

Kesetimbangan Energi di Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tabung Tubular dengan Sistem Pemanas Selimut Oli

HARMEN, ZULKRI KURNIAWANSAH, AMRUL, HADI PRAYITNO

ABSTRACT

Torrefaction is a method of processing solid biomass through a thermal process into solid fuel with higher calorific value. The torrefaction process is carried out in a reactor with a temperature of 250 – 300 °C. Continuous reactor with a tubular tube type that was developed in this research. From several studies that have been carried out it was found that there is still a lot of energy wasted in this torrefaction process. Therefore, it is necessary to calculate the energy balance in the reactor to get this amount of energy loss. The energy source used is liquefied petroleum gas (LPG). The biomass used in the research is a wood chip. In this study, the torrefaction process was carried out for 65 minutes at a temperature of 275°C. During the process, energy input, energy output and energy/heat loss was calculated using temperature data. The temperatures measured include reactor temperature, oil temperature, outer wall temperature, and ambient temperature at the inlet, middle, and outlet of the reactor, respectively. Calculation results obtained, the total energy input is 125.257 kJ (LPG and raw biomass energy), the output energy is 30.113 kJ (torrefied biomass/charcol from torrefaction process) or 4.61% from total energy input, and the heat loss is 89.367 kJ or 71.34% from total energy input. The wasted heat from the reactor is still very large. To increase the thermal efficiency of the reactor, this heat can be used to dry the biomass before it is put into the reactor.

Keywords: heat balance, torrefaction, biomass, oil jacket, heat loss.

PENDAHULUAN

Torefaksi merupakan salah satu teknologi konversi termal biomassa menjadi bahan bakar padat pada kondisi ketiadaan oksigen (Basu, 2013). Tujuan utama torrefaksi adalah untuk meningkatkan densitas energi biomassa dengan meningkatkan kandungan karbonnya sambil menurunkan kandungan oksigen dan hidrogennya.

Proses torfaksi untuk berbagai jenis biomassa telah banyak dilakukan untuk menentukan karakteristik bahan bakar padat produk torfaksi. Amrul, dkk., (2013) melakukan torfaksi sampah kota dan mendapatkan produk torfaksi yang nilai kalornya setara dengan batubara sub-bituminus. Penelitian torfaksi sampah kota juga dilakukan oleh Triyono, dkk., (2019) dengan metode torfaksi basah dan sebelumnya Becidan, (2007) dalam disertasi doktoralnya.

Selain sampah kota penelitian torfaksi juga pernah dilakukan untuk tandan kosong kelapa sawit (Soh, dkk., 2021; Wahyudi, dkk., 2020; dan Maryenti, dkk., 2017), ampas tebu (Daniyanto, dkk., 2015), pellet kayu jabon (Sulistio, dkk., 2020), sekam dan jerami padi (Chen, dkk., 2021), kayu pinus (Nguyen, dkk., 2021) dan batang singkong (Nakason, dkk., 2021).

Penelitian torfaksi juga telah dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis reaktor diantaranya, Haryanto, dkk., (2020) melakukan torfaksi pellet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB), reaktor kontinu tipe tubular (Apriyanto, dkk., 2018), dan reaktor *fixed bed* horizontal (Susilowati, dkk., 2017)

Pemanasan adalah bagian penting dari proses torfaksi. Tanoue, dkk., (2020) meneliti proses perpindahan panas dan massa dalam proses torfaksi dan menemukan jumlah panas yang signifikan yang dibutuhkan dalam proses

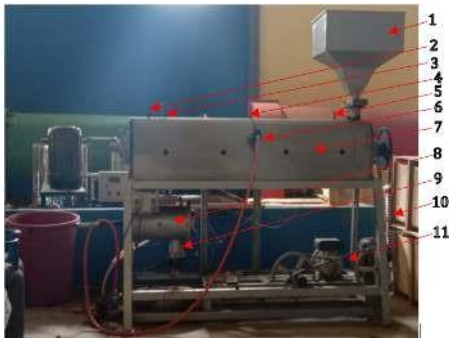
torefaksi. Mengingat kebutuhan panas yang tinggi dalam proses torefaksi, oleh karena itu perlu dikaji hubungan kebutuhan panas ini terhadap peningkatan densitas energi produk torefaksi yang didapatkan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui neraca energi pada reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas selimut oli. Neraca energi diperlukan untuk menentukan potensi pemanfaatan ulang energi terbuang pada proses torefaksi dan upaya mengurangi penggunaan bahan bakar pada proses torefaksi.

METODE PENELITIAN

Reaktor Torefaksi, Alat dan Bahan

Reaktor torefaksi yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor kontinu tipe tubular berselimut oli termal dengan pemanas berasal dari pembakaran gas LPG seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 1.



GAMBAR 1. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular berselimut oli termal dengan pemanas gas LPG

Keterangan gambar

1. Saluran biomassa masuk
2. Pipa gas buang
3. Termokopel A
4. Termokopel B
5. Termokopel C
6. Saluran gas LPG
7. Reaktor torefaksi
8. Tabung pendingin
9. Saluran biomassa keluar
10. Rantai penggerak ulir reaktor
11. Sistem penggerak ulir reaktor

Biomassa yang digunakan adalah jenis kayu keras dengan HHV 17.100 kJ/kg (hasil pengujian laboratorium). Oli termal komersial digunakan sebagai sumber panas reaktor yang

dipanaskan melalui pembakaran gas LPG dengan nilai kapasitas panas 1.6794 kJ/kg.K.

Alat pendukung yang digunakan adalah pemantik api, tabung LPG 12 kg, regulator LPG, termokopel tipe K, *Temperature Recorder Datalogger* 12 titik merek Lutron BTM- 4208SD, dan timbangan digital. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan system pemanas oil jacket memiliki spesifikasi lengkap seperti pada Tabel 1.

TABEL 1. Spesifikasi reaktor torefaksi kontinu tipe tubular

<ul style="list-style-type: none"> ● Reaktor 	
○ Diameter Screw	: 195 mm
○ Diameter tabung dalam	: 203,2 mm
○ Diameter tabung luar	: 254,0 mm
○ Panjang reaktor	: 1600 mm
○ Tinggi reaktor	: 1700 mm
○ Jarak Pitch	: 100 mm
○ Diameter poros	: 50 mm
○ Kecepatan Putar	: 0,5 rpm
○ Kapasitas maksimum	: 5 kg/jam
<ul style="list-style-type: none"> ● Sistem Penggerak 	
○ Electromotor	: 2 unit @ 2 dan
○ Ratio gear Reducer	0,5 Hp : 2 unit @ 1 : 60
<ul style="list-style-type: none"> ● Medium Pemanas 	
○ Jenis medium pemanas	: Heat Trasfer Oil Caflo™AF
○ Merk medium pemanas	: Petro Canada
○ Temperatur Maksimum	: 375 °C
○ Tekanan kerja	: 1 atm
<ul style="list-style-type: none"> ● Sistem Pembakaran 	
○ Ruang Bakar	: Horizontal Burner
○ Bahan Bakar	: Liquid Petroleum Gas (LPG)

Prosedur Pengujian dan Perhitungan

Penelitian dilakukan secara eksperimental. Energi masuk (Q_{in}) meliputi energi yang terkandung dalam biomassa mentah (biomassa masuk reaktor) yang dihitung menggunakan Pers. (1) dan energi dari LPG (Pers. 2).

$$Q_{B,in} = m_{B,in} \cdot HHV_B \quad (1)$$

dengan

$$Q_{B,in} = \text{energi biomassa masuk (kJ)}$$

$$m_{B,in} = \text{massa biomassa masuk (kg)}$$

$$HHV_B = \text{nilai kalor biomassa mentah (kJ/kg)}$$

Biomassa masuk reaktor ditentukan melalui penimbangan dengan penimbang digital. Nilai kalor biomassa diperoleh melalui uji laboratorium nilai kalor yang dilakukan di Tekmira, BRIN, Bandung.

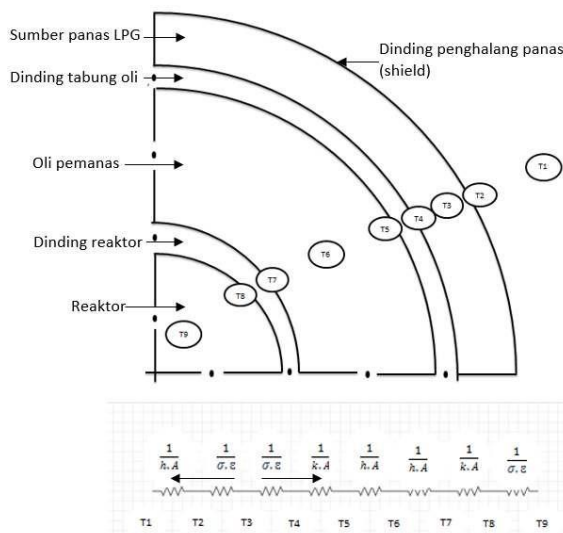
$$Q_{LPG} = m_{LPG} \cdot HHV_{LPG} \quad (2)$$

Massa LPG ditentukan berdasarkan massa LPG yang terpakai saat pengujian, yaitu selisih massa LPG sebelum dan sesudah proses pengujian dilakukan. Sedangkan nilai kalor LPG didapat data spesifikasi LPG yang tersedia di situs Pertamina dengan nilai sebesar 50.456 kJ/kg.

Energi keluar (Q_{out}) adalah energi dari biomassa produk torefaksi. Nilai kalornya ditentukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium Tekmira, BRIN, Bandung dan nilai energinya dihitung berdasarkan Pers. 3.

$$Q_{tor} = m_{B,tor} \cdot HHV_{B,tor} \quad (3)$$

Energi terbuang (heat loss) yang dihitung dalam penelitian ini adalah panas yang dikonveksikan oleh dinding penghalang panas (*shield*) ke udara lingkungan. Panas ini berasal dari panas hasil pembakaran gas LPG yang diradiasikan ke shield dan dinding oli. Gambar sketsa proses perpindahan panas pada reaktor torefaksi dan analogi listrik dari proses perpindahan panasnya ditampilkan seperti yang terlihat pada Gbr. 2.



GAMBAR 2. Sketsa proses perpindahan panas pada reaktor torefaksi dan analogi listriknya

dengan

- T_1 = Temperatur lingkungan, °C
- T_2 = Temperatur *shield*, °C
- T_3 = Temperatur ruang pembakaran, °C
- T_4 = Temperatur dinding luar tabung oli, °C
- T_5 = Temperatur dinding dalam tabung oli, °C
- T_6 = Temperatur oli, °C

- T_7 = Temperatur dinding luar reaktor, °C
- T_8 = Temperatur dinding dalam reaktor, °C
- T_9 = Temperatur reaktor, °C

T_1 , T_2 , T_6 , dan T_9 , didapat dari pengukuran menggunakan termokopel. T_1 , dan T_2 diukur di satu lokasi pengukuran sedangkan T_6 , dan T_9 diukur di tiga lokasi berbeda (lokasi input, tengah, dan output) selanjutnya digunakan nilai rata-ratanya. Kemudian temperatur yang lain ditentukan menggunakan perpindahan panas konduksi/konvensi/radiasi seperti yang diilustrasikan oleh analogi listrik dalam Gbr. 2 dan panas yang dihasilkan oleh pembakaran LPG dihitung sesuai dengan Pers. 2.

Perhitungan neraca energi dilakukan saat pemanasan oli sampai temperatur oli mencapai temperatur torefaksi yang diinginkan dan saat proses torefaksi berlangsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini pertama dilakukan pemanasan oli termal sampai temperatur 275 °C. Nilai dari parameter-parameter yang digunakan di tabulasi dalam Tabel 2 berikut:

TABEL 2. Nilai dari parameter pada saat proses pemanasan oli

Nama	Nilai
Massa gas (m_{LPG})	2,4 kg
HHV Gas LPG 12 kg	50.456 kJ/kg
c_p oli termal	1.6794 kJ/kg . K
Temperatur (ΔT)	246 °C
Waktu (t)	85 menit atau 5.100 detik

Kemudian dilanjutkan dengan proses torefaksi yang berlangsung selama 65 menit. Pada proses torefaksi nilai dari parameter-parameter yang digunakan ditabulasikan dalam Tabel 3.

Pada saat proses pengujian torefaksi menggunakan biomassa jenis kayu keras pada temperatur 275°C didapatkan besar energi input dan energi output. Adapun energi input yang terjadi pada proses torefaksi ini meliputi energi yang terkandung dalam gas LPG 12 kg, HHV pada kayu mentah dan laju massa air untuk pendingin sampel kayu torefaksi. Proses torefaksi ini menggunakan sumber energi yang berasal dari tabung LPG 12 kg sebagai energi utamanya, pada proses ini LPG akan ditimbang massa awal sebelum digunakan dan massa akhir

setelah pemakaian. Hal ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar massa gas LPG yang digunakan dan energi yang diperlukan pada saat proses pengujian torefaksi berlangsung.

TABEL 3. Nilai dari parameter pada saat proses torefaksi

Parameter	Nilai
Massa gas (m_{LPG})	1,8 kg
HHV Gas LPG 12 kg	50.456 kJ/kg
HHV sampel kayu	4.087 Cal/g = 17.100 kJ/kg
Debit air (Q)	2.100 liter/jam = 2,1 (m ³ /s)
Waktu (t) torefaksi	65 Menit (3.900 s)
Massa jenis air (ρ)	997 kg/m ³
Massa sampel kayu (m_B)	2 kg
Massa sampel kayu tertorefaksi ($m_{B,tor}$)	1,4 kg
HHV sampel kayu tertorefaksi	5.076 cal/g = 21.236 kJ/kg
Entalpi air ($H_{40^\circ C}$)	167,6 kJ/kg
A_1 (Luas permukaan shield)	0,888 m ²
h_c udara	5 W/m ² K

Sebelum dilakukan proses pengujian sampel perlu dilakukan pemanasan awal terlebih dahulu untuk mencapai temperatur oli yang seragam sekitar 275°C, proses ini dilakukan selama 85 menit sampai temperatur dalam kondisi stabil. Pada proses pemanasan ini didapatlah dua komponen energi yang diberikan kedalam reaktor yaitu energi gas LPG (Q_{LPG}) dan energi oli (Q_{oli}), nilai energi gas LPG adalah sebesar 121.093 kJ dan nilai energi gas oli adalah sebesar 5.009 kJ. Sesuai dengan data tersebut diatas, energi yang diberikan oleh gas tidak sama

dengan energi yang dibutuhkan oli untuk mencapai temperatur 275°C sehingga terjadilah peristiwa energi yang hilang atau panas terbuang (Q_{loss}). Energi hilang yang terjadi pada proses pemanasan sebesar 116.085 kJ.

Terdapat 3 komponen energi yang terjadi pada saat proses pengujian yaitu, energi input (Q_{in}), energi output (Q_{out}), dan panas terbuang (Q_{loss}). Energi yang diberikan kedalam reaktor ada 3 macam yaitu, energi dari pembakaran gas LPG 12 kg, sampel kayu mentah, dan air pendingin kayu tertorefaksi. Nilai energi input dari gas LPG saat proses pengujian adalah sebesar 90.820 kJ. Hasil uji laboratorium sampel kayu mentah didapat nilai *Higher Heating Value* (HHV) nya sebesar 17.100 kJ/s dan dengan menggunakan Pers. 1 didapat energi dari kayu sebesar 34.200 kJ. Pada saat pengujian juga digunakan air yang berfungsi sebagai pendingin kayu yang telah di torefaksi dengan nilai sebesar 237,3 kJ.

Sampel yang mengalami proses torefaksi akan menyerap energi yang masuk ke dalam reaktor, sehingga pada saat sampel keluar ada dua komponen yang menyerap energi atau disebut Q_{out} yaitu energi kayu torefaksi dan air keluar setelah mendinginkan kayu tertorefaksi. Untuk mencari energi pada sampel kayu tertorefaksi, digunakan nilai HHV massa sampel kayu tertorefaksi hasil pengujian laboratorium yang nilainya sebesar 21.238 kJ. Energi kayu tertorefaksi dihitung dengan mengalikan HHV kayu tertorefaksi dengan massa kayu tertorefaksi (Pers. 3). Massa kayu setelah pengujian torefaksi adalah sebesar 1,4 kg sehingga didapat energi pada sampel tertorefaksi sebesar 29.733,1776 kJ, sedangkan untuk energi air keluar atau Q_{air} dengan nilai sebesar 379,16 kJ.

Nilai-nilai dari energi ini ditabelkan dalam Tabel 4 berikut.

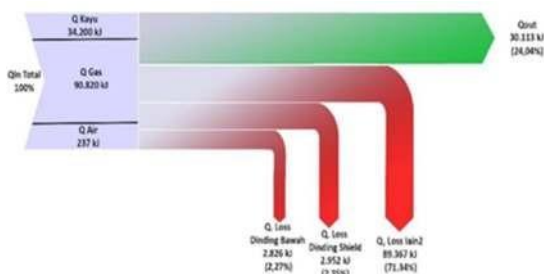
TABEL 4. Hasil perhitungan neraca energi reaktor torefaksi kontinu tipe turbular.

No.	Energi input (Q_{in})		Energi output (Q_{out})		Energi losses (Q_{los})	
	Nama	Nilai	Nama	Nilai	Nama	Nilai
1.	Gas	90.820 kJ	Air	379,1 kJ	Dinding shield	2.952 kJ
2.	Kayu	34.200 kJ	Kayu	29.734 kJ	Dinding bawah	2.826 kJ
3.	Air	237,3 kJ				
Total	125.257 kJ		30.113 kJ		5.778 kJ	

Pada saat proses pengujian berlangsung terjadi peristiwa *heat loss*, hal ini dikarenakan proses pengujian dilakukan pada suhu lingkungan sehingga terjadi proses perpindahan panas antara *shield* yang bertemperatur tinggi ke lingkungan yang bertemperatur lebih rendah. Melalui hasil perhitungan, bahwasanya terdapat beberapa komponen Q_{loss} antara lain terjadi pada dinding atas reaktor (yang diberi *shield*) dan dinding bagian bawah reaktor yang tanpa *shield*. Q_{loss} yang terjadi pada dinding cover dianalisis menggunakan cara menghitung koefisien perpindahan panas udara, luas permukaan cover dengan asumsi temperatur dinding dan temperatur lingkungan yang berubah setiap 5 menit berdasarkan data pengujian. Sehingga didapatkan nilai dari Q_{loss} pada dinding ber *shield* sebesar 2.952 kJ.

Selanjutnya dihitung Q_{loss} yang terjadi pada dinding bagian bawah reaktor. Dengan luas permukaan dinding bagian bawah reaktor sebesar 0,585 m² dan nilai h udara adalah 5 w/m².K serta asumsi temperatur oli dan lingkungan berubah setiap 5 menit, sehingga didapatkan nilai Q_{loss} dinding bagian bawah sebesar 2.826 kJ.

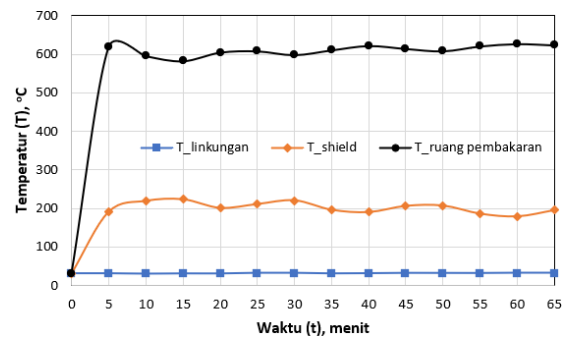
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah diuraikan diatas dibuat diagram sankey seperti Gbr. 3 dengan nilai energi yang input (Q_{in}) sebesar 125.257 kJ (100%) dan energi output (Q_{out}) sebesar 30.113 kJ (24,04%). Sehingga berdasarkan hasil analisis berdasarkan data diatas didapatkanlah 3 tempat terjadinya *heat loss* yaitu, Q_{loss} dinding bawah sebesar 2.826 kJ (2,27%), dinding shield 2.952 kJ (2,35%) dan Q_{loss} lain-lain sebesar 89.367 kJ (71.34%).



GAMBAR 3. Diagram Sankey reaktor torefaksi kontinu tipe turbular

Data temperatur yang diukur dalam penelitian adalah temperatur lingkungan (T_1), temperatur dinding shield (T_2), temperatur oli (T_6), dan temperatur reaktor (T_9). Sedangkan temperatur T_3 , T_4 , T_5 , T_7 , dan T_8 dihitung menggunakan persamaan

perpindahan panas yang sesuai (Gbr. 2) yaitu persamaan perpindahan panas konduksi/konveksi/radiasi. Distribusi temperatur T_1 , T_2 , dan T_3 dalam 65 menit proses torefaksi diperlihatkan dalam Gbr. 4.



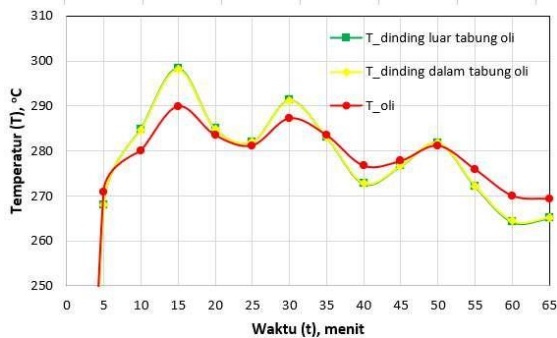
GAMBAR 4. Distribusi temperatur lingkungan, shield, dan ruang pembakaran selama proses torefaksi.

Pada Gbr. 4 terlihat bahwa temperatur lingkungan cenderung konstan. Dari data pengukuran variasi temperatur lingkungan adalah sebesar 30,4 – 31,8°C atau rata-rata temperatur lingkungan sekitar 31,25°C. Begitu juga dengan temperatur dinding shield dan temperatur ruang pembakaran LPG tidak terlalu banyak bervariasi. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk temperatur lingkungan yang konstan, proses pembakaran yang stabil energi pembakaran dipancarkan dengan stabil ke dinding shield. Rata-rata temperatur shield dari data pengukuran adalah sebesar 201,8°C dengan temperatur maksimum dan minimumnya adalah 223,1°C dan 179°C.

Besarnya energi yang dilepas ke lingkungan (Q_{loss}) dihitung menggunakan persamaan konveksi dengan mengasumsikan nilai koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 5 W/(m².°C). dari perhitungan diperoleh $Q_{loss} = 2.952$ kJ. Temperatur ruang pembakaran ditentukan menggunakan persamaan perpindahan panas radiasi. Asumsi yang digunakan adalah $Q_{loss} = Q_{rad} = 2.952$ kJ dan energi yang dipindahkan secara konveksi dan konduksi dari proses pembakaran LPG ke dinding shield diabaikan. Dari perhitungan didapat rata-rata temperatur ruang pembakaran adalah 611°C (maks. 627,6°C dan min. 583°C).

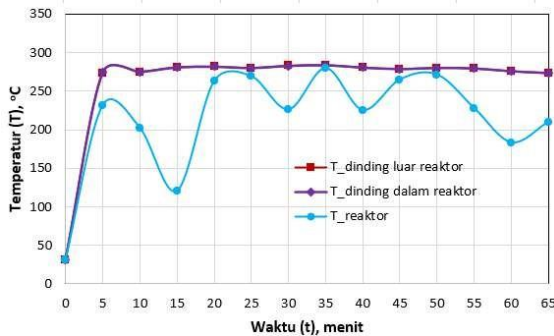
Jumlah massa LPG yang digunakan adalah sebesar 1,8 kg. dari Pers. 2 didapat besar energi yang dibangkitkan oleh LPG sebesar 90.820 kJ. Distribusi temperatur dinding oli sisi luar dan dalam serta temperatur oli di sajikan pada Gbr. 5. Karena dinding tabung oli cukup tipis maka terlihat pada Gbr. 5 tidak ada perbedaan temperatur kedua bagian tersebut. Dari hasil

perhitungan rata-rata temperatur dinding oli dalam dan luar adalah sama yaitu 278,89°C. Gambar 5 memperlihatkan fluktuasi temperatur dinding oli cukup besar sekitar 34°C.



GAMBAR 5. Distribusi temperatur dinding luar dan dalam tabung oli serta temperatur oli.

Temperatur oli juga terlihat bervariasi besar sekitar 20,6°C dengan rata-rata sebesar 279°C. Hal ini menandakan adanya losses energi selain losses dari dinding shield ke lingkungan dengan nilai yang cukup besar. Bentuk ruang bakar yang terbuka memungkinkan kehilangan energi berupa energi dari exhaust produk pembakaran yang belum terukur dalam penelitian ini.



GAMBAR 6. Distribusi temperatur dinding luar dan dalam reaktor serta temperatur reaktor.

Dari oli selanjutnya energi ditransfer ke dinding reaktor. Sama seperti dinding tabung oli, temperatur dinding luar dan dalam tabung reaktor juga hampir sama (dapat dilihat pada Gbr. 6) dengan nilai rata-rata sebesar 279,13°C dan variasi yang kecil 273°C - 283°C. Seperti temperatur oli, temperatur reaktor juga berfluktuasi sangat besar sekitar 159°C dengan temperatur rata-rata 228,7°C serta $T_{min} = 120,6^\circ\text{C}$ dan $T_{max} = 279,5^\circ\text{C}$. Penurunan temperatur yang tajam pada reaktor diprediksi disebabkan oleh kehilangan energi yang besar saat memasukkan kayu mentah ke reaktor dengan membuka katup. Terbukanya katup inlet menyebabkan panas dalam reaktor lepas keluar sehingga temperatur reaktor menjadi drop secara signifikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan data eksperimen yang diperoleh dan hasil perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Neraca energi dari reaktor torefaksi kontinu turbular adalah energi masuk/input (Q_{in}) sebesar 125.257 kJ berupa energi bahan bakar LPG, energi biomassamentah, dan energi air pendingin, energi output (Q_{out}) berupa energi biomassa tertorefaksi dan energi air pendingin keluar reaktor sebesar 30.113 kJ atau 24,04% dari total energi input, dan energi terbuang (Q_{loss}) sebesar 95.145 kJ 75,96% dari total energi input.
2. Energi terbuang dapat dikurangi melalui penempatan isolasi panas sekeliling reaktor dan atau memanfaatkan energi tersebut untuk mengeringkan biomassa sebelum diumpukan ke reaktor torefaksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pino Amrullah, Ahmad Zikautsar, dan Nurazizah Patmawati yang telah membantu dalam penelitian yang dipublikasikan dalam seminar ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul, Hardianto, T., Suwono, A., Pasek, A.D., & Irhamna, A.R. (2013). Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, Bandar Lampung, (pp.76-82). ISBN 978 979 8510 61 8.
- Apriyanto, A., Amrul, & Amrizal, (2018). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Jurnal Mechanical*, vol. 6 (2), pp. 54 – 66.
- Basu, Prabir. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical*

- Design and Theory*. 2nd Ed., San Diego, USA: Elsevier Inc.
- Becidan, M., (2007). *Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis*. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Energy and Process Technology.
- Chen, C., Qu, B., Wang, W., Wang, W., Ji, G., & Li, A., (2021). Rice husk and rice straw torrefaction: Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass. *Environmental Technology & Innovation*, 24 (101872).
- Daniyanto, Sutidjan, Deendarlianto, & Budiman, A., (2015). Torrefaction of Indonesian sugar-cane bagasse to improve bio-syngas quality for gasification process. *Energy Procedia*. Vol. 68, pp. 157 – 166.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Hidayat, W., (2020). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 7 (2). Diakses dari <http://www.procedia-esem.eu>.
- Maryenti, R., Komalasari, & Helwani, Z. (2017). Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi Pada Variasi Suhu Waktu Torefaksi. *Jom FTEKNIK*, volume 4 no. 1. Jurnal Teknik Universitas Riau.
- Nakason, K., Khemthong, P., Kraithong, W., Chukaew, P., Panyapinyopol, B., Kitkaew, D., & Pavasant, P., (2021). Upgrading properties of biochar fuel derived from cassava rhizome via torrefaction: Effect of sweeping gas atmospheres and its economic feasibility. *Case Studies in Thermal Engineering*, 23 (100823).
- Nguyen, Q., Nguyen, D.D., He, C., & Bach, Q.V., (2021). Pretreatment of Korean pine (*Pinus koraiensis*) via wet torrefaction in inert and oxidative atmospheres. *Fuel*, 291 (119616).
- Soh, M., Khaerudini, D.S., Chew, J.J., & Sunarso, J. (2021). Wet torrefaction of empty fruit bunches (EFB) and oil palm trunks (OPT): Effects of process parameters on their physicochemical and structural properties. *South African Journal of Chemical Engineering*, Volume 35, pp. 126-136.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Hasanudin, U., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., & Hidayat, W. (2020). Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan Electric Furnace terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*, Vol. 8 No. 1, pp. 65-76.
- Susilowati, Komalasari, & Helwani, Z. (2017). Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi; Variasi Suhu dan Ukuran Bahan Baku. *Jom FTEKNIK*, volume 4 no. 1. Jurnal Teknik Universitas Riau.
- Tanoue, K., Hikasa, K., Hamaoka, Y., Yoshinaga, A., Nishimura, T., Uemura, Y., & Hiden, A. (2020). Heat and Mass Transfer during Lignocellulosic Biomass Torrefaction: Contributions from the Major Components—Cellulose, Hemicellulose, and Lignin. *Process*, 8, 959. Diakses dari www.mdpi.com/journal/process.
- Triyono, B., Prawisudha, P., Aziz, M., Mardiyati, Pasek, A.D., & Yoshikawa, K. (2019). Utilization of mixed organic-plastic municipal solid waste as renewable solid fuel employing wet torrefaction. *Waste Management* 95, 1–9.
- Wahyudi, R., Amrul, Irsyad, M., (2020). Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. *Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*. Volume 20 (2). DOI : 10.24036/invotek.v20i2.706

PENULIS:

Harmen

Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung.

Email: harmen.1969@eng.unila.ac.id

Zulkri Kurniawansah, Amrul, Hadi Prayitno

Konversi Energi, Laboratorium Termodinamika, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung.