

# REKAYASA ALAT KONVERSI BIOMASSA DARI BAHAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENJADI *BIO OIL* BAHAN BAKAR CAIR

## (*MANUFACTURING OF BIOMASS CONVERSION EQUIPMENT FROM EMPTY PALM FRUIT BUNCHES INTO LIQUID FUEL*)

Mangala Tua Marpaung dan Yemirta

Balai Besar Kimia dan Kemasan, Kementerian Perindustrian RI  
Jl. Balai Kimia I Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta Timur

*E-mail* : mangalamarpaung@yahoo.co.id

*Received* : 28 Februari 2015; *revised* : 23 Maret 2015; *accepted* : 25 Maret 2015

### ABSTRAK

Rekayasa alat konversi biomassa menjadi bahan baku cair melalui uji coba skala laboratorium, desain awal reaktor, serta desain rinci masing-masing komponen. Dari hasil uji coba laboratorium, dapat disimpulkan bahwa 50 gram biomassa berupa butiran dapat berubah menjadi gas dengan pemanasan 600 ° C. Setelah melewati *cyclone* dan kondensor gas yang terbentuk akan berubah fase menjadi *bio oil*. Dari desain awal dirancang reaktor dengan menggunakan pemanas *burner* yang beroperasi pada suhu 500 ° C sampai dengan 600 ° C. Pada desain rinci dilakukan pembuatan rancangan *flow* proses dan desain masing-masing komponen yang terdiri atas reaktor utama, *cyclone*, kondensor, tangki penampungan *bio oil*, tangki pendingin, dan *screw conveyer*.

Kata kunci : Biomassa, *Bio oil*, *Cyclone*

### ABSTRACT

*Tool feedstock conversion of biomassa into liquid was done in the stage of laboratory scale testing, preliminary design of the reactor as well as detailed design of each component. From the results of laboratory tests, it can be concluded that 50 grams of biomassa in the form of granules can be turned into gas by heating to 600 ° C, after passing through the cyclone and the condenser gas that is formed will be transformed into a bio oil phase. From the initial design was designed using a heating burner reactor operating at a temperature of 500 ° C until 600 ° C. On the manufacturing was conducted detailed design of flow and processes design of each component comprising the main reactor, cyclone, condensers, tanks bio oil, coolant tank, and screw conveyer.*

*Keywords* : Biomassa, *Bio oil*, *Cyclone*

### PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar dan diantaranya yang belum banyak dimanfaatkan adalah biomassa. Biomassa merupakan salah satu sumber energi yang mengandung lignoselulosa yang ditengarai merupakan sumber bahan bakar bio bernilai kalor tinggi. Pemanfaatan biomassa sebagai bahan energi di Indonesia masih sangat rendah dan masih menggunakan teknologi pembakaran untuk mendapatkan panas yang digunakan baik untuk pemasakkan maupun untuk pembangkit uap. Isroi (2004) menyatakan bahwa dari potensi energi biomassa Indonesia sebesar 50.000 MW ekuivalen, baru sebesar 320 MW ekuivalen yang telah dimanfaatkan atau hanya 0,64%, baik sebagai bahan bakar rumah

tangga maupun bahan bakar untuk pembangkit tenaga dan panas di industri.

Sumber biomassa di Indonesia yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan penghasil energi adalah seperti limbah hasil pertanian, hasil perkebunan, hasil hutan, limbah industri pengolahan, dan limbah kota atau pasar. Jumlah limbah padat kelapa sawit yang dihasilkan dari perkebunan merupakan sumber biomassa yang sangat potensial dan mengandung bahan lignoselulosa yang tinggi, cocok sebagai sumber bahan bakar cair. Menurut Direktorat Jenderal Perkebunan (2014), luas perkebunan kelapa sawit Indonesia pada tahun 2013 mencapai 10.465.020 ha dan pada tahun 2014 mencapai 10.956.231 ha dengan laju pertumbuhan

sebesar 4,69%. Tempurung dan serabut sawit telah dimanfaatkan di pabrik pengolahan kelapa sawit (PKS) yang digunakan sebagai bahan bakar padat pada pembangkit uap (*boiler*). Sementara itu, proporsi tandan sawit kosong dapat mencapai separuh dari limbah padat tersebut, dalam setiap panen tandan sawit akan dihasilkan satu pelepah daun sawit, yang selama ini hanya digunakan sebagai pakan ternak dan jumlahnya masih sangat kecil. Pemanfaatan kedua jenis limbah sawit ini terkendala oleh teknologi pengolahan yang relatif murah dalam penyiapan bahan dan perlu proses untuk menurunkan kandungan air yang masih cukup tinggi.

Dalam perkembangan konversi biomassa menjadi bahan bakar, proses kimia termal lebih banyak digunakan dibandingkan dengan proses biokimia. Hal ini disebabkan waktu proses secara termal lebih singkat dibandingkan dengan proses biokimia dan juga efisiensi konversi yang pada umumnya diperoleh dari proses termal lebih baik, yaitu antara 60% sampai dengan 80% (The Japan Institute of Energy 2008).

Menurut Bridgewater (2004), bagian penting dari proses pirolisis cepat untuk menghasilkan *bio oil* dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut :

1. Suhu dan laju pemanasan yang tinggi pada saat reaksi dan biasanya menggunakan bahan biomassa yang halus.
2. Mengatur suhu reaksi sekitar 500 ° C dan suhu fase penguapan pada 400 ° C sampai dengan 450 ° C.
3. Proses pirolisis di dalam reaktor memerlukan waktu yang pendek, tidak lebih dari dua detik.
4. Untuk menghasilkan *bio oil*, dilakukan dengan pendinginan terhadap gas-gas pirolisis secara tiba-tiba.

Oleh karena itu, pada kegiatan penelitian ini akan difokuskan pada metode proses konversi kimia termal dengan teknologi pirolisis cepat (*fast pyrolysis*).

Melihat akan kebutuhan bahan bakar di dalam negeri yang terus meningkat sementara pasokan bahan bakar fosil semakin terbatas dan terus menurun, oleh karena itu perlu dicari suatu teknologi yang mampu menghasilkan energi alternatif dengan memanfaatkan limbah padat yang bersumber dari bahan biomassa seperti tandan kosong dan pelepah daun kelapa sawit.

Dengan demikian pengembangan teknologi untuk peralatan proses konversi biomassa menjadi bahan bakar cair perlu segera dilakukan.

## BAHAN DAN METODE

Pada kegiatan penelitian ini, ada beberapa rangkaian alat proses yang diperlukan dan metode yang digunakan, diantaranya :

### Bahan

Sebagai kebutuhan alat utama yaitu perancangan alat, pabrikasi alat, perakitan, dan instalasi, sedangkan untuk alat pembantu dibutuhkan antara lain unit komputer dengan perangkat lunak *Auto CAD*, *printer*, mesin pemotong pelat baja 1 unit, mesin pemotong baja profil 1 unit, mesin las 1 unit, mesin *roll* pelat baja 1 unit, mesin *drilling* baja (vertikal) 1 unit, kunci pas 1 set, dan *forklift* 1 unit.

### Metode

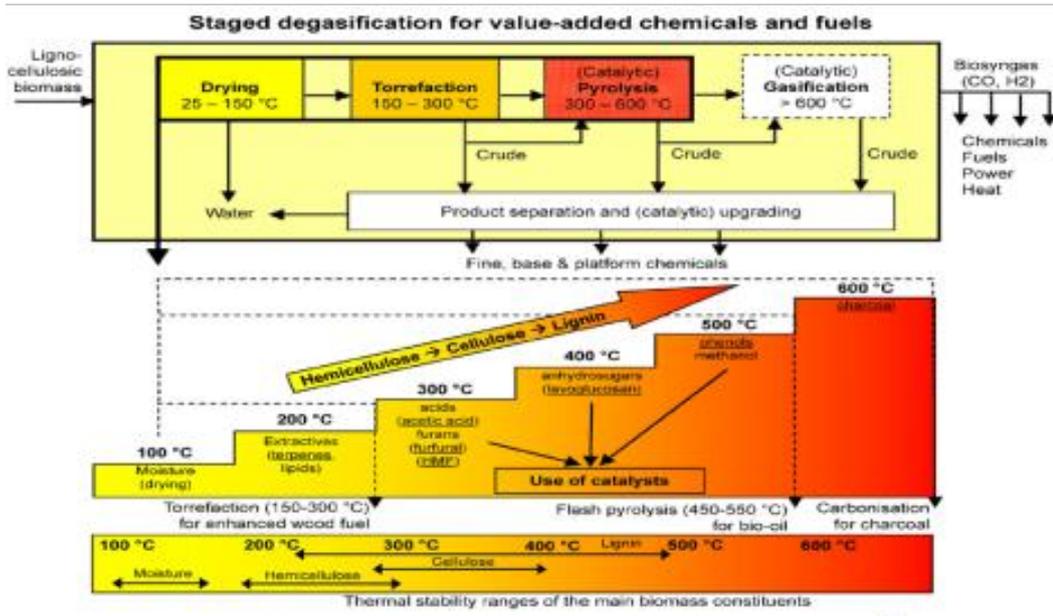
Kegiatan penelitian ini melakukan uji coba skala laboratorium, desain, pembuatan rangkaian unit konversi kapasitas kecil (skala laboratorium), dan pembuatan unit konversi skala *pilot plant*, yang terdiri dari :

#### a. Uji Coba Skala Laboratorium

Peralatan laboratorium yang digunakan untuk uji coba terdiri dari reaktor dari bahan kaca dengan diameter 25 mm dan panjang 300 mm, *heating furnace* dengan menggunakan pemanas listrik 3000 watt 1 *phase* dan panjang *furnace* 300 mm, *cyclone* dari bahan kaca sebagai pemisah gas dan butiran abu, kondensor *double pipe* dari bahan kaca untuk mendinginkan fase gas panas menjadi cairan, tangki produk yang terbuat dari bahan *glass erlenmeyer* sebagai penampung cairan *bio oil*, serta pompa kompresor berfungsi untuk memompakan kembali fase gas yang tidak mampu terkondensasi untuk dimasukkan kembali ke dalam reaktor.

#### b. Desain Awal

Reaktor dirancang dengan alat pemanas (*heating furnace*) yang akan dioperasikan pada suhu 450 ° C sampai dengan 600 ° C. Menurut skema dekomposisi termal (Gambar 1), semua bahan biomassa akan terpirolisis pada suhu 300 ° C sampai dengan 600 ° C (de Wild *et al.* 2008).



Gambar 1. Skema dekomposisi termal (de Wild *et al.* 2008)

**c. Desain Rinci**

Untuk melakukan proses pirolisis cepat dengan kapasitas bahan baku biomassa 10 kg/jam dan menggunakan energi panas, maka perlu dibuat desain rinci dari masing-masing alat. Ada beberapa jenis komponen alat yang dibutuhkan pada proses pirolisis sesuai dengan Gambar 2.

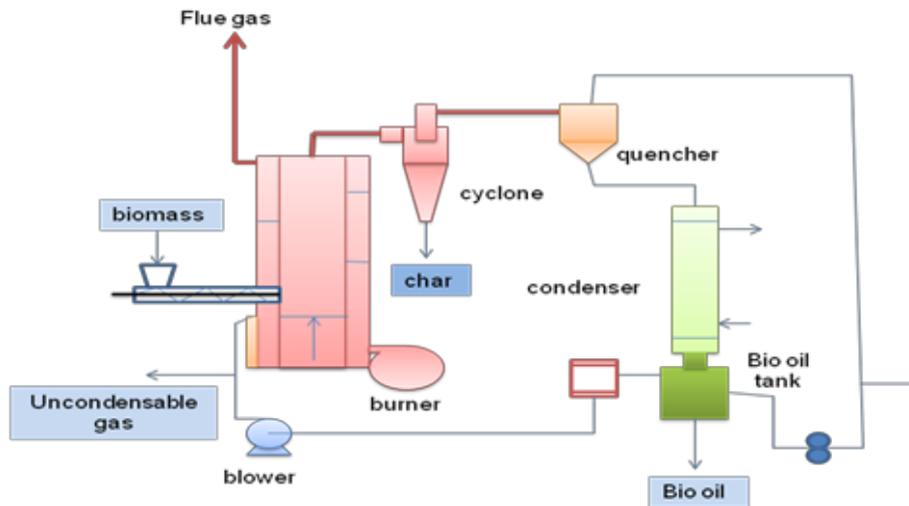
Selanjutnya dilakukan pembuatan desain untuk setiap komponen baik ukuran, bentuk, dan model agar semua komponen dapat terpasang sesuai dengan rencana kapasitas.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**a. Hasil Uji Coba Skala Laboratorium**

Sebanyak 50 gram biomassa dimasukkan

ke dalam reaktor yang dihubungkan dengan *heating furnace* (kolom pemanas) dengan suhu sekitar 600 °C. Biomassa tersebut terpirolisis menjadi fase gas, segera keluar dari reaktor dan masuk menuju *cyclone*, untuk memisahkan fase gas terhadap butiran biomassa yang ikut melayang. Selanjutnya fase gas dimasukkan ke dalam kondensor hingga berubah menjadi cairan *bio oil*. Sisa gas yang tidak mampu terkondensasi disedot dengan menggunakan pompa kompresor dan dialirkan kembali ke dalam reaktor pemanas yang berfungsi sebagai gas *recycle*. Cairan (berupa *bio oil*) yang keluar dari ujung kondensor masuk ke dalam tangki pengumpul *bio oil*.



Gambar 2. Komponen alat pada proses pirolisis

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pirolisis cepat dengan sistem *fluidized bed*. Gas nitrogen dialirkan ke dalam pipa untuk dipanaskan hingga mencapai suhu 450 °C sampai dengan 600 °C, kemudian dimasukkan ke dalam reaktor dan bertemu dengan bahan baku sehingga terjadi proses pirolisis (Froment and Bischoff 1979).

### b. Desain Awal (Alat)

De Wild *et al.* (2008) menyebutkan bahwa laju dekomposisi primer dari biomassa tergantung pada sifat-sifat panas (termal) dari komponen utama dan kontribusinya pada dekomposisi panas (*thermal decomposition*). Hemiselulosa terdekomposisi pada suhu 225 °C sampai dengan 325 °C, selulosa pada suhu 325 °C sampai dengan 375 °C, dan lignin terdekomposisi secara perlahan-lahan pada suhu 250 °C sampai dengan 500 °C. Peningkatan laju pemanasan menyebabkan kisaran suhu degradasi komponen menjadi sempit dan suhu proses meningkat secara progresif. Apabila suhu sudah cukup tinggi, laju degradasi secara signifikan dicapai secara simultan oleh semua komponen. Untuk itu dirancang reaktor dengan pemanas *burner* yang dioperasikan pada suhu 450 °C sampai dengan 600 °C.

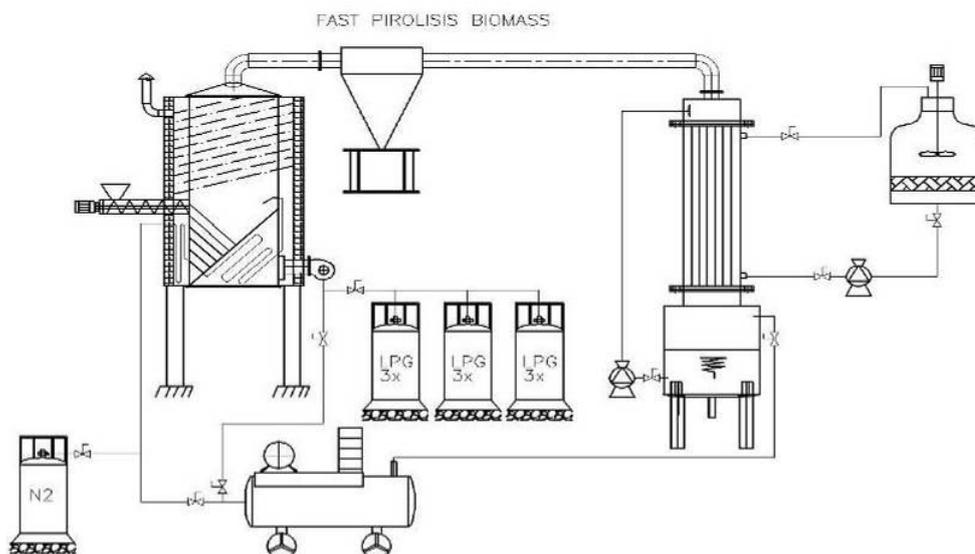
### c. Desain Rinci

Perancangan alat pirolisis untuk kapasitas *pilot plant* digunakan semua bahan yang terbuat dari baja berupa *stainless steel* 304 dan baja biasa seperti dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Steel (2007), SS 304 memiliki keunggulan dapat meminimalkan *chromium*

*carbide* yang diakibatkan pengelasan dan mengurangi korosi intergranular, serta memang aplikasinya yang banyak digunakan untuk alat-alat proses industri bahan kimia.

Detail ukuran dan bahan yang digunakan yaitu untuk reaktor utama, bahan plat SS 304 tebal (t) 3 mm dengan penampang kubus ukuran 300 x 300 mm dan tinggi (h) 1500 mm dengan menggunakan *burner LPG* sebagai sumber panasnya. *Cyclone* terbuat dari bahan plat SS 304 tebal (t) 1,5 mm diameter utama (d) 200 mm dan panjang (l) 1000 mm. Kondensator terbuat dari bahan pipa SS 304 SCH 10 dengan diameter (d) utama 6" dan tinggi (h) 1.500 mm. Tangki penampung *bio oil* yang terpasang langsung di bawah kondensator terbuat dari bahan plat SS 304 tebal (t) 2 mm dengan diameter (d) 400 mm dan panjang (l) 400 mm. Pompa kompresor berfungsi untuk memompakan kembali fase gas yang tidak mampu terkondensasi untuk dimasukkan kembali ke dalam reaktor, penggeraknya elektromotor 3 *phase*, 1 Hp, 380 V dengan kapasitas pemompaan (Q) 105 liter/menit. Tangki air pendingin terbuat dari bahan plat SS 304 tebal (t) 2 mm dengan diameter (d) 700 mm dan tinggi (h) 900 mm. Pompa sirkulasi air pendingin *single phase*, 220 V, 125 W kapasitas pemompaan (Q) 15 liter/menit. Tabung nitrogen yaitu untuk persediaan gas nitrogen yang berfungsi sebagai gas *inner* ke dalam reaktor utama.

Selanjutnya masing-masing komponen didesain ukuran, bentuk, dan model agar semua komponen dapat terpasang sesuai dengan rencana kapasitas.



Gambar 3. Desain rinci konstruksi pirolisis

### 1) Reaktor Utama

Reaktor utama berfungsi sebagai ruang tempat proses pirolisis biomassa. Pada reaktor ini terjadi kontak antara bahan baku dengan transfer panas langsung, tidak boleh terbakar menghasilkan nyala, dengan cara membatasi jumlah udara sedikit mungkin masuk ke dalam reaktor. Sistem reaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor metode *fluidized bed*. Sistem *fluidized bed* yang pertama dikembangkan oleh Fritz Winkler di Jerman pada tahun 1920 (Tavoulareas 1991). Sumber energi panas berasal dari *burner* dengan menggunakan bahan bakar gas *LPG*. Sisa gas panas akan digunakan untuk memanaskan *inner gas* nitrogen melalui pipa spiral yang dipasang kompak dengan dinding luar reaktor dan diteruskan melewati ruang bakar utama agar mendapatkan panas yang lebih tinggi. Kemudian melalui jalur *screw conveyor* bahan biomassa dimasukkan melalui *hopper* di atas *conveyor* dan langsung jatuh masuk ke ruang bakar utama yang terdiri dari pipa-pipa api bersuhu tinggi. Gas hasil pirolisis akan melayang ke atas dalam waktu yang cukup panjang, agar bahan biomassa yang baru masuk ke ruang bakar harus terpirolisis sempurna dan dibantu dengan gas *inner* yang bersuhu tinggi. Gas pirolisis yang terbentuk dalam waktu cepat meninggalkan reaktor dan segera didinginkan di dalam kondensor, yang sebelumnya harus melewati *cyclone* agar gas pirolisis dapat dipisahkan dari butiran debu yang ikut terbawa. Ukuran utama dari reaktor utama adalah panjang (*p*) 300 mm, lebar (*l*) 300 mm, dan tinggi (*t*) 1.500 mm.

Bahan reaktor (Gambar 4) terbuat dari bahan plat SS 304 dengan tebal (*t*) 3 mm yang bersinggungan langsung dengan bahan biomassa. Sedangkan dinding luar yang bersinggungan dengan sisa gas panas pembakaran terbuat dari bahan plat ST 37 dengan tebal (*t*) 2 mm serta sirip jalur pembuangan gas panas dari bahan plat strip ST 70.

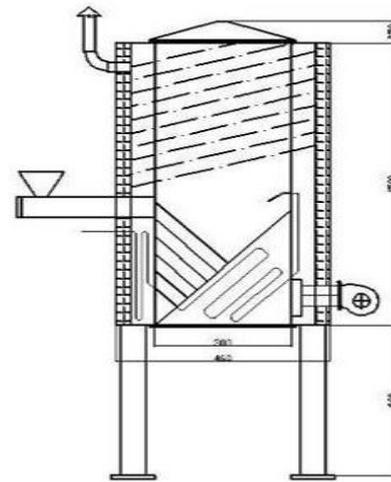
Selanjutnya reaktor dibungkus dengan isolasi *glass wool* untuk menahan panas agar sedikit mungkin panas yang terbuang ke udara bebas.

### 2) Cyclone

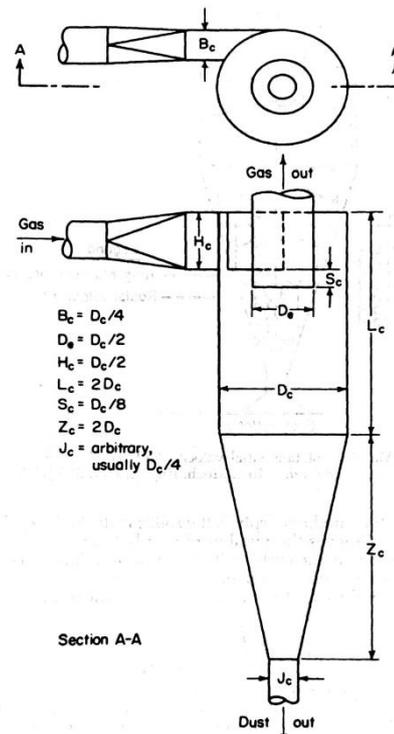
*Cyclone* berfungsi untuk memisahkan fase gas dengan butiran debu yang ikut terbawa oleh gas di dalam ruang bakar dan selanjutnya menuju ke ruang kondensor. Menurut Perry dan Green (1998), penentuan dimensi *cyclone* menggunakan rumus empiris sehingga dapat

diketahui proporsi *cyclone separator*. Gambar 5 menunjukkan proporsi *cyclone separator*.

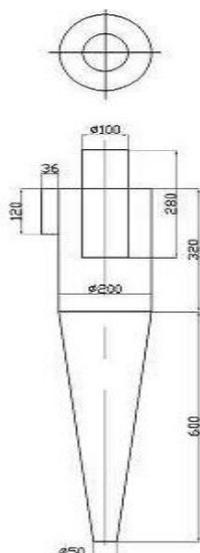
Berdasarkan proporsi *cyclone separator* dirancang konstruksi *cyclone* seperti pada Gambar 5. Ukuran utama *cyclone* (Gambar 6) adalah diameter silinder (*d*) 200 mm dan tinggi (*h*) 600 mm. Bahan utama *cyclone* adalah dari bahan plat SS 304 dengan tebal (*t*) 1,5 mm.



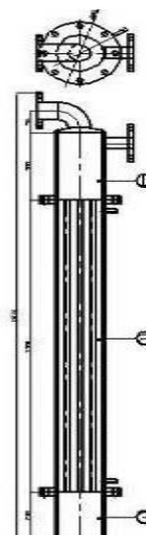
Gambar 4. Konstruksi reaktor



Gambar 5. *Cyclone separator proportions*



Gambar 6. Konstruksi *cyclone*



Gambar 7. Konstruksi kondensor

### 3) Kondensor

Kondensor berfungsi untuk mengubah fase gas dari hasil pembakaran setelah melewati *cyclone* untuk menjadi fase cair dengan cara penurunan suhu gas tersebut melalui pipa pendingin di dalam *shell* kondensor.

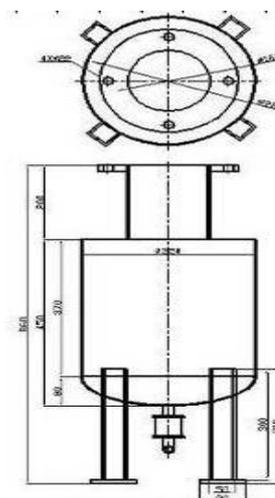
Parameter yang harus diperhatikan dalam mendesain kondensor adalah laju aliran gas, suhu gas masuk, suhu air pendingin, dan panas spesifik dari gas yang diinginkan serta konduktivitas termal dari bahan kondensor (Cengel 2002).

Ukuran utama dari kondensor (Gambar 7) adalah diameter luar *shell* ( $d$ ) 6 mm dan tingginya ( $h$ ) 1500 mm. Bahan utama kondensor adalah dari bahan pipa SS 304 SCH 10.

### 4) Penampung *Bio Oil*

Penampung *bio oil* berfungsi untuk menampung semua fase yang telah mencair dari kondensor lalu dialirkan langsung ke dalam tangki penampung *bio oil* (Gambar 8) dan pada sisi bagian atas akan terdapat penampung gas yang tidak mampu terkondensasi untuk dialirkan kembali ke dalam reaktor utama.

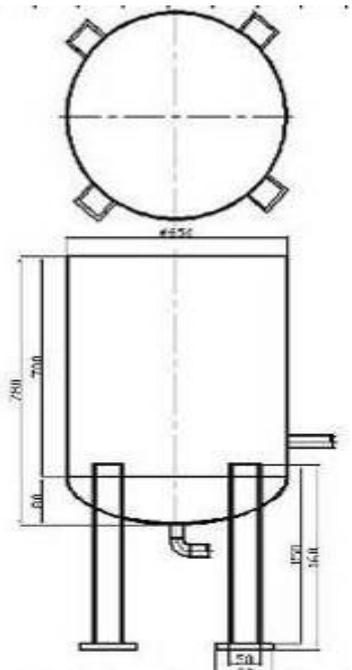
Ukuran utama tangki penampung *bio oil* adalah diameter tangki ( $d$ ) 400 mm dan tingginya ( $h$ ) 500 mm. Bahan utama penampung *bio oil* adalah dari bahan plat SS 304 dengan tebal ( $t$ ) 2 mm.



Gambar 8. Konstruksi tangki penampung *bio oil*

### 5) Tangki Air Pendingin

Tangki air pendingin berfungsi untuk menampung air pendingin yang akan disirkulasikan berulang-ulang ke dalam kondensor agar terjadi pendinginan sempurna di dalam kondensor. Air yang keluar dari kondensor langsung ditumpahkan ke atas permukaan air di dalam tangki dengan bentuk *spray* agar proses pendingin air terhadap udara lebih baik. Konstruksi tangki air pendingin dapat dilihat pada Gambar 9.



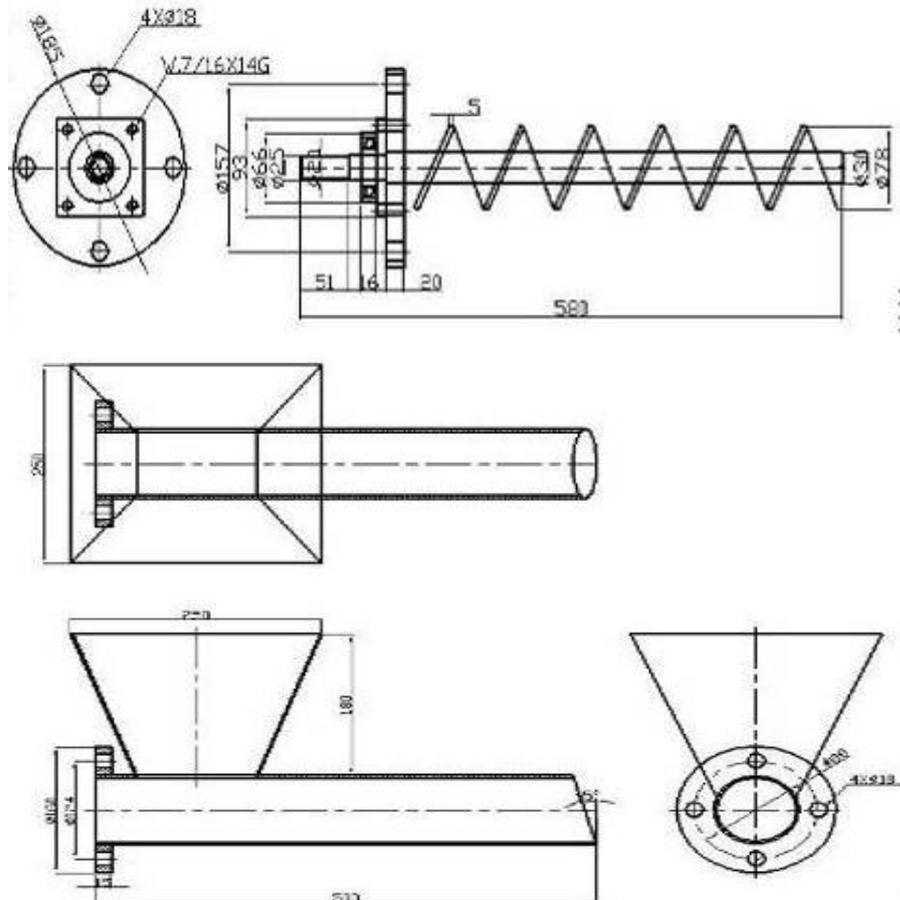
Gambar 9. Konstruksi tangki air pendingin

Ukuran utama tangki air pendingin *oil* (Gambar 9) ini adalah diameter tangki ( $d$ ) 800 mm dan tingginya ( $h$ ) 900 mm. Bahan utama tangki air pendingin adalah dari bahan plat SS 304 SCH 10, dengan tebal ( $t$ ) 3 mm.

#### 6) *Screw Conveyor*

*Screw conveyor* berfungsi sebagai alat untuk memasukkan bahan biomassa menuju ruang bakar melalui mekanisme *screw* yang berputar sebagai pembawa bahan biomassa mulai dari ujung *hopper* menuju ujung *screw*. Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam mendesain suatu *screw conveyor* antara lain jenis material, ukuran maksimum dari butiran, volume butiran, kapasitas pemindahan bahan, dan jarak material yang akan dipindahkan (Thomas Conveyor 2002).

Ukuran utama dari *screw conveyor* (Gambar 10) adalah pipa rumah *screw* diameter ( $d$ ) 88 mm dan panjang *screw* ( $l$ ) 500 mm. Bahan dari ruang *screw conveyor* terbuat dari bahan pipa SS 304 SCH 10,  $\Phi$  3". Bahan *blade screw*, plat ST37 tebal ( $t$ ) 5 mm. Bahan poros *screw*, ST 41,  $\Phi$  1". Jarak ( $s$ ) *helix blade* 50 mm dan diameter luar *blade screw* ( $d_o$ ) 85 mm.



Gambar 10. Konstruksi *screw conveyor*

Setiap peralatan dijelaskan dalam bentuk gambar teknis yang detail untuk memastikan komunikasi gambar yang bisa diterima dan dimengerti oleh tiap bengkel pabrikasi.

Secara mekanis peralatan atau komponen akan berfungsi sesuai dengan desain awal. Akan tetapi beberapa peralatan hanya dapat digerakkan sesuai dengan perintah yang diprogram, karena hampir semua peralatan tersebut dihubungkan dengan listrik. Sistem kontrol yang akan dibuat dan dipesan sesuai dengan jumlah peralatan yang dihubungkan dengan listrik seperti *burner*, elektromotor, dinamo pompa, dan sistem kontrol suhu yang dapat diatur di dalam reaktor.

Untuk mengontrol *burner* hidup dan mati secara otomatis (apabila suhu di dalam reaktor turun maka *burner* akan menyala atau hidup dan demikian juga sebaliknya apabila suhu di dalam reaktor telah mencapai suhu yang sudah diatur maka *burner* akan mati), dilakukan oleh *thermo control* yang mendapat data melalui sensor *thermocouple* (Gambar 11).

Semua hasil desain peralatan dan komponen yang sudah ditetapkan di atas dilanjutkan dengan pembuatannya dan kemudian dipasang.

#### a) Pabrikasi Komponen Dan Peralatan

Dengan tersedianya bahan konstruksi dan juga peralatan sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan di atas dan tertuang dalam gambar teknis, maka proses pabrikasi dikerjakan di bengkel Balai Besar Kimia dan Kemasan (BBKK). Mulai dari memotong besi, *rolling*, dan mengelas (las biasa maupun las *stainless steel*).

Semua pembuatan sub komponen dirakit dan langsung dicoba fungsional untuk menjadi satu bagian komponen.

#### b) Melaksanakan Perakitan Komponen Serta Melakukan Uji Coba Komponen Bagian

Setiap komponen yang sudah selesai dipabrikasi, selanjutnya dilakukan perakitan dan instalasi sesuai dengan urutan rangkaian yang telah ditetapkan di dalam gambar *lay out* proses. Instalasi dilakukan terhadap pemasangan rangkaian pipa gas nitrogen, pipa gas *LPG*, pipa *recycle gas*, pipa air, dan pipa *bio oil*. Kemudian dilakukan percobaan per bagian (uji coba fungsional) untuk melihat apakah bisa bergerak atau berputar, jalur pipa gas dan pipa minyak yang bocor, apabila kurang baik agar dapat langsung disempurnakan (Gambar 12).

#### c) Melaksanakan Perakitan Akhir

Supaya *burner* dapat menyala dengan sempurna, maka diperlukan rangkaian pasokan gas *LPG* yang disatukan ke dalam suatu gas *header* untuk menyeimbangkan tekanan gas *LPG* sebelum menuju gas *burner* dengan menggunakan selang khusus yang bertekanan tinggi. Dengan maksud untuk menjaga keselamatan penggunaan peralatan dari resiko kebakaran (Gambar 13).

Pada *taHAp* perakitan akhir (*final assembling*) adalah memasang panel *box control* untuk menyambung perintah dari panel *box* listrik menuju ke masing-masing peralatan yang dihubungkan dengan menggunakan kabel listrik dan juga kabel sensor lainnya (Gambar 14).



Gambar 11. Instalasi *burner LPG* dan sistem termostat pada pipa lorong api



Gambar 12. Uji coba fungsional atau per bagian



Gambar 13. Instalasi tabung gas LPG menuju ke burner



Gambar 14. Rangkaian panel box control ke setiap peralatan dan komponen lainnya

## KESIMPULAN

Rekayasa alat konversi biomassa dari bahan tandan kosong kelapa sawit menjadi *bio oil* membutuhkan rangkaian alat yang terdiri dari reaktor, *cyclone*, kondensor, penampung *bio oil*, tangki pendingin air, dan *screw conveyor*. Dari uji coba yang dilakukan dengan metode *fast pyrolysis* didapatkan kondisi proses sebagai berikut besar butiran bahan biomassa minimum 60 mesh, kadar air maksimum 10%, suhu pirolisis yang ideal selama proses di dalam reaktor utama antara 500 °C sampai dengan 600 °C, dan waktu yang diperlukan dalam pirolisis tidak lebih dari 2 detik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada laboratorium kemasan bahan dan ritel Balai Besar Kimia dan Kemasan (BBKK) sebagai tempat pelaksanaan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bridgewater, A. V. 2004. Biomass fast pyrolysis (review paper). *Journal thermal science* 8 (2) : 21 - 49.
- Cengel, Y. A. 2002. *Heat transfer : A practical approach. 2<sup>nd</sup> Ed.* New York : Mc Graw Hill.
- de Wild, P. J. , H. den Uil, J.H. Reith, J.H.A. Kiel, and H.J. Heeres. 2008. Biomass valorisation by staged degasification a new pyrolysis-based thermochemical conversion option to produce value-added chemicals from lignocellulosic biomass. *Journal of analytical and applied Pyrolysis* 85 : 124 - 133.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2014. Luas areal produksi dan produktivitas perkebunan di Indonesia. <http://www.pertanian.go.id/Indikator/abel-3-prod-lsareal-prodvitas-bun.pdf> (Accessed November 14, 2014).
- Froment, G.F. and K.B. Bischoff. 1979. *Chemical reactor analysis and design.* New York : John Wiley and Sons Inc.
- Isroi. 2008. Energi terbarukan dari limbah pabrik kelapa sawit. <http://isroi.com/2008/02/25/energi-dari-limbah-sawit/comment-page-1/> (Accessed April 3, 2013).
- Perry, R.H. and D.W. Green. 1998. *Perry's chemical engineers handbook. 7<sup>th</sup>*

- International Ed.* New York : Mc Graw Hill.
- Steel, A.K. 2007. *Product data sheet 304/304L stainless steel UNS S30400/UNS S30403.* Ohio : AK Steel Corporation.
- Tavoulareas, S. 1991. Fluidized-bed combustion technology. *Annual reviews Inc* 16 : 25-27.
- The Japan Institute of Energy. 2008. *Buku panduan biomassa Asia : panduan untuk produksi dan pemanfaatan biomassa.* Japan : Kementrian Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan.
- Thomas Conveyor Company. 2002. *Thomas conveyor engineering guide.* Texas : Thomas conveyor company.