

Analisis Keseimbangan Energi pada Reaktor Pirolisis Kapasitas 75 Kg/Jam

Ryanto Sirait^{1,*}, Eka Maulana², Didik Mahardika³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila
Jl.Srengseng Sawah, Jagakarsa, RT.1/RW.3, Jagakarsa Jakarta Selatan, 12640, Indonesia

*E-mail: siraitryanto13@gmail.com

ABSTRAK

Pirolisis melibatkan pemanasan plastik jenis polipropilena (PP) yang tidak ada udara atau oksigen pada tingkat temperatur maksimum, yang dikenal sebagai temperatur pirolisis, dan menahanya dalam reaktor pada waktu yang ditentukan. Karakteristik reaktor sebagai alat utama yang memerlukan energi, perlu dijelaskan secara rinci agar energi yang dihasilkan dalam reaktor lebih efisien. Sebuah reaktor pirolisis yang baik, memiliki tingkat *heat loss* yang rendah. Dengan tipe reaktor *batch* bermaterial *stainless steel* melalui percobaan selama dua jam, temperatur maksimal 300°C, dan konsumsi pemakaian gas LPG sebanyak 6 kg maka didapat perhitungan keseimbangan energi pada reaktor menjadi tujuan dalam penelitian ini. Energi masuk (E_{in}) dan Energi keluar (E_{out}) = 39.234 J/s dan Energi terlepas (Q_{losses}) = 2622,6 J/s adalah hasil keseimbangan energi yang didapat pada pengujian ini dengan disertai arah aliran fluida dan kontur simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Kata kunci: energi, reaktor pirolisis, plastik, CFD

ABSTRACT

Pyrolysis involves heating a type of polypropylene (PP) plastic that has no air or oxygen at the maximum temperature level, known as the pyrolysis temperature, and keeps it in the reactor at the specified time. The characteristics of the reactor as the main tool that requires energy, need to be explained in detail so that the energy produced in the reactor is more efficient. A good pyrolysis reactor, has a low level of heat loss. With a type of stainless steel batch reactor with a two-hour experiment, a maximum temperature of 300°C, and consumption of 6 kg of LPG gas, the calculation of energy balance in the reactor is the goal of this research. Energy in (E_{in}) and Energy out (E_{out}) = 39.234 J / s and Energy released (Q_{losses}) = 2622.6 J / s is the result of energy balance obtained in this test with accompanied by the direction of fluid flow and contours in CFD (Computational Fluid Dynamics).

Keywords: energy, pyrolysis reactor, plastic, CFD

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan kebutuhan pada kehidupan manusia. Semakin bertambahnya populasi jumlah penduduk, maka semakin besar juga kebutuhan energi yang dibutuhkan. Sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang banyak tersedia di Indonesia adalah Biomassa dengan potensi sebesar 49,86 GW dan baru dimanfaatkan sebanyak 0,9%. Biomassa merupakan suatu sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang diperbaharui dalam memproduksi dan

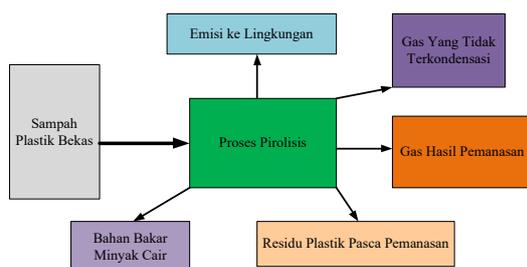
mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar yang salah satunya yaitu mengkonversi sampah plastik menjadi minyak plastik. Plastik juga mempunyai nilai kalor cukup tinggi, setara dengan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar. Upaya guna menemukan sumber energi alternatif dengan mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dengan teknologi pirolisis plastik. Permasalahan yang dihadapi pada reaktor pirolisis adalah mengetahui kinerja energi dalam bentuk panas dan analisa fluida plastik

menggunakan *software* CFD (*Computational Fluid Dynamics*) selama proses pemanasan pirolisis. Oleh karena itu perlu dilakukan studi eksperimen terhadap reaktor pirolisis dengan energi masuk dari kalor tabung gas *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) dan energi keluar adalah nilai energi pemanasan plastik menjadi uap plastik yang menjadi batasan dalam penelitian ini, serta simulasi *software* CFD untuk mengetahui keseimbangan energi yang dihasilkan pada reaktor pirolisis, hasil kontur CFD fluida plastik dan upaya mengoptimalkannya dari kinerja reaktor.

TEORI DASAR

A. Pirolisis

Pirolisis atau devolatilisasi adalah proses fraksinasi material oleh suhu atau temperatur. Proses pirolisis dimulai pada temperatur sekitar 230°C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, dan *volatile matters* pada sampah akan pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya. Produk cair yang menguap mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas (H₂, CO, CO₂, H₂O, dan CH₄), tar (*pyrolytic oil*), dan arang. Parameter yang berpengaruh pada kecepatan reaksi pirolisis mempunyai hubungan yang sangat kompleks, sehingga model matematis persamaan kecepatan reaksi pirolisis yang diformulasikan oleh setiap peneliti selalu menunjukkan rumusan empiris yang berbeda. Selain itu, plastik merupakan polimer yang berat molekulnya tidak bisa ditentukan, ataupun dihitung. Karena itu, kecepatan reaksi dekomposisi didasarkan pada perubahan massa atau fraksi massa per satuan waktu. Produk pirolisis selain dipengaruhi oleh temperatur dan waktu, bisa disebabkan juga oleh laju pemanasan.



Gambar 1. Skema Umum Proses Pirolisis

B. Termoplastik

Termoplastik merupakan suatu jenis plastik yang apabila plastik tersebut dipanaskan mencapai suatu temperatur, plastik tersebut berubah menjadi cair dan dapat dicetak ke bentuk yang diinginkan. Berdasarkan sifatnya Termoplastik memungkinkan untuk didaur ulang dan jenis plastiknya diberikan kode untuk memudahkan dalam mengidentifikasi dan penggunaannya.

Table 1. Karakteristik Termal Polipropilena

No	Karakteristik Termal Plastik Polipropilena (PP)	
1	Massa Jenis	915 kg/m ³
2	Titik Leleh	130°C
3	<i>Specific Heat Capacity</i> (C _p)	1700 J/kg°C
4	<i>Heat of Fusion</i> (L)	207 kJ/kg
5	<i>Heat of Vaporization</i> (U)	4640 kJ/kg

Jenis plastik polipropilena (PP) sebagai bahan baku pada proses pirolisis penelitian ini yang mana perlu diketahui karakteristik termal untuk mencapai hasil minyak yang diinginkan.

C. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah ilmu yang digunakan untuk memperhitungkan banyaknya energi yang berpindah dalam bentuk panas yang disebabkan oleh perbedaan suhu antara suatu benda ataupun material. Ilmu perpindahan panas juga dapat diartikan untuk menghitung laju perpindahan panas yang terjadi pada suatu kondisi tertentu. Energi panas memiliki rumus sebagai berikut:

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

dimana:

Q = energi panas (J/s)

\dot{m} = laju perpindahan (kg/s)

C_p = kalor jenis suatu material (J/kg°C)

ΔT = beda temperatur (°C)

D. Kerugian Panas

Panas terbuang atau panas yang menghilang dari suatu sistem akan

membuat kerugian pada perpindahan panas karena adanya rambatan termal pada suatu sistem. Untuk memudahkan perhitungan rugi-rugi panas diawali dengan membuat skematik gambar laju aliran panas yang dilanjutkan dengan membuat jala-jala termal. Persamaan rugi-rugi panas ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$Q_{losses} = \frac{\Delta T}{R_{total}}$$

dimana:

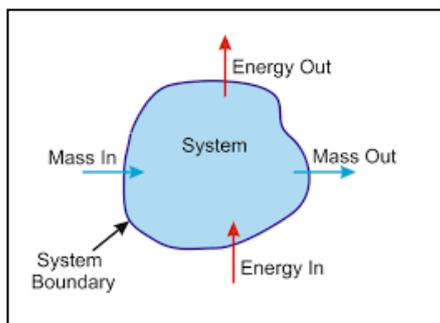
Q_{losses} = kerugian panas (W)

ΔT = beda temperatur (°C)

R_{total} = rambatan total termal (°C/W)

E. Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi (*Energy Balance*) adalah persamaan matematis yang menyatakan interaksi antara energi masuk dan energi yang keluar suatu sistem yang berdasarkan pada satuan waktu operasi.



Gambar 2. Diagram Umum *Energy Balance*

Energi dapat melintasi batas sistem dengan berbagai cara. Satu dalam bentuk panas, dan lainnya dalam bentuk kerja. Cara ketiga energi memasuki atau meninggalkan suatu sistem adalah ketika dibawa bersama oleh material yang memasuki atau meninggalkan sistem, suatu mekanisme yang dikenal sebagai konveksi. Persamaan dinyatakan hubungan antara energi masuk dan energi keluar suatu sistem yang berdasarkan pada satuan waktu operasi sebagai berikut:

$$\sum E_{in} = \sum E_{out}$$

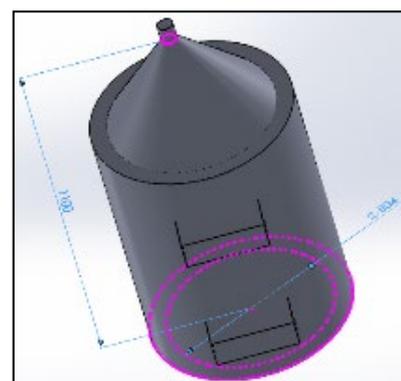
2. METODE PENELITIAN

A. Pengujian dan Pengambilan Data Eksperimen

- Menimbang Bahan Baku
 Dengan menggunakan timbangan jarum, bahan baku yang telah ditentukan adalah cacahan plastik jenis *Polypropylene* (PP) seberat 5 kg.
- Pengukuran *Pressure* pada Gas LPG
 Gas LPG 3 kg menjadi sumber pembakaran pada proses pirolisis. Selang regulator dilengkapi indikator *pressure* dan jarum menunjukkan pada posisi maksimum agar pemanasan reaktor optimal.
- Pengukuran Temperatur Ruang Bakar & Tabung Reaktor
 Pengukuran temperatur yang ditembak pada ruang bakar menggunakan termometer *infrared* dan pada tabung reaktor sudah dilengkapi dengan termometer. Pengambilan data temperatur dilakukan selama 4 kali yaitu pada menit 30, 60, 90, dan 120.

B. Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

- Pemodelan Reaktor
 Sebelum proses simulasi CFD, dilakukan pembuatan 3D model pada reaktor pirolisis menggunakan *software* SolidWorks dengan dimensi diameter 504 mm dan tinggi 1100 mm.



Gambar 3. Pemodelan Reaktor

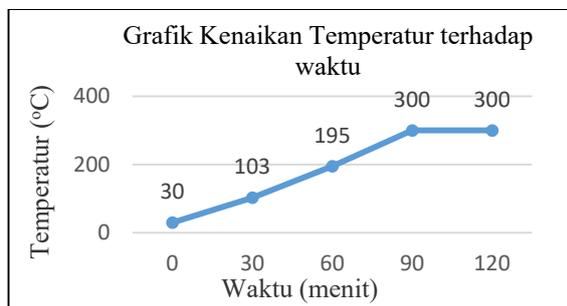
- Analisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Tahap selanjutnya, simulasi ini menggunakan FlowSimulation pada *software* SolidWorks yang dilakukan penentuan jenis aliran turbulen, material reaktor AISI 304, material fluida *propylene*, *inlet mass flow* pada *boundary condition*

sebesar 0,00694 kg/s dengan hasil yang diinginkan (*goals*) adalah rata-rata temperatur pada fluida, temperatur maksimal pada dinding reaktor, dan kecepatan aliran fluida.

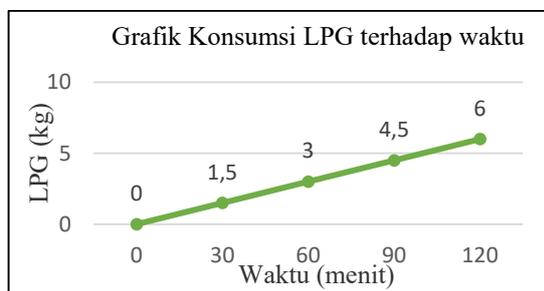
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini keluaran data yang didapat setelah melakukan eksperimen pada pengujian pirolisis adalah kenaikan temperatur reaktor, konsumsi pemakaian gas LPG, dan hasil minyak yang dihasilkan pada waktu dua jam.



Gambar 4. Grafik kenaikan temperatur

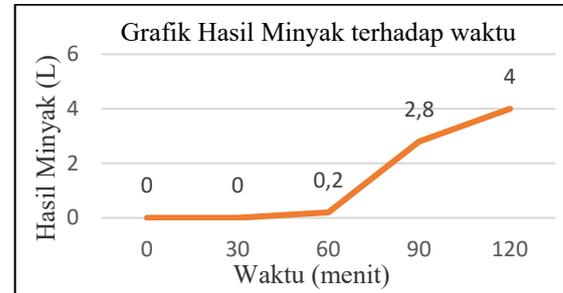
Gambar 4.1, tren grafik cenderung naik seiring berjalannya waktu dimulai dari temperatur lingkungan sebesar 30°C sampai 300°C. Namun pada menit 90 mengalami kondisi *steady state* pada temperatur 300°C. Besaran temperatur dipengaruhi *burner* yang bekerja dengan tipe *premixed burner* berdiameter 1,5 inci dan dilengkapi regulator bertekanan tinggi sehingga *burner* mampu memanaskan reaktor dengan titik maksimum temperatur 300°C.



Gambar 5. Grafik konsumsi gas LPG

Grafik konsumsi gas LPG menunjukkan kenaikan secara linier seiring berjalannya waktu pengujian selesai. Dengan nilai kalor sebesar 39324 kJ/kg pada eksperimen ini menghabiskan total 6 kg gas

elpiji pada tekanan konstan. Pada intensitas ini semakin rendah *pressure* pembakaran maka semakin kecil konsumsi pemakaian gas dan kalor yang diserap oleh reaktor.



Gambar 6. Grafik hasil minyak

Minyak yang dihasilkan pada eksperimen ini sebanyak 4 liter yang terbagi dua jenis minyak yaitu 3,6 liter minyak jenis solar (kondensor pertama) dan 0,4 liter minyak jenis bensin (kondensor kedua). Intensitas minyak mulai terlihat menjelang satu jam pemanasan pirolisis hingga uap plastik habis dan tidak lagi menghasilkan minyak.



Gambar 7. Sampel Minyak Pirolisis

Minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis diuji di LEMIGAS dengan hasil yang didapat angka oktana riset sebesar 83,6 dengan metode uji ASTM D 2699 dan berat jenis pada 15°C sebesar 781,0 kg/m³ dengan metode uji ASTM D 4052.

C. Analisis Perhitungan Keseimbangan Energi

- Energi masuk (E_{in})

Pemanasan plastik reaktor pirolisis bersumber pada pembakaran dari dua tabung gas LPG dengan nilai kalor 47081 kJ/kg dengan lama pembakaran 2 jam atau 7200 detik sebagai energi masuk (E_{in}). Dengan perhitungan sebagai berikut:

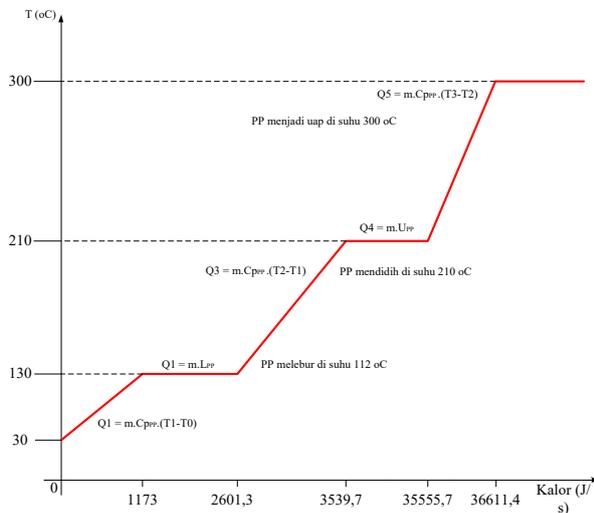
$$E_{in} = \frac{6 \text{ kg}}{7200 \text{ s}} \times 47081 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{in} = 39,23 \text{ kJ/s}$$

$$E_{in} = 39.234 \text{ J/s}$$

• Energi keluar (E_{out})

Perhitungan energi keluar (E_{out}) pada reaktor dimana energi yang memanaskan plastik pada temperatur 30°C hingga mencapai uap gas yang menghasilkan minyak dengan temperatur maksimal 300°C , maka dilakukan perhitungan kalor berdasarkan analisis grafik kalor plastik PP yang diketahui karakteristiknya pada tabel 2.1 adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Grafik zat fase plastik PP

$$E_{out} = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5$$

$$E_{out} = 1173 \text{ J/s} + 1428,3 \text{ J/s}$$

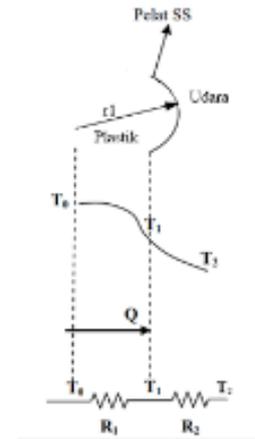
$$+ 938,4 \text{ J/s} + 32016 \text{ J/s}$$

$$+ 1055,7 \text{ J/s}$$

$$E_{out} = 36.611,4 \text{ J/s}$$

• Kerugian Energi

Terdapat kerugian atau kehilangan energi setiap sistem yang memerlukan energi. Pada proses pirolisis perhitungan rugi-rugi panas diawali dengan membuat skematik gambar rambatan laju aliran panas yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 9. Rambatan termal reaktor

Tahanan termal dihitung untuk mendapatkan rugi-rugi panas yang terjadi di dalam reaktor pirolisis. Persamaan tahanan termal satu (R_1) sampai dengan persamaan tahanan termal dua (R_2) dengan perhitungan sebagai berikut:

$$R_1 = \frac{1}{h_{plastik} \times 2\pi \times r_1 \times L}$$

$$R_1 = \frac{1}{500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 6,28 \times 0,252\text{m} \times 1,1\text{m}}$$

$$R_1 = 0,00114 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{udara} \times 2\pi \times r_1 \times L}$$

$$R_2 = \frac{1}{5,64321 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 6,28 \times 0,252\text{m} \times 1,1\text{m}}$$

$$R_2 = 0,10181 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Panas yang rugi (Q_{losses}) pada pemanasan reaktor pirolisis:

$$Q_{losses} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2}$$

$$Q_{losses} = \frac{(300^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})}{0,00114 \text{ }^\circ\text{C/W} + 0,10181 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

$$Q_{losses} = \frac{270^\circ\text{C}}{0,10295 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

$$Q_{losses} = 2622,6 \text{ W}$$

$$Q_{losses} = 2622,6 \text{ J/s}$$

Pada perhitungan diatas maka didapat keseimbangan energi pada reaktor adalah:

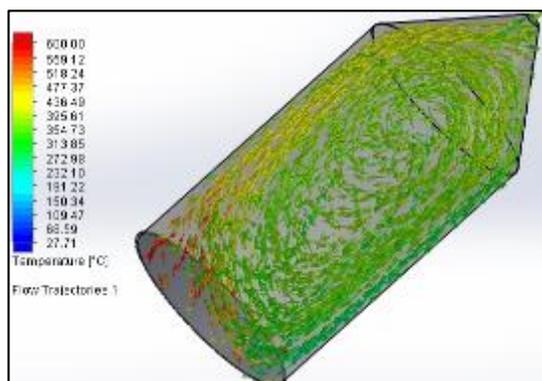
$$E_{in} = E_{out} + Q_{losses}$$

$$39.234 \text{ J/s} = 36.611,4 \text{ J/s} + 2622,6 \text{ J/s}$$

$$E_{in} = E_{out} = 39.234 \text{ J/s}$$

D. Hasil Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Setelah dilakukannya proses *running* simulasi pada reaktor dengan menampilkan pergerakan dan aliran fluida plastik saat proses pemanasan, didapatkan hasil kontur dari temperatur awal yang diasumsikan dari temperatur lingkungan hingga titik maksimum pemanasan sebesar 600°C.

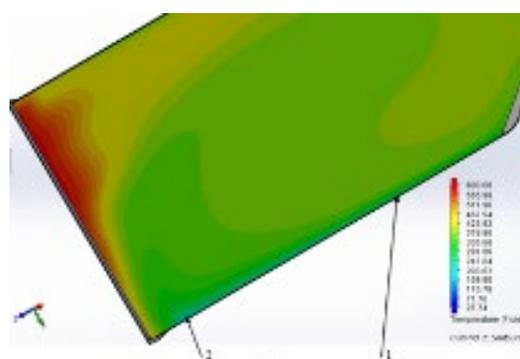


Gambar 10. Kontur Aliran Fluida Plastik

Dari Gambar 4.7 menunjukkan hasil aliran uap gas plastik turbulen didalam reaktor pirolisis yang dipanaskan pada tungku sebesar 600°C. Simulasi CFD menjelaskan uap gas plastik naik menuju dinding atas reaktor dan diteruskan menuju pipa kondensor pada temperatur 300°C. Plastik mengalami perubahan fasa dari padat ke cair lalu sampai menjadi gas uap. Pada sisi dasar pemanasan pada reaktor yang dimana kontur berwarna merah lebih dominan artinya temperatur tinggi fluida pada sisi tersebut. Keterangan pada kontur menunjukkan sebagian besar permukaan sisi ini temperaturnya sebesar 600°C. Pemanasan pada reaktor ini mengalami konduksi pada permukaan plat *stainless steel* dari sumber pembakaran. Sisi tengah pada dinding reaktor yang dimana kontur hijau lebih dominan dibanding warna merah yang lebih sedikit. Dengan nilai temperatur sebesar 300°C tersebut hampir menyerupai dengan termometer yang terdapat reaktor pada pengujian eksperimen sehingga pada sisi ini plastik mengalami pendidihan selama proses pemanasan yang berlanjut. Pada sisi atas pada ruang reaktor, plastik sudah menjadi fluida uap gas yang akan diteruskan menuju pipa dan konsendor pada proses pirolisis plastik untuk menghasilkan

produk pada alat pirolisis ini yaitu Bahan Bakar Minyak (BBM).

Pada kerugian energi, semakin tinggi Q_{losses} maka semakin besar kerugian energi seiring dengan lamanya penggunaan sistem tersebut. Hal ini mengidentifikasi adanya kerugian energi pada reaktor pirolisis. Banyaknya faktor kerugian energi ini dapat dipengaruhi pada pendistribusian panas yang tidak merata pada ruang reaktor, terjadi gesekan fluida plastik sepanjang dinding reaktor dan panas yang terbuang keluar sistem dinding reaktor.



Gambar 11. Titik Kerugian Energi

Pada Gambar 4.8 menunjukkan posisi kerugian energi pada reaktor. Titik 1 menunjukkan awal kerugian energi pada reaktor yang menyebabkan temperatur fluida plastik menurun. Kemudian titik ke 2 menunjukkan posisi maksimalnya kerugian energi yang terjadi. Fluida uap gas plastik mengalami turbulensi ketika proses pemanasan dan mengalami gesekan terhadap dinding reaktor yang beda temperatur sehingga uap gas plastik mengalami kehilangan energi panas. Fluida yang tidak dapat sampai mengalir menuju *outlet* reaktor bersirkulasi menuju dasar untuk mendapatkan energi panas kembali.

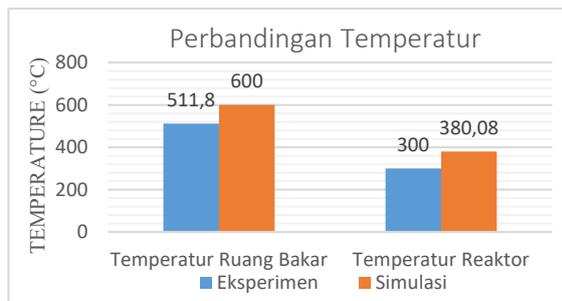
Tabel 2. Hasil parameter simulasi CFD

Goal Name	Unit	Value
SG Av Temperature (Fluid)	[°C]	380,08
GG Av Velocity	[m/s]	0,48420
GG Max Wall Temperature	[°C]	54,80

Hasil pengamatan eksperimen dan simulasi CFD terdapat perbedaan pada temperatur

ruang bakar dan reaktor. Beberapa faktor yang mempengaruhi perbedaan yaitu:

- Kondisi lingkungan saat melakukan eksperimen.
- Tingkat ketelitian alat ukur yang digunakan pada eksperimen.
- Mesh dan setup pada simulasi CFD.



Gambar 12. Grafik Perbandingan

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan pada keseimbangan energi pada reaktor pirolisis ini didapat kesimpulan bahwa hasil percobaan dilakukan selama dua jam dengan parameter yang didapat; temperatur 30°C sampai 300°C, konsumsi pemakaian gas sebanyak 6 kg, dan hasil minyak yang dihasilkan sebesar 4 liter, yang dimana 3,6 liter dari kondensasi pertama dan 0,4 liter pada kondensasi ke dua. Reaktor menjadi faktor penting dalam proses pirolisis dan keseimbangan energi diperlukan pada sebuah reaktor pirolisis untuk mengetahui kapasitas energi yang terserap dan dilepas pada sistem ini, sehingga proses pirolisis dapat bekerja dengan maksimal. Pada perhitungan didapat $E_{in} = 39.234 J/s$, $E_{out} = 36.611,4 J/s$ dan $Q_{losses} = 2622,6 J/s$ sehingga $E_{in} = E_{out} = 39.234 J/s$. Pada simulasi CFD didapat nilai temperatur fluida plastik sebesar 380,08°C, temperatur maksimal dinding reaktor 54,80°C, dan temperatur ruang bakar sebesar 600°C.

DAFTAR PUSTAKA

J. Wahyudi, H. T. Prayitno, A. D. Astuti, B. Perencanaan dan P. Daerah, "Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Baku Pembuatan Bahan Bakar Alternatif," vol. XIV, pp. 58-67, 2018.

U. B. Surono dan Ismanto, "Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE Menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya," *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal (JMST)*, vol. 1, pp. 32-37, 2016.

W. Trisunaryanti, *Dari Sampah Plastik Menjadi Bensin Dan Solar*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2018.

M. A. Wicaksono dan Arijanto, "Pengelolaan Sampah Plastik Jenis PET (Polyethylene Terephthalate) Menggunakan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, 2017.

J. D. Hopkins and J. G. Quintiere, "Material Fire Properties and Predictions for Thermoplastics," *Fire Safety Journal*, 2011.

K. Burhani, Ramelan and R. F. Naryanto, "Pengembangan Media Pembelajaran Perpindahan Panas Radiasi Dengan Variasi Beda Perlakuan Perlakuan Permukaan Spesimen Uji," *J. Mech. Eng. Learn*, vol. 3, no. doi: 2252-651X, pp. 56-63, 2015.

Holman, *Heat Transfer (10th Edition)*, McGraw-Hill Inc., 2010.

G. Pikra, A. Salim, T. Admono dan M. I. Devi, "Analisis Rugi-rugi Panas pada Tangki Penyimpan Panas dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Matahari," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 01, no. 1, 2010.

Y. Cengel and M. Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, McGraw-Hill, 2004.

- M. Alexander, "Neraca Massa dan Neraca Energi Pengelolaan Sampah Terpadu - Penunjang Kabupaten Tegal," *Teknobiz J. Ilmu Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 8, no. doi: 10.35814/teknobiz.v8i3.894, pp. 129-138, 2018.
- R. Ermawati, "Konversi Limbah Plastik Sebagai Sumber Energi Alternatif," *Jurnal Riset Industri*, vol. V, no. 3, pp. 257-263, 2018.