengisi ketel (*Feed Water Pump/FWP*) memiliki karakteristik khusus, yaitu dengan beda tekanan yang tinggi antara sisi hisap dan sisi buang. Pada kasus rancangan ini, pada sisi buang memiliki tekanan hingga 32 barg. Dengan kondisi tersebut, maka diperlukan pompa dengan jenis *multistage* untuk dapat menghasilkan tekanan yang tinggi.

Air yang masuk dan harus dipompakan oleh FWP juga memiliki temperatur yang tinggi, hingga 105°C, dengan demikian diperlukan pemilihan spesifikasi pompa yang sangat ketat agar tidak terjadi kavitasi. Pemilihan jenis pompa harus memperhitungkan NPSH tersedia dan NPSH diperlukan, berdasarkan instalasi perpipaan pompa. Salah satu solusi adalah dengan memberikan gaya tekanan

grafitasi (*lift force*) dengan cara meninggikan sisi hisap hingga berada di atas posisi pompa.

Kapasitas pompa terpasang dihitung 1,5 kali dari kapasitas uap dibangkitkan, yaitu:

$$\begin{aligned} Q_{\text{pompa}} &= 1,5 \cdot Q_{\text{uap}} \\ &= 1,5 \cdot 35.000 \text{ kg/jam} \\ &= 52.500 \text{ kg/jam} = 52,5 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Pabrik Kelapa Sawit memiliki potensi sebagai penghasil energi listrik terbarukan, khususnya dalam bentuk limbah biomassa dari tandan kosong, cangkang dan serabut.
- Kinerja PKS Lubuk dalam dan PKS Sei Buatan cukup bagus, dengan didapatkan kesetabilan TBS diolah selama lima tahun terakhir, dengan rata-rata mengolah diatas 200.000 ton TBS/tahun. Sumber bahan baku TBS sebagian besar didapatkan dari pihak ketiga, sehingga parik harus memiliki kehandalan yang tinggi
- Dari hasil analisis perancangan pembangkit, jika didukung oleh dua PKS Lubuk Dalam dan PKS Sei Buatan, maka akan diperoleh daya terbangkit dari PLTBS sebesar 5 MW. Perhitungan ini menggunakan asumsi pada produksi terendah pada tahun 2011. Jika kemudian jumlah TBS diolah lebih besar, maka potensi daya yang dihasilkan juga akan lebih besar, sehingga analisis daya terpasang 5 MW masih feasible untuk dilaksanakan
- Peralatan-peralatan PLTBS telah dirancang, khususnya peralatan-peralatan kritis dalam proses produksi listrik, seperti boiler, turbin uap dan generator.
- Nilai kalor rata-rata biomassa sawit terdiri dari tandan kosong 6.727 kJ/kg; cangkang 16.413 kJ/kg dan serabut 8.813 kJ/kg.

Daftar Pustaka

- Arieta, F., Teixeira, F., Yanez, E., Lora, E., and Castillo, E. (2007) *Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies*, Biomass Bioenergy, 31, pp. 503-511
- Basiron, Sukaimi, Ngan, Darus, Yusof (1985) *Palm Oil Factory Process Handbook*, Palm Oil Research Institute of Malaysia, Malaysia.
- Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (2004) *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional*
- Harnowo, S. (2016) *Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa Sawit (PLTBS) Pabatu PT Perkebunan Nusantara IV*, Jurnal Mekanika dan Sistem Termal, Vol. 1(1), pp. 14-20.
- International Renewable Energy Agency (2014) *Bio Energy Forum, Bangkok*
- J Dunn (2007) *Thermodynamics Analysis*.
- Lacrosse, L. (2004) *Clean and Efficient Biomass Cogeneration Technology in ASEAN*, COGEN 3 Seminar on "Business Prospects In Southeast Asia For European Cogeneration Equipment", 23 November 2004, Krakow, Poland.
- Lynn Wright, Bob Boundy, Philip G Badger, Bob Periack, Stacy Davia (2009) *Biomass Energy Data Book : Edition 2*, Oak Ridge, Tennessee, US.

- Lynn Wright, Bob Boundy, Philip G Badger, Bob Periack, Stacy Davia (2009) *Biomass Energy Data Book : Edition 2*, Oak Ridge, Tennessee, US.
- Mujeebu and Abdullah (2009) *Biomass Based Cogeneration and Trigeration for Effective Heat Recovery and Waste Management*.
- Mustangin, M. dan Wibowo, A. (2013) *Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Sawit PT Perkebunan Nusantara XIII (Persero) Cluster Kalimantan Timur*, Forum Teknik : Majalah Ilmiah Teknologi, Vol.35, No.2.PLN (2015) *Statistik PLN 2014*. Sekretariat Perusahaan PLN
- Quack, Knoof, Stessen (1999) *Energy From Biomass, review of combustion and gassification*, The International Bank for Reconstruction and Development/THE WORLD BANK, Washington D
- Wibowo, A. (2015) *Analisis Potensi Pembangkit Listrik Biogas Berbasis Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Studi Kasus Pks PT Intan Sejati Andalan, Riau*, Jurnal Teknik Vol. 5 No. 2.