

Pemanfaatan Gas Buang (Syngas) Pada Proses Pirolisis Plastik Berkapasitas 10 kg

La Ode M. Firman^{1*}, Angga Panji Satria Pratama¹

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pancasila, DKI Jakarta, 12630, Indonesia

*Email Corresponding Author: mtmpancasila@gmail.com

ABSTRAK

Plastik berperan besar dalam kehidupan sehari – hari misalnya, sebagai pengemasan bahan baku. Namun plastik adalah material yang sulit terurai dan mencemari lingkungan. Penyumbang limbah plastik terbesar kedua di dunia adalah Indonesia. Hal ini yang mendorong dilakukannya penelitian agar dapat mengurangi limbah plastik. Pirolisis adalah salah satu cara untuk menanggulangi limbah plastik dengan mengubahnya menjadi bahan bakar minyak. Universitas Pancasila memiliki alat pirolisis sebagai kontribusi perguruan tinggi dalam mengurangi jumlah limbah plastik. Namun pirolisis di Laboratorium Energi Baru Terbarukan Teknik Mesin Universitas Pancasila yang berkapasitas 10 kg dengan bahan bakar LPG dan RDF menghasilkan gas (syngas) yang dibuang ke udara bebas. Oleh karena itu, dibutuhkan optimasi dengan memanfaatkan kembali gas yang dibuang sehingga dapat membantu suplai bahan bakar dan dapat mengurangi volume pemakaian LPG. Perancangan desain pemipaan diperlukan untuk mengalirkan syngas kembali ke ruang bakar dan diperlukan pengujian pemanfaatan gas tersebut terhadap 3 jenis plastic, yaitu polypropylene, polystyrene, dan polyethylene. Kemudian dibandingkan jenis plastic mana yang paling optimum dalam prespektif laju perpindahan panasnya. Hasil perhitungan empiris menunjukkan bahwa pipa yang optimum untuk mengalirkan syngas ke ruang bakar menggunakan ASTM A53 Grade A yaitu diameter 20 mm dan penurunan tekanan 1,3 bar. Hasil percobaan menunjukkan bahwa plastic yang paling baik untuk proses pirolisis dengan kebutuhan energi sebesar 55.990 kJ adalah jenis polystyrene.

Kata kunci: LPG; Pirolisis; Plastik; RDF; Syngas

ABSTRACT

Plastic is a big role in everyday life, for example as a raw material packaging. However, plastic is a material that is difficult to decompose and pollutes the environment. The second largest contributor of plastic waste in the world is Indonesia. This has encouraged research to reduce plastic waste. Pyrolysis is one way to tackle plastic waste by turning it into fuel oil. Pancasila University has a pyrolysis equipment as a university contribution in reducing the amount of plastic waste. However, pyrolysis at Renewable Energy Laboratory, Department Mechanical Engineering, Pancasila University that has a capacity of 10 kg and uses LPG fuel and RDF produce exhaust gas (syngas) that release to ambient air. Therefore, it is necessary to optimize by reusing the exhaust gas so that it can help fuel supply and decrease the volume using LPG. Piping design is necessary to flowing syngas to burner and necessary experiment reusing the exhaust gas with 3 various type of plastic, such as polypropylene, polystyrene, and polyethylene. Then it is compared which type of plastic is the most optimum based on terms of heat transfer rate. Result of empirical calculations show piping the most optimum flowing syngas to burner is using ASTM A53 Grade A with diameter 20 mm and pressure drop 1,3 bar. Result of experiment show plastic the most better to using pyrolysis with energy demand 55.990 kJ is Polystyrene type.

Keywords: LPG; Pyrolysis; Plastic; RDF; Syngas

PENDAHULUAN

Penyumbang limbah plastik terbesar kedua di dunia adalah Indonesia [1]. Dimana sampah plastik meningkat sebesar 5% tiap tahun [2]. Namun regulasi tentang pengolahan sampah belum jelas seperti tidak tersedianya dan tidak konsistennya kualitas dari *feedstock* [3]. Masalah tersebut baik dari segi pemakaian plastik maupun

edukasi tentang dampak dari penggunaan plastik. Salah satu solusi untuk pengolahan sampah adalah dengan mendaur ulang menjadi bahan bakar atau dengan sistem pirolisis [4]. Cara pirolisis adalah devolatilasi proses suatu pemisahan bahan berdasarkan pada suhu yang dimulai dari suhu 240 °C [5]. Plastik jenis *Polyethylene* (PE) baik dengan jenis *High – Density Polyethylene* (HDPE) maupun jenis *Low – Density Polyethylene* (LDPE)

dapat menghasilkan 200 mL pada suhu 460 °C [6]. Plastik dengan jenis *Polyethylene Terephthalate* (PET) dapat menghasilkan 180 mL pada suhu 400 °C selama 45 menit [7]. Limbah PE yang digabung dengan leci juga dapat dimanfaatkan untuk proses pirolisis karena dapat meningkatkan energi hingga 308 kJ/mol [8]. Nilai kalor PE adalah sebesar 44,9 MJ/kg dan nilai kalor PP sebesar 46,5 MJ/kg [9]. Plastik dengan jenis *Polypropylene* (PP) dapat menghasilkan 10.292 kal/g pada suhu 400 °C selama 90 menit [10]. Dan jika PP ditambah dengan sampah ranting akan meningkatkan nilai kalornya menjadi 11.872 kal/g [11]. Plastik dengan jenis *Polystyrene* (PS) yang digunakan untuk proses pirolisis dan digabungkan dengan plastik berlapis aluminium foil dapat mempercepat naiknya temperatur hingga 450 °C [12]. PS yang digunakan untuk proses pirolisis tanpa katalis dapat menghasilkan minyak sebanyak 135 mL [13]. Penggabungan sampah plastik jenis PS dengan plastik lain dapat meningkatkan volume minyak sebesar 52,36% [14]. Jika PP dan PE dijadikan bahan bakar untuk proses pirolisis dengan suhu 450 °C selama 2 jam, maka hasil minyak dari campuran plastik tersebut mempunyai jumlah atom Carbon yang sebanding dengan solar, C₁₂–C₁₇ [15].

Bahan bakar untuk pirolisis bisa menggunakan *Liquid Petroleum Gas* (LPG) atau kombinasi dengan *Refuse Derived Fuel* (RDF). Pemakaian RDF sebagai bantuan bahan bakar dapat menghemat biaya operasional sebesar 25% [16]. Dan dapat menghasilkan 9000 mL minyak dalam waktu 180 menit dengan suhu 350 °C [17]. RDF dalam bentuk pellet jika digabungkan dengan karet kayu dengan komposisi 50 : 50 akan meningkatkan nilai kalor 22,21% [18]. Penggunaan limbah plastik jenis PET sebagai RDF akan meningkatkan nilai kalor dari 18,94 MJ/kg menjadi 25,04 MJ/kg. [19]. *Municipal Solid Waste* (MSW) di Bali memiliki potensial untuk mengurangi *Greenhouse gas* (GHG) sebesar 178 – 350 kali dengan nilai kalor 3904 – 4945 kkal/kg [20]. Suhu terbaik dalam proses pirolisis adalah di dalam kisaran 350 °C sampai 550 °C dengan nilai kalor sampai dengan 41,7 MJ/kg [21], [22], [23]. Pada suhu tersebut terjadi pemisahan antara *oxygenate* dan *hidrokarbon* [24]. Semakin meningkatnya suhu maka konsentrasi paraffin akan ikut meningkat sedangkan konsentrasi olefin menurun [25]. Konsentrat paraffin sebesar 35 wt% dapat dihasilkan oleh plastik PE dan konsentrat olefin sebesar 63 wt% dapat dihasilkan oleh plastik jenis PP [26]. Penambahan katalis pada proses pirolisis dapat meningkatkan nilai oktan namun mengurangi produksi minyak 16 – 22% [27]. Katalis juga dapat menurunkan waktu tempuh dan kebutuhan energinya [28]. Katalis pada sistem

Continue Microwave Assited Pyrolysis (CMAP) dapat menghasilkan gasoline 73,5% pada suhu 620 °C [29].

Universitas Pancasila khususnya Departemen Teknik Mesin memiliki *roadmap* riset yang salah satunya adalah pirolisis. Namun alat pirolisis yang ada masih memiliki kekurangan yaitu nilai produksi yang lebih besar daripada nilai jual. Pada penelitian pirolisis dengan plastik PP sebanyak 10 kg, bahan bakar LPG selama 4 jam dapat dihasilkan 9 liter bahan bakar minyak. Namun terdapat gas buang atau syngas yang dibuang ke udara bebas melalui kondenser [30]. Syngas tersebut gagal dikondensasikan sehingga terbuang ke udara bebas. Syngas terdiri dari H₂ 8,3%, CO 8,3%, CH₄ 33,4%, CO₂ 3,3%, dan C₂ 46,7% [31], [32]. Syngas memiliki massa jenis 1,0357 g/mL [33]. Dikarenakan mengandung CH₄ maka syngas tersebut dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar alternatif [32]. Syngas yang dihasilkan dialirkan dengan instalasi pemipaan menuju reaktor untuk dibakar kembali di ruang bakar. Penulisan ini bertujuan untuk melakukan perancangan instalasi pemipaan gas buang (syngas) dan melakukan pengujian terhadap efeknya serta melakukan analisis laju perpindahan panas agar diperoleh jenis plastik yang paling optimum pada proses pirolisis berkapasitas 10 kg.

Instalasi pemipaan dirancang agar tidak diperlukan tambahan *blower* atau *fan* agar tidak bertambahnya konsumsi listrik yang nantinya akan membebani nilai produksi dan menghindari pemilihan diameter pipa yang terlalu besar karena akan semakin besar diameternya maka semakin mahal harga pemipannya. Pemanfaatan kembali gas buang (syngas) diharapkan dapat mengurangi pencemaran udara yang diakibatkan gas dari proses pirolisis yang dibuang ke udara sekitar dan dapat mengurangi konsumsi penggunaan gas LPG pada proses pirolisis. Setelah itu dilakukan penelitian jenis plastik yang paling efisien berdasarkan 3 jenis plastik yaitu *Polypropylene*, *Polyethylene*, dan *Polystyrene*.

METODE PENELITIAN

Optimasi dengan melakukan modifikasi tambahan instalasi pemipaan untuk mengalirkan syngas menuju ruang bakar untuk dibakar kembali sebagai bahan bakar alternatif.

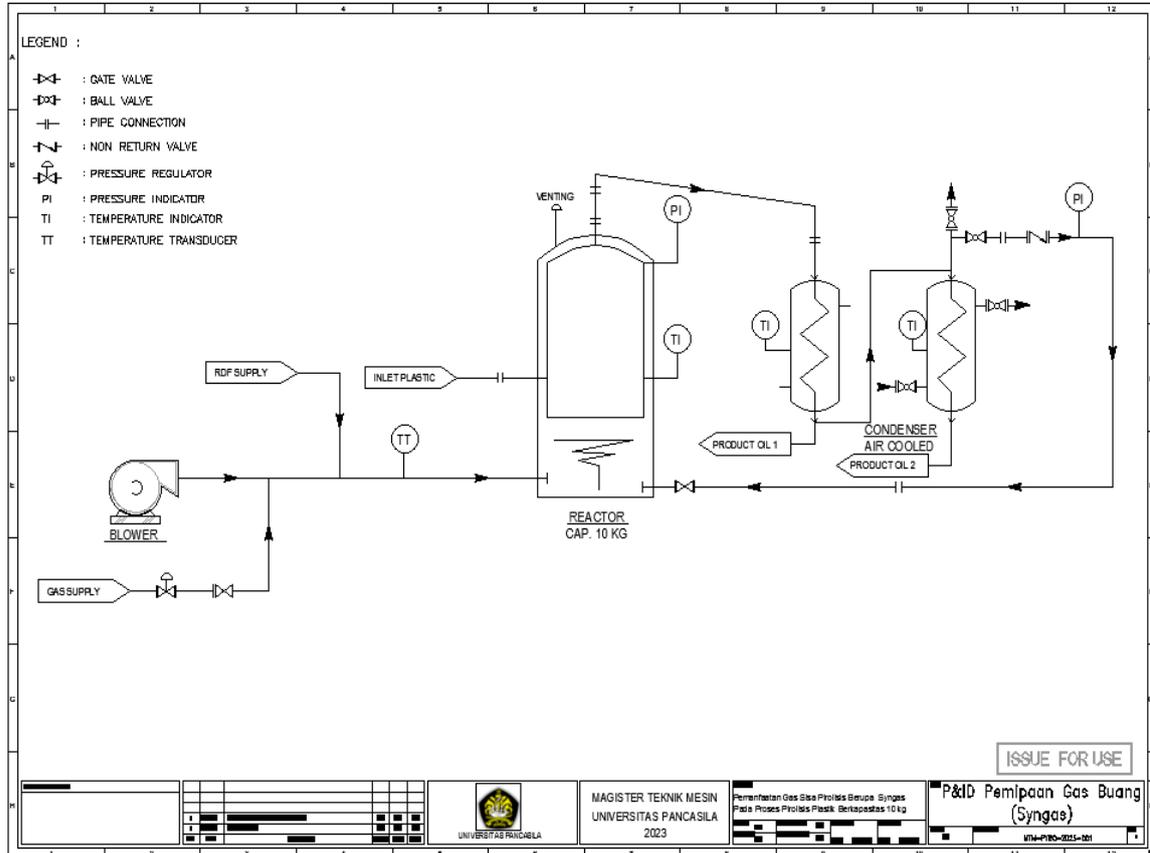
$$\Delta P = 4f \frac{\rho L}{2D} v^2 \tag{3}$$

$$P_1 = \Delta P + P_2 + P_s \tag{4}$$

Dimana:

ΔP = kehilangan tekanan (kg/m.s²)

P_1 = tekanan outlet condenser (kg/m.s²)



Gambar 1. P&ID system pirolisis

Pada Gambar 1 menunjukkan proses pirolisis yang menggunakan sumber bahan bakar LPG dan RDF. Pada outlet kondenser didesain instalasi pemipaan yang menghubungkan kondenser ke ruang bakar. Dalam mendesain sistem pemipaan dibutuhkan besaran nilai kekasaran pada pipa dan panjang ekivalen pada fitting dan valve yang diperlukan untuk menentukan friksi atau kehilangan tekanan (*pressure loss*). Rumus untuk mencari nilai friksi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon/D}{3,7} + \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \tag{1}$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{2}$$

Kehilangan tekanan dapat ditentukan jika nilai friksi sudah didapatkan yang kemudian menggunakan persamaan berikut:

P_2 = tekanan inlet ruang bakar (kg/m.s²)

P_s = elevation head (kg/m.s²)

f = friksi

L = panjang pipa (m)

ϵ = nilai kekasaran pipa (m)

D = diameter internal pipa (m)

Re = bilangan Reynold

ρ = massa jenis gas (kg/m³)

v = kecepatan gas (m/s)

μ = viskositas gas (kg/m.s)

Setelah desain pemipaan sudah didapatkan maka percobaan dapat dilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut:

1. Siapkan plastik *Polypropylene* (PP) yang sudah dicacah dan dikeringkan.
2. Masukkan plastik PP sebanyak 10 kg ke dalam ruang reaktor.
3. Menyalakan motor penggerak auger untuk memasukkan RDF.

4. RDF pellet kayu dimasukkan sebanyak 1 kg.
5. Menyalakan blower dan menyesuaikan kecepatan yang diinginkan.
6. Buka katup slang gas LPG untuk memasukkan gas LPG ke dalam ruang reaktor.
7. Nyalakan pemantik sehingga gas LPG terbakar dan membakar RDF di ruang bakar.
8. Buka katup gas buang agar dapat mengalirkan gas kembali ke ruang bakar.
9. Cabut regulator gas LPG untuk keamanan.
10. Nyalakan pemantik untuk membakar gas metan menjadi api dan arahkan kompor ke ruang bakar.
11. Mencatat perubahan suhu setiap 30 menit serta mencatat jumlah serta mencatat jumlah minyak pirolisis yang keluar.
12. Setelah 1 jam, masukan kembali RDF pada ruang bakar dari tempat pemasukan RDF sebanyak 1 kg.
13. Setelah 3 jam, maka hentikan proses penelitian dan keluarkan arang bekas plastik di reaktor.
14. Ulangi dari langkah nomer 1 untuk pengujian dengan plastik PS dan PE.

Tabel 1. Data Pipa dan Syngas

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang Pipa (L)	4700	mm
Perbedaan Ketinggian (l)	-1,5	m
Kekasaran Material Pipa (ϵ)	0,0003	mm
Temperatur (T)	40	$^{\circ}\text{C}$
Densitas (ρ)	1,0357	kg/m^3
Viskositas (μ)	0,0001027	Pa.s
Laju Alir Massa (\dot{m})	3,333	kg/h
Laju Alir Volume (Q)	4,6	m^3/h
Tekanan pada ujung pipa (P_2)	1	bar

Tabel 1 menunjukkan data pipa yang digunakan untuk penelitian dan juga menjelaskan spesifikasi teknis dari syngas yang dihasilkan dari proses pirolisis. Tabel 2 sampai 4 menjelaskan hasil penelitian dari plastik polyethylene, polypropylene dan polystyrene dimana untuk mencapai suhu dalam reaktor $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ diperlukan suhu pada ruang bakar sebesar $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 180 menit. Pada menit 150 menit menuju 180

menit terdapat penurunan suhu, hal ini didiagnosa dikarenakan volume plastik sebanyak 10 kg yang sudah terurai 100% sehingga tidak ada lagi bahan baku yang dapat dipanaskan dan volume syngas menjadi berkurang dimana volume syngas ini digunakan untuk suplai pembakaran di ruang bakar. Konsumsi gas LPG yang dibutuhkan sebesar 1 kg dan konsumsi RDF sebesar 2 kg. Sedangkan hasil minyak yang dihasilkan selama 180 menit adalah 7000 mL untuk polyethylene dan 8500 mL untuk polypropylene dan polystyrene.

Tabel 2. Pengujian plastik polyethylene

No.	Waktu (menit)	Suhu Ruang Bakar ($^{\circ}\text{C}$)	Pemakaian LPG (kg)	Pemakaian RDF (kg)	Hasil Minyak (mL)
1	0	200	0	1	0
2	30	600	0,5	1	400
3	60	730	1	1	1250
4	90	795	-	2	3500
5	120	810	-	2	4100
6	150	820	-	2	6800
7	180	810	-	2	7000

Tabel 3. Pengujian plastik polypropylene

No.	Waktu (menit)	Suhu Ruang Bakar ($^{\circ}\text{C}$)	Pemakaian LPG (kg)	Pemakaian RDF (kg)	Hasil Minyak (mL)
1	0	200	0	1	0
2	30	610	0,5	1	430
3	60	740	1	1	1380
4	90	805	-	2	5610
5	120	820	-	2	5900
6	150	830	-	2	8400
7	180	815	-	2	8500

Tabel 4. Pengujian plastik polystyrene

No.	Waktu (menit)	Suhu Ruang Bakar ($^{\circ}\text{C}$)	Pemakaian LPG (kg)	Pemakaian RDF (kg)	Hasil Minyak (mL)
1	0	200	0	1	0
2	30	600	0,5	1	410
3	60	730	1	1	1280
4	90	795	-	2	5510
5	120	810	-	2	5800

6	150	820	-	2	8300
7	180	810	-	2	8500

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan bahwa didapatkan tekanan di outlet kondenser sebagai berikut:

Tabel 5. Data tekanan outlet kondenser

Jenis Plastik	P (bar)		
	250°C	300°C	350°C
Polypropylene	2,6	3,2	4,4
Polyethylene	3,2	3,4	4,4
Polyesterene	3,2	3,4	4,8

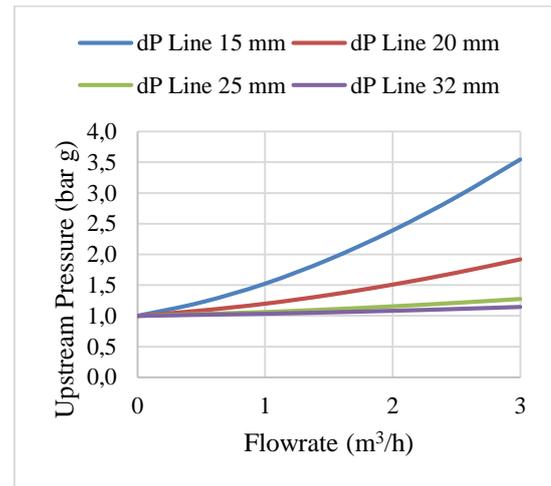
Tabel 5 menyatakan besaran tekanan pada outlet kondenser berdasarkan penelitian. Tekanan pada temperatur 250 °C adalah tekanan terkecil dibandingkan pada temperatur 300 dan 350 °C, yaitu 2,6 bar pada jenis plastik PP, 3,2 bar pada jenis plastik PE, dan 3,2 bar pada jenis plastik PS. Sedangkan tekanan pada temperatur 350 °C adalah yang tertinggi, yaitu 4,4 bar pada jenis plastik PP, 4,4 bar pada jenis plastik PE, dan 4,8 bar pada jenis plastik PS. Nilai tekanan pada outlet kondenser sangat penting untuk menentukan apakah syngas dapat mengalir dengan sendirinya atau membutuhkan bantuan blower atau fan sebagai pendorong syngas agar dapat mengalir ke ruang bakar dikarenakan tekanan yang kecil di outlet kondenser. Jika nilai perhitungan tekanan outlet kondenser analisis (P_1) lebih besar daripada tekanan outlet kondenser penelitian (P_{1p}), maka dibutuhkan tambahan blower dan fan. Sedangkan jika nilai perhitungan tekanan outlet kondenser analisis (P_1) lebih kecil daripada tekanan outlet kondenser penelitian (P_{1p}), maka dibutuhkan tambahan blower atau fan. Cara untuk menentukan tekanan analisis sebagaimana yang tertulis pada persamaan 4.

Ketika mencari ukuran diameter yang paling optimum, diambil 4 ukuran pipa sebagai variabel perhitungan yaitu diameter 15 mm, 20 mm, 25 mm, dan 32 mm. Gambar 2 menunjukkan perencanaan pemipaan yang terdiri dari pipa ASTM A53 Grade A, check valve, tee, elbow, pressure gauge, reducer, dan watermur. Fitting – fitting pemipaan tersebut akan dianalisa dengan variabel diameter pipa yang berbeda – beda sehingga didapatkan diameter pipa yang paling optimum.

Hasil perhitungan dari masing – masing diameter pipa dapat dilihat pada tabel 6 berikut:

Tabel 6. Penurunan tekanan pada pipa diameter 15 mm, 20 mm, 25 mm, dan 32 mm

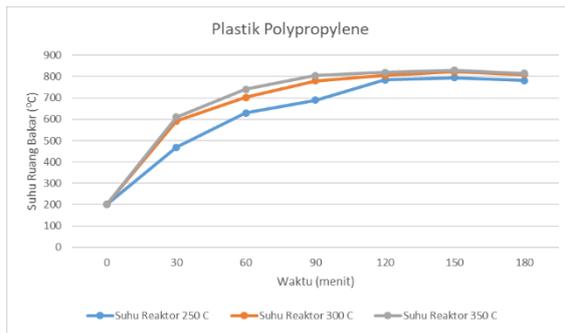
Dia (mm)	Kecepatan (m/s)	Bil.Reynold	Faktor Friksi	ΔP Pipa (kPa)	Elevation Head (bar)	P_{s1} (bar)	ΔP Line (bar)
15	4,3	437	0,0239	255	0,0	1,0	3,5
20	2,7	345	0,0269	92	0,0	1,0	1,9
25	1,5	259	0,0314	28	0,0	1,0	1,3
32	1,0	216	0,0348	15	0,0	1,0	1,1



Gambar 2. Grafik penurunan tekanan dan laju volumetrik

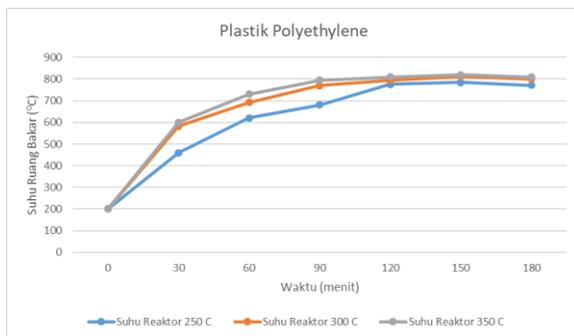
Gambar 2 disimpulkan jika menginginkan tekanan keluar gas pada ruang bakar 1 bar dengan tekanan outlet kondenser 3,4 bar, maka diameter pipa yang optimum adalah $\geq \frac{3}{4}$ ". Jika menggunakan pipa diameter $\frac{1}{2}$ " maka dibutuhkan alat *blower* atau *fan* untuk menambah tekanan agar syngas dapat mencapai ke ruang bakar. Jika berpedoman pada harga pipa maka makin besar diameter pipa maka akan semakin mahal harganya sehingga diameter $\frac{3}{4}$ " adalah yang paling optimum dengan harga yang paling murah daripada pipa yang lebih dari 1" dan tidak memerlukan bantuan *fan* dikarenakan penurunan tekanan pada diameter $\frac{3}{4}$ " yaitu 1,3 bar.

Setelah didapatkan diameter pipa yang paling optimum, kemudian dilakukan fabrikasi pemipaan dan diinstal pada alat pirolisis sebagaimana pada Gambar 4 instalasi pipa syngas yang dialirkan ke ruang bakar akan di cek pengaruhnya pada sistem. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit dengan waktu penelitian selama 180 menit dengan variatif suhu di dalam reaktor yaitu 250 °C, 300 °C, dan 350 °C. Jenis plastik yang akan diteliti yaitu *Polypropylene* (PP), *Polyethylene* (PE), dan *Polystyrene* (PS).



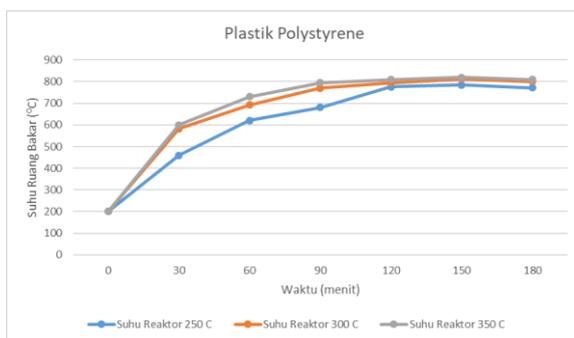
Gambar 3. Grafik suhu dan waktu plastik polypropylene

Gambar 3 menunjukkan bahwa plastik PP membutuhkan suhu 815 °C pada ruang bakar untuk mencapai suhu 350 °C pada reaktor selama 180 menit dan volume plastik sebanyak 10 kg.



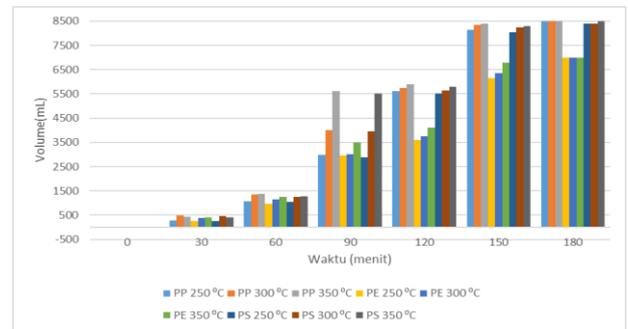
Gambar 4. Grafik suhu dan waktu plastik polyethylene

Gambar 4 menunjukkan bahwa plastik PE membutuhkan suhu 810 °C pada ruang bakar untuk mencapai suhu 350 °C pada reaktor selama 180 menit dan volume plastik sebanyak 10 kg.



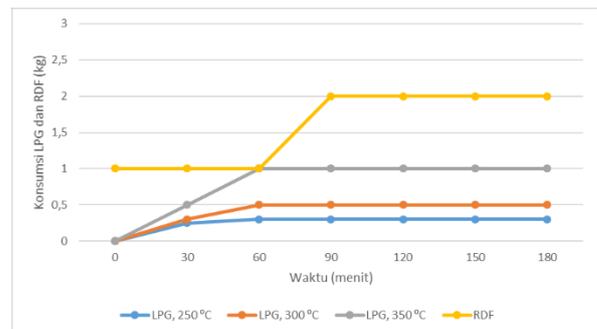
Gambar 5. Grafik suhu dan waktu plastik polystyrene

Gambar 5 menunjukkan bahwa plastik PS membutuhkan suhu 800 °C pada ruang bakar untuk mencapai suhu 350 °C pada reaktor selama 180 menit dan volume plastik sebanyak 10 kg.



Gambar 6. Grafik suhu dan waktu plastik polystyrene

Gambar 6 menunjukkan volume minyak yang dihasilkan pada penelitian. Volume minyak terbesar dimulai dari menit ke – 60. Plastik PP dapat menghasilkan 8500 mL selama 180 menit. Plastik PE dapat menghasilkan 7000 mL selama 180 menit. Plastik PS dapat menghasilkan 8400 mL selama 180 menit.



Gambar 7. Grafik konsumsi kebutuhan LPG dan RDF terhadap waktu

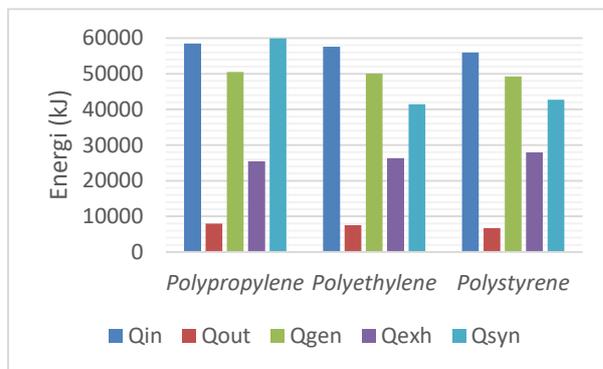
Gambar 7 menunjukkan kebutuhan LPG sebesar 1 kg dan RDF 2 kg selama 180 menit untuk suhu reaktor 350 °C, sedangkan kebutuhan LPG sebesar 0,5 kg dan RDF 2 kg selama 180 menit untuk suhu reaktor ≤ 300 °C.

Penelitian menghasilkan data untuk menentukan energi masuk maupun energi keluar agar mengetahui jenis plastik yang paling efisien pada sistem pirolisis. Adapun karakteristik dari masing – masing plastik untuk proses analisa perpindahan panas dapat dilihat pada tabel 7 berikut:

Tabel 7. Karakteristik plastik [5]

Property	Polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Units
General				
Density	952-965	905	960-1050	kg/m ³
Mechanical				
Yield Strength	2.62e7- 3.1e7	1.2e7- 4.3e7		Pa
Tensile Strength	2.21e7- 3.1e7	5.00E+07	4.6e7- 6e7	Pa
Elongation, yield	9 sampai 18	10 sampai 12	1.4	%
Impact Strength (un-notched)	1.9e5- 2e5	1.11 e5- 1.7e5		J/m ²
Young's Modulus	1.07e9- 1.09e9	1.33E+12	3e9- 3.6e9	Pa
Thermal				
Max Service Temperature	113- 129	82.2	122	°C
Melting Temperature	130- 137	160	270	°C
Insulator or Conductor	Insulator	Insulator	Insulator	
Specific Heat Capability	1.75e3- 1.81e3	1700- 1900	1300- 1500	J/kg °C
Thermal Expansion Coefficient	1.06e-4- 1.98e-4	6e-5- 17e-5	9e-5- 15e-5	strain/°C

Gambar 8 menunjukkan hasil analisa perpindahan panas dengan plastik PP membutuhkan energi masuk sebesar 58.510 kJ, menghasilkan energi 7.960 kJ dan energi yang dimanfaatkan kembali sebesar 59.970 kJ. Plastik PE membutuhkan energi masuk sebesar 57.565 kJ, menghasilkan energi 7.495 kJ dan energi yang dimanfaatkan kembali sebesar 41.517 kJ. Plastik PS membutuhkan energi masuk sebesar 55.990 kJ, menghasilkan energi 6.730 kJ dan energi yang dimanfaatkan kembali sebesar 42.747 kJ. Plastik yang memerlukan energi masuk terkecil adalah jenis plastik yang paling efisien, hal ini dapat disimpulkan bahwa plastik jenis PS merupakan plastik paling baik karena membutuhkan energi masuk yang paling kecil yaitu 55.990 kJ. Dan jenis plastik yang paling boros dikarenakan membutuhkan energi masuk terbesar adalah jenis plastik PP yaitu sebesar 58.510 kJ.



Gambar 8. Grafik keseimbangan energi

KESIMPULAN

Total energi yang dibutuhkan (Q_{in}) pada proses pirolisis dari masing – masing material yaitu polypropylene (PP) sebesar 58.510 kJ, polyethylene (PE) sebesar 57.565 kJ, dan polystyrene (PS) sebesar 55.990 kJ. Berdasarkan hasil tersebut, maka jenis plastik yang paling baik adalah yang memiliki Q_{in} terkecil dimana polystyrene memiliki nilai Q_{in} terkecil sebesar 55.990 sehingga jenis plastic yang paling optimum adalah polystyrene (PS). Material pipa yang optimal untuk mengalirkan syngas tersebut adalah pipa Black Steel Sch 40 (ASTM A53 Grade A) dengan diameter 20 mm dan penurunan tekanan sebesar 1,3 bar dimana syngas dapat mengalir dari outlet kondenser menuju ruang bakar tanpa bantuan blower.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Herliati, S. B. Prasetyo, and Y. Verinaldy, "Potensi Plastik Sebagai Sumber Energi Jurtek FTI," *JTek*, vol. 6, no. 2, pp. 85–98, 2019.
- [2] T. Maqsood, J. Dai, Y. Zhang, M. Guang, and B. Li, "Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 159, p. 105295, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JAAP.2021.105295.
- [3] M. S. Qureshi *et al.*, "Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 152, p. 104804, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JAAP.2020.104804.
- [4] E. Patriatna, "Pengembangan Purwarupa Tungku Bakar Terintegrasi Pirolisis Plastik," Pancasila University, 2020.
- [5] M. S. Gunawan, M. Muharom, M. H. Abdullah, F. G. Dewi, A. J. Suwondo, and O. Purnamayudhia, "Perancangan Proses Kondensasi Pada Pengolahan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Menggunakan Sistem Pirolisis Dengan Kapasitas 10 Liter," vol. 01, no. 02, pp. 65–70, 2022.
- [6] A. F. Anene, S. B. Fredriksen, K. A. Sætre, and L. A. Tokheim, "Experimental study of thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste components," *Sustain.*, vol. 10, no. 11, pp. 1–11, 2018, doi: 10.3390/su10113979.
- [7] M. A. Wicaksono and Arijanto, "Pengolahan Sampah Plastik Jenis Pet(Polyethilene Perefthalathe) Menggunakan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Alternatif," *J. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 9–15, 2017.
- [8] Y. , Zhang *et al.*, "Co-pyrolysis of lychee and plastic waste as a source of bioenergy through kinetic study and thermodynamic analysis," *Energy*, vol. 256, p. 124678, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124678.
- [9] U. B. Surono and Ismanto, "Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE Menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya," *J. Mek. dan Sist.*

- Termal*, vol. 1, no. 1, pp. 32–37, 2016.
- [10] W. W. Mandala, M. S. Cahyono, S. Ma'arif, H. Sukarjo, and W. Wardoyo, "Pengaruh Suhu terhadap Rendemen dan Nilai Kalor Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik," *J. Mek. dan Sist. Termal*, vol. 1, no. 2, pp. 49–52, 2016.
- [11] F. L. Savira and O. H. C., "Pirolisis Sampah Plastik Sebagai Bahan Bakar Alternatif Dengan Penambahan Sampah Ranting," *J. Envirotek*, vol. 9, no. 2, 2018, doi: 10.33005/envirotek.v9i2.966.
- [12] Y. Yuriandala, S. Syamsiah, and H. Saptoadi, "Pirolisis Campuran Sampah Plastik Polistirena Dengan Sampah Plastik Berlapisan Aluminium Foil (Multilayer)," *J. Sains & Teknologi Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 10–20, 2016, doi: 10.20885/jstl.vol8.iss1.art2.
- [13] Y. K. Pamungkas, "Pengaruh Katalis Zeolit Alam Terhadap Perolehan Minyak Pirolisis Sampah Plastik Polystyrene dan Low Density Polyethylene," Universitas Jember, 2020.
- [14] G. B. Susilo and T. Mesin, "Pembuatan Bahan Bakar dari Pirolisis Limbah Plastik Jenis Polietilen, Polistiren dan Other," vol. 8, no. 2, pp. 147–154, 2016.
- [15] S. Untoro Budi, "Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak," *J. Envirotek*, vol. 9, no. 2, pp. 32–40, 2018.
- [16] D. Mahandika, "Optimasi Desain Burner Reaktor Pirolisis Berkapasitas 2 kg/jam Berbahan Bakar LPG dan Refused Derived Fuel (RDF)," Pancasila University, 2021.
- [17] H. N. Putra, "Analisis Termoekonomi Pada Pemanfaatan Alat Pirolisis Dengan Menggunakan Kombinasi RDF Dan LPG," Pancasila University, 2021.
- [18] R. Laosena *et al.*, "Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/ma15093093.
- [19] N. L. Zahra *et al.*, "Substitution of Garden and Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste as Refused Derived Fuel (RDF)," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 523–532, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.44328.
- [20] I. W. K. Suryawan, I. M. W. Wijaya, N. K. Sari, I. Y. Septiariva, and N. L. Zahra, "Potential of Energy Municipal Solid Waste (MSW) to Become Refuse Derived Fuel (RDF) in Bali Province, Indonesia," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 10, no. 1, pp. 09–15, 2021, doi: 10.15294/jbat.v10i1.29804.
- [21] L. J. Brown, F. X. Collard, and J. Görgens, "Fast pyrolysis of fibre waste contaminated with plastic for use as fuel products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 138, pp. 261–269, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JAAP.2019.01.007.
- [22] L. Quesada, A. Pérez, V. Godoy, F. J. Peula, M. Calero, and G. Blázquez, "Optimization of the pyrolysis process of a plastic waste to obtain a liquid fuel using different mathematical models," *Energy Convers. Manag.*, vol. 188, pp. 19–26, May 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.03.054.
- [23] K. Ding *et al.*, "Catalytic microwave-assisted pyrolysis of plastic waste over NiO and HY for gasoline-range hydrocarbons production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1316–1325, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.07.001.
- [24] N. Sophonrat, L. Sandström, I. N. Zaini, and W. Yang, "Stepwise pyrolysis of mixed plastics and paper for separation of oxygenated and hydrocarbon condensates," *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 314–325, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.08.006.
- [25] P. Das and P. Tiwari, "The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel," *Waste Manag.*, vol. 79, pp. 615–624, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.WASMAN.2018.08.021.
- [26] M. Kusenberg *et al.*, "A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition," *Fuel*

- Process. Technol.*, vol. 227, p. 107090, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.FUPROC.2021.107090.
- [27] T. S. Singh, T. N. Verma, and H. N. Singh, "A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study," *Fuel*, vol. 277, p. 118176, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118176.
- [28] M. Syamsiro, "Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk," *Teknik*, vol. 5, no. 1, pp. 1–85, 2015.
- [29] N. Zhou *et al.*, "Catalytic pyrolysis of plastic wastes in a continuous microwave assisted pyrolysis system for fuel production," *Chem. Eng. J.*, vol. 418, p. 129412, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.129412.
- [30] Joseba Giansena, "Analisa Kinerja Reaktor Pirolisis Kapasitas 150 Liter," Pancasila University, 2020.
- [31] S. Zhang, S. Zhu, H. Zhang, X. Liu, and Y. Xiong, "High quality H₂-rich syngas production from pyrolysis-gasification of biomass and plastic wastes by Ni-Fe@Nanofibers/Porous carbon catalyst," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 48, pp. 26193–26203, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.105.
- [32] R. Agustin, M. Muharom, M. H. Abdullah, C. W. Oktavia, W. Nugroho, and M. Muchid, "Rancang Bangun Alat Purifikasi Gas Buang Pirolisis Dengan Sistem Absorber dan Adsorber Kontinyu," vol. 01, no. 02, pp. 71–76, 2022.
- [33] K. Ridhuan and D. Irawan, *Energi Terbarukan Pirolisis*. 2020.