

JURNAL RISET TEKNOLOGI INDUSTRI

**PEMANFAATAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS
PLASTIK *POLYETHYLENE* (PE) SEBAGAI BAHAN BAKAR
DENGAN METODE KONDENSOR DAN METODE TANGKI AIR*****GAS UTILIZATION OF POLYETHYLENE (PE)
PLASTIC WASTE PYROLYSIS PROCESS AS FUEL
WITH CONDENSOR METHOD AND WATER TANK METHOD***

Silvie Ardhanie Aviandharie, Bumiarto Nugroho Jati, Rahyani Ermawati
Balai Besar Kimia dan Kemasan, Kementerian Perindustrian, Indonesia
E-mail: agathareginasilvie@gmail.com

Diterima 11 - 12 - 2019

Direvisi 10 - 03 - 2020

Disetujui 14 - 05 - 2020

ABSTRAK

Masalah limbah plastik meresahkan masyarakat dunia. Alternatif penanganannya antara lain dengan metode pirolisis. Pada proses pirolisis, limbah plastik akan diubah menjadi fas cair, padat, dan gas. Tujuan penelitian ini untuk memanfaatkan produk gas dari proses pirolisis limbah plastik *polyethylene* (PE) sebagai bahan bakar dengan metode kondensor dan metode tangki air serta aplikasinya di lapangan. Nilai kalor pada metode kondensor 1209,25 BTU/ft³ sedangkan nilai kalor metode tangki air 1548,42 BTU/ft³. Jika dibandingkan dengan kualitas gas alam yang sudah diolah dan gas pipa, gas hasil pirolisis mempunyai kualitas lebih baik karena mempunyai nilai kalor lebih tinggi dan tidak menghasilkan gas H₂S yang bersifat korosif. Dari kedua metode, metode tangki air menghasilkan kualitas gas terbaik. Sebelum dimanfaatkan, gas pirolisis yang masih mengandung pengotor CO₂ perlu dipurifikasi. Penurunan CO₂ mencapai 99,82% setelah dipurifikasi dengan kolom purifikasi sedangkan dengan larutan Ca(OH)₂ hanya 65,05%. Gas yang sudah dipurifikasi dimasukkan ke dalam tabung untuk memudahkan dalam penyimpanan dan aplikasi di lapangan.

Kata Kunci: bahan bakar, gas, katalis, pirolisis plastik

ABSTRACT

The problem of plastic waste is disturbing the world community. Alternative treatment with pyrolysis method. In the pyrolysis process, plastic waste will be converted into liquid, solid, and gas phase. The purpose of this study was to utilize gas products from the pyrolysis process of PE plastic waste as fuel, with condenser method and water tank method, and its application in the field. Calorific value of condenser method is 1209.25 BTU/ft³ and calorific value of water tank method is 1548.42 BTU/ft³. When compared with the quality of processed natural gas and pipeline gas, pyrolysis gas has better quality because it has a higher calorific value and does not produce corrosive H₂S gas. From both methods, the water tank method produces the best gas quality. Before being utilized, pyrolysis gas that still contains CO₂ impurities needs to be purified. The reduction in CO₂ reached 99.82% after purification with the purification column while with a solution of Ca(OH)₂ only 65.05%. Purified gas is put into a tube for easy storage and application in the field.

Keywords: fuel, gas, catalyst, plastic pyrolysis

PENDAHULUAN

Masalah limbah plastik di seluruh dunia sangat meresahkan masyarakat. Sekitar 8.300 juta ton plastik *virgin* telah diproduksi di seluruh dunia pada tahun 2017. Pada tahun 2015 sekitar 6.300 ton sampah plastik telah didaur ulang 9%, dibakar 12%, dan 79% dibuang ke alam. Jika tren produksi dan pengelolaan limbah saat ini berlanjut, sekitar 12.000

ton limbah plastik akan berada di tempat pembuangan sampah atau di lingkungan alami pada tahun 2050 (Geyer, 2017).

Indonesia masuk dalam peringkat kedua di dunia sebagai penghasil limbah plastik ke laut. Total sampah Indonesia tahun 2019 mencapai 68 juta ton dan limbah plastik diperkirakan mencapai 9,52 juta ton atau 14 % dari total sampah yang ada. Lebih dari satu juta kantong plastik digunakan setiap menit dan 50% dari kantong plastik tersebut dipakai hanya sekali lalu langsung dibuang dan hanya 5% yang benar-benar didaur ulang (Purwaningrum, 2016).

Peningkatan jumlah pengguna plastik menyebabkan akumulasi limbah plastik di Tempat Pembuangan Akhir yang berkontribusi terhadap masalah lingkungan. Pemusnahan plastik dengan cara pembakaran kurang efektif dan beresiko karena akan muncul polutan dari emisi gas buang seperti CO₂, CO, NO_x, SO_x dan beberapa partikulat pencemar lainnya sehingga diperlukan cara pengolahan lain untuk mengolah sampah plastik menjadi produk lain yang bermanfaat.

Salah satu alternatif yang telah dikembangkan untuk mengolah limbah plastik adalah metode daur ulang. Metode daur ulang memiliki beberapa kekurangan antara lain memerlukan biaya tenaga kerja yang tinggi untuk proses pemisahan serta menyebabkan kontaminasi air. Alternatif pengelolaan limbah plastik lainnya adalah metode pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi alternatif pengganti minyak bumi yang semakin menipis. Hal ini dimungkinkan karena bahan utama pembuatan plastik adalah minyak bumi sehingga plastik dapat diolah kembali menjadi minyak cair yang memiliki nilai kalori tinggi sebanding dengan bahan bakar (Sharuddin et al., 2016). Metode pirolisis limbah plastik diharapkan dapat mengatasi permasalahan lingkungan terkait limbah plastik, beroperasi tanpa membutuhkan oksigen dengan suhu tinggi serta tidak memerlukan tekanan tinggi sehingga relatif aman dalam prosesnya (Almeida dan Marques, 2016).

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mendapatkan teknologi yang optimal dalam mengolah gas hasil proses pirolisis limbah plastik menjadi bahan bakar gas, dengan membandingkan dua metode pirolisis yaitu metode kondensasi (Ermawati et al., 2016 dan Naimah et al., 2016) dan metode menggunakan tangki air (Naimah et al. 2016) serta aplikasinya di lapangan. Proses pirolisis ini juga memanfaatkan katalis bekas pengolahan minyak bumi yang sudah tidak digunakan yaitu *Residue Catalytic Cracking (RCC)* (Naimah dan Aidha, 2017). Penggunaan katalis diharapkan dapat mempercepat *cracking* plastik, menurunkan temperatur reaksi, produk yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik (Lopez-Uribe et al., 2012; Patni et al., 2013; Zhu et al., 2013). Pada proses *cracking*, terjadi proses pemutusan ikatan karbon. Selama proses konversi tersebut, plastik akan berubah dari fasa padat menjadi fasa cair kemudian berubah menjadi uap dan gas. Uap yang mengandung beberapa senyawa penyusun hidrokarbon seperti *benzene, toluene, dan xylene* akan terbawa oleh gas untuk diproses lebih lanjut pada kondensor atau tangki air untuk dipisahkan antara fasa cair dan gas. Gas hasil pirolisis akan dimurnikan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar yang dihasilkan. Gas ini diharapkan dapat dimanfaatkan dan diaplikasikan sebagai bahan bakar gas. Penelitian ini secara umum bertujuan menunjang program pemerintah tentang strategi penanganan pencemaran lingkungan dan penyediaan energi baru.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan adalah limbah plastik *polyethylene (PE)*, katalis bekas atau *Residue Catalytic Cracking (RCC)*, karbon aktif, silika gel, batu kerikil, pasir, akuades, dan CaO. Sedangkan peralatan-peralatan yang digunakan meliputi alat pencacah plastik, reaktor pirolisis kapasitas 5 kg dilengkapi kondensor atau tangki air (Ermawati et al., 2016 dan Naimah, et al. 2016), *Gas Chromatography (GC)* dengan *Flame Ionization Detector (FID)* dan *Thermal Conductivity Detector (TCD)* merk Shimadzu, tabung gas, *plastic bag* 500 L, *plastic bag*

sampler 3 L, *glass sampler*, kolom purifikasi, genset gas merk Highlander CS-2000 L, seperangkat alat penabungan gas hasil rekayasa Fakultas Peternakan dan Pertanian UNDIP Semarang yang terdiri dari pompa vakum dan kompresor, kompor gas merk Rinai.

Metode

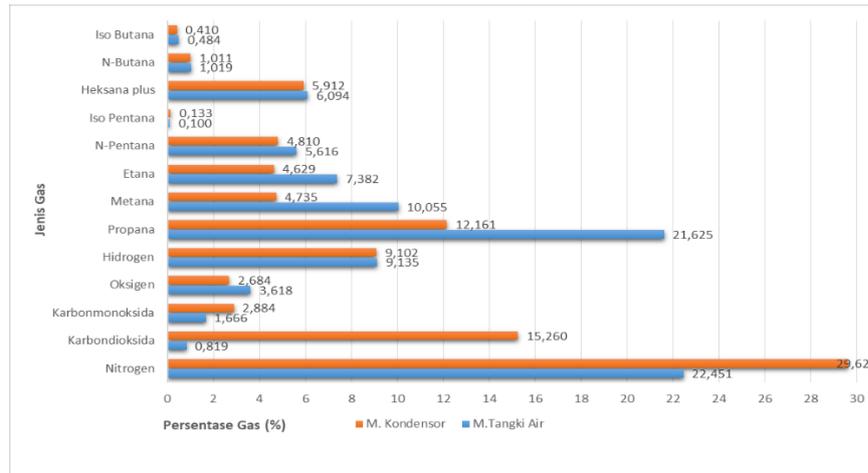
Metode penelitian yang digunakan yaitu pirolisis menggunakan metode kondensasi dan metode tangki air dengan katalis RCC 10%. Bahan baku yang digunakan adalah limbah plastik PE yang dicacah dengan ukuran 2 cm sampai 5 cm sebelum dimasukkan ke dalam reaktor. Plastik dan katalis dimasukkan ke reaktor yang dilengkapi pemanas dengan suhu 350°C sampai 450°C. Hasil proses pirolisis berupa fasa cair ditampung dalam tangki produk pada metode kondensator sedangkan pada metode tangki air, fasa cair akan terpisah dengan air. Fasa cair hasil pirolisis di atas permukaan air. Fasa gas akan ditampung dalam penampung gas berbentuk *plastic bag* 500 L. Analisa karakteristik gas menggunakan GC dengan detektor FID dan TCD. Gas ini kemudian dipurifikasi untuk menghilangkan gas pengotor dilakukan dengan dua metode yaitu purifikasi dengan larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ serta purifikasi dengan kolom purifikasi yang terdiri dari batu kerikil, pasir, silika gel serta karbon aktif. Gas hasil purifikasi selanjutnya dilakukan penabungan ke dalam tabung gas sehingga lebih mudah dipindahkan dan diaplikasikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komponen senyawa gas yang dihasilkan

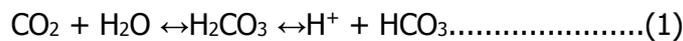
Pada proses pirolisis, limbah plastik akan diubah menjadi fasa cair, fasa gas dan residu berupa padatan. Semakin tinggi suhu proses maka akan semakin banyak memproduksi gas karena suhu tinggi akan memicu reaksi perengkahan kedua yang akan mengkonversi komponen berat ke gas (Kiran, et.al., 2000). Proses perengkahan thermal poliolefin pada suhu 400° - 500°C akan menghasilkan gas dengan nilai kalor yang tinggi, *hydrocarbon oil*, dan *wax* (Jung, et.al., 2010). Penelitian ini menggunakan suhu 350°C sampai 450°C karena menggunakan katalis untuk membantu proses perengkahan plastik. Produk pirolisis limbah plastik jenis *Polyethylene* (PE) menurut Gao (2010) terdiri dari 18,3% gas yang tidak dapat dikondensasi, produk cair 81,7%, dan kurang dari 1% karbon murni. Fasa cair hasil pirolisis plastik dapat diproses lebih lanjut menjadi solven dan solar (Naimah, Aviandharie, dan Aidha, 2016). Pada penelitian ini, dari empat kg limbah plastik yang dipirolisis akan menghasilkan 500 L gas yang tidak terkondensasi dalam waktu sekitar 3,5 jam.

Fasa gas proses pirolisis plastik berupa gas H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 dan nC_4H_{10} , C_5H_{12} (Adrados et al., 2012; Kuncser et al., 2010). Gas-gas tersebut berpotensi menjadi bahan bakar karena mengandung gas yang umumnya dipakai sebagai bahan bakar seperti gas metana, propana, etana, dan butana namun masih ada gas pengotor seperti CO dan CO_2 yang dapat mengganggu proses pembakaran. Untuk mengetahui karakteristik gas pada penelitian ini maka dilakukan analisa gas hasil pirolisis. Hasil analisa gas dari kedua metode pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan gambar 1, gas (C_1 - C_4) yang terbentuk pada metode tangki air mulai dari yang tertinggi adalah propana (C_3) 21,63%, metana (C_1) 10,06%, etana (C_2) 7,38%, dan C_4 (butana) 1,50% sedangkan pada metode kondensator berturut-turut adalah propana (C_3) 12,16%, metana (C_1) 4,74%, etana (C_2) 4,63%, dan C_4 (butana) 1,42%. Penelitian lain terkait pirolisis pernah dilakukan oleh Ratnasari et al. (2017) menggunakan bahan baku *high density polyethylene* (HDPE) dengan katalis MCM-41 dan ZSM-5 menghasilkan gas yaitu C_3 , C_2 , C_4 , dan C_1 .



Gambar 1. Perbandingan kualitas gas pirolisis dengan metode kondensor dan tangki air

Hasil pirolisis limbah plastik menggunakan metode tangki air menghasilkan gas (C₁-C₄) lebih tinggi daripada metode kondensor. Hal ini disebabkan karena pada metode tangki air, gas pengotor seperti CO₂ langsung larut dalam air sehingga gas yang keluar lebih bersih jika dibandingkan dengan proses tanpa air. CO₂ akan menurunkan nilai kalor gas. Absorpsi gas ini merupakan proses kontak antara fasa gas dan cairan yang berdampak pada penghilangan salah satu komponen gas dengan cara melarutkannya menggunakan air. Proses difusi gas ke dalam cairan sangat mempengaruhi kesuksesan berkurangnya kadar CO₂ dalam gas seperti proses absorpsi gas CO₂ menggunakan pelarut air, CO₂ akan bereaksi dengan air melalui persamaan sebagai berikut (Kartohardjono et al., 2007):



Reaksi CO₂ dengan air tersebut merupakan reaksi kesetimbangan, di mana konstanta kesetimbangannya sangat kecil sehingga pembentukan H⁺ dan HCO₃⁻ juga sangat kecil. Oleh karena itu, proses absorpsi CO₂ dengan air bukan absorpsi kimia melainkan absorpsi fisika (Kartohardjono et al., 2007).

Nilai kalor

Nilai kalor merupakan ukuran panas atau energi yang dihasilkan dan diukur sebagai nilai kalor kotor/*Gross Heating Value (GHV)* atau nilai kalor netto/*Net Heating Value (NHV)*. Perbedaannya ditentukan oleh panas laten kondensasi dari uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran. GHV mengasumsikan seluruh uap air yang dihasilkan selama proses pembakaran sepenuhnya terembunkan atau terkondensasikan. Sedangkan NHV mengasumsikan air yang keluar dengan produk pengembunan tidak seluruhnya terembunkan. Bahan bakar harus dibandingkan berdasarkan NHV (Rojey et al., 1997).

Pemanfaatan gas sebagai bahan bakar dapat diketahui dengan menganalisa nilai kalornya. Menurut Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012), nilai kalor gas alam yang sudah diolah adalah 924 BTU/ft³ sampai 1027 BTU/ft³. Nilai kalor ini akan dijadikan pembandingan gas hasil pirolisis karena mempunyai sifat dan karakteristik yang mendekati. Semakin tinggi nilai kalor maka mutu gas akan semakin bagus. Dari hasil analisa, gas pada metode tangki air memiliki nilai kalor (NHV) 1548,42 BTU/ft³ sedangkan pada metode kondensor, nilai kalornya (NHV) lebih rendah yaitu 1111,99 BTU/ft³. Gas pipa memiliki komposisi nilai kalor 950 BTU/ft³ sampai 1250 BTU/ft³. Apabila dibandingkan dengan gas alam yang sudah diolah sertagas pipa, gas hasil

proses pirolisis memiliki kandungan nilai kalor yang lebih tinggi dan dalam prosesnya tidak menghasilkan gas H_2S yang dapat menyebabkan korosi sehingga akan lebih baik dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Uji nyala gas pirolisis dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Uji nyala gas hasil pirolisis

Purifikasi gas CO_2

Gas CO_2 merupakan gas yang tidak diinginkan dalam bahan bakar. Emisi gas CO_2 dapat menyebabkan perubahan iklim. Bahan bakar gas dengan kadar CO_2 tinggi tidak ekonomis karena akan mengurangi nilai energi dan nilai kalor (Songolzadeh et al., 2014). Untuk mengurangi kadar CO_2 dalam gas dapat dilakukan dengan beberapa teknologi antara lain metode absorpsi atau penyerapan (Khan et al., 2017). Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang banyak digunakan karena memiliki rongga karbon yang tahan terhadap suhu tinggi dan tetap stabil pada berbagai bahan kimia serta memiliki kemampuan penyerapan yang baik (Huang et al., 2015).

Gas hasil pirolisis sebelum disimpan dalam tabung harus dipurifikasi karena masih mengandung pengotor CO_2 yang tinggi terutama pada proses tanpa melalui tangki air yaitu CO_2 sebesar 15,26%. Purifikasi awal gas hasil pirolisis dengan menggunakan larutan $Ca(OH)_2$ (Sutanto et al., 2019) menghasilkan nyala api yang masih berwarna merah seperti pada gambar 3. Purifikasi berikutnya menggunakan kolom purifikasi yang terdiri dari kombinasi batu kerikil, pasir, silika gel serta karbon aktif kemudian dihubungkan pada kompor gas. Hasilnya nyala api menjadi lebih baik yaitu nyala api berwarna biru dapat dilihat pada gambar 4. Berdasarkan nyala api yang dihasilkan dapat dikatakan bahwa purifikasi menggunakan kolom purifikasi lebih efektif dari pada hanya menggunakan larutan $Ca(OH)_2$.

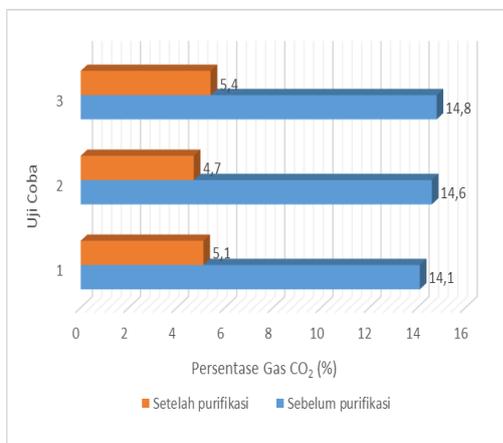
Penurunan kadar pengotor pada gas setelah proses purifikasi dapat dilihat pada Gambar 5a dan 5b. Berdasarkan Gambar 5a, kadar penurunan gas CO_2 hasil pirolisis setelah melewati larutan $Ca(OH)_2$ uji coba 1 sebesar 63,8%, uji coba 2 sebesar 67,81%, dan uji coba 3 sebesar 63,51% sehingga rata-rata penurunan 65,05% sedangkan pada Gambar 5b didapatkan penurunan kadar CO_2 sebagai salah satu pengotor dalam gas pada uji coba 1 sebesar 99,87%, uji coba 2 sebesar 99,69%, dan uji coba 3 sebesar 99,90% sehingga rata-rata penurunannya sebesar 99,82%. Hal tersebut berarti bahwa proses purifikasi terbaik yaitu dengan menggunakan kolom purifikasi.



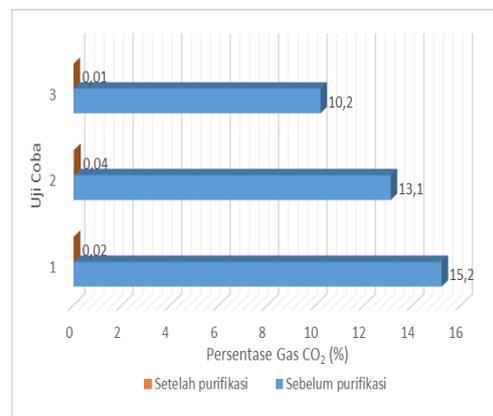
Gambar 3. Nyala api setelah purifikasi menggunakan larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Gambar 4. Nyala api setelah purifikasi menggunakan kolom purifikasi



Gambar 5a. Kadar penurunan gas CO_2 hasilpirolisis setelah melewati larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Gambar 5b. Kadar penurunan gas CO_2 hasil pirolisis setelah melewati kolom purifikasi

Aplikasi

Aplikasi gas sebagai sumber energi telah dilakukan di banyak tempat (Basnet dan Zhong, 2020). Gas dapat digunakan sebagai sumber energi pembangkit gas untuk menghidupi listrik industri dan perumahan (Bailera et al., 2017) serta kendaraan bermotor (Nallamothe et al.,2013).

Gas hasil pirolisis yang sudah dipurifikasi dengan kolom purifikasi di uji coba untuk diaplikasikan sebagai bahan bakar kompor gas (Gambar 4). Uji coba dilakukan selama 1 jam tanpa menunggu gas habis. Sebelum dimanfaatkan, gas tersebut ditampung ke dalam plastik penampung gas dengan kapasitas 500 L kemudian dialirkan ke alat penabungan. Pemilihan tabung sebagai pengemas untuk mempermudah proses penyimpanan dan aplikasinya menjadi bahan bakar. Tabung yang digunakan dalam penelitian ini adalah tabung Freon bekas yang selama ini tidak dimanfaatkan.

Pada proses penabungan, gas dari *plastic bag* dipindahkan ke perangkat mesin penabungan menggunakan pompa vakum lalu dikompresi secara kontinyu pada suhu sekitar -20°C . Mesin kompresi dilengkapi *nozzle* untuk mengisi gas yang telah dimurnikan ke dalam tabung (Khan et al., 2017). Setelah gas ditabungkan kemudian dilakukan uji nyala seperti pada Gambar 6.

Gas hasil pirolisis selain diujicoba untuk bahan bakar kompor gas juga di uji coba untuk bahan bakar *burner* dalam proses pirolisis agar dapat menghemat energi listrik. *Start up* proses pirolisis menggunakan energi listrik hingga 350°C selanjutnya digunakan gas hasil pirolisis (Gambar 7). Penggunaan *burner* untuk menstabilkan suhu proses dan menghemat energi.

Gas hasil pirolisis yang telah ditabungkan juga di uji coba pada mesin genset gas dan hasilnya ternyata dapat menyalakan lampu dengan daya 25 Watt selama 1 jam tanpa menunggu gas habis (Gambar 8).



Gambar 6. Uji nyala setelah penabungan gas hasil pirolisis limbah plastik



Gambar 7. Uji coba gas hasil samping pirolisis pada *burner* alat pirolisis



Gambar 8. Uji coba gas hasil samping pirolisis pada genset

KESIMPULAN

Metode tangki air lebih optimal dalam mengolah gas hasil proses pirolisis plastik menjadi bahan bakar dibandingkan metode kondensor karena kualitas gas yang dihasilkan lebih baik. Gas tersebut memiliki kandungan nilai kalor lebih tinggi dibanding gas alam yang sudah diolah serta gas pipa. Gas ini bahkan tidak mengandung gas H_2S yang dapat menyebabkan korosi. Gas hasil pirolisis yang didapat pada metode kondensor masih banyak mengandung gas pengotor CO_2 perlu dipurifikasi terlebih dulu. Purifikasi gas menggunakan kolom purifikasi menghasilkan kualitas gas lebih baik dibandingkan dengan menggunakan larutan $Ca(OH)_2$. Gas hasil proses pirolisis telah di uji coba dan terbukti dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor, *burner* pada proses pirolisis serta sebagai bahan bakar mesin genset yang mampu menyalakan lampu 25 Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrados, A., I. de Marco, B. M. Caballero, A. López, M. F. Laresgoiti, dan A. Torres. 2012. Pyrolysis of Plastic Packaging Waste: A Comparison of Plastic Residuals From Material Recovery Facilities With Simulated Plastic Waste. *Waste Management* 32 (5): 826–32. doi:10.1016/j.wasman.2011.06.016.
- Almeida, D. dan M. D. F. Marques. 2016. Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste. *Polímeros* 26 (1). ABPol: 44–51. doi:10.1590/0104-1428.2100.
- Basnet, A. dan J. Zhong. 2020. Integrating Gas Energy Storage System in a Peer to Peer Community Energy Market for Enhanced Operation. *Electrical Power and Energy System* 118. Artikel 105789: 1-11.
- Bailera, M., P. Lisbona, L. M. Romeo, dan S. Espatolero. 2017. Power to Gas Project Review: Lab, Pilot and Demo Plants for Storing Renewable Energy and CO_2 . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69: 292-312.
- Ermawati, R., B. N. Jati, I. Rumondang, E. Oktarina, dan S. Naimah. 2016. Pengaruh Residue Catalytic Cracking (RCC) dan Zeolit terhadap Kualitas Crude Oil Hasil Pirolisis Limbah Plastik Polietilena. *Jurnal Kimia dan Kemasan* 38 (1): 47-54. doi:10.24817/jkk.v38i1.1978.
- Gao, F. 2010. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. A Thesis Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Geyer, R., J. R. Jambeck, dan K. L. Law. 2017. PLASTICS. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances* 3(7) : 1-5. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- Huang, P. H., H. H. Cheng, dan S. H. Lin. 2015. Research Article: Adsorption of Carbon Dioxide onto Activated Carbon Prepared from Coconut Shells. *Journal Of Chemistry* 2015. Artikel 106590:1-10.

- Jung,S.H., M.H.Cho, B.S.Kang, dan J.S.Kim. 2010. Pyrolysis of Fraction of Waste Polypropylene and Polyethylene for the Recovery of BTX Aromatics Using a Fluidized Bed Reactor. *Fuel Processing Technology* 91(3): 277-84.
- Kartohardjono,S., Anggara, Subihi, dan Yuliusman. 2007. Absorpsi CO₂ dari Campurannya dengan CH₄ atau N₂ melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Pelarut Air. *Makara, Teknologi* 11 (2): 97–102.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia No.12 Tahun 2012 tentang Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi.
- Khan,I.U.,M.H.D.Othman, H.Hashim, T.Matsuura, A.F.Ismail, M.R.D.Arzhandi, dan I.W.Azelee. 2017. Biogas as a Renewable Energy Fuel-A Review Of Biogas Upgrading, Utilisation and Storage.*Energy Conversion and Management* 150: 227-294.
- Kiran,N., E.Ekinci, dan C.E.Snape. 2000. Recycling of Plastic Waste with Pyrolysis. *Resour.Conserv.Recycl.*29(4):273-83.
- Kuncser,R., M.Paraschiv, M.Tazerout, dan J.Bellettre. 2010. Liquid Fuel Recovery Through Pyrolysis of Polyethylene Waste.*Environmental Engineering and Management Journal*9 (10): 1371–74.
- Lopez-Urionabarrenechea, A., I.De Marco, B.M.Caballero, M.F.Laresgoiti, dan A.Adrados. 2012. Catalytic Stepwise Pyrolysis Of Packaging Plastic Waste.*Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96 (Juli): 54–62. doi:10.1016/j.jaap.2012.03.004.
- Naimah,S., dan N.N.Aidha. 2017. Karakteristik Gas Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik Polietilena (PE) dengan Menggunakan Katalis Residue Catalytic Cracking (RCC).*Jurnal Kimia dan Kemasan* 39 (1): 31–38.
- Naimah,S., S.A.Aviandharie, dan N.N.Aidha. 2016. Karakteristik Pelarut dan Solar Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik.*Jurnal Kimia dan Kemasan* 38 (2): 109–14.
- Nallamothe,R.B., A.Teferra, B.V.A.Rao. 2013. Biogas Purification,Compression and Bottling. *Global Journal Of Engineering, Design and Technology* 2 (6):34-38.
- Patni,N., P.Shah, S.Agarwal, dan P.Singhal. 2013. Review Article: Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels.*ISRN Renewable Energy* 2013: 1–7.
- Purwaningrum,P. 2016. Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik Di Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan* 8 (2): 141-47.
- Ratnasari, D.K., M.A.Nahil, dan P.T.Williams. 2017. Catalytic Pyrolysis Of Waste Plastics Using Staged Catalysis for Production of Gasoline Range Hydrocarbon Oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 124: 631-37.
- Rojey,A, C.Jaffret, S.Cornot-Gandolphe, B.Purand, S.Ullian, dan M.Valais. 1997. *Natural Gas: Production Processing Transport*. Diedit oleh R.N. Maddox. Technip. Paris: Institut Francais Du Petrole Publications.
- Sharuddin,S.D.A., F.Abnisa, W.M.A.W.Daud, dan M.K.Aroua. 2016. A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes.*Energy Conversion and Management* 115 (Mei). Pergamon: 308–26. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.037.
- Songolzadeh,M., M.Soleimani, M.T.Ravanchi, dan R.Songolzadeh. 2014. Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *The Scientific World Journal*2014. Artikel 828131: 1-34.
- Sutanto,R., A.Mulyanto, M.Wirawan, I.B.Alit, dan N.Nurchayati. 2019. Adsorpsi Gas Karbon Dioksida dalam Biogas dengan Menggunakan Endapan Batu Kapur. *Dinamika Teknik Mesin* 9 (2):133-39.
- Zhu,X., S.Jiang, C.Li, X.Chen, dan C.Yang. 2013. Residue Catalytic Cracking Process for Maximum Ethylene and Propylene Production.*Industrial & Engineering Chemistry Research* 52 (40): 14366–75. doi:10.1021/ie401784q.