

Perancangan dan Simulasi Numerik Perpindahan Panas pada Reaktor Pirolisis tipe *Fixed-Bed* Skala Laboratorium

Thoharudin^{1,*}, Muhammad Nadjib¹ dan Tito Hadji Agung Santosa¹

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta – Yogyakarta

*Korespondensi: thoharudin@ft.umy.ac.id

Abstrak. Pirolisis merupakan proses dekomposisi termo kimia dari material padat menjadi bentuk padat, cair dan gas melalui reaksi endotermis. Oleh karena itu, perancangan reaktor pirolisis sangat penting agar temperatur pirolisis dapat tercapai sehingga terbentuk produk yang dapat dimanfaatkan, antara lain arang, *bio-oil*, dan *flamable gas*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang reaktor pirolisis dengan melibatkan pendekatan perpindahan panas transien dan simulasi numerik, dilanjutkan validasi dengan hasil eksperimen. Material insulator yang digunakan pada reaktor pirolisis yaitu batu tahan api dan *glass wool*, sementara dinding reaktor pirolisis terbuat dari *stainless steel*. Melalui proses analisis perpindahan panas secara transien selama satu jam, kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan reaktor hingga temperatur 500°C adalah 2513,2 Watt. Berdasarkan pendekatan secara simulasi numerik dengan jumlah kalor yang telah ditetapkan, reaktor pirolisis mampu mencapai temperatur 500°C pada menit ke-58,7. Sementara itu, pada hasil eksperimen waktu yang diperlukan agar reaktor mencapai temperatur 500°C adalah 80 menit.

Kata kunci: *pyrolyzer*, *fixed bed*, perpindahan panas, simulasi numerik

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Energi merupakan faktor yang sangat penting dalam berbagai sektor. Indonesia merupakan negara berkembang yang tidak lepas dari penggunaan energi. Tercatat penggunaan energi Indonesia per tahun mencapai 6200 Triliun BTU dan akan terus berkembang dengan berdirinya pembangkit listrik baru yang ditargetkan tahun 2019 sebesar 25%-nya berasal dari sumber energi baru dan terbarukan [1].

Eksplorasi energi fosil yang berkelanjutan berdampak pada turunnya cadangan minyak dunia dan akibatnya harga minyak cenderung naik. Selain itu, penggunaan energi fosil juga berdampak pada perubahan iklim akibat naiknya suhu permukaan bumi. Oleh karena itu, perlu adanya energi baru dan terbarukan yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil yang ramah terhadap lingkungan dan dapat digunakan secara berkelanjutan.

Indonesia merupakan negara tropis yang kaya akan hasil limbah biomassa. Pada tahun 2009, tercatat Indonesia memiliki energi dari biomassa sebesar 279,25 juta setara barel minyak yang mana penggunaan dalam bidang energi masih 22% [2]. Selain itu, sampah yang mengandung energi di Indonesia juga melimpah, diantaranya adalah sampah plastik. Sampah plastik di Indonesia mencapai 187,2 ton pertahun yang merupakan urutan kedua dunia penghasil sampah plastik setelah Tiongkok [3] yang mana kandungan energi dalam plastik tersebut masih tinggi yaitu sebesar 42,1 hingga 49,4 MJ/kg [4].

Ada beberapa macam teknologi yang dapat digunakan untuk mengubah sampah menjadi energi. Salah satunya adalah pirolisis. Pirolisis merupakan dekomposisi termokimia dari suatu material baik organik maupun anorganik menjadi produk yang lebih berguna yang prosesnya tanpa melibatkan oksigen [5]. Produk utama dari pirolisis adalah minyak serta gas dan arang sebagai produk sampingnya. Baik produk minyak, gas dan arang memiliki kandungan energi yang dapat dimanfaatkan dalam proses pembakaran.

Pirolisis merupakan proses termokimia yang dalam reaksinya memerlukan reaktor sebagai tempat berlangsungnya proses dekomposisi termal. Reaktor pirolisis banyak dikembangkan menjadi beberapa jenis, antara lain *fixed-bed*, *fluidized-bed*, *ablative*, *rotating cone* dan *vaccum pyrolyzer* [5]. Akan tetapi reaktor yang paling sederhana dan biasa digunakan dalam skala laboratorium adalah tipe *fixed-bed* [6].

Pembuatan reaktor pirolisis (*pyrolyzer*) memerlukan proses perancangan agar target temperatur yang diperlukan dapat tercapai dengan kebutuhan energi yang rendah. Oleh karena itu makalah ini akan menyajikan metode perancangan dengan pendekatan perpindahan panas transien serta simulasi numerik menggunakan *software* ANSYS Fluent R18.0 Academic Version.

Metode

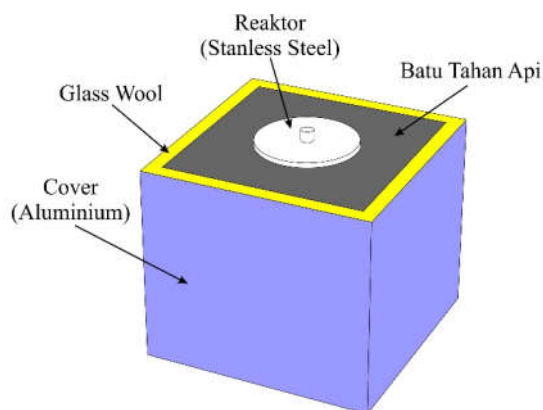
1. Perancangan *pyrolyzer*

Pyrolyzer yang dibuat merupakan jenis *fixed-bed pyrolyzer* untuk kapasitas biomassa 1 kg. Beberapa properti sampel biomassa dan bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan *pyrolyzer* dapat dilihat pada table 1. Melihat pada tabel 1 bahwa densitas rata-rata biomassa sebesar 548,3 kg/m³ sehingga kebutuhan volume ruang reaktor pirolisis sebesar 1,82 liter. Dengan asumsi porositas volume biomassa sebesar 0,75 dan untuk memudahkan uap pirolisis keluar dari reaktor maka volume ruangan

reaktor didesain dengan diameter 200 mm dan tingginya 200 mm. Reaktor pirolisis dibuat berbentuk silinder agar keseragaman temperatur pada ketinggian biomassa yang sama dapat tercapai. Dengan mempertimbangkan dimensi ruang reaktor pirolisis dan kemudahan dalam penyimpanan, maka geometri keseluruhan *pyrolyzer* didesain sedemikian rupa seperti terlihat pada gambar 1 dan dimensinya ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 1. Properti material yang digunakan dalam perancangan [7]

Jenis Material	Densitas (kg/m ³)	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Kalor Jenis (J/kg.K)	Difusivitas Thermal (m ² /dt)
Batu tahan api	2050	1,0	960	5,08x10 ⁻⁷
Glass wool	16	0,0046	835	3,44x10 ⁻⁷
SS AISI 316	8238	13,4	468	3,48x10 ⁻⁶
Aluminium	2770	177	875	7,30 x10 ⁻⁵
Kayu Pinus	510	0,12	1380	1,71x10 ⁻⁷
Kayu Oak	720	0,16	1255	1,77x10 ⁻⁷
Kayu Cemara	415	0,11	2720	9,75x10 ⁻⁸



Gambar 1. Geometri Reaktor Pirolisis

Tabel 2. Dimensi *Pyrolyzer*

Kegunaan	Material	Dimensi	Nominal (mm)
Cover luar	Aluminium	Tebal	1
Insulator	Glass wool	Tebal	30
Insulator	Batu tahan api	Panjang	400
		Lebar	400
		Tinggi	400
Reaktor	Stainless Steel	Diameter	200
		Tinggi	200

Proses perancangan *pyrolyzer* melibatkan beberapa material sebagai insulator termal sehingga rugi panas yang keluar pada dinding reaktor menjadi rendah. Properti dari material-material insulator tersebut dapat dilihat pada tabel 1. Kebutuhan kalor proses pirolisis (\dot{Q}_p) dihitung dengan menjumlahkan kalor yang keluar melalui dinding (\dot{Q}_L), kalor yang digunakan untuk memanaskan material reaktor (\dot{Q}_G) dan kalor yang keluar melalui uap

pirolisis (\dot{Q}_S) seperti terlihat pada persamaan 1 dengan estimasi waktu pirolisis selama satu jam untuk mencapai temperatur 500°C.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_L + \dot{Q}_G + \dot{Q}_S \tag{1}$$

Untuk mengestimasi rugi kalor yang keluar melalui dinding (\dot{Q}_L), bentuk reaktor disederhanakan menjadi dua dimensi dan perpindahan panasnya dihitung dengan persamaan 2 - 5 [7].

$$\dot{Q}_L = q'' \times A \tag{2}$$

$$q'' = h[T(L, t) - T_\infty] \tag{3}$$

$$T(L, t) = T_\infty + (T_i - T_\infty)\theta_o^* \cos(\zeta_1) \tag{4}$$

$$\theta_o^* = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty} = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \tag{5}$$

Kalor yang digunakan untuk memanaskan reaktor (\dot{Q}_G) dihitung dengan persamaan 6 - 8 [7].

$$\frac{Q_G}{Q_o} = 1 - \frac{\sin \zeta_1}{\zeta_1} \theta_o^* \tag{6}$$

$$Q_o = \rho cV(T_i - T_\infty) \tag{7}$$

$$\dot{Q}_G = \frac{Q_G}{t} \tag{8}$$

Sementara itu, untuk memperkirakan kalor yang keluar melalui uap pirolisis (\dot{Q}_S) dihitung dengan persamaan 9.

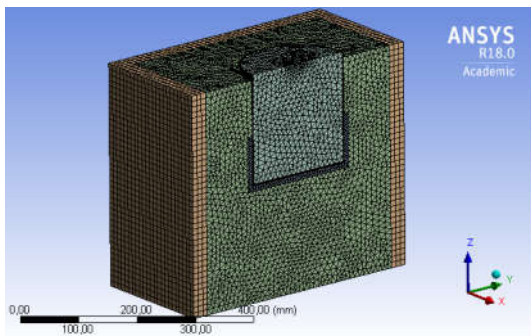
$$\dot{Q}_S = \dot{m}_S \times h_g \tag{9}$$

2. Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent R18.0 Academic Version untuk memodelkan distribusi temperatur

pada proses pirolisis. Proses simulasi melibatkan tiga tahap, yaitu *pre-processing* dengan membuat gambar 3D geometri dan membuat mesh, dilanjutkan dengan *processing* yaitu dengan mendeskripsikan pemodelan dan proses iterasi, kemudian *post-processing* untuk menampilkan hasil simulasi. Dalam proses ini, simulasi yang dilakukan hanya terhadap perpindahan panasnya saja, tanpa melibatkan reaksi-reaksi yang terjadi pada proses pirolisis.

Pembuatan geometri 3D dilakukan dengan *software* Autodesk Inventor. Untuk menghemat waktu dan proses simulasi maka geometri dimodelkan hanya setengah dari *pyrolyzer* sehingga pada bagian potongan dimodelkan dengan kondisi batas *symmetry*. Sementara itu, ukuran mesh dibuat beragam dengan pertimbangan ketebalan komponen yang beragam dan letak ketelitian proses numerik. Ukuran paling kecil dari komponen lain terletak pada pemanas listrik (*heater*) dan dinding reaktor (*stainless steel*). Hasil dari proses *meshing* dapat dilihat pada gambar 2. Jumlah nodal yang terbentuk sebesar 126.981 dengan jumlah element sebesar 500.321 *cells*.



Gambar 2. Hasil proses meshing

Simulasi dilakukan dengan model transien selama 60 menit. Pembangkitan panas dimodelkan dengan *source term* pada volume *heater* dengan besar daya pembangkitan sesuai dengan hasil perhitungan pada persamaan 1. Bagian sisi terluar dimodelkan dengan konveksi alami dan temperatur lingkungan dikontrol pada 27°C. Pengukuran temperatur diletakkan pada $T_1= 5 \text{ mm}$, $T_2= 50 \text{ mm}$, $T_3= 100 \text{ mm}$, $T_4= 150 \text{ mm}$, dan $T_5= 200 \text{ mm}$ dari dasar reaktor.

Hasil dan Pembahasan

1. Desain dan Manufaktur

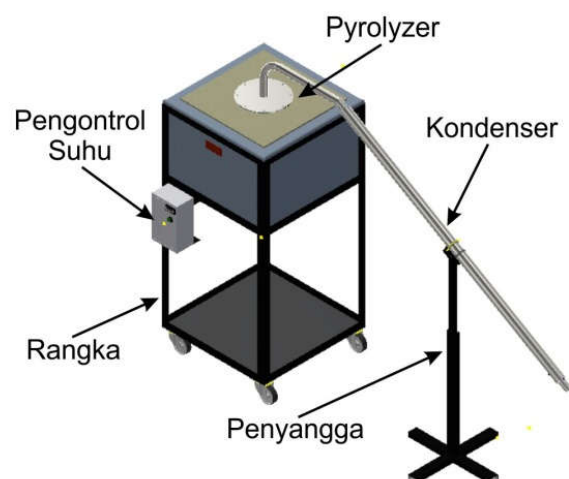
Perancangan kebutuhan pemanas *pyrolyzer* didesain dengan mengakumulasi kebutuhan panas pirolisis. Melalui proses perhitungan rugi kalor melalui dinding (\dot{Q}_L), kalor pemanasan reaktor (\dot{Q}_G), dan kalor yang keluar melalui uap pirolisis

(\dot{Q}_S) diperoleh data perhitungan yang ditampilkan pada tabel 3. Dengan demikian, kebutuhan kalor proses pirolisis diperoleh sebesar 2513,2 Watt. Sumber panas yang digunakan berasal dari pemanas listrik ditempatkan di bawah dan di samping reaktor. Pemanas listrik yang tersedia berbentuk tubular berkapasitas 1500 Watt dan 1350 Watt bertegangan 240 V, sehingga dengan menyesuaikan tegangan listrik 220 V daya total pemanas listrik yang dihasilkan sebesar 2612,5 Watt.

Tabel 3. Data kebutuhan kalor *pyrolyzer*

Kebutuhan Kalor	Jumlah (Watt)
Rugi kalor pada dinding reaktor (\dot{Q}_L)	228,1
Kalor pemanasan reaktor (\dot{Q}_G)	1846,3
Kalor uap pirolisis (\dot{Q}_S)	438,8
Kebutuhan kalor total	2513,2

Pyrolyzer dilengkapi dengan pengontrol suhu untuk mengatur nyala dan matinya pemanas listrik. Selain itu, *pyrolyzer* juga dilengkapi dengan kondenser yang berfungsi untuk mendinginkan uap pirolisis agar dapat berubah fasa dari gas menjadi cair (*bio-oil*). Kondenser tersebut bekerja dengan pendinginan aliran air sistem *water jacket* dan minim belokan. Bentuk kondenser ini tidak seperti pada umumnya yang berbentuk spiral. Hal ini dipertimbangkan karena uap pirolisis keluar dari reaktor memiliki tekanan yang rendah sehingga jika terlalu banyak belokan pada saluran, *pressure drop* yang terjadi semakin besar yang berakibat pada penggumpalan tar yang akhirnya menyumbat saluran. Rancangan *pyrolyzer* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Rancangan *Pyrolyzer*

Proses manufaktur *pyrolyzer* dimulai dengan pembuatan reaktor pirolisis yang terbuat dari plat stainless steel. Plat stainless steel dipotong dengan panjang 126 cm, lebar 20 cm kemudian diproses

dengan pengerolan sehingga membentuk tabung silinder. Bagian bawah reaktor ditutup dengan plat stainless steel dengan profil lingkaran. Baik bagian sambungan sisi tabung silinder maupun bagian bawah reaktor disambung dengan proses pengelasan. Bagian penutup atas reaktor disambung dengan sambungan baut sehingga dapat dibuka dan ditutup. Bagian tersebut kemudian dilas menjadi satu dengan bagian kondenser/pendingin.

Rangka yang digunakan terbuat dari besi profil siku yang disusun dengan sambungan las. Rangka yang sudah tersusun kemudian digunakan untuk meletakkan batu tahan api dan sekaligus dengan semen tahan api untuk merekatkan batunya. Setelah menunggu hingga kering, kemudian bagian luar batu tahan api dilapisi dengan glass wool dan penutup bagian luar yang terbuat dari plat paduan aluminium.

Pemanas listrik diletakkan di bawah dan samping reaktor yang terhubung dengan unit pengontrol suhu. Sementara itu, unit kondenser didinginkan dengan air yang bersirkulasi dengan pompa jenis *submersible pump* melalui sistem *water jacket*. Hasil dari proses manufaktur *pyrolyzer* dapat dilihat pada gambar 4.

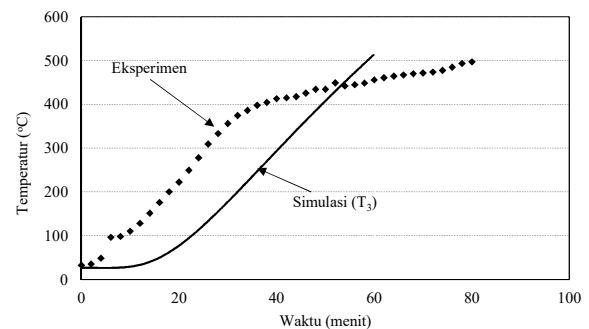


Gambar 4. Hasil manufaktur *pyrolyzer*

2. Simulasi dan Pengujian Alat

Proses simulasi dilakukan dengan model yang disederhanakan hanya untuk melihat capaian temperatur hingga 500°C, sehingga proses penguapan uap air dalam biomassa serta reaksi-reaksi yang terjadi pada proses pirolisis diabaikan. Perubahan temperatur tengah reaktor (T_3) antara hasil simulasi dan eksperimen dapat dilihat pada gambar 5. Terlihat pada gambar 5 bahwa dengan semakin lama waktu maka temperatur tengah reaktor semakin besar baik dari hasil simulasi maupun eksperimen. Akan tetapi terjadi perbedaan temperatur dengan waktu yang sama. Berdasarkan hasil simulasi, target temperatur 500°C terjadi pada menit

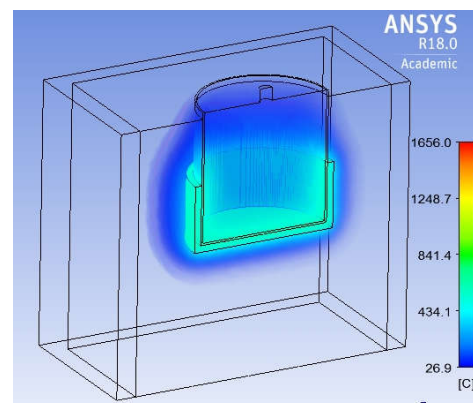
ke-58,7 dimana hampir sama dengan desain waktu perencanaan alat (60 menit), sementara untuk hasil eksperimen tercapai pada menit ke-80.



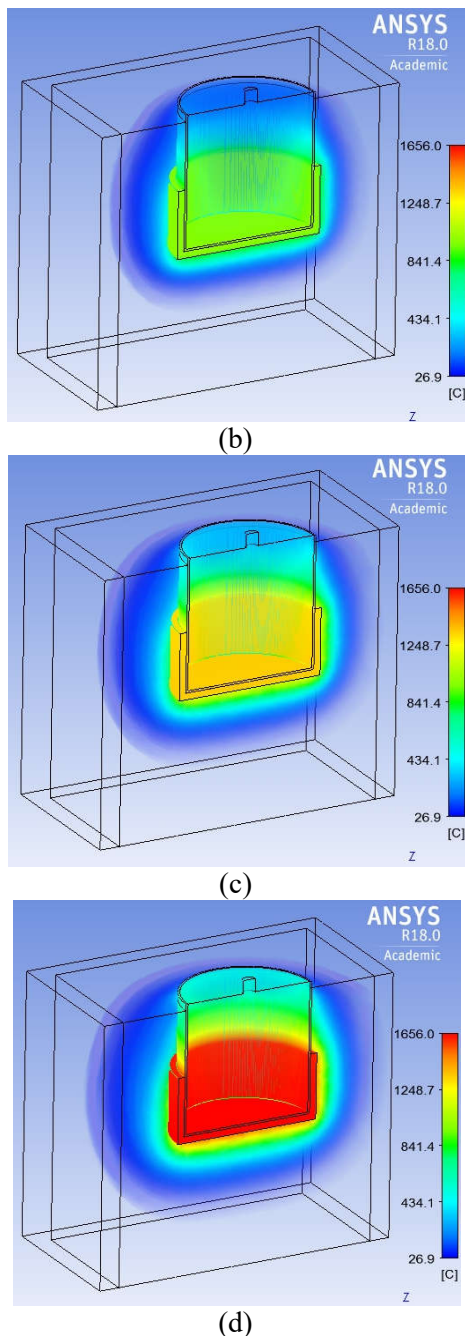
Gambar 5. Temperatur tengah reaktor pirolisis (T_3)

Perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen disebabkan oleh proses pirolisis itu sendiri. Pada simulasi yang tanpa melibatkan proses penguapan dan reaksi pirolisis terlihat landai pada menit awal dan terjadi kenaikan yang signifikan pada menit ke 20 ke atas. Sementara itu, pada hasil eksperimen kenaikan temperatur yang signifikan terjadi di awal pemanasan selanjutnya setelah menit ke 30 kenaikan temperaturnya menjadi landai. Hal ini disebabkan oleh proses penguapan kadar air dalam kayu sehingga proses pemanasan di tengah reaktor lebih cepat dan pada proses pirolisis yang reaksinya endotermis maka laju pemanasan reaktor menjadi lambat karena energi panas yang disuplai oleh pemanas listrik diserap untuk proses reaksi pirolisis. Hal ini yang tidak terjadi pada simulasi numerik, sehingga capaian temperatur 500°C lebih cepat dari eksperimennya.

Laju perubahan temperatur tiap waktu simulasi *pyrolyzer* disajikan pada gambar 6.



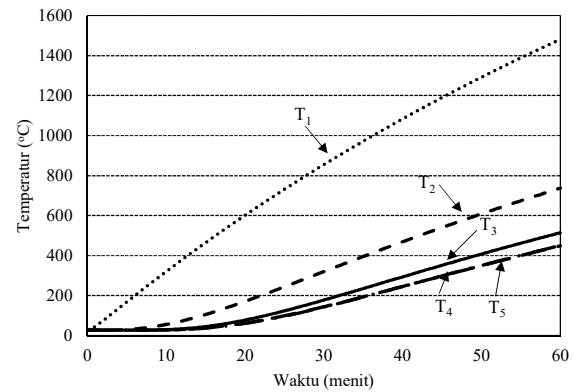
(a)



Gambar 6. Hasil simulasi perubahan temperatur *pyrolyzer* terhadap waktu; (a) menit ke-15, (b) menit ke-30, (c) menit ke-45, (d) menit ke-60

Terlihat pada gambar 6 bahwa terjadi perbedaan temperatur yang signifikan antara pemanas dengan komponen yang lain dengan semakin lamanya waktu pemanasan. Pada menit ke-60, temperatur pemanas listrik sudah mencapai 1656 °C dan temperatur tengah reaktornya hanya sebesar 513,9 °C. Perbedaan temperatur yang sangat signifikan ini terjadi karena konduktivitas termal material yang rendah sehingga distribusi temperatur tidak merata. Konduktivitas termal yang rendah pada batu tahan api dan *glass wool* sangat baik digunakan sebagai insulator. Akan tetapi material kayu sebagai bahan baku pirolisis juga memiliki konduktivitas termal

yang rendah akibatnya kalor yang dibangkitkan melalui pemanas listrik sulit untuk dilepaskan sehingga temperatur pemanas listrik menjadi sangat tinggi. Distribusi temperatur T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , dan T_5 terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 7. Sementara itu, sampel minyak hasil pirolisis yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 7. Distribusi temperatur T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , dan T_5 terhadap waktu



Gambar 8. Sampel minyak pirolisis

Kesimpulan

Reaktor pirolisis tipe *fixed-bed* telah dirancang dengan *software* Inventor dan kemudian disimulasikan perpindahan panasnya menggunakan *software* ANSYS Fluent R18.0 Academic Version. Berdasarkan perhitungan perpindahan panas transien, kebutuhan daya pemanasan reaktor adalah 2513,2 Watt. Daya sebesar ini telah mempertimbangkan faktor-faktor seperti kebutuhan kalor pemanasan reaktor, rugi kalor pada dinding insulator dan kalor yang terbuang melalui uap pirolisis. Pencapaian waktu pemanasan reaktor hingga temperatur 500°C adalah 58,7 menit untuk hasil simulasi dan 80 menit untuk hasil eksperimen.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya atas dukungan pembiayaan dari LP3M UMY melalui hibah Penelitian Dosen Muda dengan judul “Metode Pembuatan Bahan Bakar Cair

Ramah Lingkungan dari Limbah Cangkang Sawit dan Sampah Plastik dengan Pirolisis Berkatalis Kalsium Oksida (CaO).

Co-Pyrolysis of Waste Rubber/Plastics Blended, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 115, p. 37–42.

Nomenclature

- \dot{Q}_P = Kalor yang dibutuhkan untuk proses pirolisis (Watt)
 \dot{Q}_L = Kalor yang hilang melalui dinding reaktor (Watt)
 \dot{Q}_G = Kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan material (Watt)
 \dot{Q}_S = Kalor yang hilang melalui uap pirolisis (Watt)
 q'' = Fluks kalor (W/m^2)
 A = Luas area perpindahan panas (m^2)
 h = koefisien konveksi ($W/m^2.K$)
 $T(L, t)$ = Temperatur sesaat pada waktu dan lokasi tertentu ($^{\circ}C$)
 T_{∞} = Temperatur lingkungan ($^{\circ}C$)
 Fo = Fourier Number
 C_1 = Koefisien yang digunakan dalam penyelesaian konduksi transien
 ζ_1 = Koefisien yang digunakan dalam penyelesaian konduksi transien
 \dot{m}_S = laju aliran massa uap pirolisis (kg/dt)
 h_g = Entalpi spesifik uap pirolisis (J/kg)

- [7] F. P. Incropera dan D. P. Dewitt, 2011, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Seventh penyunt., Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Referensi

- [1] T. Reber dan K. Burman, 2016, *Sustainable Energy for Remote Indonesian Grids: Strategies to Accelerate Nationwide Deployment*, U.S. Department of Energy, Denver West Parkway.
- [2] M. Hasan, T. Mahlia dan H. Nur, 2012, *A Review on Energy Scenario and Sustainable Energy in Indonesia*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 2316–2328.
- [3] H. Triyoga, “Indonesia Peringkat ke-2 Penghasil Sampah ke Laut,” 2016. [Online]. Available: <http://news.detik.com/berita/3137410/indonesia-peringkat-ke-2-penghasil-sampah-ke-laut>. [Diakses 2 September 2016].
- [4] B. Kunwar, H. Cheng, S. R. Chandrashekar dan B. K. Sharma, 2016, *Plastics to Fuel: A Review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 421–428.
- [5] P. Basu, 2010, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, Oxford: Elsevier Inc.
- [6] H. Li, X. Jiang, H. Cui, F. Wang, X. Zhang, L. Yang dan C. Wang, 2015, *Investigation on The*