

Teknologi Pirolisis untuk Konversi Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak : Kajian Literatur

Bayu Megaprastio¹, Mochamad Syamsiro^{1*}, Muhammad Arief Saputro¹ dan Fadmi Rina²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Universitas Janabadra,

Jl. Tentara Rakyat Mataram 55-57 Yogyakarta 55231, Indonesia

² Program Studi Informatika, Universitas Nahdlatul Ulama (UNU) Yogyakarta

Jl. Lowanu No.47 Yogyakarta 55162, Indonesia

*E-mail: syamsiro@janabadra.ac.id

Diajukan: 17-05-2023; Diterima: 01-08-2023; Diterbitkan: 21-08-2023

Abstrak

Pada zaman ini, penggunaan bahan bakar minyak (BBM) merupakan kebutuhan energi yang tidak dapat diperbarui yang tidak sebanding dengan meningkatnya jumlah kendaraan sehingga pasokan volume BBM semakin menurun. Selain itu, masalah lingkungan berupa peningkatan jumlah sampah yang juga semakin tinggi dikarenakan proses penguraian yang memerlukan khususnya pada sampah plastik. Oleh karenanya diperlukan cara mengatasi permasalahan tersebut dengan membuat bahan bakar minyak dengan mengekstrak energi yang terdapat pada sampah menggunakan termal. Pirolisis adalah proses dekomposisi secara kimia-termal pada keadaan tanpa oksigen yang terjadi didalam reaktor. Produk utama dari teknologi ini adalah MHP (Minyak Hasil Pirolisis). Minyak inilah yang diharapkan mampu mengatasi berkurangnya bahan bakar fosil dengan dilakukan pengujian performa MHP pada mesin secara langsung. Pengujian dilakukan dengan melihat kinerja yang dihasilkan dengan melakukan variasi campuran bahan bakar. Emisi gas buang juga dilakukan guna mendapatkan data dari efek penggunaan MHP sebagai campuran BBM. Hal ini ditujukan untuk mengetahui secara keseluruhan bagaimana potensi dari MHP agar nantinya bukannya menghasilkan energi terbarukan tetapi juga ramah lingkungan sehingga menghasilkan energi yang bersih dan berkualitas.

Kata kunci: bahan bakar minyak; emisi; energi terbarukan; pirolisis; sampah plastik

Abstract

The use of non-renewable fossil-based fuel oil has increased recently as the number of vehicles has increased. On the other hand, Indonesian oil production is relatively stagnant, so the country currently become a net importer of oil. In addition, the environmental problems due to waste generation are also increasing as a result of the long decomposition process, especially inorganic waste such as plastic waste. Therefore, we need a way to overcome this problem by making fuel oil by extracting the energy contained in the waste using thermal process. Pyrolysis is a chemical-thermal decomposition process in a state without oxygen that occurs in the reactor. The main product of this technology is PPO (Plastic Pyrolytic Oil). PPO is expected to be able to overcome the reduction in fossil fuels by substituting the oil with PPO, either using one hundred percent PPO or mixing it with fossil-based oil. Therefore, testing the oil on the engine directly is needed to investigate the performance of the engine using a variety of fuel mixtures. Exhaust emissions tests are also carried out to obtain the data on the effect of using PPO as a fuel mixture. This is intended to find out as a whole what the potential of PPO is so that in the future it will not only produce renewable energy but also be environmentally friendly in order to produce clean and quality energy.

Keywords: fuel oil; emission; renewable energy; pyrolysis; plastic waste

1. Pendahuluan

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) cadangan minyak yang ada di Indonesia akan tersedia sampai dengan 9,5 tahun kedepan atau mencapai pertengahan tahun 2030. Ketersediaan ini diperkirakan dapat mencukupi sebagai cadangan tanpa adanya asumsi penemuan cadangan migas baru yaitu hanya sebesar 4,17 miliar barel dengan 2,44 miliar barel terbukti dan sisanya belum terbukti sebagai cadangan [1]. Bahan bakar minyak merupakan bahan bakar fosil yang diproduksi dalam perut bumi dengan proses pembentukan yang sangat alam sehingga termasuk dalam jenis energi non renewable dan dengan jumlah yang terbatas [2]. Penggunaan bahan bakar minyak (BBM) menjadi bahan bakar utama

untuk kendaraan bermotor. Penggunaan bahan bakar minyak (BBM) sebagai bahan bakar utama untuk kendaraan bermotor telah menjadi komoditas di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh pertumbuhan kendaraan bermotor yang sangat cepat dan belum terkendalikan.

Aktivitas manusia tidak terlepas dari kendaraan bermotor yang berfungsi sebagai alat mobilitas untuk mencapai suatu tempat tertentu dengan mudah dan cepat. Kendaraan pribadi banyak diminati dibandingkan dengan kendaraan umum karena dinilai cukup lebih mudah dijangkau dan lebih fleksibel dalam penggunaannya. Kendaraan bermotor di Yogyakarta mengalami peningkatan jumlah dari tahun ke tahun dengan total kendaraan bermotor pada tahun 2020 mencapai 1.576.155 unit [3]. Peningkatan ini berlangsung dari tahun-ke-tahun pada seluruh jenis kendaraan bermotor yang beroperasi di Daerah Istimewa Yogyakarta. Efek dari peningkatan jumlah kendaraan adalah meningkatnya konsumsi bahan bakar minyak yang digunakan sebagai sumber utama bahan bakar kendaraan bermotor.

Aktivitas manusia akan menghasilkan dampak negatif pada lingkungan yaitu peningkatan jumlah sampah. Berdasarkan Badan Pusat Statistik Indonesia [4] menunjukkan data di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Yogyakarta pada tahun 2019 total jumlah sampah yang terangkut per hari mencapai 252,95 ton. Dalam total sampah tersebut terdapat jumlah sampah dengan jenis anorganik sebesar 98,35 ton dengan presentasi 14% jenis non organik berupa sampah plastik yang terdiri bungkus makanan dan kemasan [5].

Oleh karenanya perlu diadakan suatu pemecahan masalah dengan menciptakan sebuah bahan bakar dengan menggunakan bahan baku yang belum termanfaatkan seperti sampah plastik yang mana bahan dasar dari sampah Plastik memiliki penyusun utama berupa hidrokarbon yaitu senyawa yang terbentuk dari unsur karbon (C) dan hidrogen (H) [6]. Teknologi yang diperlukan untuk menghasilkan bahan bakar dari sampah plastik. Teknologi pengolahan sampah ada 3 yaitu *mechanical recycling*, *chemical recycling* dan *energy recovery*. *Mechanical recycling* adalah proses mendaur ulang plastik dengan menggunakan metode mekanik untuk mencacah plastik yang kemudian menjadi bahan baku untuk produk yang baru dengan tidak memerlukan kualitas yang baik. *Chemical recycling* atau daur ulang kimia adalah proses mengolah sampah plastik menjadi bentuk dan sifat yang berbeda. Proses ini ditandai dengan perubahan wujud dari sampah plastik yang solid (padat) menjadi molekul gas atau cairan dengan mengubah struktur kimia dari polimer. Proses daur ulang dengan teknologi ini memiliki manfaat sebagai bahan bakar minyak. *Energy recovery* adalah proses mendapatkan kembali energi yang terdapat sampah plastik. Energi tersebut dimanfaatkan sebagai bahan bakar secara langsung yang digunakan pada pembangkit listrik [7].

Pirolisis merupakan teknologi perengkahan atau cracking berupa proses meraksikan bahan baku berupa sampah plastik dengan proses kimia menggunakan thermal sebagai energi yang diperlukan untuk perengkahan. Pemanasan dilakukan secara endotermis yang menyerap panas selama proses berlangsung sehingga bahan baku akan berdekomposisi yaitu terjadi pemutusan rantai karbon secara kimia dari polimer menjadi monomer hidrokarbon yang dapat digunakan sebagai bahan bakar [8].

Teknologi Pirolisis adalah proses reaksi kimia termal yang dilakukan pada keadaan minim atau tanpa oksigen didalam reaktor dengan instalasi saluran output dari hasil reaksi berupa gas atau uap yang nantinya dapat dilakukan proses kondensasi menjadi produk cair [9]. Dalam penerapan teknologi pirolisis tersebut diaplikasikan baik dalam skala kecil sampai pada skala besar. Teknologi pirolisis memiliki banyak variabel yang dapat digunakan sehingga menghasilkan bahan bakar yang variatif. Penggunaan input berupa variabel pada teknologi pirolisis akan menimbulkan efek yang berbeda pada proses pirolisis [10].

Table 1. Faktor Penambahan Variabel terhadap Efek yang Ditimbulkan [10]

Faktor yang memengaruhi	Efek yang ditimbulkan
Komposisi kimia dari resin	Produk utama pirolisis berhubungan langsung dengan struktur kimia dengan komposisi dari resin dan juga mekanisme dekomposisinya (murni termal atau katalistik)
Temperatur pirolisis dan tingkat pemanasan	Suhu pengoperasian yang lebih tinggi dan tingkat pemanasan yang baik akan meningkatkan proses perengkahan untuk memproduksi molekul yang lebih kecil.
Waktu Pirolisis	Waktu tinggal yang lebih lama akan meningkatkan tingkat konversi sekunder dari produk primer, menghasilkan lebih banyak kokas, tar serta produk akan lebih stabil secara termal karena efek perengkahan dari struktur polimer terjadi secara bertahap.
Tipe Reaktor	Menentukan terutama kualitas perpindahan panas, pencampuran, waktu tinggal untuk fase gas dan cair, dan saluran keluar produk.
Tekanan Operasi	Tekanan operasi yang rendah mengurangi tingkat kondensasi dari fragmen reaktif untuk pembentukan kokas.
Kehadiran Gas Reaktif seperti udara (oksigen) dan hidrogen	Kehadiran seperti itu secara internal memengaruhi panas, pencairan produk dan pengaruh pada keseimbangan, kinetika, dan mekanisme.
Penggunaan Katalis	Penggunaannya mempengaruhi kinetika dan mekanisme pada pembagian hasil produk.
Aditif yang tergabung	Aditif umumnya menguap atau ikut berdekomposisi. Beberapa dapat memengaruhi kinetik dan mekanisme.
Fase Cair atau Gas	Pyrolisis fase cair menghambat pelarian produk yang berkembang, sehingga meningkatkan interaksi.

Dari banyaknya variabel dan parameter yang dilakukan pada proses pirolisis maka dalam kajian literatur ini akan dibahas proses pirolisis yang menggunakan berbagai metode dan parameter sehingga akan menemukan metode yang tepat dan efisien dari pirolisis sampah plastik agar menghasilkan MHP dengan kualitas dan kuantitas yang baik untuk nantinya dapat dikembangkan oleh peneliti berikutnya.

2. Material dan metodologi

Pengumpulan data sekunder merupakan metodologi utama yang dilakukan penulis. Data sekunder yang digunakan adalah data kajian pustaka yang ditujukan untuk mendapatkan teori-teori yang dapat menguatkan argumen penulis. Kajian pustaka berisikan data laporan yang terdapat dalam artikel, jurnal dan buku yang kemudian dilakukan analisis data dengan metode deskriptif untuk dapat menyajikan data secara tersusun dan sistematis melalui laporan untuk dapat menyampaikan informasi secara mudah dan teoritis.

Penggunaan variabel ditujukan untuk fokus dalam memberikan pengaruh terhadap objek penelitian sehingga dapat menghasilkan suatu kesimpulan berdasarkan variabel yang digunakan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh penulis berupa teknologi pirolisis yang menggunakan katalik dan non katalik. Variabel tersebut kemudian dibandingkan terhadap performa yang didapat setelah diaplikasikan. Langkah selanjutnya adalah mencari kemungkinan prediksi hasil dari

teknologi pirolisis menggunakan metode prediksi pirolisis dengan pendekatan berupa data masukan pirolisis berdasarkan proses yang digunakan. Metode prediksi pirolisis adalah metode alternatif untuk menghasilkan data berupa kuantitas dari proses pirolisis. Metode ini menghasilkan persamaan model yang dapat disimulasikan berdasarkan fenomena dan hukum fisika yang berlangsung pada proses eksperimen.

3. Hasil dan pembahasan

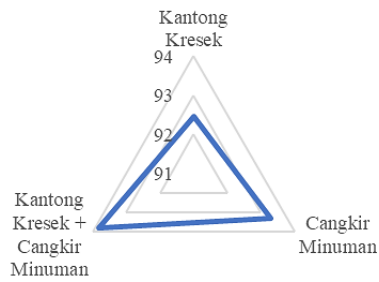
3.1. Pirolisis Raw Material dan Menggunakan Katalis

Bahan baku untuk proses pirolisis secara garis besar dapat dibedakan atas bahan alam dan juga plastik. Pirolisis dengan raw material yaitu menggunakan satu jenis bahan baku saja yaitu bahan baku utamanya yang dapat berupa plastik atau polimer. Dalam penelitian Firman, dkk [11] meneliti pirolisis menggunakan bahan baku sampah plastik jenis polipropilen yang diproses dekomposisi senyawa organik untuk menghasilkan minyak yang diharapkan mampu untuk menjadi bahan bakar. Hal ini dibuktikan pada pengujian LEMIGAS pada minyak hasil pirolisis (MHP) yang menghasilkan angka oktan mencapai 78.6 dan nilai densitasnya adalah 0.7820 g/c. Dalam penelitian tersebut dilakukan pengamatan pada pemanasan yang digunakan, semakin tinggi suhu pemanasan yang digunakan maka akan menghasilkan minyak pirolisis yang semakin banyak pula. Efek lain yang ditimbulkan pada tingginya suhu pemanasan adalah meningkatnya nilai kalot pada MHP, hal ini disebabkan berkurangnya kadar air akibat pemanasan.

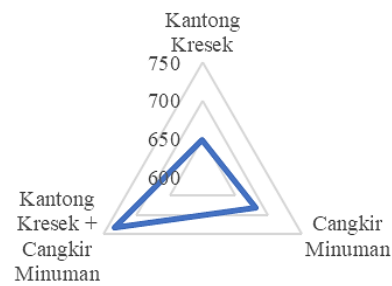
Dalam jurnal “Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer” oleh Adoe, dkk [12] dipaparkan terkait hasil penelitian berupa proses pirolisis sampah plastik PP yang diperoleh dari plastik cup bekas air mineral yang kemudian dilakukan proses pembandingan karakteristik MHP dengan bensin yang meliputi sifat fisik dan kimianya. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 250 °C dengan variasi waktu yang digunakan adalah 1 jam, 2 jam dan 3 jam. Penggunaan variasi waktu menghasilkan peningkatan MHP pada variasi waktu yang paling lama, hal ini dikarenakan penyerapan kalor oleh bahan baku lebih banyak didapatkan pada waktu proses yang lama sehingga dapat mencapai kesetimbangan termal dan plastik dapat berubah fasa menjadi gas. Pada pengujian nilai kalor, MHP memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding dengan bensin murni, nilai yang paling tinggi didapatkan pada MHP proses 3 jam yaitu 11.670 kal/gr. Untuk pengujian massa jenis MHP menempati posisi diantara bensin dan minyak tanah. Sedangkan untuk viskositas MHP yang dihasilkan mengikuti perolehan hasil produk MHP dimana nilai tertinggi viskositas didapatkan pada variasi waktu 3 jam, hal ini dikarenakan perolehan panas yang lama pada bahan baku mempengaruhi nilai viskositas HMP.

Dalam penelitian Kang dkk [13] tentang eksperimen dan teoritis pirolisis propana untuk menghasilkan gas dan jelaga. Eksperimen ditujukan untuk menghasilkan gas hasil pirolisis dan karakteristik dari jelaga yang diproduksi berdasarkan suhu dan waktu tinggal yang bervariasi. Mekanisme baru yang digunakan dalam pirolisis propana yaitu dengan meninjau jalur reaksi dan pengontrol dari laju produksi jelaga yang dihasilkan. Hasil eksperimen mendapatkan mekanisme baru yang dioptimalkan dalam memprediksi proses pirolisis propana dan produksi jelaga akurat. Propana mulai terdekomposisi pada sekitar 970 K untuk menghasilkan syngas dengan komponen utama adalah H₂, CH₄, C₂H₂, dan C₂H₄. Pembentukan jelaga meningkat etika suhu pirolisis lebih tinggi dari 1250K. Diameter jelaga juga meningkat seiring dengan kenaikan suhu, namun jumlah jelaga akan menurun ketika waktu tinggal yang digunakan semakin sedikit.

Penelitian oleh Fatimutra [14] melakukan proses pirolisis bahan plastik yang mudah ditemukan dimasyarakat yaitu kantong kresek bekas dengan cangkir minuman yang diproses tanpa menggunakan katalis dengan tujuan untuk mengetahui kinerja dari mesin pirolisis. Proses pirolisis dilakukan dengan masing-masing bahan baku yang dibandingkan dengan hasil penggabungan kedua bahan baku. Hasil menunjukkan bahwa dengan adanya proses pirolisis plastik menghasilkan pengurangan limbah yang cukup besar dengan *recovery* minyak yang cukup besar pula.



Gambar 1. Pengurangan Limbah



Gambar 2. Recovery Minyak

Dalam penelitian Sukma dkk. [15] telah dikaji tentang pirolisis bahan alam berupa kayu ketapang menjadi bio-oil dengan menggunakan katalis NiMo/NZA sebagai pereaksi selama proses konversi termal. Prosesnya yaitu dengan memasukan serbuk kayu ketapang berserta dengan katalis kedalam reaktor dengan dilakukan pada suhu 320 °C dengan mengalirkan gas nitrogen sambil diaduk dengan pengaduk listrik yang berada didalam reaktor. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan katalis menghasilkan produk yeild lebih banyak.

Salamah dan Maryudi [16] telah meneliti tentang proses pirolisis menggunakan bahan baku jenis plastik yaitu styrofoam yang dilakukan dengan menggunakan variabel komposisi katalis. Dalam proses terdapat pengambilan data tanpa dilakukan penambahan kalatis selama pirolisis, hasil minyak yang didapatkan memiliki jumlah yang paling sedikit dibanding dengan variasi komposisi penambahan katalis. Hasil minyak yang terkondensasi semakin meningkat dengan bertambahnya kadar katalis dalam proses pirolisis, namun efek yang ditimbulkan yaitu munculnya bulk akibat reaksi styrofoam dan katalis sehingga menyebabkan kinerja katalis tidak optimal dan proses perengkahan tidak efektif. Hal ini dibuktikan dengan analisis MHP (Minyak hasil pirolisis) yang terbanyak pada pirolisis styrofoam tanpa menggunakan katalis yaitu 68,47% stirena sedangkan produk MHP semakin menurun dengan pembahan katalis.

Dalam penelitian Syamsiro dkk. [17] telah dilakukan proses pirolisis dengan 2 bahan baku yang berbeda dalam sifat fisiknya (padat untuk sampah plastik dan cair untuk oli bekas, namun ada kesamaan dalam sifat kimianya yaitu terdiri dari unsur penyusun hidrokarbon. Bahan baku tersebut adalah sampah plastik polipropilen dan oli bekas yang dilakukan proses dekomposisi bersamaan didalam reaktor. Dalam penelitian ini difokuskan untuk mencari efek sinergistik yang dicapai akibat penggunaan bersama bahan baku. Proses pirolisis dilakukan dengan mengambil data terlebih dahulu masing-masing bahan baku kemudian dibandingkan dengan proses pirolisis bersama kedua bahan dengan variasi temperatur. Nilai efek sinergistik didapatkan dari produk cair yang dikalulasikan antara MHP pirolisis bersama dikurangi MHP masing-masing bahan baku. Nilai efek sinergistik yang bernilai positif menunjukkan tingkat interaksi bahan baku yang dilakukan.

Proses kombinasi bahan baku pirolisis menggunakan kedua bahan yang berbeda sifatnya yaitu limbah kayu mahoni dan plastik polypropylene. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui rasio komposisi antara kedua bahan baku dalam menghasilkan MHP. Rasio komposisi yang digunakan adalah 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 dan 0:100 (dalam satuan %) yang diproses sealama 90 menit. Hasil menunjukkan tidak adanya interaksi antara kedua bahan baku selama proses pirolisis bersama. Hal ini dibuktikan pada perolehan MHP terbanyak pada komposisi 100% plastik polypropylene. Pada penelitian ini didapatkan kesimpulan berupa bahan baku sangat mempengaruhi hasil dari MHP dikarenakan proses penyerapan panas yang dicapai pada saat pirolisis. Penambahan serbuk gergaji kayu mahoni akan menyebabkan penurunan suhu pirolisis sehingga tidak mencapai suhu optimal dan tidak menghasilkan gas reaksi [18].

Tabel 2. Hasil Kalkulasi, Eksperimen dan Efek Sinergistik [17]

Sampel		MHP (%)		
		<i>Y cal</i>	<i>Y eks</i>	<i>AY</i>
PP	450 °C	34.15	34.15	0
Oli		11.675	11.675	0
PP	500 °C	31.1	31.1	0
Oli		34.175	34.175	0
PP	550 °C	12.275	12.275	0
Oli		24.775	24.775	0
PP/Oli	450 °C	45.825	66.3	20.475
PP/Oli	500 °C	65.275	61.4	-3.875
PP/Oli	550 °C	37.05	51.775	14.775

Menurut penelitian yang dilakukan Phetyim dan Pivsa-art [19] berupa co-pirolisis minyak pelumas bekas yang dicampur dengan 3 jenis sampah plastik yaitu HDPE, PP dan PS untuk didapatkan bahan bakar dengan kualitas seperti bahan bakar diesel. Proses pirolisis dilakukan dalam skala laboratorium dengan tekanan atmosfer menggunakan suhu akhir 450 °C tanpa katalis. Variable yang digunakan pada perbandingan berat bahan baku yaitu minyak pelumas bekas:HDPE:PP:PS dengan variasi 50:30:20:0, 50:30:0:20, 50:0:30:20, dan 50:30:10:10. Waktu yang digunakan selama proses selama 4 jam untuk memastikan reaksi telah selesai. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa minyak yang mendekati pada sifat minyak diesel dengan rasio bahan baku Oil:HDPE:PP:PS 50:30:20:0. Produk minyak dihasilkan pada suhu 400 – 425 °C produksi ini tercatat lebih awal dari suhu target yaitu 450 °C. Hal ini dipengaruhi oleh cepatnya proses penyerapan panas oleh bahan baku pirolisis yang digunakan untuk melakukan dekomposisi. Hasil campuran bahan baku terbukti meningkatkan proses perpindahan panas yang lebih baik. Secara analisis sifat produk minyak, berdasarkan analisis produk minyak pirolisis campuran oli bekas dengan sampah plastik tanpa polistirena mengandung parafin yang tinggi (55,723%) yang termasuk dalam kisaran solar (45,28%).

Savira dan Hendriyanto [20] dalam penelitiannya berupa proses pirolisis dengan menggabungkan bahan baku berupa sampah plastik dan sampah ranting. Tujuannya ialah mendapatkan pengaruh hasil variasi terbaik untuk kemudian ditinjau dari nilai kalori untuk mendapatkan bahan bakar alternatif. Sampah plastik yang digunakan adalah plastik jenis PP dan HDPE dengan campuran sampah ranting adalah mangga dan jambu biji. Dengan variasi perbandingan komposisi antara sampah plastik dan sampah ranting menggunakan 75:25, 50:50 dan 25 dengan berat total 300 gram. Proses ini dilakukan pada suhu operasi 450 °C dengan waktu tinggal 10 menit. Produk yang dihasilkan berupa padatan dan asap cair. Dari penelitian tersebut hasil asap cair terbesar yang dihasilkan dari kombinasi pirolisis sampah plastik PP 75 gram dan sampah ranting jambu biji 225 gram menunjukkan nilai kalori sebesar 10.058 kal/gr yang setara dengan biodiesel (minyak nabati murni).

Ryu, dkk. [21] melakukan penelitian kemajuan teknologi pirolisis dari biomasa dengan sampah plastik dengan meninjau pada efek sinergis yang terjadi. Dengan melakukan variasi pada penggunaan katalis dan tidak pada proses co-pirolisis menunjukan hasil tanpa katalis distribusi produk yang dihasilkan memiliki karakteristik dengan proses pirolisis tunggal. Hal ini menunjukkan tidak adanya interaksi dari 2 bahan baku yang dilakukan proses co-pirolisis tanpa menggunakan katalis. Penggunaan katalis ditujukan untuk meningkatkan interaksi yang terjadi selama proses kombinasi kedua bahan baku tersebut. Dijelaskan bahwa hasil menunjukkan sinergi positif berupa meningkatnya nilai hidrokarbon pada hasil liquid serta mengurangi jumlah char. Dalam proses pirolisis degradasi biomasa terjadi lebih dulu sebelum dekomposisi plastik HDPE hal ini memicu interaksi radikal dan char dari biomasa menghasilkan 2-alkana. Hasil liquid berupa bio-oil yang cocok digunakan untuk bahan bakar transportasi.

3.2. Pengujian MHP

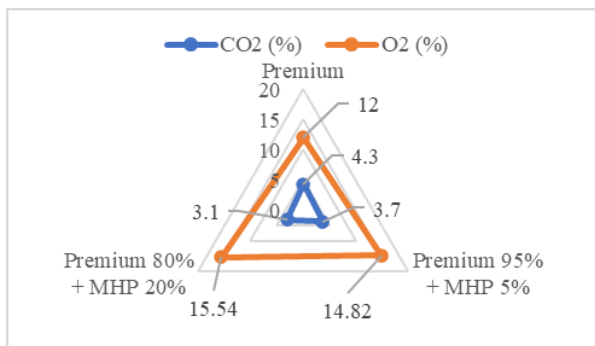
Minyak hasil proses pirolisis merupakan produk kondensasi dari proses dekomposisi rantai hidrokarbon polimer yang menjadi rantai hidrokarbon pendek dan ringan yang menguap akibat adanya termal. Minyak ini dapat digunakan sebagai bahan bakar sehingga diharapkan mampu mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil dan memenuhi variasi bahan bakar yang digunakan untuk masa depan serta berefek dalam mengurangi masalah lingkungan.

Dalam penelitian Nurdianto, Nugraheni dan Ivana melakukan pengujian MHP pada kendaraan bermotor yaitu mesin sepeda motor empat tak satu silinder merek Honda Beat 108 cc dengan mencampur MHP bersama bahan bakar lain menggunakan variasi komposisi. MHP dihasilkan dari proses dekomposisi limbah botol plastik dengan jenis plastik PET. Dari hasil uji lab kemudian dibandingkan dengan jenis bahan bakar fosil yang lain maka didapatkan nilai sebagai berikut:

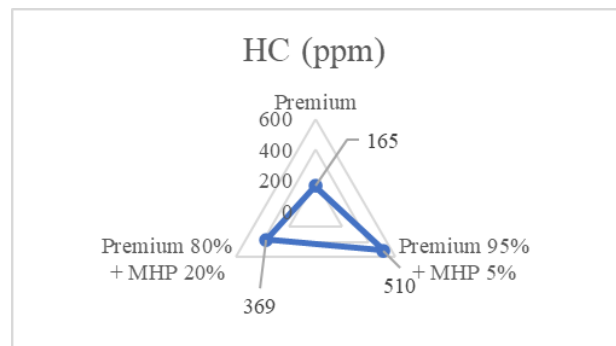
Tabel 3. Perbandingan MHP, Bensin dan Solar [22]

No	Parameter Pembading	MHP	Bensin	Solar
1	Densitas (Kg/L)	0.78	0.71 – 0.77	0.815 – 0.870
2	Viskositas (Cp)	1.50	-	2.0 – 5.0
3	Titik Nyala (°C)	46.50	-10 – -15	40 – 100

Pengujian selanjutnya dilakukan uji emisi yang dihasilkan gas buang dengan variasi pengujian yaitu premium murni, campuran 95% premium dan 5% MHP, serta 80% premium dan 20% MHP.



Gambar 3. Grafik Emisi CO2 dan Kandungan O2 dalam % Volume [22]



Gambar 4. Grafik Emisi HCD dalam PPM [22]

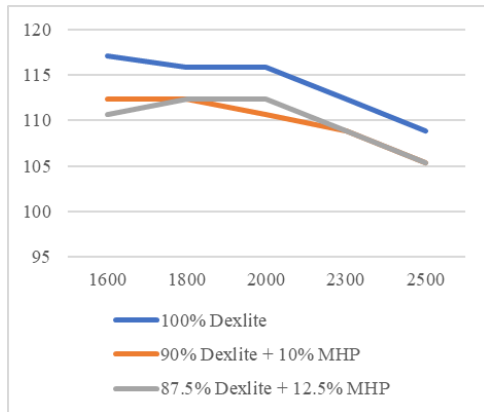
Penelitian oleh Murdieono [23] berfokus pada pengujian MHP sampah plastik jenis LDPE pada kinerja mesin diesel. MHP digunakan sebagai bahan pencampur dari bahan bakar utama yaitu dextrite. Pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi penampuran yaitu 100% dextrite, 90% dextrite + 10% MHP dan 12.5% dextrite + 87% MHP. Pengambilan data dilakukan pada torsi dan daya mesin. Sebelum dilakukan pengujian MHP pada mesin diesel, MHP dilakukan pengujian lab untuk mengetahui sifat kimianya yaitu nilai *flash point*.

Tabel 4. Hasil Pengujian MHP [23]

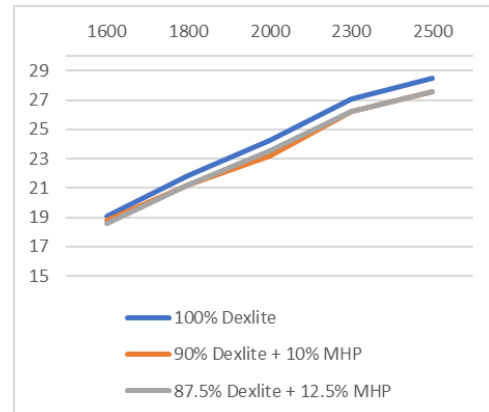
Jenis Pemeriksaan	Satuan	Solar	Hasil Pemeriksaan	Metode Pemeriksaan
Flash Point	°C	54	Suhu 200 °C Suhu 300 °C Suhu 330 °C	ASTM D 93

Dalam penelitan Syamsiro [24] telah dilakukan pengambilan dari pengujian MHP secara injeksi langsung pada mesin diesel. MHP didapatkan dari bahan kantong plastik yang dipirolisis dengan menggunakan katalis zeolit alam. Pengujian MHP dilakukan pada putaran mesin 1800 rpm dengan mencampurkan MHP bersama bahan bakar diesel. Hasil didapatkan data efisiensi termal meningkat dibandingkan dengan bahan bakar diesel saja. Pengujian berikutnya pada emisi gas buang

yang ditimbulkan pada variasi beban mesin. Hasil menunjukkan bahan bakar diesel yang dicampur dengan MHP menurunkan kadar NOx. Gambar 5 dan 6 adalah hasil perolehan data setelah dilakukan proses pengujian bahan bakar MHP pada mesin diesel.



Gambar 5. Perbandingan Torsi Mesin [23]



Gambar 6. Perbandingan Daya Mesin [23]

Pada penelitian Nugraha, dkk [25] melakukan penelitian pada pemodelan matematis untuk menghasilkan persamaan dalam bentuk *ordinary differential equations* (ODE). Perolehan model matematis ini didapatkan dengan melihat dan meninjau fenomena serta hukum fisika yang terjadi. Fokus penelitian yaitu untuk mendapatkan model matematis pada perolehan massa dan waktu reaksi proses pirolisis serbuk gergaji kayu jati. Proses pirolisis melibatkan persamaan perpindahan panas yang terjadi dalam partikel biomassa sehingga menghasilkan reaksi pirolisis. Perpindahan panas pada partikel biomassa menggunakan geometri bola. Beberapa nilai batas dan asumsi juga digunakan untuk menghasilkan persamaan yang mendekati proses pirolisis yang terjadi. Persamaan model matematis yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan data hasil eksperimen. Perbedaan yang dihasilkan menghasilkan tingkat kesalahan, hal ini dikarenakan data yang digunakan dalam pemodelan matematis adalah data dari kayu oak sedangkan untuk proses eksperimen menggunakan kayu jati.

Tabel 1. Perbandingan data hasil eksperimen dan pemodelan matematis [25]

T (K)	Arang		MHP	
	Data (%)	Model Matematis (%)	Data (%)	Model Matematis (%)
573	34,48	29,71	27,11	25,79
598	32,47	29,99	32,47	23,21
623	32,28	30,13	31,27	21,35
648	32,02	30,19	38,17	19,99
673	31,36	30,21	26,00	18,93

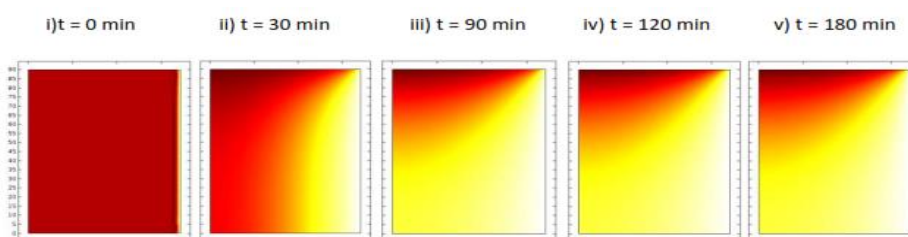
Tabel 2. Tingkat kesalahan hasil pemodelan matematis dibandingkan data eksperimen [25]

T (K)	Galat	
	Arang (%)	MHP (%)
573	1,91	0,24
598	0,58	8,13
623	0,44	10,06
648	0,33	22,69
673	0,13	7,39

Pada penelitian Zhang, dkk [26] melakukan simulasi pada proses pirolisis pada limbah $Mg(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ yaitu limbah yang dihasilkan dari pengolahan nikel yang berdampak buruk bagi lingkungan. Tujuan dari penelitian ini untuk mengungkap proses dekomposisi termal yang terjadi untuk mendaur ulang limbah tersebut menggunakan metode CFD. Tahap pertama dari penelitian ini ialah membuat model matematika terintegrasi yang berkaitan dengan aliran partikel gas dari reaksi dekomposisi akibat perpindahan panas yang kemudian dikembangkan berdasarkan metode Euler-Lagrange. Model matematis yang kemudian dikembangkan untuk mempelajari karakteristik aliran partikel gas pada proses dekomposisi termal yang terjadi di dalam tungku pirolisis akibat pengaruh dari parameter operasi diantaranya suhu saluran masuk gas, laju aliran masa dan ukuran partikel. Hasil menunjukkan model matematis yang diperoleh dapat dikembangkan dengan baik. Peningkatan perpindahan panas dapat meningkatkan laju dekomposisi dan menghasilkan dekomposisi sempurna pada suhu 1173 K.

Dalam penelitian oleh Sirait, dkk [27] melakukan proses simulasi CFD untuk mendapatkan keseimbangan energi pada reaktor pirolisis. Plastik PP merupakan bahan utama sebagai percobaan dengan waktu proses selama 2 jam menggunakan parameter berupa variasi temperatur dari 30 °C sampai 300 °C dan pemakaian gas pembakaran sebanyak 6 kg. Dari eksperimen tersebut mendapatkan minyak hasil pirolisis sebanyak 4 liter yang didapatkan dari proses kondensasi gas hasil dekomposisi. Keseimbangan energi menjadi topik utama dalam penelitian ini untuk mengetahui jumlah energi yang diterima pada sistem ini dan energi yang dikeluarkan dari sistem. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan proses pirolisis yang berkerja secara maksimal.

Pada penelitian Indriyanto, dkk [28] melakukan eksperimen pirolisis biomassa menggunakan bahan baku sekam kayu mahoni pada *fixed bed pyrolyser*. Tujuan dalam penelitian ini adalah menganalisa perpindahan panas yang terjadi selama proses berlangsung dengan mensimulasikan menggunakan *software Comsol Multiphysics*. Hasil simulasi ini kemudian diverifikasi dengan menggunakan data yang dihasilkan pada eksperimen. Geometri dan parameter yang diperuntukkan pada simulasi diambil dari kondisi eksperimen pirolisis yang sama. Hasil menunjukkan proses pirolisis tergantung pada kualitas reaktor dan temperatur yang digunakan. Meningkatnya laju pemanasan maka akan meningkatkan perpindahan panas yang semakin besar diterima oleh bahan baku dari reaktor. Hal ini dibuktikan dengan tampilan visual dari proses simulasi yang menunjukkan semakin lama waktu yang digunakan dalam proses pirolisis maka menghasilkan distribusi temperatur semakin tinggi dan merata pada reaktor.



Gambar 7. Gambar gradien temperatur pada waktu pengujian [28]

Proses simulasi pada distribusi tekanan dan kecepatan gas dalam pipa pirolisis dalam reaktor dan kondensor juga diteliti oleh Simbolon dan Setia. Dalam penelitian tersebut berfokus pada geometri pada pipa penghubung antara reaktor dan kondensor. Dalam proses analisa digunakan *software simscale* berdasarkan temperatur tekanan dan kecepatan gas pada pipa pirolisis dengan menggunakan variasi panjang pipa yaitu 1,5 m, 1,75 m dan 2 m. Bahan pipa yang digunakan adalah *stainless steel AISI 304*. Dari hasil simulasi penambahan panjang pipa yang digunakan akan menghasilkan peningkatan perpindahan panas dan mendapatkan hasil optimum sehingga gas reaksi yang dihasilkan memiliki temperatur dan tekanan rendah akibatnya menghasilkan MHP yang lebih banyak pada penggunaan pipa yang panjang [29].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ding dkk [30] tentang proses simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk pirolisis limbah padat yang mudah terbakar. Proses pirolisis dilakukan pada reaktor *fluidized bed* dengan kecepatan pemasukan bahan baku sebesar 5Kg/jam. Fokus simulasi yang dilakukan pada aliran multifasa dengan menggunakan metode euler dan metode reaksi multi-komponen, reaksi heterogen ditambahkan diprogram dalam software CFD untuk mendapatkan data secara visual dari proses pirolisis. Metode simulasi kemudian divalidasi dengan data suhu dan hasil produk yang didapatkan dari hasil eksperimen. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen menghasilkan suhu yang identik namun hasil produk berbeda satu sama lain. Perbedaan ini disebabkan akibat resistensi panas internal, resistensi perpindahan massa dan perubahan ukuran partikel.

3.3. Prediksi Pirolisis

Pirolisis sampah plastik menjadi bahan bakar minyak telah dilakukan oleh banyak peneliti dengan metode eksperimen untuk mendapatkan hasil terbaiknya. Namun demikian, penelitian eksperimen membutuhkan biaya yang sangat mahal untuk berbagai kondisi operasi. Oleh karena itu, perlu dikembangkan metode prediksi pirolisis berdasarkan data-data eksperimen yang telah ada. Beberapa peneliti telah mengembangkan metode ini diantaranya oleh Wang, dkk. (2022) yang menggunakan machine learning untuk memprediksi kinetika pirolisis beberapa jenis feedstock [31]. Dari hasil prediksi diperoleh informasi bahwa rasio H/C dan O/C berkorelasi negatif dengan energi aktivasi pirolisis.

Sementara itu Abnisa dkk. (2019) berhasil memprediksi jumlah bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis plastic menggunakan metode neural network dengan pendekatan Levenberg-Marquardt [32]. Model yang diusulkan kemudian dievaluasi menggunakan analisis statistical dan presentasi grafis untuk keakuratannya. Hasilnya menunjukkan bahwa model tersebut mampu memprediksi secara akurat produk pirolisis plastic non-daun ulang dengan membandingkannya dari hasil eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan material campuran plastik yang terdiri dari HDPE, LDPE, PP, dan PS dengan komposisi mengikuti komposisi sampah plastik yang ada di Malaysia, Amerika Serikat, Inggris, dan dunia. Hasilnya menunjukkan bahwa produk cairan yang dihasilkan semakin banyak ketika komposisi plastiknya lebih banyak mengandung LDPE dan PS. Kontribusi terhadap hasil cairan dari yang tertinggi adalah HDPE, PP, LDPE, dan PS. Sementara untuk produksi gas, HDPE dan LDPE lebih banyak memproduksi gas dibandingkan dengan PP, sedangkan PS menghasilkan paling sedikit gas.

4. Kesimpulan

Bahan baku yang digunakan dalam pirolisis memiliki banyak jenis, namun untuk produknya terdiri dari 3 macam yaitu produk utama berupa minyak yang merupakan hasil kondensasi dari gas reaksi, gas yang tidak dapat terkondensasi, dan padatan berupa char yang mengandung carbon. MHP atau minyak hasil pirolisis adalah minyak yang dihasilkan dari proses dekomposisi termal yang memiliki kandungan energi didalamnya karena mengandung hidrokarbon yang merupakan unsur penyusun bahan bakar. Minyak Hasil Pirolisis (MHP) yang dilakukan pengujian pada mesin secara langsung dapat langsung digunakan karena karakteristik sifat kimianya hampir menyerupai bahan bakar minyak fosil seperti premium untuk mesin bensin dan solar untuk mesin diesel. Prediksi pirolisis menggunakan berbagai metode seperti machine learning dan neural network dapat dilakukan untuk mengurangi biaya eksperimen yang mahal. Dalam perkembangan teknologi pirolisis sampah plastik telah menghasilkan banyak metode untuk menghasilkan produk-produk pirolisis baik dari MHP gas maupun arang. Keadaan dari fenomena fisik yang berlangsung selama proses pirolisis serta data hasil dari eksperimen sebelumnya dengan parameter yang sama dapat menghasilkan suatu pemodelan matematis. Model matematis yang dihasilkan memiliki kemungkinan untuk memproses suatu kasus dalam proses pirolisis dengan menerapkan prinsip dan parameter untuk

keadaan yang sudah pasti seperti temperatur operasi, waktu proses, jenis pendinginan pada kondensor, ukuran partikel bahan baku, geometri alat pirolisis, jenis reaktan dan jenis bahan baku yang digunakan.

Daftar pustaka

- [1] ESDM, “Menteri ESDM : Cadangan Minyak Indonesia Tersedia untuk 9,5 tahun dan Cadangan Gas 19,9 Tahun,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun> [Diakses pada tanggal 19 Januari 2021].
- [2] I. G. Wiratmaja. Pengujian karakteristik fisika biogasoline sebagai bahan bakar alternatif pengganti bensin murni. *J. Ilm. Tek. Mesin*. 2010; 4 (2).
- [3] Volume Sampah yang terangkut per hari menurut jenis sampah di Provinsi DKI Jakarta (Ton). <https://jakarta.bps.go.id/indicator/152/916/1/volume-sampah-yang-terangkut-per-hari-menurut-jenis-sampah-di-provinsi-dki-jakarta.html>. BPS Provinsi DKI Jakarta; 2022.
- [4] Badan Pusat Statistik Yogyakarta, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Dalam Rangka 2020. Yogyakarta: CV. Lontar Mediatama, 2020. doi: 1102001.34.
- [5] P. Purwaningrum. Upaya mengurangi timbunan sampah plastik di lingkungan. Indonesia. *J. URBAN Environ. Technol*. 2016; 8 (2): p. 141. doi: 10.25105/urbanenvirotech.v8i2.1421.
- [6] U. B. Surono. Berbagai metode konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. *Junal Tek*. 2013; 3: pp. 32–40. doi: 10.33005/envirotek.v9i2.966.
- [7] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review,” *Waste Manag*. 2009; 29 (10): pp. 2625–2643. doi: 10.1016/j.wasman.2009.06.004.
- [8] S. Naimah, C. Nuraeni, I. Rumondang, B. Nugroho, R. Ermawati. Dekomposisi limbah plastik polypropylene dengan metode pirolisis. *Junal Sains Mater. Indones*. 2012; 13 (3): pp. 226–229.
- [9] Y. C. Danarto, P. B. Utomo, F. Sasmita. Pirolisis limbah serbuk kayu dengan katalisator zeolit. 2010. pp. 1–6.
- [10] A. Buekens. Introduction to feedstock recycling of plastics CO abbreviations,” *Vrije Universiteit Brussel (V.U.B.)*. Brussels Belgium; 2006.
- [11] La Ode Mohammad Firman, E. Maulana, G. Panjaitan. Bahan bakar alternatif dari optimasi pirolisis sampah plastik polypropylene. *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*. 2019; 9 (2): pp. 14–19. doi: 10.35814/teknobiz.v9i2.532.
- [12] D. G. H. Adoe, W. Bunganaen, I. F. Krisnawi, F. A. Soekwanto. Pirolisis sampah plastik PP (Polypropylene) menjadi minyak pirolisis sebagai bahan bakar primer. 2016. doi: <https://doi.org/10.1234/ljtmu.v3i1.455>.
- [13] J. Kang, J. Ran, J. Niu, J. Shi, J. He, Z. Yang. Experimental and theoretical study on propane pyrolysis to produce gas and soot. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019; 44 (41): pp. 22904–22918. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.214.
- [14] M. Fatimura. Evaluasi kinerja reaktor pirolisis non katalis dalam mengkonversikan limbah plastik menjadi bahan bakar minyak. *J. Ilm. Tek. Kim.*. 2020; 4 (1): p. 1. doi: 10.32493/jitk.v4i1.3725.
- [15] Aman, Ari Aditia Sukma, Syaiful Bahri. Konversi termal kayu ketapang (terminalia catappa l.) menjadi bio-oil dengan teknologi pirolisis menggunakan katalis NiMo/NZA. *News.Ge*. <https://news.ge/anakliis-porti-aris-qveynis-momava>, 2019.
- [16] S. Salamah, M. Maryudi. Proses pirolisis limbah styrofoam menggunakan katalis silika-alumina. *J. Rekayasa Kim. Lingkungan*. 2018; 13 (1): pp. 1–7. doi: 10.23955/rkl.v13i1.8695.

- [17] M. Syamsiro, B. Megaprastio, Z. Mufrodi, M. A. Saputro, J. Winarno. Produksi bahan bakar minyak alternatif dari pirolisis plastik polipropilen dan oli bekas. *deHAP*. 2021; 1 (1): pp. 317–325, 2021.
- [18] D. Zalfa, A. Safitri, D. S. Wijayanto, T. W. Saputra. Pirolisis biomassa limbah kayu mahoni dan plastik polypropylene. 2023; 12 (1): pp. 73–80.
- [19] N. Phetyim, S. Pivsa-art. Prototype co-pyrolysis of used lubricant oil and mixed plastic waste to produce a diesel-like fuel. *Energies*. 2018: pp. 1–11. doi: 10.3390/en11112973.
- [20] F. L. Savira, O. Hendriyanto. Pirolisis sampah plastik sebagai bahan bakar alternatif dengan penambahan sampah ranting. *Jurnal Envirotek*. 2018; 9 (2); pp. 1–6. doi: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v9i2.966>.
- [21] H. W. Ryu, D. H. Kim, J. Jae, S. S. Lam, E. D. Park, Y.-K. Park. Recent advances in catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic waste for the production of petroleum-like hydrocarbons. *Bioresour. Technol*. 2020 April: p. 123473. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123473.
- [22] P. Nurdianto, I. K. Nugraheni, R. T. Ivana. Pengujian bahan bakar biofuel hasil pirolisis botol plastik pada sepeda motor. *Elemen*. 2016; 3 (1): pp. 1–6.
- [23] A. Murdieono. Kinerja mesin diesel dengan bahan bakar minyak hasil pirolisis sampah plastik. Universitas Muhammadiyah Surakarta; 2017.
- [24] M. S. Cahyono, A. Prasetya, M. Syamsiro. Influence of residence time to the properties of liquid product from plastic waste pyrolysis. *Multitek Indones. J. Ilm*. 2021 January; 6223: pp. 121–130.
- [25] N. B. Nugraha, Y. Yusuf, G. Refiadi. Pemodelan perolehan massa dan waktu reaksi pirolisis serbuk gergaji kayu Jati. *J. Konversi Energi dan Manufaktur*. 2016; 3 (3): pp. 135–141. doi: 10.21009/jkem.3.3.4.
- [26] M. Zhang, L. Zhao, S. Zhang, W. Wu, D. Hui, J. Zhang. Numerical Simulation Of Complex Thermal Decomposition Processes in Pyrolysis Furnace for Recycling Solid Waste $Mg(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$. *Chem. Eng. Res*. 2022 December; 181 (3): pp. 287–303. doi: 10.1016/j.cherd.2022.03.021.
- [27] R. Sirait, E. Maulana, D. Mahardika. Analisis keseimbangan energi pada reaktor pirolisis kapasitas 75 kg/jam. *semin. Nas. Penelit. LPPM UMJ*; 2020. P. 1–8.
- [28] R. Indriyanto, W. Wijayanti, L. Yuliati. Simulasi numerik distribusi temperatur pada pirolisis serbuk kayu di fix bed pyrolyser. *Prosiding SENIATI*; 2019. pp. 331–335, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/seniati/article/view/459>
- [29] S. Simbolon, Y. Setia. Simulasi distribusi suhu tekanan dan kecepatan gas dalam pipa pirolisis pada reaktor - kondensator. *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*. 2022; 6 (2): pp. 155–165. doi: 10.31289/jmemme.v6i2.7186.
- [30] K. Ding, Q. Xiong, Z. Zhong, D. Zhong, Y. Zhang. CFD simulation of combustible solid waste pyrolysis in a fluidized bed reactor. *Powder Technol*. 2020; 362: pp. 177–187. doi: 10.1016/j.powtec.2019.12.011.
- [31] S. Wang. A machine learning model to predict the pyrolytic kinetics of different types of feedstocks. *Energy Convers. Manag*. 2022 January; 260. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115613.
- [32] F. Abnisa, S. D. A. Sharuddin, M. F. bin Zaniil, W. M. A. W. Daud, T. M. I. Mahlia. The yield prediction of synthetic fuel production from pyrolysis of plastic waste by. *Polymers (Basel)*. 2019. doi: 10.3390/polym11111853.