

# Thermal Simulation of Continuous Torefaction Reactor Tubular Type for Solid Fuel Production of Municipal Waste

Amrul<sup>1,\*</sup>, Muhammad Fariz<sup>1</sup> dan Indra M. Gandidi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitas Lampung - Bandar Lampung

\*Korespondensi: basefmhammadfariz@gmail.com

**Abstract.** Torefaction is one method of processing waste through a thermal process into a solid fuel of equivalent quality of subbituminous coal. To obtain solid fuel from the process of waste torefaction in sufficient quantities, a continuous torefaction system should be developed. The type of reactor developed is a tubular type continuous reactor with a fluid jacket heater heating system. In this study a simulation was conducted to determine the appropriate input temperature to obtain a reactor temperature of 275-300°C. The material used for the reactor is carbon steel AISI 1045 with dimensions; diameter of screw 195 mm, pitch distance 100 mm, tube diameter 203 mm and reactor length 1600 mm. An analysis of the energy balance shows that the heat requirement for this torefaction process is 1.27 kW. For the temperature in the reactor of 275°C, the outside temperature is 311°C. Simulation to create 3D modeling and heating system of fluid tube blanket (molten salt) using Solidworks software.

**Abstrak.** Torefaksi adalah salah satu metode pengolahan sampah melalui proses termal menjadi bahan bakar padat berkualitas setara batubara subbituminus. Untuk mendapatkan bahan bakar padat dari proses torefaksi sampah dalam jumlah yang cukup besar perlu dikembangkan sebuah sistem torefaksi kontinu. Jenis reaktor yang dikembangkan adalah reaktor kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas selimut fluida (*fluid jacket heater*). Dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk menentukan temperatur *input* yang sesuai untuk mendapatkan temperatur reaktor sebesar 275–300°C. Material yang digunakan untuk reaktor adalah *carbon steel* AISI 1045 dengan dimensi; diameter *screw* 195 mm, jarak *pitch* 100 mm, diameter tabung 203 mm dan panjang reaktor 1600 mm. Analisis keseimbangan energi menunjukkan bahwa kebutuhan panas untuk proses torefaksi ini adalah sebesar 1,27 kW. Untuk temperatur dalam reaktor sebesar 275°C didapatkan temperatur luar sebesar 311°C. Simulasi untuk membuat permodelan 3D dan sistem pemanas selimut tabung fluida (*molten salt*) menggunakan perangkat lunak *Solidworks*.

**Kata kunci:** torefaksi, reaktor *tubular*, pemanas selimut fluida, *molten salt*

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Cadangan energi Indonesia saat masih bertumpu pada bahan bakar fosil yang jumlahnya sudah semakin menipis. Pemerintah Indonesia memperkirakan cadangan minyak bumi Indonesia akan habis dalam 15 tahun, gas alam dalam 60 tahun, dan batubara habis dalam 150 tahun [1]. Permasalahan ini dapat mempengaruhi ketahanan energi nasional, sehingga diperlukan usaha yang sungguh-sungguh untuk menemukan sumber energi alternatif sebagai pengganti energi fosil tersebut.

Sampah merupakan salah satu sumber energi alternatif yang tersedia dalam jumlah yang cukup besar dan berpotensi diolah menjadi bahan bakar yang bernilai kalor tinggi. Jika diasumsikan kandungan energi sampah sekitar 10,46 MJ/kg dan timbulan sampah kota Bandar Lampung sebesar 850 ton/hari, maka potensi energi panas yang dihasilkan bisa mencapai 8.891 GJ/hari atau setara 103 MW panas. Penggunaan sampah secara langsung sebagai bahan bakar tidak efisien karena nilai

kalornya rendah, kandungan air tinggi, densitas energi rendah, dan komposisi yang heterogen. Salah satu teknologi konversi sampah menjadi bahan bakar padat yang cukup prospek adalah torefaksi. Torefaksi atau juga dikenal dengan pirolisis lambat (*mild pyrolysis*) merupakan proses pemanasan material tanpa oksigen pada rentang temperatur 200–300°C [2].

Proses torefaksi pada sampah kota yang telah dilakukan oleh penulis menggunakan reaktor *batch* skala lab pada temperatur 285°C berhasil menaikkan nilai kalor sampah, yaitu sebesar 5300–5800 kcal/kg (HHV), setara dengan batubara subbituminous B [3]. Kapasitas reaktor *batch* yang digunakan sebe-lumnya relatif kecil, yakni sekitar 600 g/*bed* dalam sekali proses. Untuk mendapatkan produk torefaksi dengan kapasitas yang lebih besar, maka diperlukan sebuah reaktor kontinu.

Jenis reaktor kontinu yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor tipe *tubular* meng-

gunakan *screw conveyor* dengan pemanas selimut fluida (*heating fluid jacket*). Keunggulan jenis reaktor ini adalah bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, serta biaya konstruksi dan operasional yang rendah. Reaktor ini cocok untuk produksi skala kecil dan menengah. Kajian utama pada penelitian ini adalah perancangan reaktor tubular dan simulasi termal distribusi temperatur pada dinding reaktor.

**Metode Penelitian**

Tahapan penelitian ini dibagi mejadi tiga; pertama adalah perancangan dimensi dan sistem pemanas yang digunakan pada reaktor dalam bentuk gambar 3D menggunakan perangkat lunak Solidworks *student version 2014*. Kedua adalah menganalisis kebutuhan panas pada reaktor untuk mendapatkan temperatur input yang sesuai dengan temperatur dalam reaktor. Ketiga adalah melakukan simulasi perpindahan panas yang terjadi pada reaktor, menggunakan perangkat lunak Solidworks dengan parameter input diambil dari hasil analisis energi.

Prinsip perancangan reaktor *tubular* sama dengan perancangan *screw conveyor*. *Screw conveyor* terdiri dari poros yang terpasang *screw* yang berputar dalam *trough* dan unit penggerak. Pada saat *screw* berputar material akan dimasukan melalui *feeding hopper* ke *screw* yang bergerak maju akibat daya dorong (*thrust*) *screw*. Material yang dipindahkan dimasukkan ke dalam *trough* melalui *hopper*. Bahan akan keluar pada ujung *trough* atau bukaan bawah *trough* [4].

Reaktor dirancang untuk kapasitas *feeder hopper* sebesar 5 kg/jam dengan berat jenis sampah diasumsikan 230 kg/m<sup>3</sup>. Perancangan dilakukan untuk menentukan dimensi reaktor dan distribusi temperatur dinding reaktor. Langkah pertama adalah mengasumsikan beberapa parameter awal perancangan, seperti ditunjukkan pada tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter awal perancangan.

No	Parameter	Nilai
1	Putaran <i>screw</i>	0,5 rpm
2	<i>Loading efficiency</i>	0.25
3	Sudut inklinasi	0°
4	Kapasitas <i>pitch</i>	0,5 D
5	Waktu tinggal	30 menit
6	Jarak tabung dan <i>screw</i>	8 mm
7	Diameter poros	5 cm
8	Temperatur reaktor	275°C
9	Kandungan air sampah	30%

Nilai pada tabel 1 merupakan asumsi yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan perancangan dimensi reaktor. Volume total sampah dalam

reaktor dihitung menggunakan pers. 1, dan diameter *screw* dihitung menggunakan pers. 2.

$$V_s = \frac{m}{\rho} \tag{1}$$

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{4 Q_r}{60\pi (0,5n)\varphi \rho c}} \tag{2}$$

dimana;

- $V_s$  : Volume sampah (m<sup>3</sup>)
- $m$  : Massa sampah (kg)
- $\rho$  : Massa jenis material bahan baku (kg/m<sup>3</sup>)
- $D_s$  : Diameter *screw* (mm)
- $Q_r$  : Kapasitas *screw conveyor* (kg/jam)
- $n$  : Kecepatan putaran *screw conveyor* (rpm)
- $\varphi$  : *Loading efficiency*  
 0,12 - 0,15 untuk material abrasif  
 0,25 - 0,3 untuk material sedikit abrasif  
 0,4 - 0,45 untuk material tidak abrasif dengan aliran bebas
- $c$  : Faktor koreksi sudut *screw* horizontal (nilai faktor C): 0° (1), 5° (0,9), 10° (0,8), 15° (0,7), 20° (0,65)

Diameter tabung dihitung dengan menggunakan pers. 3, laju sembur dihitung menggunakan pers. 4 dan panjang reaktor dihitung dengan pers. 5.

$$D_T = D_s + 0,8 \tag{3}$$

$$v = \frac{S \cdot n}{60} \tag{4}$$

$$L = v \cdot t \tag{5}$$

dimana;

- $D_T$  : Diameter tabung (mm)
- $v$  : Laju sembur material (m/s)
- $S$  : Jarak *pitch* (m)
- $n$  : Kecepatan putaran (rpm)
- $L$  : Panjang reaktor (m)
- $t$  : Waktu tinggal (s)

Perhitungan dimensi reaktor diverifikasi dengan mengasumsikan volume sampah dalam reaktor sebesar 25% menggunakan pers. 6.

$$V_T = 25\% \frac{1}{4} \pi D^2 L \tag{6}$$

$$V_{sampah} = V_{tabung reaktor}$$

Material yang digunakan untuk tabung reaktor adalah *carbon steel AISI 1045* dengan konduktivitas termal 51,9 W/m.K dan tebal 10 mm. Kandungan air dalam sampah diasumsikan sebesar 30%. Temperatur dinding dalam reaktor dihitung menggunakan persamaan dasar perpindahan panas radiasi (pers. 7) dan konduksi (pers. 8) untuk silinder.

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_{dd}^4 - T_r^4) \quad (7)$$

dimana;

- $Q_{rad}$  : Besar energi perpindahan panas radiasi (watt)
- $\epsilon$  : Nilai emisivitas
- $\sigma$  : Konstanta Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ )
- $A$  : Luas area radiasi ( $\text{m}^2$ )
- $T_r^4$  : Temperatur dalam reaktor (K)
- $T_{dd}^4$  : Temperatur dinding dalam reaktor (K)

$$Q_{kon} = \frac{2 \pi k L (T_{dl} - T_{dd})}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (8)$$

dimana;

- $Q_{kon}$  : Besar energi perpindahan panas konduksi (watt)
- $L$  : Panjang reaktor (m)
- $K$  : Konduktivitas termal (W/mK)
- $T_{dl}$  : Temperatur dinding luar (K)
- $T_{dd}$  : Temperatur dinding dalam (K)
- $r_o$  : Jari-jari luar reaktor (m)
- $r_i$  : Jari-jari dalam reaktor (m)

Metode simulasi perpindahan panas pada penelitian ini dilakukan dengan cara membuat pemodelan reaktor menggunakan perangkat lunak. Dimensi serta bentuk reaktor torefaksi kontinu tipe *tubular* didapat dari hasil perhitungan dan perancangan reaktor. Setelah pemodelan selanjutnya dilakukan simulasi perpindahan panas reaktor dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks Simulation. Simulasi perpindahan panas dilakukan untuk mengetahui nilai temperatur yang sesuai dengan temperatur torefaksi yang diinginkan.

### Hasil dan Pembahasan

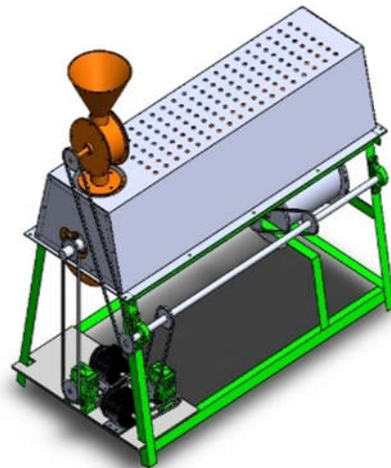
Spesifikasi reaktor hasil perancangan dapat dilihat pada tabel 2 dan gambar hasil perancangan reaktor ditunjukkan oleh gambar 1. Pemanas reaktor menggunakan sistem pemanas selimut dengan media fluida pemanas *molten salt* yang digunakan untuk memanaskan dinding luar reaktor. *Molten salt* ditempatkan antara dinding luar tabung reaktor dan dinding dalam selimut. *Molten salt* dipanaskan hingga temperatur yang diinginkan, lalu panas dari *molten salt* akan memanaskan dinding luar tabung reaktor.

**Tabel 2.** Spesifikasi reaktor

Parameter	Nilai/Keterangan
Diameter <i>screw</i>	195 mm
Diameter tabung	203,2 mm

Panjang tabung	1600 mm
Jarak <i>pitch</i>	100 mm
Diameter poros	50 mm
Kecepatan putaran	0,5 rpm
<i>Air lock system</i>	<i>Rotary valve</i>
Sistem pemanas	Selimut tabung
Fluida pemanas	<i>Molten salt</i>
Temperatur kerja	275°C – 300°C
Kebutuhan panas reaktor	1,2 kW

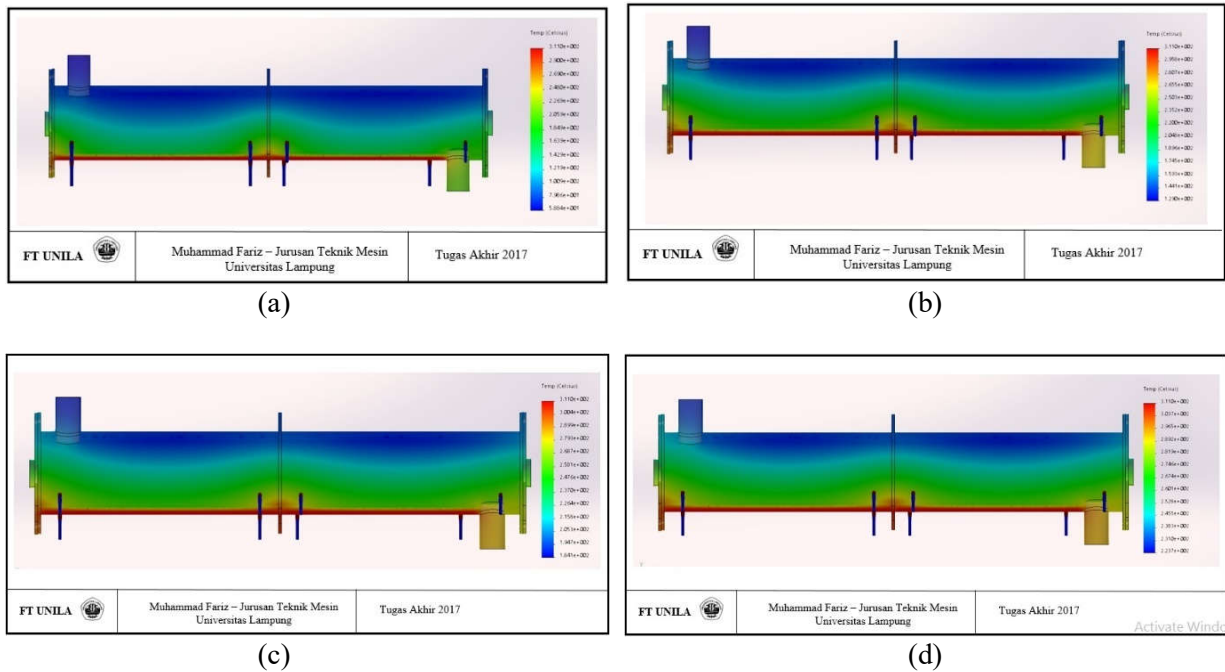
Simulasi dilakukan sebanyak empat percobaan dengan variasi waktu transient sebesar 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Pada simulasi dengan waktu transient 30 menit hasil yang didapat temperatur dalam reaktor sekitar 200°C, yang menunjukkan adanya peningkatan temperatur dalam reaktor dari temperatur ruangan, seperti terlihat pada Gambar 2 (a). Distribusi temperatur terlihat belum merata dimana warna biru masih dominan di dalam reaktor dengan nilai temperatur antara 50°C – 80°C.



**Gambar 1.** Rancangan reaktor torefaksi kontinu tipe *tubular*

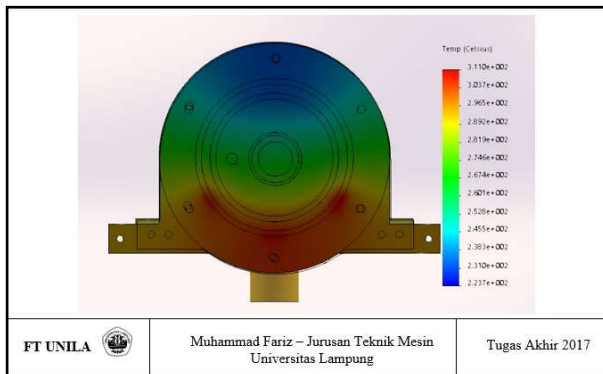
Pada simulasi dengan waktu transient 60 menit temperatur rata-rata reaktor sekitar 235°C, terjadi peningkatan temperatur dan distribusi temperatur lebih merata, seperti terlihat pada gambar 2 (b) warna biru pada reaktor mulai berkurang dan menunjukkan nilai temperatur antara 130°C – 150°C.

Untuk simulasi dengan waktu transient 90 menit didapatkan temperatur reaktor sekitar 260°C. Distribusi temperatur pada reaktor lebih baik dari waktu transient sebelumnya, seperti terlihat pada gambar 2 (c), dimana warna biru pada bagian atas reaktor tidak mendominasi reaktor dan nilai temperaturnya naik sekitar 180°C – 200°C. Yang terakhir simulasi dengan waktu transient 120 menit, dari hasil ini terlihat warna hijau lebih mendominasi pada reaktor dengan nilai temperatur reaktor sekitar 275°C seperti terlihat pada gambar 2(d).



**Gambar 2.** Hasil simulasi dengan waktu transien (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit

Dari hasil simulasi ini, pada pemilihan temperatur luar reaktor sebesar 311°C dan waktu transien 120 menit, diperoleh temperatur dalam sebesar 275°C. Temperatur luar reaktor hasil simulasi ini sesuai dengan temperatur yang diperoleh dari analisis kebutuhan energi reaktor. Gambar 3 memperlihatkan hasil simulasi potongan depan.



**Gambar 3.** Gambar hasil simulasi potongan depan.

**Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian ini maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut;

1. Hasil rancangan ruang reaktor torefaksi tipe tubular memiliki spesifikasi sebagai berikut: diameter screw 195 mm, diameter tabung reaktor 8 in, jarak pitch 100 mm, panjang reaktor 1600 mm, dan tebal dinding reaktor 10 mm.
2. Hasil simulasi perpindahan panas pada perancangan reaktor torefaksi sampah kontinu tipe Tubular dengan menggunakan selimut fluida pemanas (*heating fluid jacket*) menggunakan

program perangkat lunak untuk temperatur reaktor 275°C, dibutuhkan temperatur input sebesar 311°C.

**Penghargaan**

Penulis menyampaikan penghargaan yang besar kepada Kementerian Ristek Dikti atas dukungan finansial dan kepada LPPM Universitas Lampung atas fasilitasnya dalam menyelesaikan penelitian ini.

**Referensi**

- [1] Purba, V.S., 2007. *Penentuan Total Cadangan Minyak Nasional Indonesia Dengan Metoda Perhitungan Kurva Puncak Hubbert dan Pendekatan Numerikal Terhadap Grafik Produksi Minyak Nasional Indonesia*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [2] Supramono, D. dan Aripin, P., 2013. *Pengaruh Torefaksi Terhadap Sifat Fisik Pellet Biomassa Yang Dibuat Dari Bahan Baku Bagas Tebu*, Universitas Indonesia, Depok.
- [3] Amrul, 2014. *Pemanfaatan Sampah Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Melalui Proses Torefaksi*, Disertasi Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [4] Zainuri, A.M., 2009. *Mesin Pindah Bahan*, Penerbit Andi: Yogyakarta.