

Prototipe Penerapan Teknologi Tepat Guna Pengolahan Limbah Plastik Berbasis Sistem Pirolisis

Masitah Yusniar¹, Meidy Kaseside², Samsul Bahri Loklomin³, Trifena Punana Lesnussa⁴, Yunius M Samalukang⁵, Mario Nikolaus Dalengkade⁶

Keywords :

Plastik;
Wari Ino;
Pirolisis;
Teknologi.

Correspondensi Author

⁶Matematika, Universitas Halmahera
Jl. Wari Raya, Tobelo, Halmahera
Utara, Indonesia
Email: mariodalengkade@gmail.com

History Article

Received: 19-10-2020
Reviewed: 27-11-2020
Revised: 06-12-2020
Accepted: 22-12-2020
Published: 25-12-2020

Abstrak. Kegiatan Pengabdian Kepada Masyarakat memfokuskan pada pemecahan masalah limbah plastik. Adapun metode dalam kegiatan ini yakni sosialisasi dampak limbah plastik bagi kesehatan manusia dan lingkungan, serta pengaplikasian teknologi tepat guna dalam pengolahan limbah plastik. Hasil kegiatan sosialisasi memperlihatkan perubahan pengetahuan partisipan mengenai dampak limbah plastik bagi manusia dan lingkungan, serta partisipan berkomitmen dalam pengurangan pemakaian plastik. Sedangkan uji coba prototipe pengolah limbah plastik menggunakan sistem pirolisis berhasil mengubah limbah plastik jenis HDPE (High Density Polyethylene) menjadi BBM (Bahan Bakar Minyak). Walaupun uji coba prototipe berhasil mengubah limbah plastik menjadi energi baru. Tapi prototipe masih memiliki kekurangan berupa keluarnya gas dari wadah penampung terakhir, sehingga kedepannya diperlukan suatu pengembangan yang lebih efisien

Abstrac. Community Service Activities focus on solving the problem of plastic waste. The methods in this activity are the socialization of the impact of plastic waste on human health and the environment, as well as the application of appropriate technology in processing plastic waste. The results of the outreach activity showed changes in participants' knowledge about the impact of plastic waste on humans and the environment, and participants were committed to reducing plastic use. Meanwhile, the prototype trial of plastic waste processing using a pyrolysis system has succeeded in converting HDPE (High Density Polyethylene) plastic waste into BBM (Oil Fuel). Even though the prototype trial succeeded in converting plastic waste into new energy. But the prototype still has lack in the form of gas discharge from the last container, so that in the future a more efficient development is needed.

PENDAHULUAN

Pelaksanaan kegiatan Pengabdian Kepada Masyarakat di Desa Wari Ino sebagai mitra Program Studi Matematika Fakultas Ilmu Alam dan Teknologi Rekayasa Universitas Halmahera dilakukan dengan mematuhi protokol kesehatan. Era sekarang ini plastik selalu berdampingan dengan manusia. Dibuktikan dengan produksinya sejak 1950 yakni 130 ton dan menjadi 322 ton tahun 2015, dimana peningkatan sebesar 4% per tahun (Plastics Europe & EPRO, 2016; Miandad dkk., 2016). Belum lagi merebaknya COVID-19 semakin meningkatkan produksi secara eksponensial, karena kebutuhan akan alat perlindungan diri maupun kemasan makanan (Vanapalli dkk., 2021). Walaupun plastik membantu manusia dari pernyataan sebelumnya. Tapi memiliki dampak negatif secara biologis. Sebagai contoh penemuan mikroplastik pada hewan laut menyebabkan rusaknya rantai makan dan akumulasi dalam jaring-jaring makanan (Duis & Coors, 2016; Roch dkk., 2020; Talley dkk., 2020). Disamping itu mempengaruhi ekosistem pantai antara lain ekosistem mangrove. Karena secara tidak langsung menghambat pertumbuhan mangrove, dan mengubah fungsi ekosistem tersebut (Dalengkade, 2019; Dalengkade, 2020a,b).

Lazimnya masyarakat mengolah limbah plastik dengan cara konvensional yakni membakar atau menimbun dalam tanah. Proses pembakaran dapat mengurangi populasi limbah plastik walaupun tidak sebanding dengan jumlah produksi sampah yang dihasilkan. Dengan mengingat kembali plastik tersusun atas etilena dan propilena yang berasal dari hidrokarbon fosil mudah terbakar (Geyer dkk., 2017). Penggunaan metode pembakaran menurut Royer dkk., (2018) zat penyusun tersebut merupakan bahan berbahaya karena dapat meningkatkan efek rumah kaca. Sama halnya dengan menimbun limbah plastik dalam tanah, yang mana proses degradasi plastik tidak akan terjadi secara hayati (Ashworth dkk., 2014). Metode yang lebih berkembang oleh Dwivedi dkk., (2019); Abnisa dkk., (2019); Yousef dkk., (2020) mengolah limbah plastik dengan menerapkan konsep termokimia mampu menghasilkan BBM. Konsep tersebut merujuk pada sistem pirolisis yakni dekomposisi kimia

menggunakan panas 350 °C hingga 900 °C (tanpa oksigen) guna merusak rantai panjang hidrokarbon dari polimer plastik menjadi rantai pendek hidrokarbon. Dan hasil pirolisisnya berupa fraksi gas yang tidak dapat dikondensasi, residu limbah plastik, dan fraksi cair berupa C₄-C₁₂ (*gasoline*), C₁₂-C₂₃ (*diesel*), C₁₀-C₁₈ (*kerosene*), C₂₃-C₄₀ (*motor oil*) (Panda dkk., 2010; Park dkk., 1999; Achilias dkk., 2007; Aguado dkk., 2007; Mastral dkk., 2007; Arabiourrutia dkk., 2012; Marcilla dkk., 2009; Lee, 2012; Chen dkk., 2014). Faktor yang berperan penting dalam proses pirolisis yakni suhu (Yoshioka dkk., 2004; Ji dkk., 2006), waktu retensi (López dkk., 2011a; Lee & Shin, 2007), bahan baku (Tröger dkk., 2013), senyawa katalis (Lerici dkk., 2015; Miskolczi dkk., 2013; Chen dkk., 2014), kadar air (Chen dkk., 2014), laju pemanasan (Sharma dkk., 2014), dan ukuran partikel (Luo dkk., 2010). López dkk., (2011b); Lee dkk., (2015) mengemukakan setiap 1 kg limbah plastik dapat diubah menjadi 78% hingga 84% dari berat tersebut menghasilkan minyak cair, dan memerlukan energi 1,047 MJ/kg. Penggunaan metode pirolisis dalam skala industri pengolah limbah plastik menjadi energi baru sangat menjanjikan, karena fraksi gas memiliki CV (*Calorific Value*) untuk kebutuhan akan energi industri itu sendiri, sehingga meningkatkan IRR (*internal rate of returns*) sebesar 30% (Al-Salem dkk., 2014; Arena dkk., 2011; Abnisa & Wan Daud, 2014). Dimana gas tersebut tersusun atas senyawa metana, hidrogen, propena, etena, dan butena (Williams & Williams, 1999). Dalam laporan Chen dkk., 2014 untuk setiap 1 kg plastik menghasilkan 13% hingga 26,9% dari berat tersebut, sedangkan López dkk., (2011a) menyatakan setiap kenaikan/perubahan panas menghasilkan presentase gas yang berbeda-beda. Disisi lain penggunaan senyawa tertentu sebagai katalis dapat meningkatkan produksi gas. Hal ini tertuang dalam kajian Miskolczi dkk., (2009) HDPE dan PP (*Polypropylene*) menggunakan ZSM-5 (*Zeolite Socony Mobile-5*) menghasilkan gas sebesar 45,9 MJ/kg dan 46,6 MJ/kg HHV (*Higher Heating Value*). Pihak lain Jung dkk., (2010) melaporkan HHV dari limbah PP dan PE (*Polyethylene*) yakni 50 MJ/kg dan 42 MJ/kg. Untuk HHV dari limbah ban yakni 45 MJ/kg, dan komposisi 1-butena serta isoprena dapat diperoleh kembali yakni

dengan cara mengkondensasikan gas guna sebagai bahan baku pembuatan ban (Frigo dkk., 2014). Selain itu pemisahan propena dan etena dipergunakan sebagai bahan baku poliolefin (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Pada dua uraian sebelumnya tentang hasil pirolisis yakni BBM dan gas mempertegas tentang pemanfaatan limbah plastik menjadi energi baru, begitu pula dengan residunya. Dalam 1 kg limbah plastik residu yang dihasilkan yakni 1 g hingga 1,3 g (López dkk., 2009). Total residu limbah HDPE berupa karbon (46,03%), senyawa yang mudah menguap (51,40%), kadar air (2,41%), sedikit abu, dan HVV ialah 23,04 MJ/kg (Syamsiro dkk., 2014). Merujuk pada Heras dkk., 2014 residu plastik dapat difungsikan sebagai penyerap logam berat yang terdapat dalam limbah air perkotaan, industri, dan gas beracun. Dari segi kesehatan manusia, lingkungan dimana pemanasan tanpa oksigen mengurangi pelepasan CO (karbon monoksida), dan CO₂ (karbon dioksida), serta tidak membentuknya senyawa dioksin (Chen dkk., 2014; Stanmore, 2004; McKay, 2002; Kanniche dkk., 2010; Singh & Ruj, 2016).

Berangkat dari uraian sebelumnya, maka menimbulkan pertanyaan yakni "Apakah masyarakat di desa mitra mengetahui bahaya plastik dan cara pengolahannya?". Kegiatan pengabdian ini, memfokuskan pada dua argument tersebut. Selain itu, merupakan wujud pengaplikasian teknologi tepat guna kepada masyarakat di desa mitra walaupun bersifat prototipe.

METODE

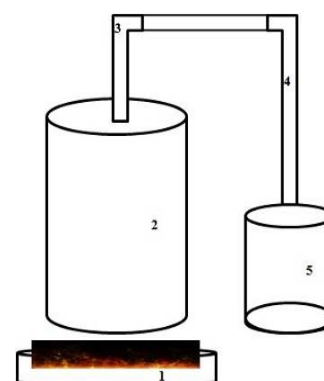
Pemecahan masalah pengolahan limbah plastik di desa mitra merupakan metode dalam kegiatan ini. Prosedur pemecahan tersebut meliputi:

1. Sosialisai masalah limbah plastik

Penjelasan mengenai bahaya limbah plastik kepada masyarakat di desa mitra.

2. Prototipe alat

Desain pengolah limbah plastik berbasis sistem pirolisis diperlihatkan ke dalam gambar 1.



Gambar 1. Desain pengolahan limbah plastik. Keterangan lainnya: 1) Tungku pembakar; 2) Wadah penampung limbah; 3) Pipa besi; 4) Selang; 5) Wadah penampung BBM.

Prosedur penggunaan alat gambar 1, yakni limbah plastik yang di rajang dimasukan ke dalam wadah penampung (2) dan diikuti dengan proses pembakaran (1). Selama proses tersebut berlangsung, limbah plastik mengalami pemecahan struktur kimia hingga menjadi gas melewati pipa (3). Selanjutnya molekul-molekul gas akan melewati selang (4) menuju wadah penampung BBM (5). Selama proses pemecahan kimia awalnya molekul berupa gas lebih dahulu keluar menuju wadah akhir, setelah 20 menit kemudian diikuti dengan BBM (Antelava dkk., 2019; Mohd. Wasif Quadri & Devendra Dohare, 2020).

3. Evaluasi Kegiatan

Guna mengetahui keberhasilan kegiatan pengabdian kepada masyarakat di desa mitra, maka evaluasi kegiatan meliputi dua aspek: 1) Pengetahuan partisipan mengenai limbah plastik; 2) Kelebihan dan kekurangan alat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bedasarkan fokus kegiatan pengabdian yang telah diuraikan dalam paragraf akhir pendahuluan, maka luaran kegiatan adalah sebagai berikut.

1. Sosialisasi limbah plastik

Pelaksanaan sosialisasi yakni di desa mitra dengan jumlah partisipan mencapai 30 orang dan tetap mengikuti protokol kesehatan antara lain menggunakan masker dan lainnya. Sosialisai limbah plastik melingkupi materi

mengenai bahaya limbah. Sebelum sosialisasi dimulai, pelaksana kegiatan memberikan beberapa pertanyaan mengenai limbah plastik gambar 2 guna mengetahui pengetahuan partisipan.

Nama Kegiatan : Pengabdian Kepada Masyarakat
Jenis Kegiatan : Sosialisasi
Lokasi : Desa Wari Ino
Waktu : Jumat, 16 Oktober 2020

Lembar Pertanyaan Sebelum Sosialisasi

No	Pertanyaan	Sanggahan Partisipan
1	Apakah partisipan mengetahui apa yang dimaksud dengan plastik?	Plastik saya kurang tahu plastik yang dimaksud itu.
2	Apakah partisipan mengetahui limbah plastik sangat berbahaya?	Ya, setuju saya sampah plastik sangat berbahaya pada lingkungan sekitar karena sampah plastik tidak bisa habis begitu saja tanpa proses pembakaran dan bila di hinggalkan pasti bentuknya akan tetap sama sampai ber-tahun-tahun pasti akan tetap begitu, kalau kita tidak memabarnya.
3	Apakah partisipan mengetahui limbah plastik setiap tahunnya meningkat?	Ya, pastinya selalu meningkat setiap tahunnya karena sekarang Praktek barangan terutama makanan dan minuman instan banyak yang menggunakan bungkus plastik maka setiap tahunnya sampah plastik terus meningkat.
4	Apakah partisipan mengetahui, bahwa pemerintah Indonesia melalui KEMENTERIAN LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN DIREKTORAT JENDRAL PENGOLAHAN SAMPAH, LIMBAH DAN BAHAN BERACUN BERBAHAYA telah mengeluarkan surat edaran Nomor : SE.6/PSLB.3/PS/PLB.0/5/2016 tentang PENGURANGAN SAMPAH PLASTIK MELALUI PENERAPAN KANTONG BELANJA PLASTIK SEKALI PAKAI TIDAK GRATIS.	Saya belum mengetahuinya.
5	Apakah partisipan mengetahui cara mengolah limbah plastik?	Saya belum mengetahuinya.

Gambar 2. Pengetahuan Partisipan Sebelum Sosialisasi.

Melihat rekaman pada gambar 2 secara jelas merepresentasikan pengetahuan partisipan mengenai plastik. Dimana partisipan belum mampu mendeskripsikan plastik dengan tepat atau partisipan belum memahami apa yang dimaksud dengan plastik pertanyaan nomor 1. Sama halnya dengan pertanyaan nomor 4 tentang respon pemerintah terhadap limbah plastik, dimana upaya pemerintah mengurangi populasi limbah plastik belum diketahui oleh masyarakat di desa mitra. Begitu pula nomor 5 mengenai pengolahan yang tepat. Ketiga pertanyaan tersebut mengindikasikan belum adanya edukasi atau minimnya pengetahuan partisipan mengenai plastik. Sedangkan dua

pertanyaan lainnya nomor 2 dan 3 yakni partisipan mampu menjawab secara umum, atau dapat dikatakan jawaban partisipan berdasarkan pengamatan. Lazimnya pengetahuan akan limbah plastik di desa mitra dapat dikatakan masih kurang, maka diperlukan edukasi secara simultan guna memupuk kesadaran masyarakat di desa mitra mengenai bahaya limbah plastik.

Nama Kegiatan : Pengabdian Kepada Masyarakat
Jenis Kegiatan : Sosialisasi
Lokasi : Desa Wari Ino
Waktu : Jumat, 16 Oktober 2020

Lembar Respon Partisipan

No	Pertanyaan	Sanggahan Partisipan
1	Apakah dampak limbah plastik bagi lingkungan?	terjadi peningkatan polusi udara
2	Apakah dampak limbah plastik bagi manusia?	dapat menyebabkan kanker jika dihirup oleh tubuh.
3	Apakah partisipan berkomitmen untuk mengurangi pemakaian plastik?	ya.

Gambar 3. Umpan Balik Sosialisasi.

Gambar 3 merupakan respon (umpan balik) partisipan pada bagian akhir kegiatan sosialisasi guna melihat perubahan pengetahuan partisipan dalam kegiatan yang dimaksud. Respon tersebut dapat dilihat dari pertanyaan nomor 1 dan 2 yakni partisipan mengetahui dampak limbah plastik terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Maka dapat disimpulkan terjadi perubahan pengetahuan partisipan mengenai limbah plastik. Selain itu partisipan berkomitmen mengenai pengurangan pemakaian plastik pertanyaan nomor 3.

2. Prototipe teknologi tepat guna

Prototipe teknologi tepat guna dalam kegiatan ini yakni diperlihatkan ke dalam gambar 4. Sedangkan plastik yang digunakan dalam uji coba/simulasi yakni jenis HDPE.



Gambar 4. Uji coba protipe alat pengolah limbah plastik.

Penilaian partisipan terhadap prototipe alat direkam pada catatan di bawah ini.

Nama Kegiatan : Pengabdian Kepada Masyarakat
 Jenis Kegiatan : Teknologi Tepat Guna
 Lokasi : Desa Wari Ino
 Waktu : Jumat, 16 Oktober 2020

Lembar Prototipe Teknologi Tepat Guna

No	Pertanyaan	Sanggahan Partisipan
1	Bagaimana menurut partisipan mengenai prototipe alat pengolah limbah plastik?	Alatnya masih sangat sederhana tapi sudah cukup bagus utk mengolah limbah plastik
2	Apakah prototipe alat pengolah limbah plastik berhasil menghasilkan minyak?	Iya, Berhasil
3	Apakah prototipe alat sudah mencerminkan teknologi tepat guna dengan memperhatikan keselamatan baik lingkungan dan manusia?	Belum.
4	Apakah prototipe alat pengolah limbah plastik memiliki kekurangan?	Iya

Gambar 5. Lembar Penilaian Partisipan.

Berdasarkan catatan gambar 5, menurut partisipan prototipe alat sangat sederhana dan tetap mampu mengolah limbah plastik menjadi BBM pertanyaan nomor 1 dan 2. Tapi penilaian lain oleh partisipan pada nomor 3 dan 4 yakni prototipe tersebut memiliki kekurangan dimana salah satunya yakni tidak memperhatikan keselamatan manusia dan lingkungan.

3. Analisis Kegiatan

Mangacu dari uraian point 1, 2 dalam hasil dan pembahasan, maka fokus pertanyaan pada pendahuluan telah tercapai. Khusus untuk prototipe pengolah limbah plastik memiliki beberapa kekurangan, seperti keluarnya gas dari wadah penampung akhir, dan menyisakan banyaknya residu (material plastik) dalam wadah penampung. Menurut Mohd. Wasif Quadri & Devendra Dohare, (2020), residu tersebut karena pembakaran tidak mencapai suhu 500 °C. Walaupun terdapat kekurangan pada prototipe tersebut, tapi tetap menghasilkan luaran BBM gambar 6.



Gambar 6. Luarannya pengolahan limbah plastik.

Hasil pengolahan limbah plastik HDPE menggunakan sistem pirolisis gambar 6 sejalan dengan penelitian terdahulu menghasilkan BBM (Nogueira da Silva dkk., 2019). Menggunakan sistem yang sama pada suhu maksimum 500 °C hingga 600 °C untuk jenis plastik PP, PE, dan PET (*Polyethylene Terephthalate*) mampu menghasilkan BBM (Mohd. Wasif Quadri & Devendra Dohare, 2020; Bungay, 2017). Berdasarkan uji coba alat dalam kegiatan PKM dan dukungan kajian terdahulu, maka sistem pirolisis merupakan solusi untuk pengolahan limbah plastik.

SIMPULAN DAN SARAN

Beranjak dari hasil Pengabdian Kepada Masyarakat, yakni sosialisasi masalah limbah plastik mampu mengubah pengetahuan masyarakat di Desa mitra akan bahaya limbah plastik bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu keberhasilan sosialisasi ditunjang dengan komitmen masyarakat desa mitra dalam pengurangan pemakaian plastik. Sedangkan

prototipe pengolah limbah plastik masih memerlukan pengembangan terutama untuk masalah gas yang tidak tertampung pada wadah penampung akhir. Meskipun demikian, uji coba prototipe tetap berhasil mengolah jenis limbah plastik HDPE menjadi BBM menggunakan sistem pirolisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., Sharuddin, S. D. A., bin Zani, M. F., Daud, W. M. A. W., & Mahlia, T. M. I. (2019). The yield prediction of synthetic fuel production from pyrolysis of plasticwaste by Levenberg-Marquardt approach in feedforward neural networks model. *Polymers*, *11*(11).
- Abnisa, F., & Wan Daud, W. M. A. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, *87*, 71–85.
- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, *149*(3), 536–542.
- Aguado, J., Serrano, D. P., Miguel, G. S., Escola, J. M., & Rodríguez, J. M. (2007). Catalytic activity of zeolitic and mesostructured catalysts in the cracking of pure and waste polyolefins. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *78*(1), 153–161.
- Al-Salem, S. M., Papageorgiou, L. G., & Lettieri, P. (2014). Techno-economic assessment of thermo-chemical treatment (TCT) units in the Greater London area. *Chemical Engineering Journal*, *248*, 253–263.
- Antelava, A., Damilos, S., Hafeez, S., Manos, G., Al-Salem, S. M., Sharma, B. K., Kohli, K., et al. (2019). Plastic Solid Waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and Sustainable Management. *Environmental Management*, *64*(2),
- (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, *115*, 308–326.
- Arabiourrutia, M., Elordi, G., Lopez, G., Borsella, E., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *94*, 230–237.
- Arena, U., Di Gregorio, F., Amorese, C., & Mastellone, M. L. (2011). A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic wastes. *Waste Management*, *31*(7), 1494–1504.
- Ashworth, D. C., Elliott, P., & Toledano, M. B. (2014). Waste incineration and adverse birth and neonatal outcomes: A systematic review. *Environment International*, *69*, 120–132.
- Bungay, V. C. (2017). Kinetic study on the pyrolysis and gasification of plastic waste. *Chemical Engineering Transactions*, *56*, 193–198.
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, *34*(12), 2466–2486.
- Dalengkade, M. N. (2019). Pemodelan reaksi suhu udara terhadap penyinaran cahaya matahari dalam hutan bakau. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, *13*(2), 061–068.
- Dalengkade, M. N. (2020a). Profil 24 jam kuat penerangan, suhu udara, kelembaban udara di luar dan di dalam hutan mangrove. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, *14*(1), 047058.
- Dalengkade, M. N. (2020b). Fluktuasi temporal kelembaban udara di dalam dan luar ekosistem mangrove. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, *14*(2), 159–166.
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, *28*(1), 1–

- 25.
- Dwivedi, P., Mishra, P. K., Mondal, M. K., & Srivastava, N. (2019). Non-biodegradable polymeric waste pyrolysis for energy recovery. *Heliyon*, 5(8), e02198.
- Frigo, S., Seggiani, M., Puccini, M., & Vitolo, S. (2014). Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *Fuel*, 116, 399–408.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 25–29.
- Heras, F., Jimenez-Cordero, D., Gilarranz, M. A., Alonso-Morales, N., & Rodriguez, J. J. (2014). Activation of waste tire char by cyclic liquid-phase oxidation. *Fuel Processing Technology*, 127, 157–162.
- Ji, L., Hervier, A., & Sablier, M. (2006). Study on the pyrolysis of polyethylene in the presence of iron and copper chlorides. *Chemosphere*, 65(7), 1120–1130.
- Jung, S. H., Cho, M. H., Kang, B. S., & Kim, J. S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 277–284.
- Kanniche, M., Gros-Bonnivard, R., Jaud, P., Valle-Marcos, J., Amann, J. M., & Bouallou, C. (2010). Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture. *Applied Thermal Engineering*, 30(1), 53–62.
- Lee, K. H. (2012). Effects of the types of zeolites on catalytic upgrading of pyrolysis wax oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 209–214.
- Lee, K. H., & Shin, D. H. (2007). Characteristics of liquid product from the pyrolysis of waste plastic mixture at low and high temperatures: Influence of lapse time of reaction. *Waste Management*, 27(2), 168–176.
- Lee, S., Yoshida, K., & Yoshikawa, K. (2015). Application of Waste Plastic Pyrolysis Oil in a Direct Injection Diesel Engine: For a Small Scale Non-Grid Electrification. *Energy and Environment Research*, 5(1), 18–32.
- Lerici, L. C., Renzini, M. S., & Pierella, L. B. (2015). Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y. *Procedia Materials Science*, 8, 297–303.
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., & Adrados, A. (2011a). Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *Chemical Engineering Journal*, 173(1), 62–71.
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A., & Torres, A. (2011b). Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions. *Waste Management*, 31(9–10), 1973–1983.
- López, G., Olazar, M., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G., & Bilbao, J. (2009). Steam activation of pyrolytic tyre char at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1–2), 539–543.
- Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., & Liu, S. (2010). Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 93–97.
- Marcilla, A., Beltrán, M. I., & Navarro, R. (2009). Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 86(1–2), 78–86.
- Mastral, J. F., Berrueco, C., & Ceamanos, J. (2007). Theoretical prediction of product distribution of the pyrolysis of high density polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(2), 427–438.
- McKay, G. (2002). Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: Review. *Chemical Engineering Journal*, 86(3), 343–368.

- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838.
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 1032–1040.
- Miskolczi, Norbert, Ateş, F., & Borsodi, N. (2013). Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char and pyrolysis oil properties. *Bioresource Technology*, 144, 370–379.
- Mohd. Wasif Quadri, & Devendra Dohare. (2020). A Study to Optimise Plastic to Fuel Technology-A Review. *International Journal of Engineering Research and*, V9(04).
- Nogueira da Silva, N., Rocha Pinto, F., Barbosa de Alencar, D., & Silva Parente, R. (2019). Transformation of Plastic Waste into Fuel by Pyrolysis. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7(11), 628–636.
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233–248.
- Park, D. W., Hwang, E. Y., Kim, J. R., Choi, J. K., Kim, Y. A., & Woo, H. C. (1999). Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 65(2), 193–198.
- Plastics Europe, & EPRO. (2016). Plastics – the Facts 2016. *Plastics – the Facts 2016*, 37. www.plasticseurope.de/informations.
- Roch, S., Friedrich, C., & Brinker, A. (2020). Uptake routes of microplastics in fishes: practical and theoretical approaches to test existing theories. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12.
- Royer, S.-J., Ferrón, S., Wilson, S. T., & Karl, D. M. (2018). Production of methane and ethylene from plastic in the environment. (P. Pardha-Saradhi, Ed.) *PLoS ONE*, 13(8), e0200574.
- Sharma, B. K., Moser, B. R., Vermillion, K. E., Doll, K. M., & Rajagopalan, N. (2014). Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags. *Fuel Processing Technology*, 122, 79–90.
- Singh, R. K., & Ruj, B. (2016). Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste. *Fuel*, 174, 164–171.
- Stanmore, B. R. (2004). The formation of dioxins in combustion systems. *Combustion and Flame*, 136(3), 398–427.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia*, 47, 180–188.
- Talley, T. S., Venuti, N., & Whelan, R. (2020). Natural history matters: Plastics in estuarine fish and sediments at the mouth of an urban watershed. *PLoS ONE*, 15(3), 1–19.
- Tröger, N., Richter, D., & Stahl, R. (2013). Effect of feedstock composition on product yields and energy recovery rates of fast pyrolysis products from different straw types. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 158–165.
- Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Ranjan, V. P., Samal, B., Bhattacharya, J., Dubey, B. K., & Goel, S. (2021). Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 750, 141514.
- Williams, P. T., & Williams, E. A. (1999). Interaction of plastics in mixed-plastics pyrolysis. *Energy and Fuels*, 13(1), 188–196.

- Yoshioka, T., Grause, G., Eger, C., Kaminsky, W., & Okuwaki, A. (2004). Pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 499–504.
- Yousef, S., Eimontas, J., Striugas, N., & Abdelnaby, M. A. (2020). Modeling of metalized food packaging plastics pyrolysis kinetics using an independent parallel reactions kinetic model. *Polymers*, 12(8), 1–14.