

Review: Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik dan Biomassa melalui Proses Pirolisis sebagai Solusi Energi Alternatif dan Pengelolaan Sampah

Lutfi Firmansyah^{1,2}, Zahrul Mufrodi¹, dan Maryudi¹

¹ Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

² Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

lutfi.firmansyah04@gmail.com, zahrul.mufrodi@gmail.com, maryudi@cbe.uad.ac.id

Abstrak

Ketergantungan terhadap penggunaan bahan bakar fosil memberikan dampak permasalahan diberbagai aspek seperti peningkatan emisi gas rumah kaca dan berkurangnya sumber energi tak terbarukan. Disisi lain isu timbulnya limbah/sampah khususnya limbah plastik dan biomassa menjadi tantangan global. Artikel ini membahas potensi konversi campuran limbah plastik dan biomassa menjadi bahan bakar alternatif menggunakan proses pirolisis. Proses pirolisis menjadi solusi ganda yaitu mengurangi akumulasi produksi limbah sekaligus menghasilkan energi alternatif yang bernilai ekonomis yakni *bio-oil*, *bio-char* dan *syngas*. Dalam implementasi proses pirolisis terdapat beberapa faktor seperti suhu operasi, jenis katalis, teknologi reaktor memiliki pengaruh terhadap hasil pirolisis. Diharapkan dengan pemahaman mendalam terhadap parameter dapat memberikan khasanah pengetahuan dan pengembangan proses pirolisis. Sehingga dengan pemilihan teknologi yang tepat, pirolisis dapat menjadi solusi dalam mengatasi krisis energi dan isu lingkungan global.

Kata Kunci : Pirolisis, Sampah, Biomassa, Plastik

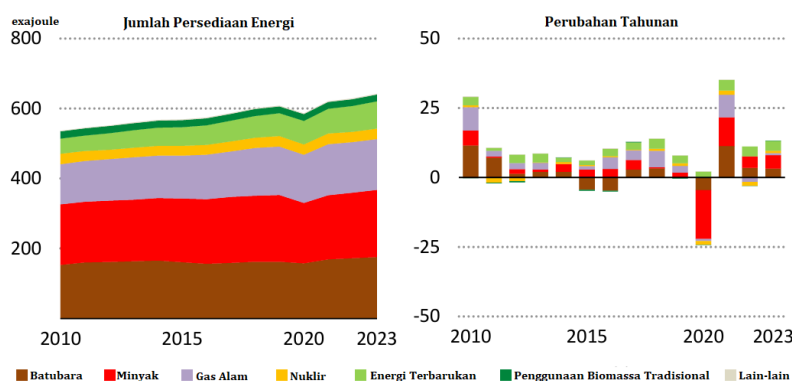
Abstract

Dependence on the use of fossil fuels has caused problems in various aspects, such as increasing greenhouse gas emissions and the depletion of non-renewable energy sources. On the other hand, the issue of waste, particularly plastic and biomass waste, has become a global challenge. This article discusses the potential of converting mixed plastic and biomass waste into alternative fuel through the pyrolysis process. Pyrolysis provides a dual solution: reducing waste accumulation while simultaneously producing economically valuable alternative energy such as bio-oil, biochar, and syngas. In implementing the pyrolysis process, several factors, such as operating temperature, type of catalyst, and reactor technology, significantly influence the pyrolysis outcomes. It is expected that a deep understanding of the parameters will enrich knowledge and support the development of the pyrolysis process. By selecting the appropriate technology, pyrolysis can be a viable solution to address the energy crisis and global environmental issues.

Keywords: Pyrolysis, Waste, Biomass, Plastic

1. Pendahuluan

Ketergantungan energi fosil masih menjadi permasalahan dalam kehidupan. Ketergantungan pada bahan bakar fosil masih sangat dirasakan baik di Negara maju maupun berkembang (Institute for Essential Service Reform, 2023). Peningkatan konsumsi energi berbahan bakar fosil di Dunia meningkat baik dari jenis Batubara, Minyak Bumi, Gas alam, digambarkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Grafik Peningkatan Konsumsi Energi (Wright, 2024)

Dengan meningkatnya penggunaan bahan bakar fosil maka akan mengakibatkan pengurangan sumber energi fosil (energi tidak terbarukan). Selain berkurangnya sumber energi fosil (energi tidak terbarukan), dampak

Info Makalah:

Dikirim : 02-01-25;

Revisi 1 : 10-16-25;

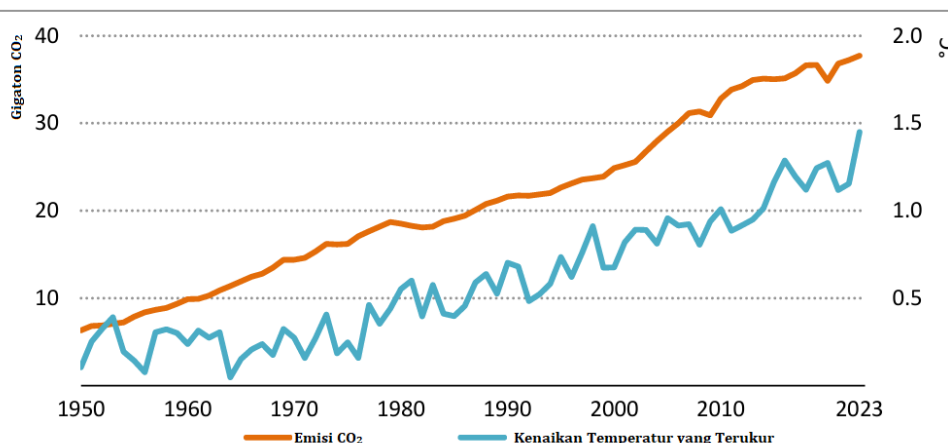
Diterima : 10-16-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-822-1828-8095

e-mail : lutfi.firmansyah04@gmail.com

lain dari peningkatan penggunaan energi fosil adalah efek rumah kaca. Hal ini dikarenakan produksi gas karbondioksida (CO₂) dari bahan bakar fosil mengalami peningkatan yang ditampilkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Kenaikan Emisi Karbondioksida dan Kenaikan Temperatur Lingkungan (Wright, 2024)

Selain permasalahan energi, salah satu permasalahan yang dihadapi dan menyangkut isu lingkungan adalah mengenai sampah. Pengelolaan sampah salah satu masalah global yang menjadikan permasalahan masyarakat di seluruh dunia karena keterbatasan teknologi yang berkembang relatif lambat. Hal ini dikarenakan pengolahan sampah tidak berkelanjutan dan mahal dalam hal biaya lingkungan dengan dampak bau serta produk samping yang berbahaya bagi lingkungan dan berdampak pada kesehatan manusia (King, 2015). Peningkatan penggunaan sampah padat atau organik dapat memberikan sumber daya yang berharga yang berasal dari barang tidak berharga. Dimana keberadaannya yang kurang dimanfaatkan namun dapat diubah menjadi energi alternatif untuk membantu mengatasi masalah kebutuhan energi. Sehingga menjadi solusi dalam siklus pembuangan dan pengelolaan limbah (Burra et al, 2018a).

Salah satu jenis sampah yang menjadi permasalahan adalah sampah plastik. Sampah plastik merupakan salah satu produk berbahan baku minyak bumi dan diolah di industri yang sudah tidak dipergunakan kembali. Pembuangan sampah plastik ke lingkungan menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Saat ini, produk plastik merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari masyarakat dan digunakan dalam berbagai industri, seperti konstruksi, perawatan kesehatan, komponen elektronik, pertanian, otomotif, dan pengemasan (Zhang et al., 2021). Karena itu, untuk menanggulangi permasalahan kebutuhan energi dan sampah plastik yaitu dengan memanfaatkan sampah plastik menjadi energi. Beberapa metode konversi dapat dilakukan baik secara mekanik (*pellet* atau briket) maupun secara termal (pembakaran langsung, gasifikasi, pirolisis). Teknik pirolisis sering digunakan lebih dari 50 tahun dan memberikan hasil berkualitas tinggi dengan harga produksi lebih rendah dibandingkan dengan teknik lain (Yang et al., 2016).

Selain pemanfaatan sampah plastik, limbah biomassa juga berpotensi digunakan sebagai sumber biofuel. Energi terbarukan dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, pengembangan teknologi untuk memproduksi energi terbarukan perlu terus didorong di seluruh dunia. Namun tantangan dari energi terbarukan tidak cukup untuk memenuhi permintaan di masa mendatang dalam menggantikan bahan bakar fosil. (Moriarty et al, 2012).

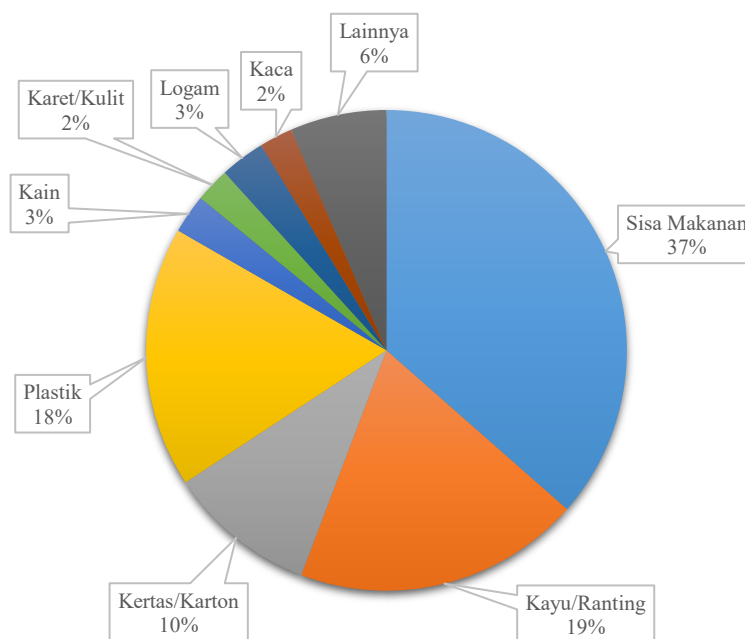
Terdapat potensi keuntungan dalam proses pirolisis campuran antara sampah biomassa dan sampah plastik, di mana proses ini terbukti lebih efektif dibandingkan dengan pirolisis biomassa tunggal. Selain itu, dibandingkan dengan metode konversi termal lainnya seperti pembakaran (*combustion*), gasifikasi, torrefaksi, dan karbonisasi, pirolisis memiliki keunggulan utama, yaitu mampu menghasilkan produk bernilai tinggi seperti bio-oil, gas sintesis, dan biochar secara bersamaan dengan efisiensi energi yang lebih tinggi serta emisi polutan yang lebih rendah. Hal ini menjadikan pirolisis sebagai metode konversi termal yang lebih unggul untuk pengolahan campuran limbah biomassa dan plastik. (Uzoejinwa et al., 2018). Sehingga dengan banyaknya referensi yang diperoleh, pembahasan tentang tantangan dan peluang dari pirolisis campuran plastik dan biomassa dirangkum dalam kesimpulan. Hasilnya mengungkapkan pentingnya penelitian *Co-pyrolysis* dan menyediakan jalur untuk penelitian serta mendukung pengolahan sampah yang berkelanjutan dan sinergis

2. Sampah

Pengelolaan sampah pada saat ini menjadi kebutuhan dasar manusia, hingga dianggap sebagai “hak asasi manusia”. Hal tersebut dikarenakan apabila pengelolaan sampah tidak memadai maka akan mengancam kesehatan bagi manusia. Untuk menjamin kualitas dari kesehatan manusia, sanitasi yang baik dan pengelolaan sampah padat harus sejalan dengan penyediaan air minum, tempat tinggal, makanan, energi, transportasi, dan komunikasi. Meskipun

demikian, pandangan masyarakat terhadap pengelolaan sampah seringkali lebih rendah dibandingkan layanan utilitas lainnya. Untuk mengatasi tentang ketertiban pengolahan sampah maka perlu adanya peraturan tentang sampah dan penerapan serta penegakannya yang ketat (Wilson et al., 2022).

Potensi sampah menjadi bahan baku energi alternatif sangatlah besar. Hal ini dapat menanggulangi permasalahan sampah yang menjadi isu lingkungan. Berdasarkan produksi sampah, klasifikasi jenis sampah yang terbesar adalah sampah organik sebagai peringkat pertama kemudian sampah plastik sebagai peringkat kedua. Persentase jenis sampah di Indonesia berdasarkan data yang dipublikasi oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan berupa komposisi dan jenisnya ditampilkan pada grafik yang ditampilkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Persentase Jenis Sampah di Indonesia pada Tahun 2023
(Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2023)

Dengan gabungan persentase antara sampah organik (kayu, kertas) dan plastik mencapai 51,03% maka berpotensi sebagai bahan baku untuk pembuatan *bio fuel* menggunakan proses pirolisis yang akan menghasilkan *syngas*, *bio char* dan *bio oil*.

3. Karakteristik Bahan Baku

3.1. Sampah Plastik

Terdapat beberapa jenis plastik pada jenis sampah. Tergantung dari kegunaan dan karakteristik jenis plastik yang digunakan. Sebagai contoh jenis plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) digunakan sebagai kemasan makanan dikarenakan memiliki karakteristik seperti tidak beracun, tahan terhadap suhu ekstrem, dan ringan. Selain itu titik leleh HDPE berada pada suhu 120°C – 130°C, dimana pada suhu tersebut plastik HDPE berubah menjadi *volatile* dan menjadi *biofuel* berupa *bio oli* dan *syngas*. Sementara sisa plastik yang tidak tergedradasi saat proses pirolisis akan mencari *bio char*. Komposisi *syngas* dan *bio oil* yang terbentuk tergantung dari rantai panjang/rumus molekul yang dimiliki oleh jenis plastik. Untuk jenis-jenis plastik yang umumnya ditemukan ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Jenis dan Sifat Plastik

Jenis Plastik	Rumus Molekul	Sifat	Titik Leleh	Contoh Aplikasi	Referensi
<i>Polyethylene terephthalate</i> (PET)	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	Tahan benturan, transparan, ringan, tahan terhadap kelembaban.	220-230°C	Industri kemasan, Botol minuman, wadah makanan, serat poliester untuk pakaian, komponen listrik	(Nisticò, 2020)
<i>High-density polyethylene</i> (HDPE)	(C ₂ H ₄) _n	Kuat, fleksibel, tahan terhadap bahan kimia, tidak mudah pecah.	120-130°C	Botol bersifat keras, pipa, mainan, penutup jendela, bahan dekorasi.	(Salakhov et al., 2021)
<i>Polyvinyl chloride</i> (PVC)	(C ₂ H ₃ Cl) _n	Bersifat termoplastik, kaku (bisa dibuat fleksibel dengan penambahan plastisizer), tahan terhadap bahan kimia	255-260°C	Pipa air, isolator kabel listrik, rangka jendela, Eksterior Bangunan	(Mnyango & Hlangothi, 2024)
<i>Low-density polyethylene</i> (LDPE)	(C ₂ H ₄) _n	Lembut, fleksibel, transparan, tahan terhadap kelembaban.	100-115°C	Wadah makanan, Botol minum bersifat lunak, peralatan laboratorium.	(Salakhov et al., 2021)
<i>Polypropylene</i> (PP)	(C ₃ H ₆) _n	Bersifat termoplastik, Kuat, ringan, tahan terhadap panas, tahan terhadap bahan kimia.	160-166°C	Komponen kendaraan, bahan dasar <i>furniture</i> , Botol minum, tutup kemasan botol, sedotan, wadah makanan.	(Hisham A. Maddah, 2016)
<i>Polystyrene</i> (PS)	(C ₈ H ₈) _n	Kaku (bisa dibuat berbusa), transparan, ringan	>270°C	Komponen kendaraan (<i>head rest, sun visor</i>), bungkus makanan, kemasan, barang medis (<i>medical cups</i>)	(Lynwood, 2019)
<i>Polycarbonate</i> (PC)	[(CH ₃) ₂ C(C ₆ H ₄ OH) ₂] _n	Transparan, tahan benturan, keras, tahan terhadap panas	250-300°C	Komponen elektronik; bahan konstruksi seperti jendela dan lampu lalu lintas; penyimpanan data seperti cakram padat, DVD.	(Kausar, 2018)
<i>Polyurethanes</i> (PU)	(C ₁₇ H ₁₆ N ₂ O ₄) _n	Tersedia dalam berbagai bentuk, termasuk fleksibel, kaku, dan berbusa, tahan terhadap aus, abrasi, dan bahan kimia, Bersifat termoset	200-250°C	Berbagai busa, dinding/lembaran plastik pada sebagian besar lemari es dan <i>freezer</i> , sepatu, panel bangunan, dll.	(Engels et al., 2013)
<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (ABS)	(C ₈ H ₈) _x •(C ₄ H ₆) _y •(C ₃ H ₃ N) _z	Kuat, ringan, tahan terhadap benturan.	200-250°C	Suku cadang otomotif, peralatan elektronik, peralatan rumah tangga, bahan bangunan, perpipaan, dll.	(Olivera et al., 2016)

Nilai karbon dan hidrogen dari komposisi plastik menjadi faktor dalam nilai *heating value* yang dihasilkan dari bahan bakar. Selain itu nilai karbon dan hidrogen juga dapat memperkirakan hasil keseluruhan *olefin* dan *aromatic*, hasil *bio-char* dan laju penonaktifan katalis (Zhang et al., 2011). Untuk mencari perbandingan komposisi hidrogen dalam suatu bahan baku dapat dicari menggunakan rasio (H/C)_{eff} (Chen et al., 1988) dengan asumsi seluruh komponen bereaksi menjadi H₂O, NH₃, dan H₂S (Zhang et al., 2015). Rasio (H/C)_{eff} pada bahan bakar merupakan parameter termokimia yang digunakan untuk menilai kualitas energi dan karakteristik pembakaran. Nilai (H/C)_{eff} yang tinggi menunjukkan proporsi hidrogen yang lebih besar terhadap karbon, yang berimplikasi pada peningkatan nilai kalor, efisiensi konversi energi, serta reduksi pembentukan jelaga dan emisi karbon dioksida. Dengan demikian, peningkatan rasio (H/C)_{eff} mencerminkan potensi bahan bakar yang lebih bersih dan berkualitas tinggi dalam proses konversi termal. Persamaan rasio (H/C)_{eff} ditampilkan pada persamaan 1 berikut ini.

$$\left(\frac{H}{C}\right)_{eff} = \frac{H - 2O - 3N - 2S}{C} \quad (1)$$

Dimana nilai H, O, N, S dan C pada persamaan 1 di atas adalah persentase mol dalam suatu komponen. Hasil analisa *proximate*, *ultimate*, serta rasio (H/C)_{eff} ditampilkan pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil Analisa *Proximate* dan *Ultimate* dari Berbagai Jenis Plastik

Jenis Plastik	<i>Proximate Analysis</i> (%berat)					<i>Ultimate Analysis</i> (%berat)					(H/C) _{eff}	Referensi
	V	FC	A	M	C	H	N	O	S	Cl		
PET	62	13,11	0	0,06	62	4	34	0	0	0	-0,048	(Olam & Karaca, 2022)
HDPE	16,64	72,10	11,16	0,2	67,57	4,13	0,51	0,79	1,07	0	0,694	(Kasar & Ahmaruzzaman, 2021)
PVC	75,56	0	24,30	0,11	38,69	4,70	0,03	32,11	0	0	0,211	(Othman et al., 2008)
LDPE	95,59	2,82	0,83	0,76	85,86	14,20	0,05	0,02	0	0,05	1,983	(Adoga et al., 2022)
PP	94,73	1,93	3,34	0	84,32	14,19	0,67	0,15	0,06	0,61	2,008	(Adoga et al., 2022)
PS	100	0	0	0	85,41	13,63	0	0	0,319	0	1,912	(Selvaganapathy et al., 2019)
PC	79,73	20,10	0,17	0,67	69,56	5,33	0,08	24,86	0	0	0,819	(Othman et al., 2008)
PU	82,01	9,51	5,78	2,71	63,90	6,45	6,74	16,96	0	0	0,678	(Stančin et al., 2021)
ABS	97,88	1,12	1,01	0,89	76,82	7,45	6,13	34,23	0	0	0,392	(Othman et al., 2008)

Keterangan:

Proximate Analysis : V = Volatile ; FC = Fix Carbon ; A = Ash ; M = Moisture

Ultimate Analysis : C = Carbon ; H = Hydrogen ; N = Nitrogen ; O = Oxygen ; S = Sulfur ; Cl = Chlor

3.2. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, dan limbah hutan. Selain digunakan untuk tujuan primer serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan, dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) (Williams et al., 2012). Umum yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya. Rangkuman hasil analisa komposisi *Proximate*, *Ultimate* dari beberapa jenis contoh biomassa dijelaskan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Contoh Hasil Analisa dari Beberapa Biomassa

Biomassa	<i>Proximate Analysis</i> (%berat)					<i>Ultimate Analysis</i> (%berat)					H/C _{eff}	Referensi
	V	FC	A	M	C	H	N	O	S			
Janggel Jagung	69,58	15,40	2,58	12,44	47,5	6,1	0,8	45,6	-	0,28		(Muneeer et al., 2019)
Serbuk Kayu	80,87	12,68	3,38	3,07	46,09	7,02	0,50	46,39	-	0,51		(Varma et al., 2019)
Sekam Padi	63,94	15,66	20,40	7,53	35,52	5,10	0,35	38,61	0,02	0,08		(Nayak & Datta, 2022)
Jerami	66,2	8,2	15,1	10,5	52,3	7,3	1,3	38,5	0,1	0,51		(Pinto et al., 2016)
Cangkang Kernel	71,15	18,76	4,75	5,34	48,35	6,50	1,25	34,15	0,08	0,52		(Kaniapan et al., 2021)
Tempurung Kelapa	71,1	17,6	0,8	10,5	48,6	5,97	0,62	43,8	1,09	0,89		(Hazman et al., 2024)
Bambu	72,34	1,31	18,35	8	45,47	6,63	-	47,44	0,46	0,18		(Pattanayak et al., 2020)
Kertas	72,8	9,5	11,2	6,5	39,78	5,50	0,10	54,62	-	-0,41		(Chen et al., 2016)
Ampas Tebu	71,79	11,13	5,97	10,91	42,07	5,60	0,26	52,01	0,06	-0,27		(Hassan et al., 2019)

Keterangan:

Proximate Analysis : V = Volatile ; FC = Fix Carbon ; A = Ash ; M = Moisture

Ultimate Analysis : C = Carbon ; H = Hydrogen ; N = Nitrogen ; O = Oxygen ; S = Sulfur

4. Pirolisis

Pirolisis adalah salah satu metode konversi bahan organik ataupun plastik menjadi *biofuel* secara termokimia dengan kondisi tanpa kehadiran oksigen. Terdapat beberapa jenis pirolisis yang berdasarkan temperatur kondisi operasi dan waktu tinggal umpan yang diberikan. Ringkasan dari jenis-jenis pirolisis ditampilkan pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Jenis-Jenis Pirolisis (Adams et al., 2017)

Jenis Pirolisis	Kondisi Operasi		
	Tekanan	Temperatur	Waktu Tinggal
<i>Slow Pyrolysis</i>	1 atm	350-750°C	< 10 detik
<i>Intermediate Pyrolysis</i>	1 atm	< 500°C	4-10 detik
<i>Fast Pyrolysis</i>	1 atm	400-550°C	0,5-4 detik
<i>Flash Pyrolysis</i>	1 atm	400-1000°C	<0,5 detik
<i>Vacuum Pyrolysis</i>	<50 kPa (dibawah atmosfer)	300-500°C	-

Selain jenis-jenis pirolisis, jenis teknologi operasi harus menjadi pertimbangan dalam merancang sebuah proses pirolisis. Ringkasan jenis teknologi pirolisis ditampilkan pada Tabel 5. Dikarenakan pemilihan jenis teknologi pirolisis menentukan biaya operasi, kesulitan dan kemudahan dalam pengoperasian, biaya modal, kapasitas serta faktor lainnya yang menjadi keuntungan maupun tantangan.

Tabel 5. Jenis Jenis Reaktor Pirolisis

Jenis reaktor	Mekanisme	Keuntungan	Tantangan	Sumber
Reaktor <i>Batch</i>	Proses berlangsung secara siklus <i>Batch</i> . Sehingga umpan dimasukkan, diproses dan menghasilkan produk dalam satu siklus.	Desain reaktor sederhana Cocok untuk produksi skala kecil	Proses memerlukan waktu untuk memanaskan ulang saat awal masuk umpan. Tidak efisien untuk produksi besar	(Berrueco et al., 2005)
Reaktor Kontinyu	Umpan dapat dimasukkan secara terus menerus dan menghasilkan produk secara kontinyu	Memasukkan umpan tidak perlu menghentikan proses pirolisis Efisiensi untuk produksi skala besar	Desain lebih rumit dibandingkan reaktor <i>batch</i> . Pengoperasian lebih kompleks untuk menjaga kondisi operasi agar tunak	(Qureshi et al., 2018)
Reaktor <i>Fix Bed</i>	Umpan di dalam reaktor dengan ditumpuk, kemudian panas di hantarkan ke tumpukkan umpan.	Desain sederhana	Pemanasan tidak merata Potensi bahan yang tidak terpirolisis sangat besar (terutama di bagian yang jauh dari sumber panas)	(Quan et al., 2016)
Reaktor <i>Fluidized Bed</i>	Umpan dicampur/dihembuskan menggunakan gas <i>inert</i> /uap panas sehingga menghasilkan peristiwa fluidisasi	Pemanasan merata Efisiensi tinggi	Memerlukan pengendalian gas yang kompleks dalam pengaturannya	(Prabhakara et al., 2021)
Reaktor <i>Moving Bed</i>	Umpan bergerak perlahan melalui area pemanasan secara perlahan	Panas yang diterima umpan menjadi merata	Tidak cocok untuk bahan yang bersifat lengket	(Aylón et al., 2008)
Reaktor <i>Microwave</i>	Pemanasan dilakukan menggunakan gelombang mikro yang dipancarkan langsung ke umpan	Pemanasan berlangsung cepat Efisiensi energi tinggi	Memerlukan tempat yang luas Biaya investasi sangat tinggi. Pengontrolan panas yang diberikan lebih sulit dibanding pemanasan secara konvensional	(Motasemi & Afzal, 2013)
Reaktor <i>Thermal Solar</i>	Panas menggunakan energi matahari untuk memanaskan umpan	Ramah Lingkungan Tidak menimbulkan emisi dalam proses produksi	Bergantung dengan keberadaan sinar matahari Proses <i>start up</i> membutuhkan waktu yang sangat lama	(Lameh et al., 2021)
Reaktor <i>Rotary Kiln</i>	Umpan dimasukkan ke dalam reaktor berbentuk tabung dan kemudian diputar selama proses	Bahan akan teraduk sehingga meratakan panas yang diberikan ke umpan	Memerlukan energi tambahan untuk memutar reaktor	(Fu et al., 2018)
Reaktor <i>Screw Rotary</i> (Auger)	Umpan dipindahkan ke dalam reaktor menggunakan <i>screw rotary</i>	Pemindahan material konsisten (kontinyu) Dapat mengontrol banyaknya umpan dengan menyesuaikan kecepatan rotasi	Dimensi bahan harus kecil dan tidak bersifat lengket untuk menghindari penyumbatan	(Mathew & Muruganandam, 2017)
Reaktor Vakum	Pengoperasian proses pirolisis dilakukan pada tekanan rendah (dibawah tekanan lingkungan)	Volatil mudah terlepas sehingga proses dapat berlangsung pada temperatur lebih rendah Bahan baku mudah terirolisis	Memerlukan sistem vakum. Kebocoran kecil dapat mengganggu hasil vakum	(Mašek et al., 2013)

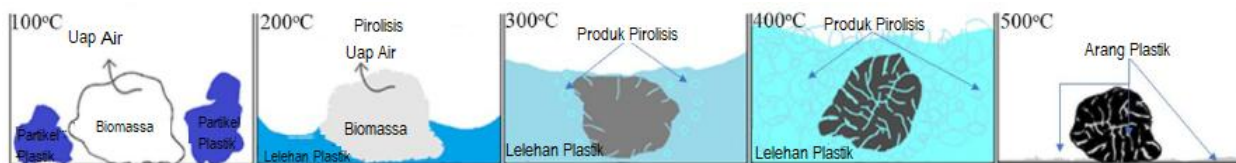
5. Pengaruh Jenis Bahan Terhadap Hasil *Biofuel*.

Untuk memberikan gambaran atas hasil pirolisis dengan perbedaan bahan diambil dari penelitian yang ditampilkan di Tabel 6 (Abadi et al., 2021). Dimana bahan baku menggunakan campuran sampah plastik dengan sampah biomassa berupa kayu Oak. Variasi dilakukan dengan membedakan bahan baku sampah plastik yang terdiri dari *polyethylene Terephthalate* (PET), *polypropylene* (PP) dan *polystyrene* (PS). Jenis reaktor yang digunakan berjenis *fix bed*, dengan katalis HZSM-5 pada kondisi operasi 450°C dibantu gas pembawa berupa Nitrogen murni dengan laju 300 ml/menit.

Tabel 6. Hasil Percobaan Pirolisis Campuran Sampah Biomassa dan Plastik (Abadi et al., 2021)

Sampel	Bio Oil (%w/w)	Syngas (%w/w)	Bio Char (%w/w)	Kandungan Air (%w/w)	Hydrocarbon (%w/w)	Oxygenated (%w/w)
Oak	25	26	30	19	14	86
PET	85	12	3	0	100	0
PP	81	17	2	0	100	0
PS	92	7	1	0	100	0
PET:Oak (1:1)	53	21	16	10	78	22
PP : Oak (1:1)	51	24	14	11	75	25
PS : Oak (1:1)	60	16	13	11	75	25

Dari tabel 6 didapatkan bahwa dengan komposisi yang sama antara sampah biomassa dengan plastik terdapat perbedaan di masing-masing variasi. Untuk melakukan pendekatan pada proses pirolisis campuran sampah biomassa dan plastik digambarkan proses tahapan pirolisis pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar Proses Tahapan Pirolisis Campuran Sampah Biomassa dengan Plastik (Abadi et al., 2021)

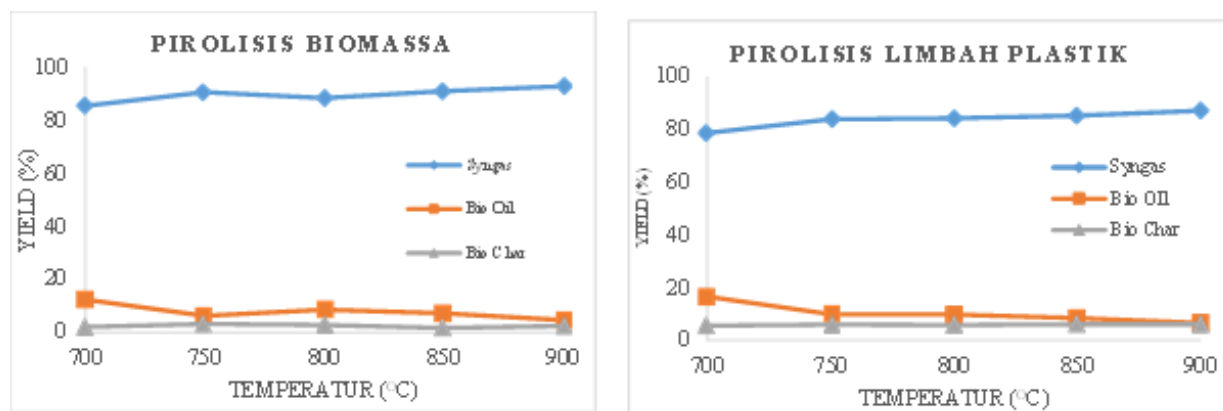
Berdasarkan gambar 4 dapat dilihat semakin meningkatnya temperatur operasi pirolisis, maka plastik akan meleleh dan menjadi volatile. *Volatile* yang terbentuk dapat menghasilkan *bio oil* maupun *syngas*. Namun dengan adanya lelehan plastik, akan mengakibatkan lelehan menempel sehingga menyelimuti partikel biomassa. Hal ini menyebabkan perubahan stabilitas termal dan laju degradasi partikel kayu.

Selain itu berdasarkan tabel 3 dimana hasil uji proximate analisis bahwa PS menghasilkan *volatile matter* lebih besar dari PP, dan PP lebih besar *volatile matter* yang dihasilkan dari PET. Sehingga hipotesa komposisi bio char yang terbentuk yang tertinggi adalah campuran OAK dengan PET. Dikarenakan PET lebih sulit untuk tergedradasi menjadi *volatile* dibandingkan PP dan PS. Sehingga sisa partikel PET yang tidak berubah menjadi *volatile* melapisi lebih banyak biomassa dan menghasilkan persentase *bio-char* lebih banyak.

6. Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Terhadap Hasil *Biofuel*

Untuk memberikan gambaran akan pengaruh temperatur dan jumlah katalis diambil data hasil percobaan yang telah dilakukan oleh (Suhaj et al., 2020). Data perubahan temperatur ditampilkan berbentuk grafik pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, semakin tinggi kenaikan suhu, perolehan komposisi *syngas* yang terbentuk cenderung semakin meningkat, baik pada umpan biomassa maupun plastik. Hal ini terlihat dari kenaikan grafik pada Gambar 5 dimana perolehan *syngas* dengan umpan biomassa pada temperatur 700 °C sebesar 85,6%w/w meningkat hingga 93%w/w pada temperatur 900°C.. Begitu pula dengan plastik, hasil *syngas* meningkat dari 78,7%w/w pada suhu 700°C menjadi 87,2%w/w pada temperatur 900°C.

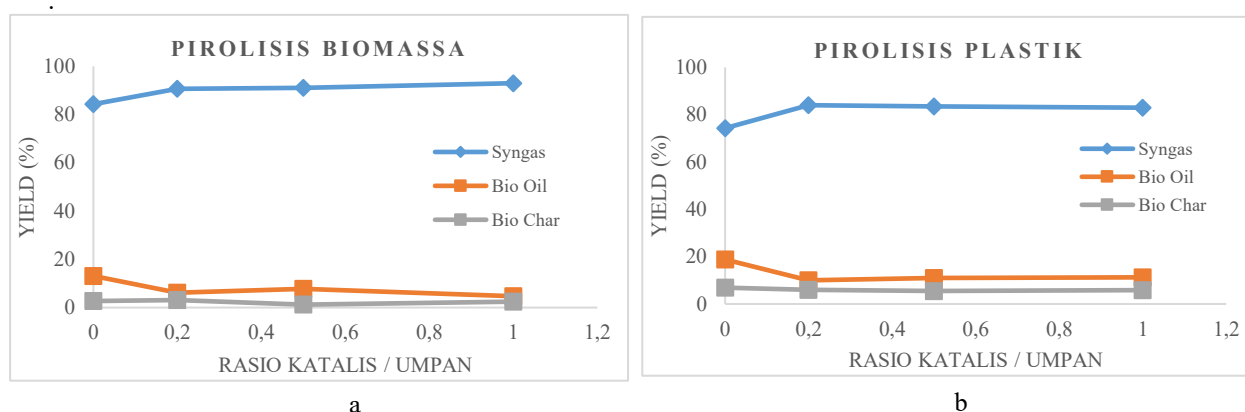
Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa peningkatan temperatur mampu mempercepat proses devolatilisasi sehingga memperbanyak pembentukan gas ringan seperti H₂, CO, dan CH₄ yang merupakan komponen utama bio-syngas (Suhartono et al., 2022). Selain itu, pada temperatur tinggi, reaksi reforming dan cracking hidrokarbon berat menjadi lebih dominan, menghasilkan efisiensi konversi yang lebih baik terhadap biofuel cair maupun gas (Suhartono et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan suhu reaksi tidak hanya berpengaruh terhadap kuantitas syngas, tetapi juga kualitas energi yang dihasilkan, menjadikannya langkah penting dalam optimasi produksi biofuel dari campuran biomassa dan plastik.



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Terhadap Hasil Pirolisis (a) Biomassa (b) Plastik

Hal tersebut berbanding terbalik dengan perolehan *bio-oil*. Dimana semakin tinggi suhu operasi maka perolehan *bio-oil* cenderung menurun. Hal ini dapat dilihat dari grafik pada Gambar 5 dimana perolehan *bio-oil* dengan umpan biomassa pada temperatur 700 °C sebesar 12,4% cenderung turun hingga pada temperatur 900°C menjadi 4,6%. Begitupun dengan umpan plastik, pada suhu 700°C hasil *bio-oil* sebesar 16,6% cenderung turun hingga pada temperatur 900°C sebesar 6,7% . Pengaruh kenaikan temperatur tidak terlalu berpengaruh terhadap perolehan *bio-char*, dimana perolehan dengan kenaikan suhu cenderung stabil perolehannya.

Untuk pengaruh penggunaan katalis yang dilakukan pada percobaan (Suhaj et al., 2020) dengan jenis katalis arang hasil pirolisis limbah ban. Dimana hasil yang didapat dengan penambahan katalis akan cenderung menghasilkan *syngas* yang lebih besar baik umpan berupa biomassa maupun plastik seperti yang ditampilkan pada Gambar 6. Hal ini berbanding terbalik dengan perolehan *bio-oil* yang cenderung menurun baik umpan berupa biomassa maupun plastik. Untuk perolehan *bio-char* tidak berpengaruh terhadap penambahan katalis dimana hasil dari percobaan perolehannya cenderung stabil



Gambar 6. Pengaruh Penambahan Katalis Terhadap Hasil Pirolisis (a) Biomassa (b) Plastik

Kesimpulan

Dengan memanfaatkan sampah menjadi bahan bakar alternatif diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan tersebut. Salah satu metode konversi yang dapat dilakukan adalah pirolisis. Namun dalam perancangan pirolisis harus dapat menentukan teknologi, kondisi operasi yang ideal. Mayoritas dari hasil pirolisis yang sering dimanfaatkan berupa *bio oil*. Untuk menentukan hasil optimum *bio-oil* yang terbentuk harus menentukan kondisi operasi dan penggunaan katalis yang ideal untuk hasil yang diinginkan.

Dikarenakan dengan komposisi campuran bahan baku sampah plastik dan biomassa yang sama, namun berbeda jenis plastik yang digunakan akan menyebabkan perbedaan hasil komposisi *bio oil* yang diperoleh. Begitu pula dengan kondisi operasi dan penggunaan katalis. Dengan merubah kondisi operasi dan rasio katalis akan mempengaruhi perolehan *bio oil*. Oleh karena itu, dengan pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh bahan baku, suhu, jenis katalis dan teknologi pirolisis yang digunakan dapat dilakukan untuk produk yang diinginkan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terlibat dalam proses penyusunan artikel ini. Secara khusus kami mengucapkan terima kasih kepada Program Magister Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri

Universitas Ahmad Dahlan dan Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani atas fasilitas, dukungan akademis serta bimbingan yang diberikan.

Daftar Pustaka

- Abadi, M. S. A., Van Geem, K. M., Fathi, M., Bazgir, H., & Ghadiri, M. (2021). The pyrolysis of oak with polyethylene, polypropylene and polystyrene using fixed bed and stirred reactors and TGA instrument. *Energy*, 232, 121085. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121085>
- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., & Watson, I. (2017). Biomass Conversion Technologies. In *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2>
- Adoga, S., Igbum, O. G., Okopi, G., Ikyenge, B. A., Ochi, O. I., & Ode, P. (2022). Catalytic pyrolysis of low density polyethylene and polypropylene wastes to fuel oils by N-clay. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 33(1), 50–55. <https://doi.org/10.2478/auoc-2022-0007>
- Aylón, E., Fernández-Colino, A., Navarro, M. V., Murillor, R., García, T., & Mastral, A. M. (2008). Waste tire pyrolysis: Comparison between fixed bed reactor and moving bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(12), 4029–4033. <https://doi.org/10.1021/ie071573o>
- Berruoco, Esperanza, E., Mastral, F. J., Ceamanos, J., & García-Bacaicoa, P. (2005). Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74(1–2), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.007>
- Burra, K. G., & Gupta, A. K. (2018). Kinetics of synergistic effects in co-pyrolysis of biomass with plastic wastes. *Applied Energy*, 220(February), 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.117>
- Chen, W., Shi, S., Zhang, J., Chen, M., & Zhou, X. (2016). Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: Synergistic effect and oil characterization. *Energy Conversion and Management*, 112, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.005>
- Chen, Walsh, D. E., & Koenig, L. R. (1988). Fluidized-bed upgrading of wood pyrolysis liquids and related compounds. *ACS Symposium Series*, 376, 277–289. <https://doi.org/10.1021/bk-1988-0376.ch024>
- Engels, H. W., Pirkel, H. G., Albers, R., Albach, R. W., Krause, J., Hoffmann, A., Casselmann, H., & Dormish, J. (2013). Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges. *Angewandte Chemie - International Edition*, 52(36), 9422–9441. <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>
- Fu, P., Bai, X., Li, Z., Yi, W., Li, Y., & Zhang, Y. (2018). Fast pyrolysis of corn stovers with ceramic ball heat carriers in a novel dual concentric rotary cylinder reactor. *Bioresource Technology*, 263(May), 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.033>
- Hassan, H., Lim, J. K., & Hameed, B. H. (2019). Catalytic co-pyrolysis of sugarcane bagasse and waste high-density polyethylene over faujasite-type zeolite. *Bioresource Technology*, 284(March), 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.137>
- Hazman, N., Mat Isa, N., Nasir, N. F., Hussein, M., & D.S., A. (2024). The Proximate and Ultimate Composition of Pulverised Coconut Shell. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(2), 270–277. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.028>
- Hisham A. Maddah. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Institute for Essential Service Reform. (2023). *No Title*. <https://iesr.or.id/agenda-iesr/peluncuran-studi-transisi-berkeadilan-di-daerah-penghasil-batu-bara-di-indonesia-studi-kasus-kab-muara-enim-dan-kab-paser/>
- Kaniapan, S., Suhaimi, H., Hamdan, Y., & Pasupuleti, J. (2021). Experiment analysis on the characteristic of empty fruit bunch, palm kernel shell, coconut shell, and rice husk for biomass boiler fuel. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(3), 8300–8309. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.3.2021.08.0652>
- Kasar, P., & Ahmaruzzaman, M. (2021). Correlative HHV prediction from proximate and ultimate analysis of char obtained from co-cracking of residual fuel oil with plastics. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(7), 1370–1380. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0790-8>
- Kausar, A. (2018). A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 34(1), 60–97. <https://doi.org/10.1177/8756087917691088>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2023). *Komposisi Sampah Nasional 2023*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- King, S. B. (2015). Lessons from China. *JACC: Cardiovascular Interventions*, 8(14), 1911–1912. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2015.09.007>
- Lameh, M., Abbas, A., Azizi, F., & Zeaiter, J. (2021). A simulation-based analysis for the performance of thermal solar energy for pyrolysis applications. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 15022–15035. <https://doi.org/10.1002/er.6781>
- Lynwood, C. (2019). Chemistry Research and Application Polystyrene: Synthetic, characteristic and Application. In C. Lynwood (Ed.), *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). Nova Science Publishers, Inc.

- http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_M_ELESTARI
- Mašek, O., Brownsort, P., Cross, A., & Sohi, S. (2013). Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel*, 103, 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.044>
- Mathew, M., & Muruganandam, L. (2017). Pyrolysis of Agricultural Biomass using an Auger Reactor: A Parametric Optimization. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(3). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2016-0133>
- Mnyango, J. I., & Hlangothi, S. P. (2024). Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 0(May), 1–59. <https://doi.org/10.1177/14777606241308652>
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.151>
- Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008>
- Muneer, B., Zeeshan, M., Qaisar, S., Razzaq, M., & Iftikhar, H. (2019). Influence of in-situ and ex-situ HZSM-5 catalyst on co-pyrolysis of corn stalk and polystyrene with a focus on liquid yield and quality. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117762>
- Nayak, P. ., & Datta, A. . (2022). *An entropy-based TOPSIS approach for selecting best suitable.pdf*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-022-02824-3>
- Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90(April). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- Olam, M., & Karaca, H. (2022). Characterization of products obtained of waste polyethylene terephthalate by pyrolysis. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 41(4). <https://doi.org/10.1002/ep.13835>
- Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K., & Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of Materials Science*, 51(8), 3657–3674. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9668-7>
- Othman, Basri, N., & Yunus, M. (2008). Determination of Physical and Chemical Characteristics of Electronic Plastic Waste (Ep-Waste) Resin Using Proximate and Ultimate Analysis Method. *Iccbt*, 16, 169–180.
- Pattanayak, S., Hauchhum, L., Loha, C., & Sailo, L. (2020). Selection criteria of appropriate bamboo based biomass for thermochemical conversion process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(2), 401–407. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00421-5>
- Pinto, F., Miranda, M., & Costa, P. (2016). Production of liquid hydrocarbons from rice crop wastes mixtures by co-pyrolysis and co-hydropyrolysis. *Fuel*, 174, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.075>
- Prabhakara, M., Bramer, E. A., & Brem, G. (2021). Role of dolomite as an in-situ CO₂ sorbent and deoxygenation catalyst in fast pyrolysis of beechwood in a bench scale fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 224(September), 107029. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107029>
- Quan, C., Gao, N., & Song, Q. (2016). Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 121, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.005>
- Qureshi, K. M., Kay Lup, A. N., Khan, S., Abnisa, F., & Wan Daud, W. M. A. (2018). A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 131, 52–75. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.010>
- Salakhov, I. I., Shaidullin, N. M., Chalykh, A. E., Matsko, M. A., Shapagin, A. V., Batyrshin, A. Z., Shandryuk, G. A., & Nifant'ev, I. E. (2021). Low-temperature mechanical properties of high-density and low-density polyethylene and their blends. *Polymers*, 13(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym13111821>
- Selvaganapathy, Muthuvelayudham, R., & Jayakumar, M. (2019). Process parameter optimization study on thermolytic polystyrene liquid fuel using response surface methodology (RSM). *Materials Today: Proceedings*, 26(xxxx), 2729–2739. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.572>
- Stančin, H., Mikulčić, H., Manić, N., Stojiljković, D., Vujanović, M., Wang, X., & Duić, N. (2021). Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis. *Energy*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121592>
- Suhaj, P., Husár, J., & Haydary, J. (2020). Gasification of RDF and its components with tire pyrolysis char as tar-cracking catalyst. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166647>
- Suhartono, Harsanti, M., Septiyanti, W., Suharto, & Achmad, F. (2022). Zeolite catalytic pyrolysis of waste tire into fuel in gasoline hydrocarbon range. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 969(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/969/1/012030>

- Suhartono, Romli, A., Prabowo, B. H., Kusumo, P., & Suharto. (2023). Converting Styrofoam Waste into Fuel Using a Sequential Pyrolysis Reactor and Natural Zeolite Catalytic Reformer. *International Journal of Technology*, 14(1), 185–194. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.4907>
- Uzoejinwa, B. B., He, X., Wang, S., El-Fatah Abomohra, A., Hu, Y., & Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management*, 163(January), 468–492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- Varma, A. K., Thakur, L. S., Shankar, R., & Mondal, P. (2019). Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management*, 89, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.016>
- Williams, A., Jones, J. M., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2012). Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 113–137. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.10.001>
- Wilson, D., Rodic, L., Modak, P., Soss, R., Rogero, A., Velis, C., Iyer, M., & Simonett, O. (2022). *Global waste management outlook*.
- Wright, V. P. (2024). World Energy Outlook. In *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- Yang, Li, R., Cui, C., Liu, S., Qiu, Q., Ding, Y., Wu, Y., & Zhang, B. (2016). Catalytic hydroprocessing of microalgae-derived biofuels: A review. *Green Chemistry*, 18(13), 3684–3699. <https://doi.org/10.1039/c6gc01239f>
- Zhang, B., Zhong, Z., Min, M., Ding, K., Xie, Q., & Ruan, R. (2015). Catalytic fast co-pyrolysis of biomass and food waste to produce aromatics: Analytical Py-GC/MS study. *Bioresource Technology*, 189, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.092>
- Zhang, Cheng, Y. T., Vispute, T. P., Xiao, R., & Huber, G. W. (2011). Catalytic conversion of biomass-derived feedstocks into olefins and aromatics with ZSM-5: The hydrogen to carbon effective ratio. *Energy and Environmental Science*, 4(6), 2297–2307. <https://doi.org/10.1039/c1ee01230d>
- Zhang, Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., Ding, T., Chen, L., & Chen, C. (2021). Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>