

ANALISIS MODIFIKASI DESAIN REAKTOR PADA RANCANG BANGUN ALAT PIROLISIS DAN PENGUJIAN NILAI KALOR UNTUK PLASTIK PP DAN ABS

Rudi Purwo Wijayanto ¹⁾ ✉, Francois Rubian Alhikam ¹⁾, Iyus Hendrawan

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin
Institut Teknologi Indonesia (ITI)
rudi.wijayanto@iti.ac.id
francoisrubian@gmail.com
iyus.hendrawan@iti.ac.id

Abstract

The increasing use of plastic results in a rise in the volume of waste each year and has an impact on the environment. Pyrolysis is a method for recycling plastic waste into fuel oil. Improvements in pyrolysis design and techniques continue to be made to obtain better performance and optimal results. In this study, we compare the rate of increase in heat and volume of oil produced from two pyrolysis device designs. The alpha version is the previous version of the pyrolysis apparatus with a flat plate roof reactor and without the addition of an insulator on the tube wall. While the beta version is a modification of the alpha version with a conical roof reactor with the addition of calk material on the tube wall. Modification of the pyrolysis apparatus was also carried out in the condensation section. The beta version of the pyrolysis device shows better performance, where the reactor temperature reaches 250 °C, while the alpha version, which is the previous version, reaches a maximum temperature of 220 °C in a longer time. The volume of oil produced by the beta version is 0.11 mL/gram of polypropylene plastic, whereas the alpha version produced only 0.01 mL/gram for the same material. The test results for the calorific value of polypropylene (PP) plastic waste were 43.838 MJ/kg, while for acrylonitrile butadiene styrene (ABS) it was 44.772 MJ/kg.

Keywords: Pyrolysis, Plastic Waste, Polypropylene, Acrylonitrile Butadiene Styrene Plastic, Gross Calorific Value.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi dan peningkatan timbunan sampah merupakan dua permasalahan besar yang muncul seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan pertambahan penduduk. Indonesia menghasilkan sekitar 4,8 juta ton per tahun sampah plastik yang tidak dikelola secara benar ^[1]. Beberapa pengelolaan sampah plastik yang keliru tersebut antara lain adalah dengan membakarnya secara asal, tidak dikelola dengan benar di tempat pembuangan sampah, serta mencemari saluran air dan laut. Berdasarkan data yang dikumpulkan oleh Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan (DLHK) Kabupaten Tangerang, Banten, mencatat sampah di daerah itu mencapai 2.250 ton per hari sehingga total selama satu tahun pada 2021 produksi sampah mencapai sekitar 820.000 ton ^[2]. Begitu juga dengan konsumsi energi di berbagai sektor seperti transportasi, industri dan energi listrik untuk rumah tangga tercatat terus meningkat dengan laju pertumbuhan rata - rata pertahun secara berurutan sebesar 3,9%, 3,2% dan 4,7% ^[3]. Konsumsi energi berkaitan dengan listrik

Corresponding Author:
✉ Rudi Purwo Wijayanto
Received on: 2023-02-15
Revised on: 2023-05-26
Accepted on: 2023-10-11

kedepannya akan mendominasi yang kemudian disusul dengan sektor industri. Sementara cadangan energi nasional yang semakin menipis menimbulkan kekhawatiran akan krisis energi di masa mendatang jika tidak cermat dalam mempergunakannya.

Pirolisis merupakan salah satu teknik pengolahan sampah plastik menjadi energi fosil yang dapat dimanfaatkan ^[4-6]. Teknik pirolisis mampu menggantikan metode konvensional penanganan sampah plastik, seperti halnya open dumping, sistem *composting* ataupun *sanitary landfill* ^[6]. Teknologi pengolahan sampah ini cukup murah dengan teknologi sederhana dan pengoperasian yang mudah, sehingga layak dikembangkan. Secara teknis dalam metode pirolisis terjadi suatu proses dekomposisi bahan secara termal tanpa adanya oksigen. Proses dekomposisi pada pirolisis ini juga sering disebut dengan devolatilisasi. Produk utama yang dihasilkan dari pirolisis adalah briket char, minyak dan gas. Arang yang terbentuk dapat digunakan untuk bahan bakar ataupun digunakan sebagai karbon aktif. Minyak yang dihasilkan selama kondensasi dari asap cair, juga dikenal sebagai bio-oil. Bio-oil yang dihasilkan dapat digunakan sebagai zat aditif atau campuran dalam bahan bakar. Sedangkan gas yang terbentuk dapat dibakar secara langsung ^[7]. Berdasarkan temperatur, laju pemanasan dan waktu pemanasan, pirolisis dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu *flash pyrolysis* (pirolisis sangat cepat), *fast pyrolysis* (pirolisis cepat) dan *slow pyrolysis* (pirolisis lambat) ^[8,9].

Tabel 1. Parameter umum dan produk pirolisis ^[8,9].

Proses Pirolisis	Laju Kalor (K/s)	Ukuran partikel (mm)	Suhu (K)	Produk Hasil (%)		
				Cair	Padat	Gas
Lambat	0,1-1	5 – 50	550 – 950	30	35	35
Cepat	10-200	< 1	850 – 1250	50	20	30
Sangat cepat	>1000	< 0,2	1050 - 1300	75	12	13

Bahan baku pirolisis tidak terbatas pada limbah plastik, bahan biomasa dapat juga digunakan seperti limbah kayu, ranting pohon, sekam padi, kotoran sapi dan bahan biomasa lainnya ^[10-12]. Namun, pirolisis lebih banyak digunakan untuk pengolahan limbah plastik yang tidak mudah terurai melalui proses alam. Plastik merupakan polimer sintesis yang memiliki karakteristik kuat, tahan lama, dan tahan terhadap korosi. Alasan inilah yang menyebabkan penggunaan plastik semakin masif dalam kehidupan sehari-hari seperti sebagai kemasan, pakaian, peralatan olahraga dan kedokteran, komponen elektronika dan perangkat lainnya ^[13-15]. Terdapat beberapa bahan plastik yang sering digunakan diantaranya adalah PP (*polypropylene*), PET (*polyethylene terephthalate*), PVC (*polyvinyl chloride*), LDPE (*low density polyethylenen*), HDPE (*high density polyethylenen*), dan ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*) ^[15].

Alat pirolisis menjadi penelitian yang menarik bagi peneliti dengan beberapa ruang lingkupnya, diantaranya terkait dengan desain ^[16,17], unjuk kinerja pirolisis untuk biomasa ^[10,12,18], kinerja pirolisis untuk plastik jenis PP ^[19], jenis LDPE dan PP ^[20], jenis PET ^[21]. Penelitian penggunaan plastik ABS sebagai bahan baku pirolisis masih sangat terbatas. ABS berasal dari akronitril, butadiene, dan stirena yang mempunyai nilai transisi gelas 107,29 °C - 177,91 °C dengan titik kristalisasi antara 84 °C – 112 °C. Akronitril adalah monomer sintesis yang bersifat stabil terhadap panas, tahan terhadap bahan kimia dan memiliki kekuatan tinggi. *Butadiene* memiliki sifat ketahanan pukul dan sifat kekerasan, sedangkan stirena bersifat kaku dan mudah untuk diproses ^[22]. ABS banyak digunakan dalam industri elektronika, komputer dan otomotif karena sifatnya yang kuat, tahan terhadap suhu dan cairan kimia serta dengan penambahan lapisan akan tampak berkilau.



Gambar 1. Plastik jenis PP dan ABS

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis laju pertambahan panas dan volume hasil pirolisis dari dua versi alat pirolisis, alfa dan beta, dimana beta merupakan hasil modifikasi dari versi alfa. Selain itu, penulis melaksanakan uji nilai kalor hasil pirolisis untuk sampah plastik jenis PP dan ABS, mengingat penelitian yang membahas penggunaan plastik ABS sebagai bahan baku pirolisis masih sangat terbatas.

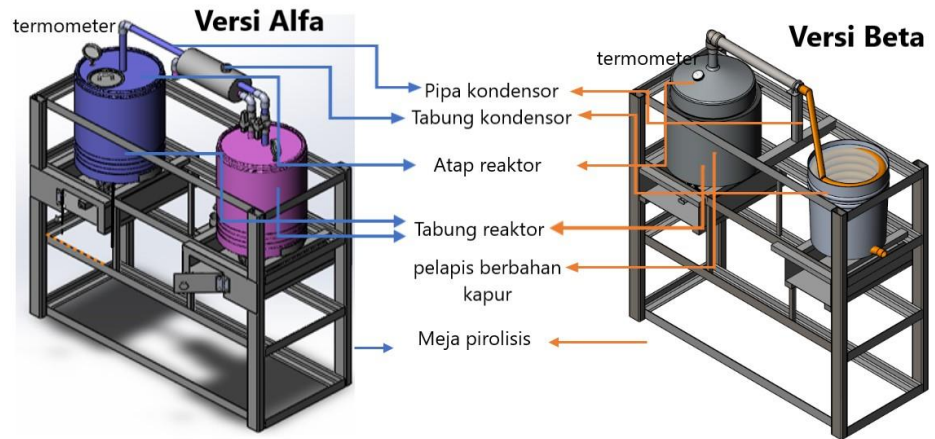
2. METODE DAN BAHAN

Metode yang digunakan adalah dengan rancang bangun alat, uji kinerja, dan uji laboratorium hasil minyak pirolisis. Pelaksanaan uji kinerja dilakukan dengan membandingkan laju pemanasan, volume hasil dan performa pirolisis versi alfa dan versi beta. Versi beta merupakan modifikasi dari versi alfa dengan tujuan untuk mendapatkan desain yang lebih sederhana dengan hasil yang lebih baik. Penulis melakukan modifikasi alat pirolisis, sehingga pengujian untuk versi alfa dan beta dilakukan pada waktu yang berbeda.

Data yang diambil adalah kenaikan suhu pada reaktor terhadap waktu, dengan menggunakan sistem pemanas kompor yang sama. Selain nilai laju pemanasan terhadap waktu, penulis mengambil data minyak hasil pirolisis (mL) dalam satuan waktu. Untuk nilai kalor, penulis menggunakan alat pirolisis versi beta, dengan mengambil sampel untuk dilakukan pengujian di Laboratorium Uji Bahan Bakar, BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). Nilai kalor (*gross calorific value*) untuk uji plastik jenis PP dan ABS ditampilkan dan di analisis guna memastikan bahwa alat pirolisis versi beta ini dapat digunakan.

2.1. Desain Alat Pirolisis

Tabung reaktor versi alfa terpasang tutup yang berbentuk datar, sedangkan pada versi beta atap tabung reaktor berbentuk kerucut. Peneliti memiliki asumsi awal bahwa atap reaktor berbentuk kerucut akan menghasilkan aliran laminar di dalamnya sehingga uap atau minyak yang mengalir lebih banyak. Pada tabung reaktor juga terpasang termometer, untuk mengamati kenaikan suhu reaktor. Desain versi alfa dan beta ditampilkan pada Gambar 2 di bawah ini.



2.2. Alat dan Bahan

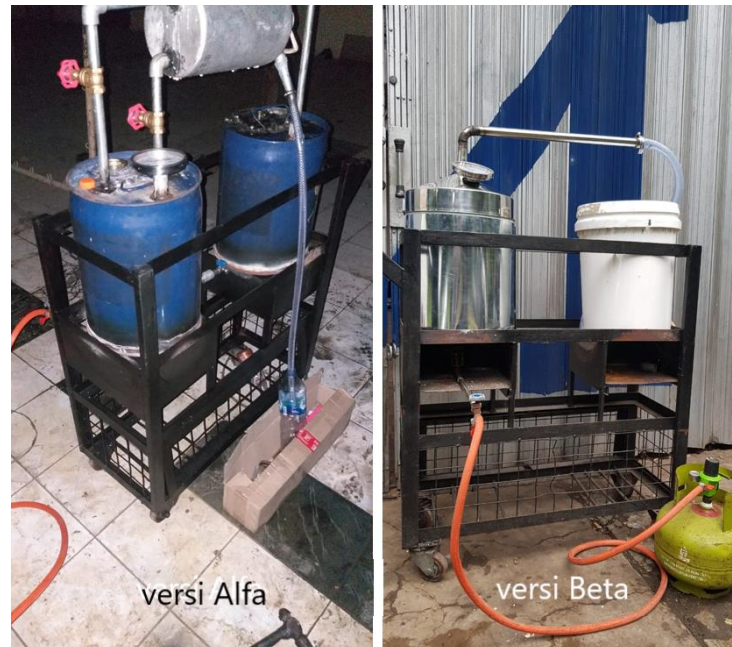
Alat yang digunakan dalam pembuatan alat pirolisis ini adalah sebagai berikut; mesin las, gerinda, mesin bor, amplas, tang potong dan meteran panjang. Sedangkan material yang digunakan adalah sebagai berikut; tabung baja sebagai bahan reaktor, tabung plastik untuk kondensor, pipa selang galvanis dan selang plastik untuk aliran uap dari reaktor ke kondensor, bubuk kapur yang dipilih sebagai penyekat panas, termometer bimetal sebagai pengukur suhu, dan meja reaktor sebagai tempat dudukan.

Ukuran tabung reaktor yang digunakan memiliki diameter 28 cm, tinggi 38 cm dan kapasitas 18 liter. Penggunaan tabung berbahan baja dikarenakan sifatnya yang kuat terhadap temperature tinggi dan tahan akan korosi. Untuk kondensor, menggunakan tabung dengan bahan plastik berdiameter 27 cm, tinggi 30 cm dan kapasitas 18 liter. Pemilihan tabung kondensor berbahan plastik ini dikarenakan harga yang ekonomis dan tahan terhadap korosi. Termometer bimetal di gunakan sebagai acuan peneliti dalam mengatur besar kecilnya suhu didalam ruang peleburan, hal ini bertujuan supaya tidak terjadi pemanasan yang berlebih di dalam tabung pengolah limbah plastik.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Hasil Modifikasi Desain

Terdapat tiga aspek desain yang berbeda dari hasil modifikasi versi beta dari versi sebelumnya (alfa); atap tabung reaktor yang semula datar menjadi kerucut, dinding tabung reaktor berpenyekat panas dengan penambahan kapur dan pipa kondensor yang dibuat melingkar dengan berpendingin air. Gambar 3 di bawah ini menunjukkan hasil modifikasi desai alat pirolisis yang dimaksud.



Gambar 3. Hasil modifikasi desain pirolisis dari versi alfa dan beta

Dari modifikasi desain diperoleh beberapa parameter yang menunjukkan peningkatan kinerja alat, diantaranya adalah laju kenaikan suhu reaktor, suhu maksimal yang dapat dicapai reaktor, waktu pemanasan dan volume minyak hasil pirolisis. Pelapisan dinding reaktor memiliki dampak menjaga suhu reaktor tetap stabil sekaligus dapat memanaskan reaktor dengan cepat.

Penggunaan atap yang berbentuk kerucut dapat menghasilkan minyak lebih banyak. Hal ini berbeda dengan atap reaktor berbentuk pelat datar, minyak cenderung menempel pada plat datar alih-alih diteruskan menuju proses kondensasi. Atap berbentuk kerucut juga mendorong aliran laminar, sehingga memudahkan uap air hasil kondensasi mengalir menuju kondensasi. Dengan fenomena tersebut, hasil minyak pirolisis versi beta jauh lebih banyak jika dibandingkan dengan versi alfa.

Pada proses kondensasi, versi beta menunjukkan hasil yang lebih optimal. Laju penambahan volume minyak pada versi beta jauh lebih baik dibanding dengan versi sebelumnya (alfa) dengan menggunakan jenis plastik yang sama.

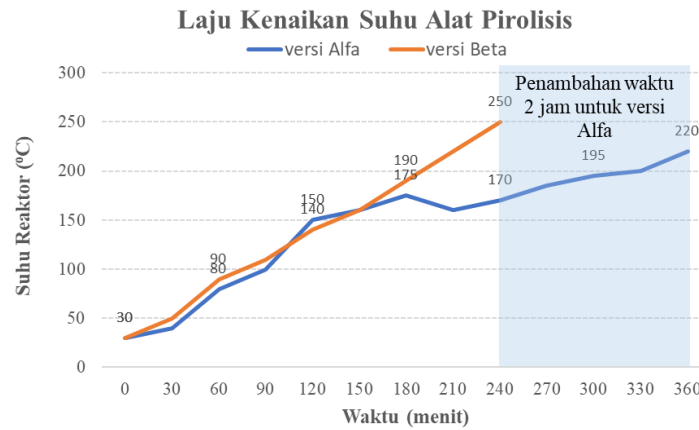
Tabel 2. Aspek perbedaan desain, bahan uji, dan hasil uji versi alfa dan beta

No	Aspek Desain, Bahan Uji dan Hasil Uji	Versi Alfa	Versi Beta
1	Atap reaktor	Plat mendatar	Kerucut
2	Dinding tabung reaktor	Tanpa penyekat panas	Menggunakan bahan kapur sebagai penyekat panas
3	Sistem kondensasi	Penggunaan pipa besi dengan air	Selang melingkar dengan pendingin air
4	Jenis plastik bahan uji	PP	PP dan ABS
5	Volume bahan uji	3 kg	500 gram
6	Volume akhir hasil uji (minyak)	30 mL	55 mL dan 52 mL
7	Suhu reaktor maksimal	220 °C	250 °C
8	Waktu untuk mencapai suhu maksimal	6 jam	4 jam

3.2. Laju Pemanasan

Laju pemanasan alat pirolisis ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik laju pemanasan per satuan waktu menunjukkan dari menit awal hingga menit ke 180, alat pirolisis versi alfa dan beta tidak jauh berbeda. Namun, untuk menit berikutnya versi alfa menunjukkan laju pemanasan yang tidak stabil. Pada versi alfa, untuk mencapai suhu maksimal diperoleh waktu yang cukup lama yaitu 6 jam. Sedangkan versi beta hanya membutuhkan waktu 4 jam untuk mencapai suhu maksimal. Suhu maksimal yang dicapai pada versi alfa hanya 220 °C, sedangkan versi beta mampu mencapai suhu 250 °C dalam waktu yang lebih singkat.

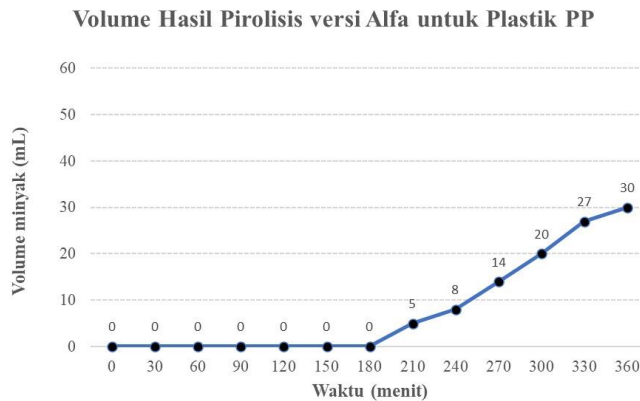
Penggunaan bahan kapur sebagai pelapis dinding reaktor, mampu menahan panas dinding reaktor dengan lingkungan sekitar. Hal tersebut berdampak pada kestabilan suhu di dalam reaktor, dimana proses pemanasan menjadi lebih optimal.



Gambar 4. Laju kenaikan suhu reactor

3.3. Volume Hasil Pirolisis

Alat pirolisis versi alfa menghasilkan volume minyak 30 mL dari 3 kg plastik jenis PP, sehingga secara perhitungan volume minyak pirolisis adalah 0,01 mL/gram plastik jenis PP. Laju kenaikan volume hasil pirolisis setelah 3 jam adalah 0,17 mL/menit.



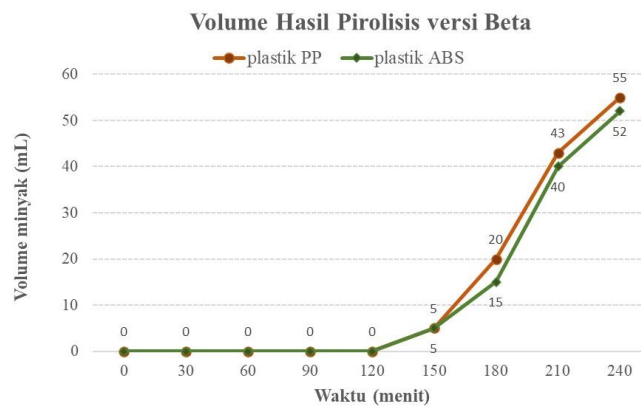
Gambar 5. Volume Hasil Pirolisis versi Alfa per satuan waktu

Sedangkan pada alat pirolisis versi Beta, volume minyak yang dihasilkan adalah 55 mL dari 500 gram plastik jenis PP. Secara perhitungan, versi Beta dapat menghasilkan minyak

0,11 mL/gram plastik jenis PP. Hal tersebut menunjukkan volume minyak hasil pirolisis versi Beta lebih baik dari versi sebe-lumnya.

Pengujian lebih lanjut dilakukan dengan menggunakan plastik jenis ABS, dimana diperoleh dari 500 gram plastik menghasilkan sebanyak 52 mL minyak pirolisis atau 0,10 mL/gram. Modifikasi desain atap dari plat mendatar ke bentuk kerucut, mendorong pola aliran laminar sehingga menghasilkan uap air yang lebih banyak yang menuju ke kondensor. Demikian juga dengan proses kondensasi yang opti-mal, mampu menghasilkan volume minyak lebih banyak.

Laju kenaikan volume minyak hasil pirolisis setelah 3 jam secara rata-rata adalah 0,55 mL/menit untuk plastik jenis PP dan 0,52 mL/menit untuk plastik jenis ABS. Plastik jenis PP menghasilkan volume minyak lebih banyak daripada plastik jenis ABS, namun perbedaannya tidak signifikan.



Gambar 6. Volume Hasil Pirolisis versi Beta per satuan waktu

3.4. Hasil Uji Nilai Kalor

Pengujian nilai kalor bahan bakar plastik jenis PP dan ABS dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Bakar, BRIN. Pengujian nilai kalor ini menggunakan dua sampel minyak pirolisis sebanyak masing-masing 30 mL, dengan metode uji ASTM D4809. Minyak hasil pirolisis untuk bahan uji ditunjukkan pada Gambar 7, sedangkan hasil uji nilai kalor (*gross calorific value*) ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 7. Minyak hasil pirolisis untuk pengujian nilai kalor

Tabel 3. Hasil uji nilai kalor

No	Sampel	Satuan/Unit	Nilai Kalor (GCV)
1	Plastik PP	MJ/kg	43,838
2	Plastik ABS	MJ/kg	44,722

Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa minyak dari plastik jenis PP memiliki nilai kalor (GCV) sebesar 43,84 MJ/kg sedangkan pada minyak dari plastik jenis ABS memiliki nilai kalor 44,72 MJ/kg. Nilai kalor dari jenis plastik PP tersebut hasilnya tidak berbeda jauh dengan penelitian yang dilakukan Joko Santoso ^[23], dengan bahan bakar yang sama dihasilkan nilai kalor 43,33 MJ/kg.

Berdasarkan pada studi yang dilakukan Al Salem, 2009 ^[24], nilai kalor solar adalah 45,20 MJ/kg sedangkan minyak berat adalah 42,50 MJ/kg sehingga hasil pirolisis dari plastik jenis PP dan ABS nilai kalor mendekati minyak solar. Dengan menggunakan referensi yang sama, nilai kalor minyak pirolisis dari kedua jenis plastik tersebut memiliki jangkauan nilai kalor yang sama dengan jenis bahan plastik polietilen yakni 43,3 – 46,5 MJ/kg ^[24].

4. KESIMPULAN

Modifikasi desain reaktor pada versi beta mampu mengkonversikan limbah plastik menjadi bahan bakar lebih optimal apabila dibandingkan dengan versi alfa (sebelumnya). Pemberian lapisan kapur pada dinding reaktor mampu menahan panas reaktor untuk berpindah ke lingkungan sekitar, sehingga suhu kerja reaktor lebih stabil dan optimal. Suhu yang dapat dicapai pada versi beta adalah 250 °C dalam waktu 4 jam sedangkan pada versi alfa 220 °C dalam waktu 6 jam dengan metode yang sama. Modifikasi desain atap reaktor berbentuk kerucut, menghasilkan volume minyak hasil pirolisis meningkat dari 0,01 mL/gram menjadi 0,11 mL/gram dengan jenis plastik yang sama.

Hasil data pengujian nilai kalor bahan bakar dari minyak pirolis pada penelitian kali ini mendapat hasil 43,838 MJ/kg untuk minyak jenis PP dan 44,722 MJ/kg untuk minyak jenis ABS. Plastik jenis ABS memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis PP. Nilai kalor tersebut hampir setara dengan minyak solar.

PERNYATAAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat ITI dan tim laboran di Laboratorium Uji Bahan Bakar BRIN atas kontribusinya dalam perolehan data dan pendanaan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hendro D. Situmorang., Berita Satu, <https://www.beritasatu.com/news/792091/48-juta-ton-per-tahun-sampah-plastik-di-indonesia-tidak-dikelola-dengan-baik>, 25 Jun. 2021. Diakses pada 20 Desember 2022.
- [2] Syamsul A. Ma'arif, Antara News, <https://www.antaraneews.com/berita/2623933/sampah-dikabupaten-tangerang-capai-2500-ton-per-hari>, 4 Jan. 2022. Diakses pada 20 Desember 2022.
- [3] Hadya D. Jayani, Databoks Katadata, Kebutuhan Energi Indonesia Diproyeksikan Capai 2,9 Miliar Setara Barel Minyak pada 2050 (katadata.co.id), 3 Des. 2021. Diakses pada 20 Desember 2022.

- [4] Kuncoro, A., Ma'muri, and Wisnugroho, S., "Desain Sistem Pirolisis untuk Pengelolaan Sampah Plastik di Perairan Wakatobi", Dalam: Prosiding SNST ke-10 Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, pp. 7-12, Semarang, 2019.
- [5] Wijayanti, W., Sasongko, M.N., Meidiana, C., and Yuliati, L., "Metode pirolisis untuk penanganan sampah perkotaan sebagai penghasil bahan bakar alternatif", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 4, n. 2, pp. 85-92, 2013.
- [6] Santhiarsa, I.G.N.N., "Rancang Bangun Alat Konversi Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Dengan Metode Pirolisis Untuk Penanganan Sampah Plastik", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 13, n. 1, pp. 189-196, 2022.
- [7] Kappler, G., Hauschild, T., Da Cruz Tarelho, L.A., and Moraes, C.A.M., "*Waste to energy and materials through pyrolysis: a review*", *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 18, n. 53, pp. 281-302, 2022
- [8] Jahirul, M.I., Rasul, M.G., Chowdury, A.A., and Ashwath, N., "*Biofuels production through biomass pyrolysis—a technological review*", *Energies*, v. 5, n. 12, pp. 4952-5001, 2012.
- [9] Balat, M., Balat, M., Kirtay, E., and Balat, H., "*Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems*", *Energy conversion and Management*, v. 50, n. 12, pp. 3147-3157, 2009.
- [10] Peng, Y., and Wu, S., "*Fast pyrolysis characteristics of sugarcane bagasse hemicellulose*", *Cellulose chemistry and technology*, v. 45, n. 9, pp. 605-612, 2011.
- [11] Aini, N.A., Jamilatun, S., and Pitoyo, J., "Pirolisis biomassa", *Agroindustrial Technology Journal*, v. 6, n. 1, pp. 89-101, 2022
- [12] Wijayanti, W., and Sasongko, M.N., "Reduksi Volume Dan Pengurangan Kotoran Sapi Dengan Metode Pirolisis", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 3, n. 3, pp. 404-410, 2012.
- [13] Thompson, R.C., Moore, C.J., Vom Saal F.S., and Swan, S.H., "*Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends*", *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, v. 364, n. 1526, pp. 2153-2166, 2009.
- [14] Day, M., Cooney, J.D., Touchette-Barrette, C., and Sheehan, S.E. "*Pyrolysis of mixed plastics used in the electronics industry*", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 52, n. 2, pp. 199-224, 1999.
- [15] Prasetiawan, H., Nafasyeila, T.D., Fardhayanti, D.S., "Pengolahan Sampah Plastik Menggunakan Metode Pirolisis Sebagai Upaya Pengurangan Limbah Plastik Pada Lingkungan: *Review*", Dalam: Seminar Nasional TECHNOPEX-2022 Institut Teknologi Indonesia, pp. 1-19, Tangerang Selatan, Okt. 2022.
- [16] Pangala, J. R., Tambunan, A.H., Kartodiharjo, H., and Pari, G., "Desain dan Pengujian Kinerja Kompor Gasifikasi-Pirolisis", *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, v. 6, n. 1, pp. 61-70, 2016.
- [17] Hadi, A., Gafur, A., Udiantoro, U., and Mukhlis, M., "Desain instalasi pirolisis limbah pertanian dalam rangka minimalisasi emisi gas rumah kaca dari lahan basah", Dalam: Prosiding SNST ke-5 Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, pp. 1-9, Semarang, 2014.
- [18] Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., and Firmansyah, F., "Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bio arang - asap cair yang dihasilkan", *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, v. 20, n. 1, pp. 18-27, Jan. 2019.

- [19] Adoe, D.G., Bunganaen, W., Krisnawi, I.F., and Soekwanto, F.A., “Pirolisis Sampah Plastik PP (*Polypropylene*) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer”, LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana, v. 3, n. 1, pp. 17-26, 2016.
- [20] Nugroho, A.S., “Pengolahan Limbah Plastik LDPE dan PP Untuk Bahan Bakar Dengan Cara Pirolisis”, Jurnal Litbang Sukowati: Media Penelitian Dan Pengembangan, v. 4, n. 1, pp. 91-100, 2020.
- [21] Wicaksono, M.A., and Arijanto, A., “Pengolahan sampah plastik jenis PET (*Polyethylene terephthalate*) menggunakan metode pirolisis menjadi bahan bakar alternatif”, Jurnal Teknik Mesin, v. 5, n.1, pp. 9-15, 2017.
- [22] Santhiarsa, N., “Pengaruh Temperatur Larutan Dan Waktu Pelapisan Elektrodes Terhadap Ketebalan Lapisan Metal Di Permukaan Plastik ABS”, Dalam: Prosiding Konferensi Nasional Engineering Perhotelan VII, Jimbaran, Sept. 2016.
- [23] Santoso, J., Uji sifat minyak pirolisis dan uji performansi kompor berbahan bakar minyak pirolisis dari sampah plastik, Skripsi Jurusan Teknik Mesin UNS, Surakarta, 2010.
- [24] Al-Salem, S.M., Lettieri, P., and Baeyens, J., “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review”, Waste Management, v. 29, n. 10, pp. 2625-2643, 2009.