

PENGEMBANGAN REAKTOR PIROLISIS TERMAL LIMBAH PLASTIK SKALA LABORATORIUM

1,2,3) Dosen, Teknik Mesin
Politeknik Negeri
Banyuwangi, Jl. Raya
Jember Km 13,
Banyuwangi, Indonesia,

**Prabuditya Bhisma Wisnu Wardhana¹⁾, Asmar Finali²⁾,
Agung Fauzi Hanafi³⁾**

Corresponding email¹⁾:
prabuditya@poliwangi.ac.id

Received: 12-10-20
Accepted: 13-12-20
Published: 28-06-21

©2021 Politala Press.
All Rights Reserved.

Abstrak. Limbah plastik merusak lingkungan karena tidak mudah terurai oleh alam. Perlu pengolahan khusus terhadap limbah plastik namun tetap tidak menimbulkan pencemaran lingkungan. Pemilihan teknologi degradasi termal mampu mengurai dan mengubah limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Hasil dari teknologi pengolahan ini adalah produk cair, gas dan padat. Alat yang digunakan pada pengolahan ini adalah pemanas LPG, tungku degradasi termal dan kondenser berpendingin air. Kapasitas rencana dari alat ini adalah 4 kg limbah plastik untuk sekali produksi dengan temperatur operasi $\pm 300^{\circ}\text{C}$ dengan durasi proses ± 120 menit. Kebutuhan LPG sebagai pemanas direncanakan sebesar $\pm 0,23 - 2,7$ kg/jam. Bahan baku dari tungku dan kondenser terbuat dari pelat baja dengan ketebalan 3 mm. Dimensi pipa kondenser direncanakan sepanjang $\pm 0,9$ m dengan temperatur air masuk rencana 25°C .

Kata Kunci : degradasi termal, limbah plastik, pemanas LPG, tungku.

Abstract. Plastic waste damages the environment because it is not easily broken down by nature. Needs special processing but still does not cause environmental pollution. Thermal degradation is able to degrade plastic waste and turn it into useful fuels. The results of this processing technology are liquid, gas and solid products. The tools used in this treatment are LPG heaters, thermal degradation furnaces and water-cooled condensers. The design capacity of this tool is 4 kg of plastic waste for one production with an operating temperature of $\pm 300^{\circ}\text{C}$ with a processing duration of ± 120 minutes. The demand for LPG as heating is planned at $\pm 0.23 - 2.7$ kg / hour. The materials are made of steel plates with a 3 mm thickness. The dimensions of the condenser pipe are designed to be ± 0.9 m long with a planned intake water temperature of 25°C .

Keywords : thermal degradation, plastics waste, LPG furnace, reactor.

To cite this article at <https://doi.org/10.34128/je.v8i1.144>

1. Pendahuluan

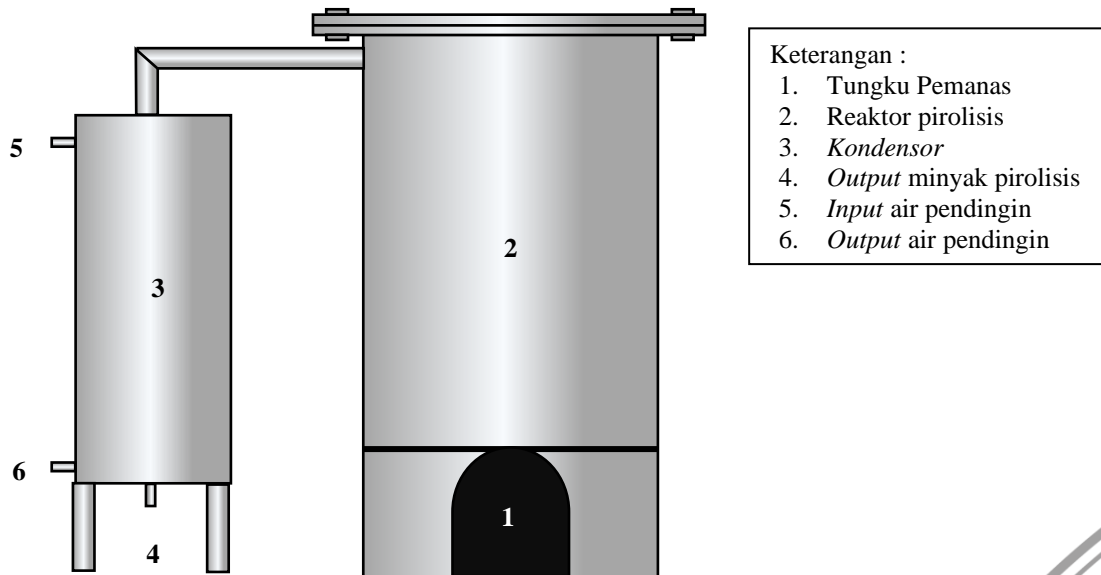
Peningkatan penggunaan energi untuk produktivitas manusia pada umumnya juga diikuti dengan peningkatan timbunan limbah plastik yang ada di lingkungan. Hal ini merupakan permasalahan besar yang timbul seiring dengan semakin tingginya pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk [1]. Produk akhir yang dihasilkan dari proses pirolisis termal ini berupa *solid*, *liquid* dan *gas* [2].

Pokok permasalahan pada penelitian ini adalah bagaimana menentukan prototipe reaktor pirolisis termal skala laboratorium. Bahan baku yang akan digunakan adalah jenis polietilen (PE) dengan kapasitas 4 kg dalam sekali proses. Perencanaan ini juga menentukan kebutuhan bahan bakar LPG dari pemanas untuk proses pirolisis. Tujuan dari penelitian untuk mendapatkan dimensi dari komponen prototipe reaktor pirolisis termal limbah plastik dan menentukan jumlah bahan bakar yang digunakan dalam satu kali proses.

2. Metodologi

Bahan baku utama yang akan digunakan pada perancangan ini menggunakan pelat besi ST37 dengan ketebalan 3 mm. Proses pemanasan menggunakan tungku berbahan bakar LPG. Kondenser yang digunakan

berpendingin air. Metode penelitian menggunakan metode perancangan dan proses desain gambar teknik menggunakan bantuan perangkat lunak.



Gambar 1. Skema Prototipe Reaktor Pirolisis Termal Skala Laboratorium

3. Hasil dan Pembahasan

Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu, tungku pemanas, reaktor pirolisis dan kondenser. Berikut adalah perhitungan perencanaan dari ketiga komponen tersebut :

Perencanaan Tungku Pemanas

Nilai *Lower Heating Value* (LHV) LPG diasumsikan sebesar 45.500 kJ/kg. Temperatur pelelehan dari plastik polietilen (PE) sebesar 150°C. Panas jenis (C_p) plastik polietilen (PE) sebesar 1,9 kJ/kg.K. Panas jenis (C_p) plastik pelat besi ST37 sebesar 0,423 kJ/kg.K.

Perencanaan kebutuhan panas untuk memanaskan reaktor :

$$Q_{reaktor} = m_{reaktor} \times C_p \times \Delta T \tag{1}$$

$$Q_{reaktor} = 72,14 \text{ kg} \times 0,423 \text{ kJ/kg.K} \times (573 - 303 \text{ K})$$

$$Q_{reaktor} = 8239,11 \text{ kJ}$$

Keterangan :

- $Q_{reaktor}$ = kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan reaktor (kJ)
- $m_{reaktor}$ = massa reaktor (kg)
- C_p = panas jenis (kJ/kg.K)

Perencanaan kebutuhan panas untuk melelehkan plastik 4 kg :

$$Q_1 = m_{plastik} \times C_p \times \Delta T \tag{2}$$

$$Q_1 = 4 \text{ kg} \times 1,9 \text{ kJ/kg.K} \times (423 - 303 \text{ K})$$

$$Q_1 = 912 \text{ kJ}$$

Keterangan :

- Q_1 = kalor yang dibutuhkan untuk melelehkan plastik (kJ)
- $m_{plastik}$ = massa plastik(kg)
- C_p = panas jenis (kJ/kg.K)

Perencanaan kebutuhan panas untuk merubah plastik 4 kg menjadi uap:

$$Q_2 = m_{plastik} \times C_p \times \Delta T \tag{3}$$

$$Q_2 = 4 \text{ kg} \times 1,9 \text{ kJ/kg.K} \times (573 - 423 \text{ K})$$

$$Q_2 = 1140 \text{ kJ}$$

Keterangan :

- Q_2 = kalor yang dibutuhkan untuk merubah fase plastik (kJ)
- $m_{plastik}$ = massa plastik(kg)

C_p = panas jenis (kJ/kg.K)

Perencanaan kebutuhan panas total :

$$\begin{aligned} Q_{total} &= Q_{reaktor} + Q_1 + Q_2 \\ Q_{total} &= 8239,11 \text{ kJ} + 912 \text{ kJ} + 1140 \text{ kJ} \\ Q_{total} &= 10.291,11 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (4)$$

Keterangan :

Q_{total} = kalor total yang dibutuhkan (kJ)
 Q_1 = kalor yang dibutuhkan untuk melelehkan plastik (kJ)
 Q_2 = kalor yang dibutuhkan untuk merubah fase plastik (kJ)

Perencanaan Kebutuhan LPG

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{Q_{total}}{\eta_{tungku} \times LHV_{LPG}} \\ \dot{m} &= \frac{10.291,11 \text{ kJ}}{0,7 \times 45500 \text{ kJ/kg}} = 0,323 \text{ kg/jam} \end{aligned} \quad (5)$$

Keterangan :

\dot{m} = kebutuhan LPG
 Q_{total} = kalor total yang dibutuhkan (kJ)
 η_{tungku} = efisiensi tungku
 LHV_{LPG} = Lower Heating Value (kJ/kg)

Perencanaan Reaktor Pirolisis

Kapasitas reaktor (m) sebesar 4 kg.
 Diameter reaktor (D) sebesar 6 in $\approx 0,15$ m.
 Reaktor menggunakan pipa dengan sch 80, maka $D_o = 0,1682$ m & $D_i = 0,1463$ m.
 Tinggi reaktor (h) sebesar 0,25 m.
 Tebal pelat reaktor (t) sebesar 3 mm.
 Material pelat besi ST37, kekuatan tarik (σ_t) sebesar $37 \text{ kg/mm}^2 \approx 360 - 370 \text{ N/mm}^2$.
 Konduktivitas termal (k) pelat besi ST37 sebesar 22 W/m.K .

Perhitungan tebal pelat minimal reaktor :

Menurut putra [3], penentuan tebal pelat minimum bisa direncanakan dengan mengetahui tekanan rencana, radius dalam pipa, nilai tegangan material akibat temperatur dan efisiensi pengelasan. Untuk efisiensi pengelasan, perencanaan ini menggunakan nilai sebesar 85 % [4], karena asumsi pengelasan menggunakan sambungan *butt joint* [5].

$$\begin{aligned} t_{rencana} &= \frac{P.R}{S.E-0,6P} = \frac{(0,20265 \text{ MPa}) \times (146,3 \text{ mm})}{(79,98 \text{ MPa}) \times (0,85) - 0,6 \times (0,20265 \text{ MPa})} \\ t_{rencana} &= 0,4369 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

Syarat tebal pelat aman, $t \geq t_{rencana}$. Jadi $t \geq t_{rencana}$ dimana $3 \text{ mm} \geq 0,4369 \text{ mm}$.

Keterangan :

$t_{rencana}$ = tebal rencana (mm)
 P = tekanan rencana (MPa)
 R = radius dalam pipa (mm)
 S = nilai tegangan material akibat temperatur (MPa)
 E = efisiensi dari pengelasan

Perencanaan laju perpindahan panas konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas melalui zat padat yang tidak disertai dengan perpindahan partikel-partikel zat-nya [6].

$$\begin{aligned} T_1 &= 300^\circ\text{C} = 573 \text{ K} \\ T_2 &= 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K} \\ D &= \text{Diameter reaktor} = 0,15 \text{ m} \\ A &= \text{Luas area perp. panas konduksi} \\ A &= \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} 0,15^2 = 0,0177 \text{ m}^2 \\ q &= kA \frac{\Delta T}{L} = (22 \text{ W/m.K}) \times (0,0177 \text{ m}^2) \times \frac{(573-303 \text{ K})}{0,25 \text{ m}} = 420,6 \text{ W} \end{aligned} \quad (7)$$

Keterangan :

q = perpindahan panas konduksi (W)

k = konduktivitas termal (W/m.K)

ΔT = beda temperatur (K)

L = jarak (m)

Perencanaan Kondenser

Kondenser berfungsi untuk merubah fase gas dari uap limbah plastik tersebut menjadi fase cair. Performa kondenser ditentukan oleh panjang dan luas penampang [7].

Perencanaan Reynolds Number (Re)

Reynolds Number adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos [8]. Bilangan ini tidak berdimensi. Bilangan ini juga suatu indikator yang menunjukkan bahwa kondisi aliran tersebut adalah laminar, transisi atau turbulen.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,164 \text{ kg/m}^3 \times 0,26 \text{ m/s} \times 0,01905 \text{ m}}{1,872 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}} = 307,8 \text{ (Laminar)} \quad (8)$$

Keterangan :

Re = Bilangan Reynolds

ρ = massa jenis (kg/m^3)

V = kecepatan (m/s)

D = diameter (m)

Perencanaan Nusselt Number (Nu)

Karena alirannya laminar, maka Nusselt Number (Nu) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Nu = 3,66 + \frac{0,0688 \times (D/L) \times Re \times Pr}{1 + (0,04 \times (D/L) \times Re \times Pr)} \quad (9)$$

$$Nu = 3,66 + \frac{0,0688 \times (0,15/0,25) \times 307,9 \times 0,7282}{1 + (0,04 \times (0,15/0,25) \times 307,9 \times 0,7282)} = 5,11$$

Keterangan :

Nu = Bilangan Nusselt

Re = Bilangan Reynolds

Pr = Bilangan Prandtl

D = diameter (m)

Perencanaan Koefisien Konveksi (h)

Dengan menggunakan data Nusselt Number, data koefisien konveksi fluida dapat dihitung dengan persamaan berikut ini [9]. Konduktivitas termal (k) gas/udara pada temperatur 30°C adalah sebesar 0,02588 W/m.K. Konduktivitas termal (k) air pada temperatur 30°C adalah sebesar 0,615 W/m.K.

$$h_{gas} = \frac{Nu \times k_{gas}}{D} \quad (10)$$

$$h_{gas} = \frac{5,11 \times 0,02588 \text{ W/m.K}}{0,01905 \text{ m}}$$

$$h_{gas} = 6,94 \text{ W/m.K}$$

$$h_{air} = \frac{Nu \times k_{air}}{D} \quad (11)$$

$$h_{air} = \frac{5,11 \times 0,615 \text{ W/m.K}}{0,01905 \text{ m}}$$

$$h_{air} = 164,9 \text{ W/m.K}$$

Keterangan :

h = koefisien konveksi (W/m.K)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

Perencanaan Perpindahan Panas Menyeluruh (U)

Konduktivitas termal (k) tembaga adalah sebesar 401 W/m.K.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{gas}} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{air}}} \quad (12)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{6,94} + \frac{0,0005}{401} + \frac{1}{164,9}}$$

$$U = 6,66 \text{ W/m.K}$$

Keterangan :

U = koefisien perpindahan panas menyeluruh (W/m.K)

h = koefisien konveksi (W/m.K)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

Perencanaan Log Mean Temperature Difference (ΔT_m)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (13)$$

$$\Delta T_m = \frac{(30 - 25) - (300 - 55)}{\ln(30 - 25 / 300 - 55)} = 74,52^\circ\text{C}$$

Perencanaan Laju Aliran Massa (\dot{m})

Asumsi minyak yang dihasilkan adalah 2,4 kg (60 % dari 4 kg), durasi pirolisis diasumsikan 2 jam.

$$\dot{m} = \frac{\text{massa}}{\text{waktu}} = \frac{2,4 \text{ kg}}{7200 \text{ s}} = 0,00033 \text{ kg/s} \quad (14)$$

Perencanaan Kalor Kerja (Q)

Panas jenis (C_p) udara pada temperatur 450°C adalah sebesar 1081 J/kg.K.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (15)$$

$$Q = 0,00033 \text{ kg/s} \times 1081 \text{ J/kg.K} \times (723 - 373 \text{ K})$$

$$Q = 125 \text{ W}$$

Keterangan :

Q = kalor kerja (W)

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

C_p = panas jenis udara (J/kg.K)

ΔT = beda temperatur ($^\circ\text{C}$)

Perencanaan Luas Permukaan Kondenser (A)

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{125 \text{ W}}{6,66 \text{ W/m.K} \times 347,51 \text{ K}} = 0,0540 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Keterangan :

Q = kalor kerja (W)

U = koefisien perpindahan panas menyeluruh (W/m.K)

ΔT = Log Mean Temperature Difference ($^\circ\text{C}$)

Perencanaan Panjang Kondenser (L)

$$L = \frac{A}{\pi D} = \frac{0,0540 \text{ m}^2}{\pi \times 0,01905 \text{ m}} = 0,903 \text{ m}$$

4. Kesimpulan

Proses pemanasan reaktor menggunakan tungku LPG dengan konsumsi 0,323 kg/jam, dimensi reaktor pirolisis termal adalah sebagai berikut : kapasitas 4 kg/proses, diameter 0,15 m, tinggi 0,25 m, tebal pelat 3 mm, material pelat besi ST37, kondenser dari pipa tembaga dengan panjang 0,903 m dan luas permukaan 0,0540 m².

Daftar Pustaka

- [1] A. Mokhtar, J. Moh and H. Supriyanto, "Perancangan Pirolisis untuk Membuat Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik Kapasitas 10 kg," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa (SENTRA)*, 2018.
- [2] P. B. W. Wardhana and H. Saptoadi, "Konversi Limbah Plastik Polieilen menjadi Bahan Bakar dengan Metode Pirolisis," *DISPROTEK*, pp. 1-4, 2016.
- [3] R. C. Putra, "Perancangan Bejana Tekan Kapasitas 5 m³ dengan Tekanan Desain 10 bar Berdasarkan Standar ASME Section 2007 VIII DIV 1," *Jurnal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Tangerang*, 2017.

- [4] ASME, IV Boiler & Pressure Vessel Codes - (Rules for Construction of Heating Boilers), New York: ASME, 2013.
- [5] J. Purba, "Perancangan Boiler Pipa Api untuk Perebusan Bubur Kedelai pada Industri Tahu Kapasitas Uap Jenuh 160 kg/jam," *Jurnal Mahasiswa Teknik Universitas Pasir Pengaraian*, 2016.
- [6] F. P. Incropera, D. P. Dewit, T. L. Bergman and A. S. Lavine, Introduction of Heat Transfer 7th Edition, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [7] F. A. P. A. Gabe, "Analisa Termal pada Rancang Bangun Reaktor Pirolisis untuk Memproduksi Bahan Bakar Minyak dari Limbah Plastik," Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2015.
- [8] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics : Fundamentals and Applications, New York: McGraw Hill, 2006.
- [9] F. Naufan, "Desain Alat Pirolisis untuk Mengkonversi Limbah Plastik HDPE menjadi Bahan Bakar," Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2016.

