

## ALIRAN TERTUTUP MASSA DAN POTENSI MANDIRI ENERGI PADA PRODUKSI CPO

### CLOSED MASS FLOWS AND ENERGY SELF SUFFICIENCY IN CPO PRODUCTION

Tajuddin Bantacut\* dan Hermaslin Pasaribu

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor  
Kampus IPB Darmaga PO Box 220 Bogor 16002  
Email: bantacuttajuddin@gmail.com

Makalah: Diterima 21 Mei 2015; Diperbaiki 17 Juli 2015; Disetujui 27 Juli 2015

#### ABSTRACT

*Palm oil mill consumes considerable amounts of energy from fossil fuel. The declining of this energy supply in the future becomes a production constraint of palm oil mill. The purposes of this study were to calculate the rational energy needs of CPO production and to assess the energy content of by-products. Mass balance model was developed to illustrate the process flow and to determine the possibility of by-products utilization to meet the energy needs of the mill. The results of the model calculations based on the mill's rational performance showed that the palm oil mill with a capacity of 60 tons fresh fruit bunches/hour produces crude palm oil at 26.80% yield. This production also generated biomass by-products of empty bunches, fiber, shells, and liquid waste as much as 14,265; 4,613; 1,959 and 21,057 kg/hour respectively. These by-products contained potential energy as much as 271,988,317 kJ/hour. This energy met the need of 1,020 kWh electrical energy and 30 tons of steam with an excess of electricity energy of 1,022 kWh. The electricity surplus might be sold to public network or directly distributed to community around the mill. Biomass electricity generation replaced the coal used and potentially cut the green house gas emission. It was concluded that palm oil mill can be a surplus energy production system. Therefore, it is recommended that palm oil mills should be regulated and restricted in using fossil energy and electricity from public network.*

*Keywords: closed production process, energy self-sufficient, mass balance model, oil palm biomass, palm oil mill*

#### ABSTRAK

Pabrik kelapa sawit menggunakan energi dalam jumlah besar yang bersumber dari fosil, maka keterbatasan pasokan di masa mendatang akan menjadi kendala produksi. Tujuan penelitian ini adalah menghitung kebutuhan energi rasional produksi CPO dan mengkaji kecukupan energi melalui pemanfaatan hasil samping. Model neraca massa dikembangkan untuk menggambarkan aliran proses dan kemungkinan memanfaatkan hasil samping untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut. Hasil perhitungan model berdasarkan kinerja rasional, pabrik kelapa sawit yang mengolah 60 ton tandan buah segar/jam dapat menghasilkan *rendemen* sebesar 26,80% dan membentuk hasil samping (biomassa) tandan kosong, serat, cangkang, dan limbah cair masing-masing 14.265; 4.613; 1.959; dan 21.057 kg per jam. Potensi energi yang dapat diperoleh dari pemanfaatan hasil samping tersebut adalah sebesar 271.988.317 kJ/jam. Energi ini dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik pabrik 1.020 kWh dan uap panas 30 ton bahkan menghasilkan kelebihan energi sebesar 1.022 kWh. Surplus energi tersebut dapat memenuhi kebutuhan lain termasuk dijual sebagai produk tambahan sekaligus mengurangi pencemaran gas rumah kaca. Dengan demikian, pabrik CPO dapat surplus energi dengan pemanfaatan hasil samping, sehingga dapat dibatasi atau bahkan dilarang menggunakan bahan bakar fosil dan listrik dari jaringan umum.

Kata kunci: biomassa sawit, sistem produksi tertutup, mandiri energi, model neraca massa

#### PENDAHULUAN

Proses produksi pada pabrik kelapa sawit (PKS) menggunakan energi dalam jumlah yang besar. Energi rata-rata pengolahan per ton tandan buah segar (TBS) adalah 17-20 kWh dan 0,35-0,5 ton uap panas (Chavalparit, 2006; Sommart dan Suneerat, 2011; Vijaya *et al.*, 2008). Permintaan minyak sawit (CPO/*crude palm oil*) terus meningkat sejalan dengan pertambahan permintaan produk olahannya, sehingga akan meningkatkan kebutuhan

energi karena penambahan kapasitas atau pabrik baru di masa mendatang.

Pada proses produksi CPO, sumber energi terbesar yang digunakan berasal dari bahan bakar fosil yang ketersediaannya semakin menurun setiap tahun (Tverberg, 2012). Di Indonesia, total cadangan minyak bumi diperkirakan habis dieksplorasi sekitar 32 tahun lagi (diperbaiki dari perkiraan KESDM 2007). Oleh sebab itu, dalam beberapa tahun ke depan, terbatasnya persediaan bahan bakar fosil akan

menjadi kendala utama proses produksi industri termasuk pabrik kelapa sawit.

Tandan buah segar sebagai bahan baku memiliki kandungan energi yang tinggi yang sebagian belum dimanfaatkan secara optimal atau terbuang ke lingkungan dalam bentuk hasil samping seperti tandan kosong, cangkang, serat, dan limbah cair. Berdasarkan basis kering, tandan kosong kelapa sawit mengandung energi (*heating value*) antara 9,6-19 MJ/kg, cangkang 17-21 MJ/kg, dan serat 4,6-5 MJ/kg (Prasertsan dan Prasertsan, 1996; Husein, 2002; Pleanjai *et al.*, 2007; Kavalek *et al.*, 2012; WURFBR, 2013). Beragam kajian telah dilakukan untuk memanfaatkan hasil samping pabrik minyak sawit tersebut. Tandan kosong kelapa sawit, serat, dan cangkang dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler (Prasertsan dan Prasertsan, 1996; Hassan *et al.*, 2013; Husain *et al.*, 2002; Pleanjai *et al.*, 2007; Kavalek *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2013; WURFBR, 2013). Tandan kosong dan serat dengan kelembaban masing-masing 60-70% dan 17-40% dikeringkan terlebih dahulu sebelum dimanfaatkan sedangkan cangkang dapat langsung dimanfaatkan (WURFBR, 2013; Sing *et al.*, 2010). Limbah cair kelapa sawit dengan sistem kolam anaerobik dapat menghasilkan biogas yang mengandung 40-70% metan (Hassan *et al.*, 2013; Ma, 1999). Penelitian tersebut bersifat parsial sehingga jika disatukan dalam aliran proses terpadu dapat diterapkan sebagai upaya pengembangan sistem produksi mandiri energi. Oleh karena itu, penelitian terhadap sistem terpadu produksi CPO dengan memanfaatkan hasil penelitian tersebut perlu dilakukan.

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan hasil samping PKS untuk memenuhi kebutuhan energi pabrik. Analisis dilakukan dengan mengembangkan model neraca massa yang menghubungkan *input*, produk, dan hasil samping. Dalam penelitian ini, pengembangan model didasarkan pada pendekatan hukum kekekalan massa sebagai dasar perhitungan kecukupan energi pabrik dari pemanfaatan hasil samping. Jika energi yang dapat diperoleh dari optimalisasi dan pemanfaatan hasil samping sama dengan atau melebihi energi yang diperlukan, maka pabrik tersebut dapat dikembangkan sebagai sistem produksi mandiri energi. Sebaliknya, jika energi yang dapat diperoleh lebih kecil dari kebutuhan, maka sistem produksi memerlukan *input* atau tambahan energi dari luar sistem sehingga sistem tersebut bergantung pada tambahan energi dari luar.

Tujuan utama penelitian ini adalah pengembangan rancangan proses produksi pabrik kelapa sawit mandiri energi. Kajian pengembangan sistem aliran proses berdasarkan prinsip-prinsip kesetimbangan massa. Untuk mencapai tujuan ini, langkah-langkah utama yang dilakukan: (1) menganalisis kesetimbangan massa dalam produksi CPO, (2) menghitung potensi rasional energi yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan hasil samping pabrik menggunakan model neraca massa, dan (3)

mengkuantifikasi aliran proses produksi dengan minimal input tambahan dan optimal output untuk mandiri energi.

Penelitian ini difokuskan pada aliran massa pada proses untuk membuat perhitungan kebutuhan energi optimal, analisis potensi energi yang dapat dihasilkan dari hasil samping sebagai dasar perancangan aliran massa dan analisis aliran massa tertutup proses produksi CPO. Penelitian menggunakan basis (referensi) pabrik kelapa sawit yang menghasilkan CPO dan kernel dengan kapasitas 60 TBS/jam. Oleh karena itu, model kesetimbangan massa dan energi fokus dan dibatasi pada pabrik tersebut.

## BAHAN DAN METODE

### Kerangka Pemikiran

TBS mengandung minyak/lemak, serat, cangkang, tandan kosong, yang dapat dikonversi menjadi energi (*materials bearing energy*). Oleh karena itu, pengolahan TBS menjadi CPO dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi yang terkandung di dalamnya. Pada tahap pendahuluan, pemanfaatan hasil samping atau bahan yang belum dimanfaatkan secara optimal digunakan sebagai sumber energi. Apabila tidak mencukupi, maka tahap berikutnya dapat menggunakan sebagian kandungan utama (minyak/lemak) untuk energi.

Kajian dilakukan dengan membuat model kesetimbangan massa berdasarkan hukum kekekalan massa. Hubungan tersebut menunjukkan kuantifikasi massa dalam setiap tahapan proses sehingga diketahui jumlah potensial yang dapat dimanfaatkan dalam sistem produksi. Hasil perhitungan yang diperoleh digunakan untuk mengetahui kecukupan energi pabrik dari pemanfaatan hasil samping. Jika energi yang dapat diperoleh sama dengan atau melebihi energi yang diperlukan, maka pabrik tersebut dapat dikembangkan sebagai sistem produksi mandiri energi dengan rancangan proses tertutup. Sebaliknya, jika energi yang dapat diperoleh tersebut lebih kecil dari kebutuhan, maka sistem produksi memerlukan *input* atau tambahan energi dari luar sistem sehingga sistem tersebut tidak mandiri energi.

### Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengamatan langsung di pabrik CPO di PTPN IV Unit Usaha Adolina di Sumatera Utara antara bulan April-Juni 2014. Data primer meliputi sistem *input-output* proses produksi, kebutuhan energi selama proses, dan sumber energi yang digunakan untuk menggerakkan pabrik. Data sekunder berasal dari studi literatur seperti buku, jurnal nasional dan internasional, laporan penelitian, skripsi, majalah, laporan perusahaan, buku statistik dan sumber elektronik. Data sekunder yang dikumpulkan

meliputi efisiensi setiap tahapan proses produksi CPO, pemanfaatan hasil samping, dan teknologi konversi energi yang digunakan.

### Identifikasi Batas Sistem Produksi dan Neraca Massa

Proses produksi CPO merupakan sistem yang kompleks yang melibatkan banyak faktor dan kendala yang terkait satu sama lain. Faktor dan kendala tersebut adalah masukan (*input*) bahan dan energi, hasil samping, dan kebutuhan energi dalam jumlah besar. Pendekatan komprehensif diperlukan untuk menemukan solusi optimal penggunaan energi dan air. Tahapan proses produksi ditelusuri dan dipilah menjadi kompartemen yang berbasis stasiun atau sub-stasiun. Aliran bahan masuk dan keluar dari setiap kompartemen dihubungkan dengan persamaan linier. Pendekatan dan prinsip kesetimbangan massa menjadi dasar penentuan kompartemen yang menggambarkan alat atau mesin dalam stasiun-stasiun produksi.

### Deskripsi Model

Model neraca massa merupakan gambaran situasi nyata aliran massa dalam proses di PKS. *Input* dalam pemodelan menjadi peubah bebas dan *output* sebagai peubah terikat. Persamaan model menggunakan nisbah (koefisien atau efisiensi) dari nilai peubah terikat dengan menggunakan prinsip persamaan linear.

### Potensi Energi Hasil Samping

Kandungan energi hasil samping dihitung berdasarkan nilai kalor (*heating value*) masing-masing komponen. Nilai kalor didapatkan dari literatur dan massa hasil samping dari perhitungan model neraca massa. Potensi energi dibandingkan dengan kebutuhan energi proses sehingga dapat diperoleh tingkat kemandirian atau tingkat ketergantungan.

Perhitungan potensi energi dilakukan dengan rumus mengacu pada Perry's Chemical Engineers' Handbook 7<sup>th</sup> Edition (Green dan Maloney, 1997):

$$\text{Potensi Energi (kkal)} = \text{Massa (kg)} \times \text{Nilai kalor (kkal/kg)}$$

Massa adalah berat hasil samping (kg) yang dihitung dan nilai kalor adalah kandungan kalori hasil samping tersebut. Metode Perhitungan Total Potensi Uap Faktual (TPUF) dari pembakaran hasil samping menggunakan:

$$\text{TPUF (kg uap panas)} = \frac{\text{Potensi Energi (kkal)}}{669,93 \text{ kkal/kg uap panas}}$$

Nilai konversi tersebut diambil dari Tabel Uap yang menunjukkan kebutuhan energi untuk memproduksi satu kg uap panas pada tekanan 30 bar dan suhu jenuh adalah 2803 kJ/kg setara dengan 669,93 kkal/kg. Metode Perhitungan Uap Faktual yang dihasilkan Boiler (UFB) dan potensi listrik adalah:

$$\text{UFB (kg uap panas)} = \text{TPUF (kg uap panas)} \times 73 \% \text{ (efisiensi boiler rata-rata)}$$

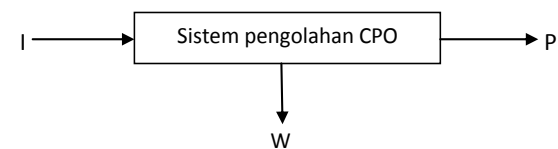
Total Potensi Energi Listrik (TPEL) yang dihasilkan:  $\text{TPEL (kW)} = \text{UFB (kg uap panas)} / 20 \text{ kg uap panas/kW}$ .

Konversi uap panas menjadi listrik pada *single stage conversion turbine* adalah 20 kg uap panas/kW.

### Pemodelan Neraca Massa

#### Model Neraca Massa Sederhana

Model sistem pengolahan CPO sederhana mengasumsikan bahwa produksi CPO dalam satu kompartemen untuk melihat hubungan *input*, produk dan hasil samping (Gambar 1). Untuk perhitungan massa secara kuantitatif, basis perhitungan mengacu pada pabrik dengan kapasitas olah 60 ton TBS/jam. Model ini tidak menggambarkan aliran internal proses, tetapi dapat menunjukkan efisiensi sistem produksi secara umum.



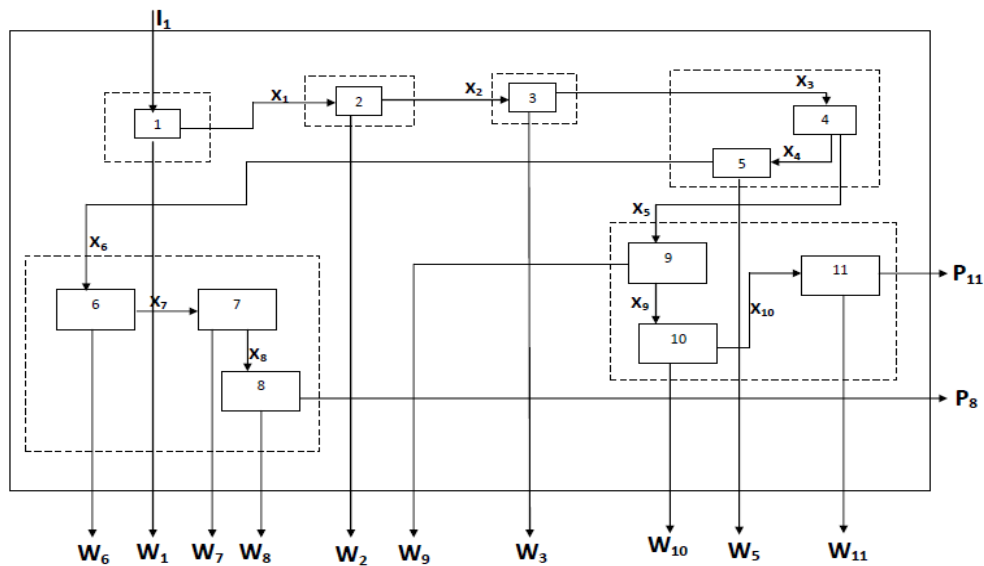
Gambar 1. Model neraca massa sederhana

Keterangan: I= *Input*, P= *Produk*, W= *Waste*, sehingga  $I = P+W$  dan efisiensi (E)=  $P/I$ .

#### Model Neraca Massa Kompleks

Model kompleks menggunakan rincian tahapan proses pada stasiun pengolahan kelapa sawit sebagai kompartemen seperti pada Gambar 2. Kompartemen tersebut adalah stasiun penerimaan buah, stasiun perebusan, stasiun perontokan buah, pengempaan buah, penyaringan kotoran, pemisahan *sludge*, pengurangan kadar air minyak pada *oil purifier*, pengurangan kadar air minyak pada *vacuum dryer*, pemisahan serat, pemisahan cangkang dan pengurangan kadar air kernel.

Model neraca massa kompleks meliputi 23 peubah yang terdiri atas 1 peubah bebas ( $I_1$ ) dan 22 peubah terikat ( $X_1$  sampai  $X_{10}$ ;  $P_8$  dan  $P_{11}$ ; dan  $W_1$  sampai  $W_3$  dan  $W_5$  sampai  $W_{11}$ ). Untuk menyelesaikan persamaan peubah terikat maka diperlukan 22 persamaan yang terdiri dari 11 persamaan kesetimbangan massa dan 11 persamaan efisiensi.



Gambar 2. Model neraca massa kompleks (Keterangan simbol pada Tabel 1)

Tabel 1. Keterangan simbol pada Gambar 2

| Kompartemen (angka dalam kotak) | Keterangan  |
|---------------------------------|---|
| 1                               | Stasiun penerimaan buah   |
| 2                               | Stasiun perebusan   |
| 3                               | Stasiun perontokkan buah  |
| 4                               | Pengempaan buah   |
| 5                               | Penyaringan kotoran   |
| 6                               | Pemisahan <i>sludge</i>   |
| 7                               | Pengurangan air pada <i>oil purifier</i>                                      |
| 8                               | Pengurangan air pada <i>vacuum dryer</i>                                      |
| 9                               | Pemisahan serat   |
| 10                              | Pemisahan cangkang  |
| 11                              | Pengurangan kadar air <i>kernel</i>   |
| <hr/>                           |   |
| <i>Input</i>                    | <i>Produk</i>   |
| $I_1$ = Tandan Buah Segar       | $P_8$ = Minyak ( <i>Crude Palm Oil</i> )<br>$P_{11}$ = Inti ( <i>Kernel</i> ) |
| <hr/>                           |   |
| <i>Hasil Sampung</i>            | <i>Aliran internal</i>  |
| $W_1$ = TBS ditolak             | $X_1$ = TBS yang diolah   |
| $W_2$ = Limbah cair perebusan   | $X_2$ = TBS yang sudah direbus  |
| $W_3$ = TKKS (tandan kosong)    | $X_3$ = Brondolan buah sawit  |
| $W_5$ = Kotoran                 | $X_4$ = Minyak kasar hasil pengempaan   |
| $W_6$ = <i>Sludge</i>           | $X_5$ = Serat buah dan biji   |
| $W_7, W_8$ = Air                | $X_6$ = Minyak kasar hasil penyaringan  |
| $W_9$ = Serat                   | $X_7$ = Minyak kasar <i>CST</i>   |
| $W_{10}$ = Cangkang             | $X_8$ = Minyak kasar dengan kadar air kecil                                   |
| $W_{11}$ = Air                  | $X_9$ = Biji utuh   |
|                                 | $X_{10}$ = Kernel basah   |

Persamaan Keseimbangan Massa:

$$\begin{aligned} \text{Kompartemen 1 : } I_1 - X_1 - W_1 &= 0 \dots\dots\dots(1) \\ \text{Kompartemen 2 : } X_1 - X_2 - W_2 &= 0 \dots\dots\dots(2) \\ \text{Kompartemen 3 : } X_2 - X_3 - W_3 &= 0 \dots\dots\dots(3) \\ \text{Kompartemen 4 : } X_3 - X_4 - X_5 &= 0 \dots\dots\dots(4) \\ \text{Kompartemen 5 : } X_4 - X_6 - W_5 &= 0 \dots\dots\dots(5) \\ \text{Kompartemen 6 : } X_6 - X_7 - W_6 &= 0 \dots\dots\dots(6) \\ \text{Kompartemen 7 : } X_7 - X_8 - W_7 &= 0 \dots\dots\dots(7) \\ \text{Kompartemen 8 : } X_8 - P_8 - W_8 &= 0 \dots\dots\dots(8) \\ \text{Kompartemen 9 : } X_5 - X_9 - W_9 &= 0 \dots\dots\dots(9) \\ \text{Kompartemen 10 : } X_9 - X_{10} - W_{10} &= 0 \dots\dots\dots(10) \\ \text{Kompartemen 11 : } X_{10} - P_{11} - W_{11} &= 0 \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

Persamaan Efisiensi:

Kompartemen 1

Persamaan efisiensi pada penerimaan buah ( $a_1$ )

$$a_1 = \frac{X_1}{I_1} = \frac{\text{TBS yang diolah}}{\text{Tandan Buah Segar}} \dots\dots\dots (12)$$

Berdasarkan pengamatan di lapangan, rata-rata TBS yang tidak layak olah (mentah, rusak, dan sebagainya) sebesar 0,5-1%. Stasiun penerimaan buah merupakan stasiun sebelum dilakukannya pengolahan terhadap kelapa sawit. TBS yang keluar dari stasiun ini minimum 99%, sehingga nilai  $a_1$  adalah 0,99.

Kompartemen 2

Efisiensi pada perebusan buah ( $a_2$ )

$$a_2 = \frac{X_2}{X_1} = \frac{\text{TBS yang sudah direbus}}{\text{TBS yang diolah}} \dots\dots\dots (13)$$

TBS yang keluar dari stasiun rebusan disebut *sterilized fruit bunches* (SFB). DitJend DJPPHP (2006) menyebutkan bahwa SFB yang dihasilkan dari stasiun perebusan yaitu 88,5%, jadi nilai  $a_2$  adalah 0,89.

Kompartemen 3

Efisiensi pada perontokan buah ( $a_3$ )

$$a_3 = \frac{X_3}{X_2} = \frac{\text{Brondolan yang rontok}}{\text{TBS yang sudah direbus}} \dots\dots\dots (14)$$

Bobot brondolan dari tandan buah segar yaitu sebesar 64,5% masing-masing terdiri atas serat dan minyak (*mesocarp*), serta cangkang dan kernel (Pleanjai *et al.*, 2007). Nisbah brondolan dengan SFB yang dirontokkan adalah 0,73, jadi nilai  $a_3$  adalah 0,73.

Kompartemen 4

Efisiensi dalam pengolahan buah ( $a_4$ )

$$a_4 = \frac{X_4}{X_3} = \frac{\text{Minyak kasar hasil pengempaan}}{\text{Brondolan buah sawit}} \dots\dots\dots (15)$$

Minyak kelapa sawit yang berasal dari *screw press* terdiri dari campuran minyak (35-45%), air (45-55%) dan padatan lain dengan proporsi yang

beragam (Singh *et al.*, 2010). Dengan demikian, persentase minyak dengan kadar air tertentu (*crude oil*) terhadap tandan buah yaitu sebesar 50%. Bobot buah brondolan dari tandan buah segar yaitu sebesar 64,5% masing-masing terdiri atas serat dan minyak (*mesocarp*), serta cangkang dan kernel (Pleanjai *et al.*, 2007). Nisbah *crude oil* dengan buah brondolan adalah 0,77 sehingga nilai  $a_4$  adalah 0,77.

Kompartemen 5

Efisiensi penyaringan (tahap awal pemurnian) *crude oil* ( $a_5$ )

$$a_5 = \frac{X_6}{X_4} = \frac{\text{Minyak kasar hasil penyaringan}}{\text{Minyak kasar hasil pengempaan}} \dots\dots\dots (16)$$

Padatan (endapan) dengan proporsi yang beragam selain campuran minyak (35-45%), dan air 45-55% terdapat pada minyak hasil pengempaan (Singh *et al.*, 2010). Endapan pada proses pemurnian sekitar 2-4% terhadap TBS (Chavalparit *et al.*, 2006; Lorestani 2006; Pleanjai *et al.*, 2007) atau setara 5-7% terhadap CPO. Artinya nisbah *crude oil* hasil penyaringan terhadap hasil pengempaan adalah 0,95 maka nilai  $a_5$  adalah 0,95.

Kompartemen 6

Efisiensi pada CST dan *sludge separator* ( $a_6$ )

$$a_6 = \frac{W_6}{X_6} = \frac{\text{Jumlah sludge yang dihasilkan}}{\text{Minyak kasar hasil penyaringan}} \dots\dots\dots (17)$$

Menurut Lorestani (2006), *crude oil* hasil pengempaan (43% terhadap TBS) mengandung *sludge* sebanyak 2 % terhadap TBS. Nisbah *sludge* terhadap total *crude oil* yang dimurnikan adalah 0,05, maka nilai  $a_6$  adalah 0,05.

Kompartemen 7

Efisiensi pada pemurnian minyak ( $a_7$ )

$$a_7 = \frac{X_8}{X_7} = \frac{\text{Minyak kasar dengan kadar air kecil}}{\text{Minyak kasar CST}} \dots\dots\dots (18)$$

Minyak kasar pada proses pemurnian selain padatan adalah sebesar 41% (Lorestani, 2006) mengandung kadar air sisa sekitar 10-12% (Kramandita *et al.*, 2014). Dengan basis ini maka *crude oil* hasil pengurangan kadar air pada *purifier* adalah 31%, sehingga nisbah *crude oil* hasil pengurangan kadar air dengan *crude oil* total ( $a_7$ ) diperkirakan sekitar 0,75.

Kompartemen 8

Efisiensi pada pemurnian minyak ( $a_8$ )

$$a_8 = \frac{P_8}{X_8} = \frac{\text{Jumlah CPO yang dihasilkan}}{\text{Minyak kasar dengan kadar air kecil}} \dots\dots\dots (19)$$

*Crude oil* hasil pengurangan kadar air pada *purifier* adalah 31%. CPO yang terdapat pada TBS sekitar 25% (Ohimain *et al.*, 2013). Nisbah CPO dengan

total minyak yang dimurnikan adalah 0,80. Jadi, nilai  $a_8$  adalah 0,80.

Kompartemen 9

Efisiensi pada *Depericarper* ( $a_9$ )

$$a_9 = \frac{X_9}{X_5} = \frac{\text{Biji utuh}}{\text{Serat buah dan biji}} \dots\dots\dots (20)$$

Persentasi biji utuh dan serat yang dihasilkan terhadap TBS pada pengolahan kelapa sawit sebesar 27%, sedangkan biji utuh yang dihasilkan 13% (Lorestani, 2006), sehingga nisbah dalam pemisahan serat ( $a_9$ ) yaitu 0,48.

Kompartemen 10

Efisiensi pada pemisahan kernel dan cangkang ( $a_{10}$ )

$$a_{10} = \frac{X_{10}}{X_9} = \frac{\text{Jumlah kernel yang dihasilkan}}{\text{Total biji utuh yang diolah}} \dots\dots\dots (21)$$

Persentasi kernel yang dihasilkan pada pengolahan kelapa sawit sebesar 7%, sedangkan biji utuh yang diolah 13% (Lorestani, 2006), maka nisbah dalam menghasilkan kernel ( $a_{10}$ ) adalah 0,54.

Kompartemen 11

Efisiensi pada pengeringan kernel ( $a_{11}$ )

$$a_{11} = \frac{P_{11}}{X_{10}} = \frac{\text{Jumlah kernel kering yang dihasilkan}}{\text{Total kernel yang dikeringkan}} \dots\dots\dots (22)$$

Persentase kernel terhadap TBS yang dihasilkan pada pengolahan kelapa sawit adalah 7%, dengan kadar air 1% (Lorestani, 2006), maka nisbah dalam menghasilkan kernel kering ( $a_{11}$ ) adalah 0,86.

Berdasarkan uraian di atas, faktor efisiensi dari persamaan dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai faktor atau nisbah ini digunakan sebagai koefisien dalam perhitungan peubah terikat menggunakan *Microsoft Excell*.

Tabel 2. Faktor efisiensi model kompleks

| Simbol   | Nilai |
|----------|-------|
| $a_1$    | 0,99  |
| $a_2$    | 0,89  |
| $a_3$    | 0,73  |
| $a_4$    | 0,77  |
| $a_5$    | 0,95  |
| $a_6$    | 0,05  |
| $a_7$    | 0,75  |
| $a_8$    | 0,80  |
| $a_9$    | 0,48  |
| $a_{10}$ | 0,54  |
| $a_{11}$ | 0,86  |

**Keluaran Model Neraca Massa**

*Neraca Massa Sederhana*

Basis perhitungan neraca massa sederhana berdasarkan kapasitas olah pabrik 60 ton TBS/jam.

Neraca massa ini (seperti pada Tabel 3) menunjukkan bahwa *rendemen* CPO yang dihasilkan adalah 26,15%. Nilai tersebut berada pada kisaran terbaik yaitu 22-28% (Wijbrans dan Zupthen, 2011; Ohimain *et al.*, 2013). Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa peningkatan produksi CPO masih dapat dilakukan melalui perbaikan efisiensi proses. Perhitungan yang lebih rinci akan memperlihatkan aliran internal dan perbaikan efisiensi tersebut.

Tabel 3. Hasil perhitungan model sederhana

| Komponen                   | Model Level I |
|----------------------------|---------------|
|                            | Massa (kg)    |
| <i>Input</i>               | 60.000        |
| Produk                     |               |
| Kernel                     | 3.600         |
| CPO                        | 15.690        |
| Total                      | 19.290        |
| Hasil Samping              | 40.710        |
| <i>Rendemen</i> minyak (%) | 26,15         |

Hasil perhitungan secara umum juga menunjukkan jumlah hasil samping yang dibentuk selama proses produksi. Secara keseluruhan hasil samping yang terbentuk tersebut sekitar 67,85% dari total input (TBS yang diolah). Namun demikian, perhitungan ini hanya bersifat garis besar dalam satu kompartemen sehingga perlu dirinci menjadi aliran massa yang mendekati proses faktual pada pabrik.

*Neraca Massa Kompleks*

Neraca massa kompleks adalah pengembangan dari neraca massa sederhana untuk menunjukkan aliran massa yang lebih rinci sehingga aliran massa terlihat lebih jelas. Hasil model kompleks secara umum dapat dilihat pada Tabel 4. Rendemen CPO yang dihasilkan adalah 26,80%, sedikit lebih besar dibandingkan perhitungan model sederhana dan aktual pabrik. Perbedaan ini disebabkan karena (i) perhitungan yang lebih rinci menghilangkan pembulatan angka hasil samping, (ii) aliran internal merinci setiap proses sehingga nisbah input output setiap tahapan dapat memperbaiki perhitungan, dan (iii) angka nisbah dipilih yang paling rasional optimal.

Tabel 4. Perbandingan hasil model kompleks dengan aktual pabrik

| Komponen                   | Model Kompleks | Faktual Pabrik |
|----------------------------|----------------|----------------|
|                            | Massa (kg)     |                |
| <i>Input</i>               | 60.000         | 60.000         |
| Produk                     |                |                |
| CPO                        | 16.081,61      | 15.007         |
| Kernel                     | 1.977,40       | 3.600          |
| Hasil samping              | 41.940,99      | 42.262         |
| <i>Rendemen</i> minyak (%) | 26,80          | 25,01          |

Dari perhitungan ini, pabrik secara rasional dapat memperbaiki efisiensi sehingga mengurangi limbah yang dihasilkan untuk meningkatkan *rendemen*. Perbandingan hasil model kompleks dengan aktual pabrik menunjukkan peluang peningkatan *rendemen* sebesar 7,2%. Perbaikan ini akan meningkatkan keuntungan ekonomis dan pengurangan limbah secara nyata. Perhitungan berikutnya akan menggunakan hasil dari model kompleks ini. Aliran massa proses produksi yang lebih efisien dapat dilihat pada Gambar 3.

*Pemanfaatan Hasil Samping untuk Pembangkit Energi*

Kandungan Energi

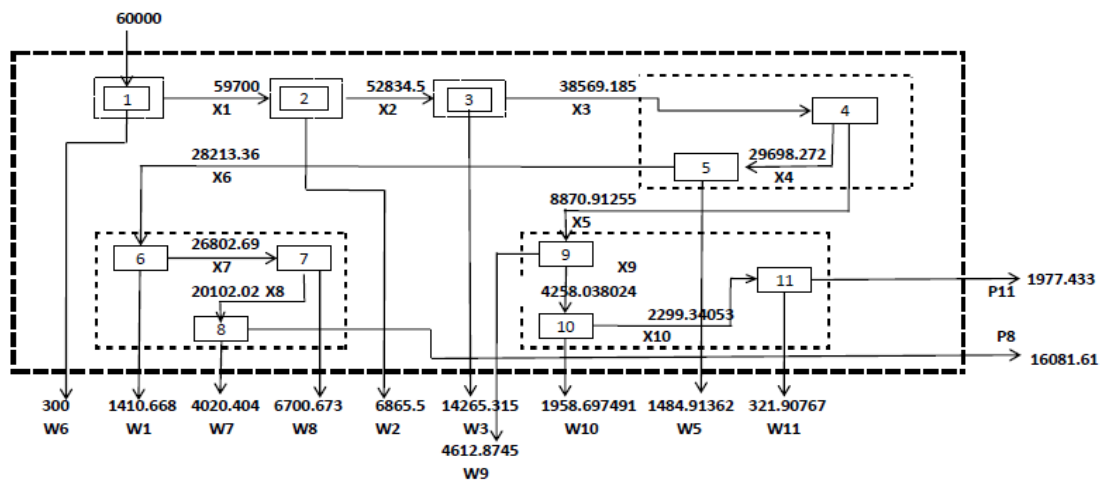
Hasil samping industri minyak sawit berupa limbah padat (biomassa) yakni cangkang, serat, dan tandan kosong kelapa sawit dan limbah cair. Beberapa kajian telah dilakukan terhadap pemanfaatan biomassa tersebut (Rusdhan *et al.*, 2007; Yong, 2007; Singh *et al.*, 2010; Ahmad *et al.*, 2011; Pattanapangchai dan Limmeechokchai, 2011; Singh *et al.*, 2013). Pemanfaatan yang paling prospektif adalah sebagai sumber energi. Selain biomassa padat, limbah cair juga potensial sebagai sumber energi. Limbah cair pabrik kelapa sawit dapat menghasilkan biogas yang terdiri dari gas metan yang merupakan penyebab pemanasan global (Begum dan Mohd, 2013). Limbah cair tersebut terutama berasal dari pemurnian minyak (60%), perebusan tandan buah segar (36%), dan *hydrocyclone* (4%) (Ma, 2000). Tabel 5

menunjukkan kandungan kalori komponen kelapa sawit.

Karakteristik Hasil Samping Industri Minyak Sawit Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Setiap produksi satu ton CPO diperlukan 5,8 ton tandan buah segar dan menghasilkan tandan kosong kelapa sawit setara 20-28,5% (Pleanjai *et al.*, 2004; Lorestani, 2006; Kavalek, 2012; Embrandini *et al.*, 2013). Alam *et al.* (2008) menambahkan bahwa TKKS mewakili 9% total produksi limbah padat kelapa sawit. Tandan kosong kelapa sawit, berdasarkan basis bobot kering mengandung bahan organik yang terdiri atas N, P, K dan Mg masing-masing 0,8%, 0,1-0,7%, 2,4-2,8%, dan 0,2-0,8% (Baharuddin *et al.*, 2009). Oleh sebab itu, TKKS dapat digunakan sebagai pupuk organik yang dapat langsung disebar ke lahan atau dengan terlebih dahulu diinsenerasi (Singh *et al.*, 2010). Selain itu, tandan ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pulp dan industri kertas (Law dan Jiang, 2001; Rusdhan, 2007; Singh *et al.*, 2013).

Pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan dilakukan dalam rangka pengurangan ketergantungan terhadap minyak bumi. Sebagai bahan bakar *boiler*, TKKS dengan kelembaban 60-70% harus dikeringkan terlebih dahulu sebelum digunakan (Singh *et al.*, 2010). Energi pada TKKS sebesar 2.294 kkal/kg sehingga dari pabrik 60 ton dapat diperoleh 32.724.633 kkal.



Gambar 3. Aliran massa dalam proses (model kompleks) (keterangan simbol pada Tabel 1)

Tabel 5. Kandungan kalori komponen tandan buah segar kelapa sawit

| Komponen              | Persentase (%) | Nilai Heating Value (kkal/kg) | Referensi   |
|-----------------------|----------------|-------------------------------|---|
| TKKS                  | 20-28,5        | 2.294                         | Prasertsan dan Prasertsan 1996; Pleanjai <i>et al.</i> , 2007 |
| Serat                 | 10-15          | 4.589                         | Prasertsan dan Prasertsan 1996; Husein <i>et al.</i> , 2002   |
| Cangkang              | 5-7            | 5.114                         | Prasertsan dan Prasertsan 1996; Husein <i>et al.</i> , 2002   |
| CPO                   | 22-28          | 9.465                         | Wijbrans dan van Zupthen 2011; Ohimain <i>et al.</i> , 2013   |
| Kernel                | 4-7            | 9,6                           | Nasution <i>et al.</i> , 2014                                 |
| Air dan <i>sludge</i> | 25-34          |                               | Nasution <i>et al.</i> , 2014                                 |

Serat Kelapa Sawit

Komposisi berdasarkan bobot kering serat kelapa sawit terdiri dari N, P, K, Mg, dan Ca masing-masing 0,29-1,4%, 0,07-0,08%, 0,47-1,18%, 0,02%, dan 0,11% (WURFBR, 2013; DJPPHP, 2006). Selain itu, serat kelapa sawit juga mengandung komponen biokimia berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin masing-masing 34,5%, 31,8%, dan 25,7% (DJPPHP, 2006). Komposisi serat tersebut memberi peluang industri pembuatan papan partikel (Wan dan Law, 2011).

Serat kelapa sawit merupakan bahan bakar utama yang digunakan untuk boiler sebelum cangkang dan tandan kosong kelapa sawit dengan kandungan energi 4.589 kkal/kg (Prasertsan dan Prasertsan, 1996; Husein, 2002; Pleanjai *et al.*, 2007) sehingga dari pabrik 60 ton dapat diperoleh energi 21.168.481 kkal. Serat tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik. Sebelum dimanfaatkan, perlu dilakukan pengeringan terlebih dahulu karena serat masih mengandung kelembaban 17-40% (WURFBR, 2003).

Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang kelapa sawit dihasilkan melalui proses pemecahan biji pada stasiun pemisahan cangkang. Komposisi biokimia cangkang kelapa sawit berdasarkan bobot kering terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin masing-masing 20,8%, 22,7%, dan 50,7%. Komposisi unsur utama pembentuk cangkang yaitu N, P, K masing-masing 0,3-0,6%, 0,01%, 0,15% (WURFBR, 2013), serta C, H dan O masing-masing 46,75%, 5,92% dan 37,97 (Okorewigwe *et al.*, 2014). Oleh karena itu,

cangkang dapat dimanfaatkan sebagai arang, karbon aktif dan papan partikel (Bantacut *et al.*, 2013; Tim PT. SP, 2000).

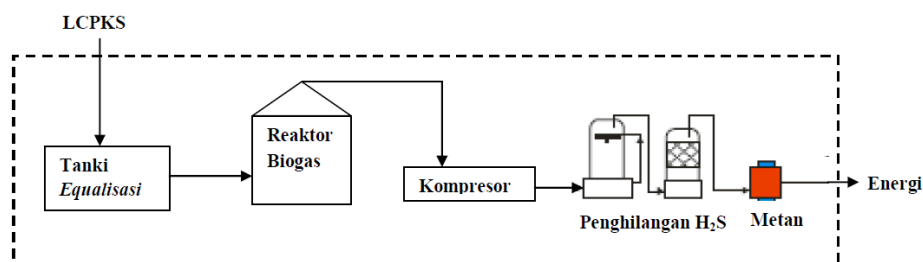
Kegunaan utama cangkang kelapa sawit adalah sebagai bahan bakar boiler karena kandungan energinya mencapai 5.114 kkal/kg (Prasertsan dan Prasertsan, 1996; Husein, 2002; Pleanjai *et al.*, 2007; Kavalek *et al.*, 2012). Dengan demikian, pabrik dengan kapasitas olah 60 ton dapat menghasilkan energi dari cangkang sebesar 10.016.779 kkal. Kandungan K dan Cl cangkang sawit yang rendah membuat debu hasil pembakaran lebih sedikit (WURFBR, 2013).

Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS)

LCPKS merupakan suspensi koloid yang terdiri atas 95-96% air, 0,6-0,7% minyak, 4-5% padatan total yang diataranya 2-4% padatan tersuspensi (Mohammad *et al.*, 2008). LCPKS mengandung bahan organik yang dicirikan oleh BOD dan COD tinggi, minyak dan grease, padatan total dan padatan tersuspensi dalam jumlah yang beragam (Chungsiriporn *et al.*, 2006; Lohsomboon *et al.*, 2002; Ma, 1995; 2000; Rupani *et al.*, 2012). Bahan organik yang terdapat pada LCPKS tersebut dapat mencemari lingkungan apabila tidak dilakukan penanganan (Mahajoeno *et al.*, 2008; Puah *et al.*, 2013; Zinatizadeh *et al.*, 2006). LCPKS dapat dimanfaatkan sebagai pupuk cair dan sumber penghasil biogas. Potensi energi metan yang dihasilkan pabrik 60 ton TBS/jam adalah 1.096.875 kkal (Tabel 6). Potensi energi tersebut dapat dimanfaatkan dengan mengembangkan teknologi sistem biogas seperti pada Gambar 4.

Tabel 6. Potensi energi limbah cair kelapa sawit (LCPKS)

| Komponen   | Jumlah    | Referensi   |
|--|-----------|---|
| Bobot LCPKS (kg)   | 21.058    |   |
| massa jenis LCPKS 1200 kg/m <sup>3</sup>                             |           | Ahmad <i>et al.</i> , 2011                                    |
| Volume LCPKS (m <sup>3</sup> )                                       | 17,55     |   |
| setiap m <sup>3</sup> LCPKS menghasilkan 20-28 m <sup>3</sup> biogas |           | Ma <i>et al.</i> , 1999; Chotwattanasak dan Puetpaiboon, 2011 |
| Volume biogass (m <sup>3</sup> )                                     | 438,75    |   |
| Biogas mengandung 45-70% metan                                       |           | Ma <i>et al.</i> , 1999                                       |
| Volume metan (m <sup>3</sup> )                                       | 219,375   |   |
| Nilai kalor metan 4,740-6,150  |           | Ma <i>et al.</i> , 1999                                       |
| Total potensi energi metan (kkal)                                    | 1.096.875 |   |



Gambar 4. Sistem biogas berbasis LCPKS



*Pemanfaatan Hasil Samping Sebagai Sumber Energi*

LCPKS, TKKS, serat dan cangkang memiliki potensi sebagai sumber energi untuk pengembangan pabrik mandiri energi. Potensi energi biomassa berdasarkan nilai *heating value* komponen kelapa sawit, dan potensi uap yang dapat dihasilkan dari pabrik dengan kapasitas 60 ton TBS/jam dapat dilihat pada Tabel 7. Potensi energi dapat dimanfaatkan dengan menjadikan biomassa tersebut sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap panas yang dapat dikonversi menjadi energi listrik oleh turbin uap dan generator. Efisiensi proses yang dihasilkan dari model lebih besar sehingga jumlah hasil samping dan potensinya lebih rendah dibandingkan aktual. Rangkaian proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.

*Rancangan Proses Produksi CPO Mandiri Energi*

Pabrik kelapa sawit dengan kapasitas olah 60 ton TBS/jam membutuhkan listrik 1.020 kWh dan 30.000 kg uap panas, maka total potensi uap aktual dan teoritis mampu memenuhi kebutuhan uap pabrik bahkan dapat dipenuhi dari pemanfaatan TKKS saja. Surplus uap panas dapat dikonversi menjadi energi listrik. Berdasarkan perhitungan potensi energi tersebut, maka potensi listrik dari hasil samping dapat memenuhi kebutuhan pabrik

bahkan menghasilkan surplus energi listrik sebesar 1.021,78 kWh per jam yang dapat digunakan untuk keperluan di luar pabrik.

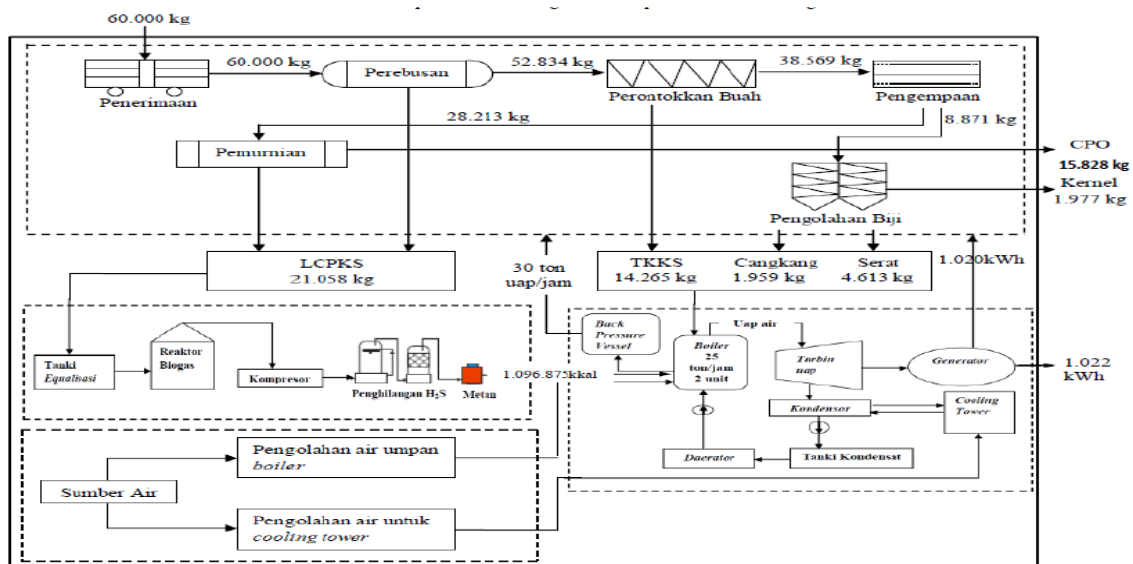
Energi yang diperoleh dari pemanfaatan hasil samping pada pabrik tersebut melebihi energi yang diperlukan sehingga pabrik dapat dikembangkan sebagai sebuah sistem produksi mandiri energi. Gambar 6 menunjukkan rangkaian aliran proses pengolahan kelapa sawit mandiri energi yang dapat dikembangkan berdasarkan hasil perhitungan model neraca massa dan konversi energi.

Pada tahun 2013, kapasitas PKS Indonesia mencapai 34.280 ton TBS/jam (GAPKI, 2014). Jika semua PKS ini mengembangkan pembangkit listrik maka potensi kelebihan listrik yang dibangkitkan adalah 11.678.053 kWh per hari atau setara dengan 3.503.416.000 kWh per tahun (dengan asumsi PKS beroperasi 300 hari/tahun dan 20 jam/hari). Kelebihan listrik ini dapat disalurkan melalui jaringan Perusahaan Listrik Negara atau melalui jaringan sendiri langsung ke permukiman sekitar PKS. Kebutuhan dasar listrik masyarakat perdesaan adalah 680 kWh per kapita/tahun. Dengan asumsi bahwa rata-rata anggota rumah tangga 4-6 orang maka potensi tersebut dapat memenuhi kebutuhan 858.680-1.288.020 rumah tangga.

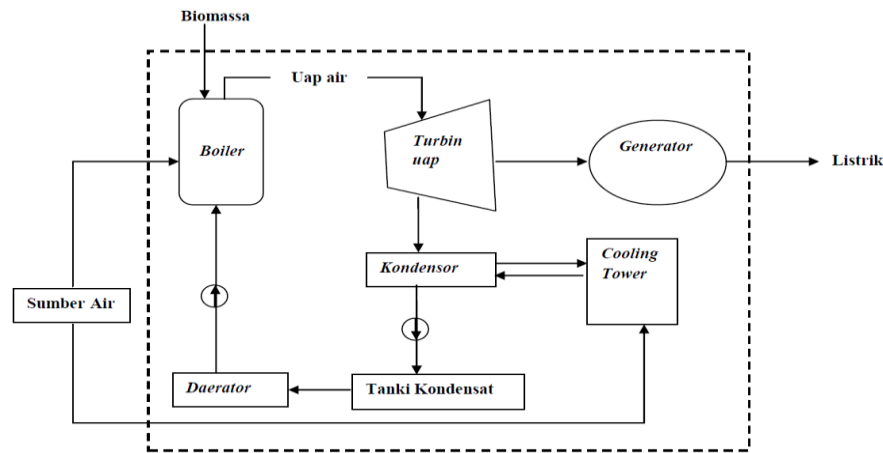
Tabel 7. Potensi energi biomassa pabrik kelapa sawit 60 ton TBS/jam

| Hasil samping | Jumlah (kg) | Potensi energi (kcal) | Potensi uap faktual (kg) |
|---------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| TKKS          | 14.265      | 32.724.633            | 35.658,92                |
| Cangkang      | 1.959       | 10.016.779            | 10.914,94                |
| Serat         | 4.613       | 21.168.481            | 23.066,58                |
| LCPKS         | 21.058      | 1.096.875             | 1.195,22                 |
| Total         | 41.886      | 65.006,768            | 70.835,66                |

Catatan: potensi energi dihitung berdasarkan produksi limbah dari perhitungan model dengan nilai efisiensi (nilai a<sub>i</sub>) terpilih sehingga produksi limbahnya menjadi berkurang. Akibatnya, potensi uap lebih kecil dari faktual yakni keadaan saat ini yang diperoleh dari pengamatan di PKS.



Gambar 5. Sistem pemanfaatan biomassa kelapa sawit (ESDM, 2011)



Gambar 6. Aliran proses produksi CPO mandiri energi kapasitas 60 ton/jam

Dari sisi pengurangan pencemaran akibat pembakaran batubara pada pembangkit listrik dapat diperkirakan. Berbagai standar batubara untuk listrik menetapkan bahwa rata-rata 1.904 kWh yang dihasilkan dari pembakaran satu ton batubara. Jadi total listrik yang dihasilkan (untuk digunakan sendiri dan surplus) tersebut setara dengan 3.676.458 ton batubara/tahun. Faktor emisi dari setiap pembakaran satu ton batubara adalah 2.078 kg CO<sub>2</sub>, 239 g CH<sub>4</sub> dan 35 g N<sub>2</sub>O. Dengan demikian, pemanfaatan semua hasil samping PKS untuk pembangkit listrik dapat mengurangi pencemaran sebanyak 7.640 k ton CO<sub>2</sub>, 878 ton CH<sub>4</sub> dan 128 ton N<sub>2</sub>O setiap tahun. Artinya, pemanfaatan hasil samping dalam produksi CPO untuk menghasilkan energi membantu mengurangi pencemaran dengan menekan produksi gas rumah kaca yang sangat berperan dalam perubahan iklim global.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Proses pengolahan kelapa sawit dapat dikembangkan menjadi proses yang bersifat mandiri energi, yakni tidak memerlukan asupan energi fosil dan listrik dari luar. Kebutuhan tersebut digantikan dengan energi yang dihasilkan dari pemanfaatan hasil samping. Hasil samping pabrik 60 ton TBS/jam yaitu TKKS 14.265 kg, cangkang 1.959 kg, serat 4.613 kg, dan LCPKS 21.058 kg memiliki total kalori sebesar 65.006.768 kkal atau 271.988.317 kJ. Energi tersebut dapat menghasilkan uap berdasarkan kondisi aktual sekarang sebanyak 70.835,66 kg. Uap tersebut dapat memenuhi kebutuhan energi pabrik sebesar 1.020 kWh dan 30 ton uap panas dengan kelebihan energi setara dengan 1.022 kWh. Oleh karena itu, pabrik pengolahan kelapa sawit dapat dikembangkan sebagai sistem produksi yang menghasilkan kelebihan energi listrik. Artinya, PKS dapat dikembangkan sebagai sistem

produksi dengan produk CPO yang menghasilkan listrik.

### Saran

Satuan perhitungan massa adalah stasiun pengolahan tanpa memperhatikan penggunaan energi per satuan alat atau mesin. Penelitian yang lebih rinci dapat dilakukan untuk memperjelas distribusi penggunaan energi menurut satuan alat dan mesin sehingga dapat dikembangkan rangkaian aliran energi. Penelitian ini menggunakan basis perhitungan PKS dengan kapasitas 60 ton/jam sehingga untuk menggambarkan aliran massa pada skala yang berbeda perlu justifikasi nilai persamaan efisiensi untuk masing-masing stasiun pengolahan.

Dari hasil perhitungan yang menunjukkan bahwa pemanfaatan hasil samping sebagai sumber energi dapat memenuhi kebutuhan energi pabrik dan menghasilkan surplus listrik, maka perlu dipertimbangkan untuk menetapkan pembatasan penggunaan bahan bakar fosil dan listrik dari jaringan publik oleh pabrik sawit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad A, Ghufran R, dan Wahid ZA. 2011. Bioenergy from anaerobic degradation of lipids in palm oil mill effluent. *Environ Sci Biotech*. 10:353-376.
- Alam MZ, Muyibi SA, dan Kamaludin N. 2008. Production of activated carbon from oil palm empty fruit bunches for removal of zinc. *In Twelfth International Water Technology Conference (IWTC12)*. Alexandria: Egypt.
- Bantacut T, Hendra D, dan Nurwigha R. 2013. The quality of biopellet from combination of palm shell charcoal and palm fiber. *J Tek Ind Pert*. 23(1):1-12.

- Baharuddin AS, Wakisaka M, Shirai Y, Abd Aziz S, Abdul Rahman NA, Hassan MA. 2009. Co-composting of empty fruit bunches and partially treated palm oil mill effluents in pilot scale. *Int J Agric Res.* 4(2):69–78.
- Begum S dan Saad MF. 2013. Techno-economic analysis of electricity generation from biogas using palm oil waste. *Asian J Sci Res.* 6(2): 290-298.
- Chotwattanasak J dan Puetpaiboon U. 2011. Full Scale Anaerobic digester for treating palm oil mill wastewater. *J Sust Energy Environ.* 2:133-136.
- Chavalparit WH, Rulkens APJ, Mol S, Khaodir. 2006. Option fore environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystem. *Environ Dev Sust.* 8:271-287.
- Chungsiriporn J, Prasertsan S, dan Bunyakan C. 2006. Minimization of water consumption and process optimization of palm oil mills. *Clean Tech Environ Policy.* 8:151-158.
- [DJPPHP] Direktorat Jenderal Pengolahan Hasil Pertanian. 2006. *Pedoman Pengelolaan Limbah Industri Kelapa Sawit.* Jakarta (ID).
- Embrandiri A, Ibrahim HM, dan Singh RP. 2013. Palm oil mill wastes utilization; sustainability in the Malaysian context. *Int J Sci Res Public.* 3 (3).
- GAPKI. 2014. Industri Minyak Sawit Indonesia Menuju 100 Tahun NKRI: Membangun kemandirian ekonomi, energi dan pangan secara berkelanjutan. Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), Bogor.
- Green DW dan Maloney JO. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* 7<sup>th</sup> ed. New York: McGraw- Hill Companies, Inc.
- Hassan S, Kee LS, dan Al-Kayiem HH. 2013. Experimental study of palm oil mill effluent and oil palm frond waste mixture as an alternative biomass fuel. *J Eng Sci Technol.* 8(6): 703 - 712.
- Husain Z, Zainal ZA, dan Abdullah MZ. 2002. Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass and Bioenergy.* 22:505-509.
- Kavalek M, Bohumil H, dan Josef P. 2012. *Analysis of Usability of shells from Processing of Palm Nuts to Palm Oil as Solid Fuel.* Czech University of Life Science Prague.
- KESDM. 2007. Data Sumber Daya Potensi Produksi Energi Indonesia. <http://dtwh2.esdm.go.id/dw2007/data/sumberdaya/> [12 Januari 2015].
- KESDM. 2011. *Indo-Bioenergi dan Revitalisasi Bioenergi Nasional.* Seminar Nasional. Kementrian Energi dan Sumberdaya Mineral, Jakarta.
- Kramandita R, Bantacut T, Romli M, Makmoen M. 2014. Utilization of palm oil mills wastes as source of energy and water in the production process of crude palm oil. *J Chem and Mat Res.* 6(8): 46-53.
- Law KN dan Jiang XF. 2001. Comparative papermaking properties of oil palm empty fruit bunch. *Tappi J.* 84(1):1-13.
- Law KN dan Wan Rosli WD. 2000. CMP and CTMP of a fast growing tropical wood: Acacia mangium. *Tappi J.* 83(7):61-68.
- Lohsomboon P, Palapleevalya P, Worathanakul P, Jirajariyavech A, Liangsakul R. 2002. *Competitiveness for Thai Industry through Environmental Management Benchmarking Case Study: Palm Oil Industry,* Thailand Environmental Institute.
- Lorestani AA dan Zinatizadeh. 2006. *Biological treatment of palm oil mill effluent (POME) using an up-flow anaerobic sludge fixed film (UASFF) bioreactor* [Thesis]. Malaysia: University Sains Malaysia.
- Ma AN. 1995. A novel treatment for palm oil mill effluent. *Palm Oil Res Inst Malaysia (PORIM).* 29:201-212.
- Ma AN. 1999. Treatment of palm oil mill effluent. Oil palm and environment: Malaysia perspective. *Malaysia Oil Palm Growers' Council,* pp 277.
- Ma AN. 2000. Environmental management for the palm oil industry. *Palm Oil Dev.* 30:1-10.
- Mahajoeno E, Lay BW, Suthajho SH, Siswanto. 2008. Potensi Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit untuk produksi biogas. *Biodiversitas.* 9:48-52.
- Nasution MA, Herawana T, dan Rivania M. 2014. Analysis of palm biomass as electricity from palm oil mills in North Sumatera. Conference and Exhibition Indonesia Renewable Energy & Energy Conservation. *Energy Procedia.* 47:166 – 172.
- Ohimain, Elijah I, Sylvester C, Izah, Francis AU, Obieze. 2013. Material-mass balance of smallholder oil palm processing in the Niger Delta, Nigeria. *Adv J F Sci Tech.* 5(3):289-294.
- Okoroigwe EC, Saffron CM, dan Kamdem PD. 2014. Characterization of palm kernel shell for materials reinforcement and water treatment. *J Chem Eng Mat Sci.* 5(1): 1-6.
- Pattanapongchai A dan Limmeechokchai B. 2011. Least cost energy planning in Thailand: A case of biogas upgrading in palm oil industry. *Sci Tech.* 33(6): 705-715.
- Pleanjai S, Gheewala SH, dan Garivait S. 2007. Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective. *Energy Environ.* 8(2):15-32.
- Prasertsan S dan Prasertsan P. 1996. Biomass residues from palm oil mills in Thailand: an

- overview on quantity and potential usage. *Biomass and Bioenergy*. 11(5):87-395.
- Puah CW, Choo YM, dan Ong SH. 2013. Production of palm oil with methane avoidance at palm oil mill: a case study of cradle-to-gate life cycle assessment. *Am J Appl Sci*. 10(11):1351-1355.
- Rupani PF, Singh RP, Ibrahim MH, Esa N. 2010. Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: Vermicomposting as a sustainable practice. *World Appl Sci*. 11(1):70-81.
- Rushdan I, Latifah J, Hoi WK, Mohd NMY. 2007. Commercial scale production of soda pulp and medium paper from oil palm empty fruit bunches. *Tropical Forest Sci*. 19(3):121-126.
- Singh P, Sulaiman O, Hashim R, Peng LC, Singh RP. 2013. Using biomass residues from oil palm industry as a raw material for pulp and paper industry: potential benefits and threat to the environment. *Environ Dev Sustain*. 15:367-383.
- Singh RP, Ibrahim MH, dan Esa N. 2010. Composting of waste from palm oil mill: A sustainable waste management practice. *Rev in Environ Sci Biotech*. 9:331-344.
- Sommart K dan Suneerat P. 2011. *Assessment and Improvement of Energy Utilization in Crude Palm Oil Mill*. IACSIT. Singapura.
- Tim PT SP. 2000. *Produksi Bersih Pengolahan Tandan Buah Segar di Pabrik Kelapa Sawit*. Makalah Lokakarya Pelaksanaan Produksi Bersih pada Industri Minyak Sawit. Pekanbaru: 2-3 Maret 2000.
- Tverberg GE. 2012. Oil supply limits and the continuing financial crisis. *Energy*. 37: 27-34.
- Vijaya S, Ma AN, Choo YM, Nik Meriam NS. 2008. Life cycle inventory of the production of crude palm oil – A gate to gate case study of 12 palm oil mills. *Oil Palm Res*. 20:484-494.
- Yong TLK, Keat TL, Mohamed AR, Bathia S. 2007. Potential of hydrogen from oil palm biomass as a source of renewable energy worldwide. *Energy Policy*. 35: 5692-5701.
- Wan RWD dan Law KN. 2011. Oil palm fibre as paper making material: potential and challenges. *Biores*. 6(1): 901-917.
- Wijbrans R dan van Zupthen H. 2011. LCA GHG emission in production and combustion of Malaysian palm oil biodiesel. *J Oil Palm Environ*. 2:86-92.
- WURFBR. 2013. Valorization of palm oil (mill) residues. Identifying and solving the challenges. Wageningen UR, Food & Biobased Research. Bornse Weiland 9. 6708 WG, Wageningen The Netherlands.
- Zinatizadeh AAL, Mohamed AR, Abdullah AZ, Mashitah MD, Husnain IM, Najafpour GD. 2006. Process modeling and analysis of palm oil mill effluent treatment in an upflow anaerobic sludge fixed film bioreactor using response surface methodology (RSM). *Water Res*. 40:3193-3208.