

Pengaruh Variasi Volume Aspal Terhadap Pencairan Sampah Plastik High Density Polyethylene Menjadi Bahan Bakar Cair Menggunakan Katalis Dolomit pada Reaktor Batch

The Effect of Varying Asphalt Volume on the Melting of High Density Polyethylene Plastic Waste into Liquid Fuel Using a Dolomite Catalyst in a Batch Reactor

Pandapotan Maruli Tua Manurung¹, Oki Alfernando^{2*}, Lince Muis³, Sarah Fiebrina Heraningsih⁴, Feerzet Achmad⁵, dan Aldillah Herlambang⁶.

^{1,2,3,4,6}Teknik Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

⁵Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

Email: ¹pandapotan392@gmail.com, ^{2*}alfernadooki@unja.ac.id, ³lince.muis@unja.ac.id, ⁴sarah@unja.ac.id, ⁵feerzet.achmad@tk.itera.ac.id, ⁶aldillah.herlambang@tk.itera.ac.id

Article history: Received 29-06-2024, Accepted 20-08-2024, Published 16-09-2024

Abstrak

Penelitian ini untuk mengetahui perbandingan rendemen minyak yang diperoleh dari pengolahan sampah plastik HDPE dengan membandingkan secara kuantitatif dan kualitatif dari bahan bakar minyak yang dihasilkan. Adapun proses pengolahan sampah plastik menjadi minyak yaitu dengan proses pirolisis yang dilakukan pada variasi volume aspal (20%; 40%; 60%; 80%; 100%) selama 2 jam. Dalam satu kali percobaan, 500 gram sampah plastik HDPE, 250 gram katalis dolomit, dan berlangsung pada suhu 450°C. Laboratorium Jurusan Teknik SKL Universitas Jambi merupakan tempat berlangsungnya penelitian ini. Penelitian dilakukan dengan parameter yang diuji meliputi analisis volume, massa, %-yield, densitas, dan GC-MS penelitian menunjukkan bahwa secara kuantitatif volume, massa, dan %-rendemen terendah terdapat pada variasi volume aspal 20%, dan tertinggi pada variasi volume aspal 100%. Pada variasi volume aspal 60%, densitas yang dihasilkan adalah 0,0240 gram/ml, dan hasil analisis GC-MS menghasilkan rantai karbon C5-C12 92,4800% (bensin), C13 > 7,5200% (minyak tanah), dan senyawa aromatik yang terkandung di dalamnya berjumlah sebesar 7,5200%.

Kata kunci: Aspal; HDPE; GC-MS; Pirolisis

Abstract :

This research is to determine the comparison of oil yield obtained from processing HDPE plastic waste by comparing quantitatively and qualitatively the fuel oil produced. The process of processing plastic waste into oil is a pyrolysis process carried out at varying asphalt volumes (20%; 40%; 60%; 80%; 100%) for 2 hours. In one experiment, 500 grams of HDPE plastic waste, 250 grams of dolomite catalyst, and carried out at a temperature of 450 °C. The Jambi University SKL Engineering Department Laboratory is the place where this research. Research was carried out with the parameters tested including volume, mass, %-yield, density and GC-MS analysis. The results of the research showed that quantitatively the lowest volume, mass and % yield were found in asphalt volume variations of 20%, and the highest were in asphalt volume variations of 100%. In varying asphalt volumes of 60%, the resulting density is 0.0240 gram/ml, and the results of GC-MS analysis produce 92.4800% C5-C12 carbon chains (gasoline), C13 > 7.5200% (kerosene), and the aromatic compounds contained therein amount to 7.5200%.

Keywords: Asphalt; HDPE; GC-MS; Pyrolysis.

1. Pendahuluan

Masalah lingkungan saat ini banyak diperbincangkan oleh masyarakat dunia. Pada saat ini dibahas tentang hal-hal yang memiliki efek negatif dan sangat berbahaya, seperti halnya penggundulan hutan, krisis lahan, penipisan lapisan pada ozon, pemanasan global, adanya tumpahan minyak di laut dan kematian ikan di sungai akibat bahan kimia beracun yang bertumpahan. Faktor lainnya itu masalah pada penggunaan produk plastik sekali pakai yang dapat menyebabkan penumpukan sampah plastik menjadi masalah lingkungan yang semakin meningkat secara signifikan [13].

Berdasarkan penjelasan dari Menteri Kelautan dan Perikanan bahwa urutan kedua di dunia ini diduduki oleh Indonesia sebagai penyumbang sampah reaktor terbanyak yang dibuang ke laut. Berdasarkan informasi dari Asosiasi Industri Plastik Indonesia (INAPLAS) dan Badan Pusat Statistik (BPS), Indonesia menghasilkan sampah mencapai 64 juta ton per tahun, dimana 3,2 juta ton sampah plastik dibuang ke laut. Berdasarkan hal tersebut, perlu adanya pengolahan sampah plastik agar dapat berkurang sehingga penggunaan plastik dapat dibatasi^[16]. Pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar dapat dilakukannya dengan suatu proses yang biasa disebut proses pirolisis, dimana nantinya suatu bahan terurai pada suhu tinggi dengan udara atau udara terbatas. Pirolisis adalah proses dekomposisi termal bahan berbasis karbon dengan menggunakan sumber panas eksternal tidak langsung. Pada proses pirolisis ini digunakannya reaktor *batch* [11].

Teknologi untuk mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar cair juga melewati suatu proses yaitu proses *cracking* (perengkahan)[15]. Dalam perengkahan sampah plastik menjadi bahan bakar cair, digunakan proses pirolisis dan perengkahan katalitik yang menggunakan katalis dolomit, penggunaan katalis dalam proses ini dapat mencapai hasil terbaik dengan memutus rantai hidrokarbon dan menghasilkan produk bahan bakar bensin[12]. Dolomit memiliki potensi untuk dikembangkan karena dapat mengurangi proporsi aromatik dan meningkatkan proporsi parafin, selain itu katalis dolomit ini jarang digunakan dalam penelitian pirolisis, selain itu katalis dolomit memiliki keunggulan sebagai katalis alami. Dolomit ini juga mudah untuk didapatkan dan relatif murah[5].

Katalis dolomit ini harus diaktivasi pada suhu 400°C berlangsung selama 2 jam, proses ini dilakukan sebelum dolomit ditambahkan ke dalam bahan baku[3]. Hal itu merupakan upaya untuk mengaktivasi poriporinya agar seragam dan mempermudah proses pemisahan serta mempercepat reaksi dengan menurunkan energi aktivasinya. Katalis dolomit yang digunakan dalam penelitian tersebut terbukti mampu memutus rantai polimer panjang plastik HDPE. Hal ini karena katalis dolomit merupakan mineral alami berupa kalsium dan magnesium karbonat ganda. Rumus kimianya adalah $(CaMg(CO_3)_2)$, yang sebagian besar terdiri dari 41% $MgCO_2$ dan 58% $CaCO_2$.

Kesesuaian penggunaan katalis dolomit didasarkan pada hasil penelitian pirolisis plastik HDPE menjadi bahan bakar yang dilakukan[5], dimana menghasilkan fraksi bensin sebesar 60,9% dengan rantai karbon (C5-C9) dan menghasilkan rantai karbon (C10-C25) yang mengarah pada fraksi bensin[1]. Saat proses pirolisis berlangsung, dolomit akan memutus rantai karbon polimer panjang pada plastik HDPE sehingga menghasilkan senyawa karbon dengan rantai pendek. Kemudian dolomit menekan penggunaan suhu yang tinggi dan mampu memangkas waktu reaksi pirolisis selama 30 menit. Selain mempercepat laju reaksi dengan menurunkan energi aktivasi, katalis dolomit juga bertujuan untuk mengarahkan reaktan membentuk produk pirolisis[14].

2. Metode Penelitian

a) Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif. Metode yang bersifat deskriptif dan cenderung menggunakan analisis. Dalam penelitian ini, lebih menonjolkan analisis data dan pengamatan yang mendalam seperti mengamati pengaruh variasi volume aspal terhadap sampah plastik HDPE menjadi bahan bakar cair.

b) Waktu dan Tempat Penelitian

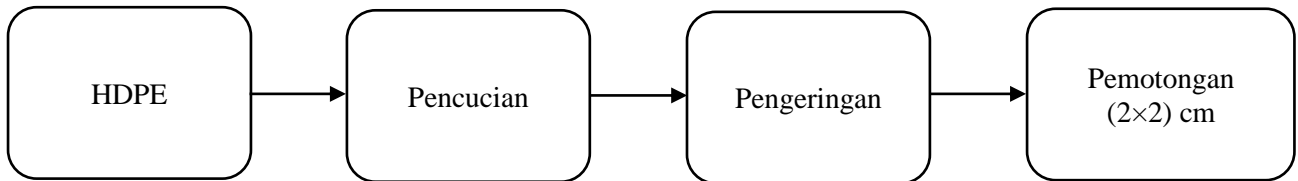
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2023 sampai dengan bulan Desember 2023 berlangsung di Laboratorium Jurusan Teknik SKL Universitas Jambi.

c) Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dengan beberapa tahap dari awal hingga akhir. Prosedur pertama yaitu proses *pre-treatment* bertujuan untuk langkah pembersihan serta pemotongan sesuai ukuran yang sudah ditetapkan. Proses kedua yaitu aktivasi katalis berguna untuk persiapan katalis digunakan setelah diaktivasi dan diayak pada proses ini. Proses selanjutnya yaitu proses pencampuran yang diharapkan bahan baku dapat tercampur merata. Proses keempat, proses pirolisis bertujuan dalam proses perengkahan. Proses terakhir yaitu disebut proses destilasi yang berguna untuk pemurnian cairan hasil perengkahan (CHP). Prosedur penelitian yang disajikan sebagai berikut:

1) *Pre-treatment*

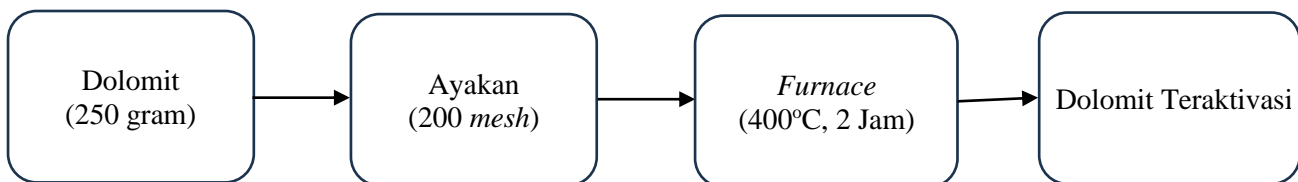
Pada gambar di atas, sampah plastik HDPE ini tentunya masih banyak kotoran yang menempel, maka sebelum dipirolisis bahan baku akan dicuci hingga bersih dan setelah itu dikeringkan. Kemudian bahan baku akan diperkecil ukurannya dengan cara dipotong-potong berukuran (2×2) cm.



Gambar 1. Diagram Alir *Pre-treatment* Limbah Plastik HDPE.

2) Aktivasi Katalis

Berdasarkan gambar 2 di atas, pengayakan katalis dolomit ini menggunakan ayakan berukuran 200 *mesh*. Katalis yang telah diayak akan ditimbang sebanyak 250 gram, kemudian diwadahi dengan cawan *crucible* untuk diletakkan di dalam tanur. Pada tanur akan terjadi proses aktivasi dengan suhu 400°C selama 2 jam. Setelah dipanaskan maka akan diperoleh katalis yang sudah teraktivasi. Proses aktivasi ini tergolong secara fisika, karena tidak melibatkan penggunaan larutan kimia.



Gambar 2. Diagram Alir Aktivasi Katalis

3) Pencampuran

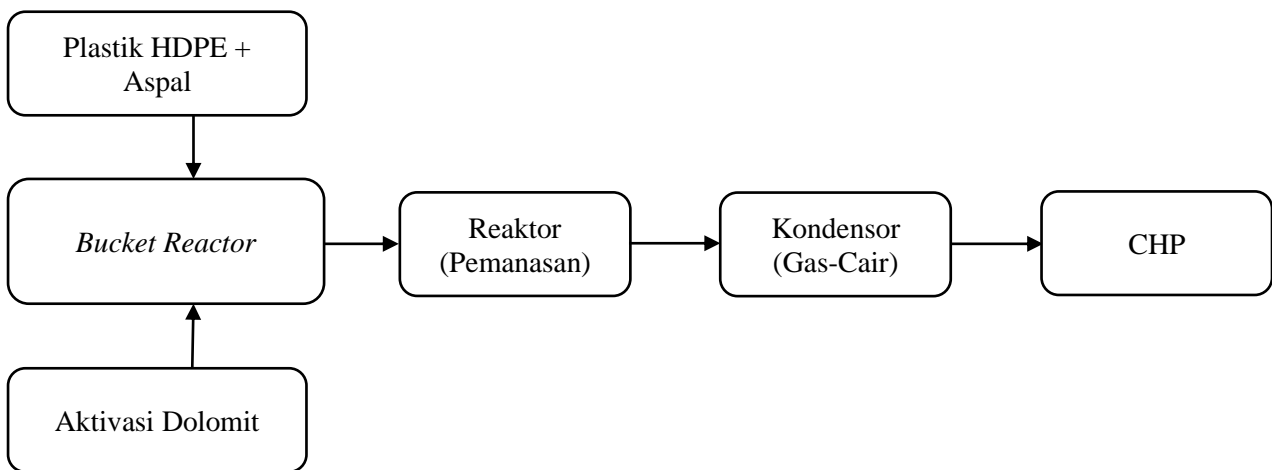
Dari gambar 3 di atas, plastik HDPE bersih berukuran 2×2 cm dilarutkan bersama aspal sesuai dengan variasi volumenya yaitu (20%; 40%; 60%; 80%; 100%). Proses selanjutnya adalah pencampuran dengan cara diaduk selama 15 menit agar tercampur merata.



Gambar 3. Diagram Alir Pencampuran HDPE dan Aspal

4) Pirolisis

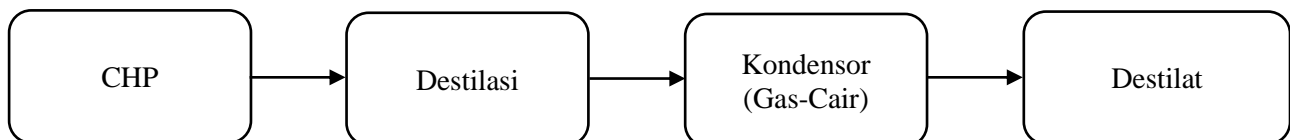
Pada gambar 4 di atas, sebanyak 250 gram katalis dolomit teraktivasi dimasukkan ke dalam *bucket* yang di dalamnya telah bercampur aspal dan sampah plastik HDPE. Kemudian *bucket* dimasukkan ke dalam reaktor untuk dipanaskan agar bahan baku dapat terpirolisis. Proses pirolisis akan berlangsung selama 2 jam, dengan variasi volume aspal yang digunakan adalah 20%; 40%; 60%; 80%; 100%, sehingga terdapat 5 kali percobaan. Hasil dari pirolisis yang teruapkan akan melewati *coil* kondensor untuk dirubah fasanya menjadi fasa cair, inilah yang disebut dengan CHP (Cairan Hasil Pirolisis).



Gambar 4. Diagram Alir Proses Pirolisis

5) Destilasi

Sesuai gambar 5 di atas, hasil dari pirolisis berupa CHP. CHP dari setiap variasi volume yang dihasilkan, akan didestilasi untuk memisahkan serta memurnikan minyak yang dihasilkan dari campuran aspal dan pengotornya. Proses ini dilakukan selama 1 jam dengan suhu 150°C. Minyak hasil pemurnian disebut sebagai destilat.



Gambar 5. Diagram Alir Destilasi CHP

d) Data, Intrumen, dan Teknik Pengumpulan Data

Penulis melakukan penyesuaian ukuran pada plastik HDPE yang dipotong menjadi 2×2 cm dan sesuai dengan ukuran penelitian yang dilakukan sebelumnya^[7]. Variasi volume aspal yang digunakan yaitu 20%; 40%; 60%; 80%; 100%, sehingga terdapat 5 kali percobaan. Pentingnya penentuan waktu dalam proses pirolisis, maka penulis menggunakan waktu pirolisis sebesar 2 jam. Durasi proses pirolisis juga bergantung pada sifat ruang di sekitar proses pirolisis, udara yang mengganggu nyalanya api, yang mengganggu suhu

tabung reaktor. Selain itu, sebaiknya tabung reaktor dipanaskan dengan nyala api yang tinggi, maka proses pirolisis akan lebih cepat.

e) Analisis Data

Pada penelitian ini, adapun analisis yang dilakukan antara lain yaitu pengukuran volume yang dilakukan langsung oleh peneliti, pengukuran massa yang ditimbang sebelum masuk ke tahap pencampuran, perhitungan %-yield dihitung berdasarkan cairan hasil pirolisis yang dihasilkan, perhitungan massa jenis berdasarkan massa dan volume yang didapatkan, dan analisis GC-MS yang diuji di Universitas Islam Indonesia.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Plastik merupakan salah satu jenis makromolekul yang terbentuk dalam proses polimerisasi. Polimerisasi adalah proses dimana beberapa molekul sederhana digabungkan menjadi molekul besar melalui proses kimia. Massa plastik HDPE yang digunakan pada proses pirolisis akan berpengaruh terhadap volume CHP yang dihasilkan. Oleh sebab itu, massa plastik HDPE digunakan sebanyak 500 gr didapatkan hasil volume CHP tertinggi sebanyak 87 ml pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya[8].

Ukuran partikel mempengaruhi *yield* dan komposisi produk pirolisis karena ukuran partikel yang lebih kecil menghasilkan produk pirolisis yang lebih banyak. Jadi sebelum proses pirolisis dimulai, penulis melakukan penyesuaian ukuran pada plastik HDPE yang dipotong menjadi 2×2 cm dan sesuai dengan ukuran penelitian yang dilakukan sebelumnya[7]. Pentingnya penentuan waktu dalam proses pirolisis, maka penulis menggunakan waktu pirolisis sebesar 2 jam. Durasi proses pirolisis juga bergantung pada sifat ruang di sekitar proses pirolisis, udara yang mengganggu nyalanya api, yang mengganggu suhu tabung reaktor. Penentuan tersebut dari penelitian yang dilakukan oleh[2], menggunakan plastik HDPE untuk dipirolisis dengan variasi waktu (20; 40; 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180) menit. Hasil yang diperoleh pada waktu pirolisis menit ke 120 adalah 70% bahan baku diubah menjadi produk CHP dengan rendemen minyak sebesar 95%. Selain itu, sebaiknya tabung reaktor dipanaskan dengan nyala api yang tinggi, maka proses pirolisis akan lebih cepat.

Menurut[13], bahwa ada proses pirolisis ini digunakannya reaktor. Reaktor memiliki 3 fraksi yaitu fraksi pertama saat air mulai menguap, fraksi kedua saat bahan baku dikompresi menjadi gas, fraksi ketiga dengan pemanasan terus menerus menghasilkan sisa padatan yang tertinggal di dalam reaktor. Gas yang dihasilkan dilewatkan melalui tabung dan terkondensasi menjadi produk cair. Efisiensi pirolisis sampah plastik terjadi pada temperatur 420°C. Produk cair memiliki nilai kalor yang tinggi, yang membuatnya mudah terbakar. Hasilnya berupa produk cair, gas dan sisa padatan dikumpulkan secara terpisah untuk digunakan. Aspal dengan viskositas rendah termasuk aliran tinggi dan sebaliknya. Pada penelitian ini menggunakan aspal yang dimana berperan dalam menjaga kualitas bahan bakar yang dihasilkan serta membantu meregangkan ikatan rantai karbon panjang agar cepat terputus[9]. Berdasarkan hasil penelitian pirolisis sampah plastik jenis PET oleh[4], penggunaan pelarut jenis residu pendek dalam penelitiannya dapat membuat pemurnian bahan bakar cair menjadi lebih pekat dan mampu menjaga kestabilan massa jenis cairan. bahan bakar yang dihasilkan. Aspal juga memiliki efek destabilisasi dalam meregangkan dan memutus rantai karbon polimer panjang pada plastik. Dengan mempertimbangkan bahan baku pada proses pirolisis maka peneliti menggunakan bahan bakunya yaitu aspal dan HDPE. Variasi volume aspal sangat mempengaruhi banyaknya keluaran cairan hasil pirolisis yang dihasilkan. Semakin banyak volume, maka akan semakin besar pula volume cairan hasil pirolisis yang didapatkan begitu pula dengan hasil %-yieldnya.

Dari penelitian yang telah penulis lakukan, %-yield terendah adalah 1,8925% dengan variasi volume aspal 20% dan selanjutnya %-yield tertinggi adalah 4,4517% dengan variasi volume 100%. Nilai densitas memiliki nilai standar SNI 3506-2017 tentang densitas bahan bakar bensin RON 88 dengan rentang nilai 0,7150 gram/ml, 0,7700 gram/ml. Nilai densitas tinggi sampel sebelum distilasi telah sesuai dengan standar

Kep. DJM No.14499K/14/DJM/2008 tentang massa jenis bahan bakar solar CN 48 dengan kisaran 0,8150 gram/ml- 0,8700 gram/ml[8].

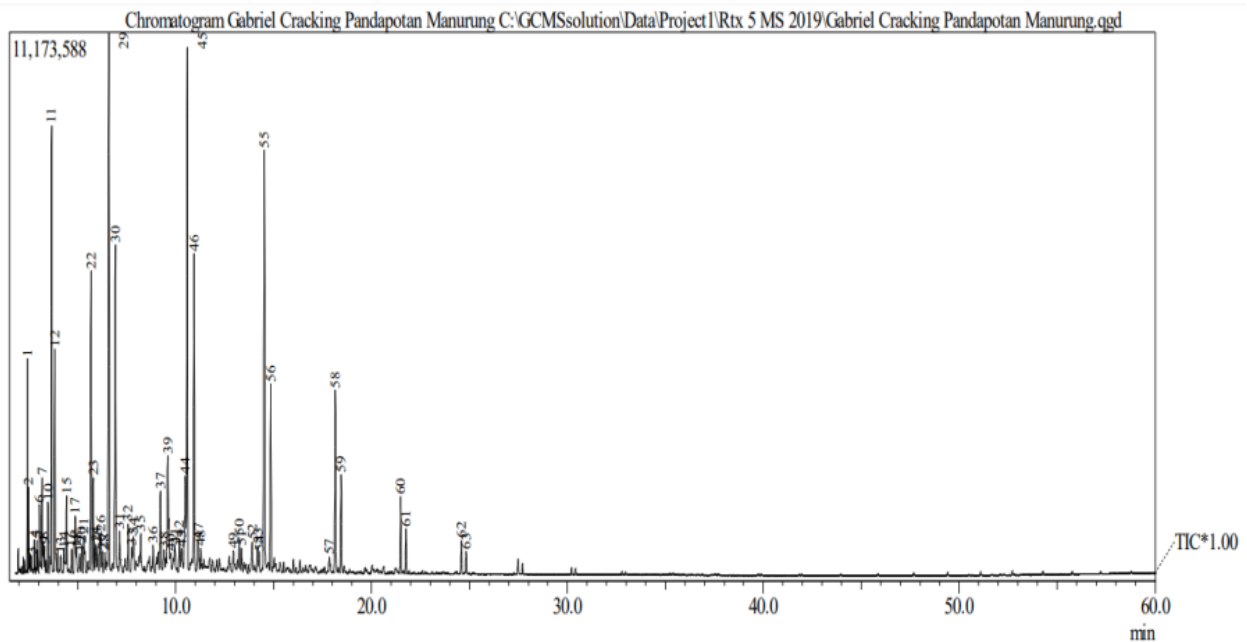
Berikut gambar cairan pirolisis sebelum distilasi:



Gambar 6. Cairan Pirolisis Setelah Destilasi

Berdasarkan penelitian ini, perbedaan nilai densitas sebelum dan sesudah distilasi terjadi karena cairan pirolisis sebelum distilasi mempunyai pengotor dan kadar air di dalamnya. Dari kelima sampel yang diperoleh terlihat bahwa sampel pada variasi volume 60% atau sebesar 300 ml aspal yang telah didistilasi telah sesuai dengan standar SNI 3506-2017 yaitu massa jenis bahan bakar bensin RON 88 dengan massa jenis sebesar 0,2640 gram/ml.

Untuk analisis GC-MS, sampel yang digunakan adalah hasil distilasi sampel dengan variasi volume 60% atau sebesar 300 ml aspal. Pemilihan tersebut didasarkan pada warna yang dihasilkan sangat jernih dengan warna kekuningan dibandingkan sampel lainnya. Sampel ini sesuai dengan standar SNI 3506-2017 yaitu massa jenis bahan bakar bensin RON 88, dimana massa jenis sampel ini sebesar 0,2640 gram/ml. Hasil analisis GC-MS dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 7. Kromatogram Minyak Hasil Pirolisis HDPE dan Volume Aspal 300 ml

Berdasarkan hasil GC-MS yang telah dilakukan dan ditunjukkan pada Gambar 7, minyak hasil pirolisis plastik HDPE memiliki puncak kromatogram tertinggi pada puncak ke-29 dengan waktu retensi 6,5900 menit, dengan %-area sebesar 9,6600%. Pada puncak tersebut, rantai karbon yang dihasilkan adalah C7 dengan senyawa dominan yang muncul adalah Sikloheptena atau C₇H₁₂. Menurut[6], waktu retensi dan luas area yang terdeteksi pada hasil analisis GC-MS pasti akan berbeda-beda, hal tersebut dikarenakan pengaruh sifat fisika dan kimia dari senyawa kimia yang ada, serta berat molekul yang terkandung dalam produk.

Terdapat 63 puncak kromatogram dengan waktu retensi tercepat 2,4290 menit dan terlama 24,8290 menit. Hasil tersebut juga memperlihatkan nilai SI, %-area, dan fraksi karbon yang beragam. Ini menandakan bahwasanya sampel minyak yang dihasilkan tidak berasal dari senyawa tunggal, melainkan terdiri dari beragam senyawa yang ditandai dari rantai penyusunnya yang terkecil adalah C5 dan yang terbesar adalah C14. Hasil analisis tersebut menghasilkan rantai karbon C5-C12 sebesar 92,4800%, dan C13> sebesar 7,5200%.

Senyawa yang paling dominan muncul adalah C₇H₁₂ sebesar 5,7100%-area. Fakta ini didukung dari hasil kromatogram seperti yang ditampilkan pada gambar 5.1, dimana kromatogram tertinggi ada pada puncak ke-29 dengan waktu retensi 6,5900 menit. Fraksi hidrokarbon C5-C12 memiliki persentase terbesar dengan nilai 92,4800%, dan fraksi hidrokarbon rantai panjang C13> sebesar 7,5200%. Menurut[9], bahwasanya fraksi hidrokarbon C5-C12 merupakan bahan bakar cair berjenis bensin, dan C13> merupakan jenis kerosin. Jika merujuk pada landasan teori tersebut, maka penelitian yang telah penulis lakukan menghasilkan bahan bakar bensin dengan persentase 92,4800% dan produk sampingnya berupa 7,5200% kerosin.

Tabel 1. Kandungan Senyawa Aromatik Hasil Analisis GC-MS

Senyawa Aromatik (%)	Kandungan Senyawa
7,5200	Hexahydrobenze, benzene, ethylbenzene, 1,4-dimethylbenzene, 1,3- dimethylbenzene, 1,2-dimethylbenzene, n-propylbenzene, propylbenzene, 1-propylbenzene, 1-ethyl-2-methylbenzene, 1,2,3-trimethylbenzene

Untuk lebih jelasnya mengetahui kandungan bahan bakar cair yang diharapkan pada penelitian ini dapat dilihat dari kandungan senyawa aromatik yang terdapat pada produk yang dihasilkan. Berdasarkan tabel 1 terlihat kandungan senyawa aromatik pada produk yang dihasilkan sebesar 7,5200%. Jika dilihat dari kandungan senyawa aromatik pada produk hasil penelitian tersebut semakin membuktikan adanya hidrokarbon cair yang mengarah pada bahan bakar jenis bensin. Hal ini terbukti karena kandungan senyawa aromatik pada produk penelitian ini sesuai dengan syarat dan ketentuan Surat Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi No. 3674K/24/DJM/2006 tanggal 17 Maret 2006 yaitu spesifikasi bensin RON 88, dengan kandungan senyawa aromatik maksimal 40%[10]. Persentase aromatik yang terlalu tinggi dapat mencemari lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan[10]. Senyawa aromatik merupakan komponen beroktan tinggi pada bensin yang dapat menghasilkan uap benzena yang sangat berbahaya bagi kesehatan (karsinogen) dan dapat meningkatkan emisi gas buang CO di udara[9].

Kesimpulan

Variasi volume pirolisis sangat mempengaruhi volume cairan pirolisis yang dihasilkan. Semakin tinggi volume pirolisis maka semakin besar volume cairan pirolisis yang diperoleh serta %-yieldnya. Hasil pengujian sampel produk CHP pada variasi volume aspal 60% atau sebesar 300 ml menggunakan instrumen GC-MS menghasilkan bahan bakar jenis bensin dengan rantai karbon C5-C12 sebesar 92,4800% dan senyawa aromatik yang terkandung di dalamnya sebanyak 7,5200%. Bahan bakar yang dihasilkan sesuai standar SNI 3506-2017 dengan jenis bensin RON 88 yang mempunyai massa jenis 0,2440 gram/ml.

Daftar Pustaka

- [1] Agnesty, Y. S., Wibawa, A., Asri, A. M., Daniswara, F. M., Aulia, N. H. 2020. Syngas to Synfuel Plant for Eastern Indonesia. *Proceedings of the 2nd Borobudur International Symposium on Science and Technology, Advances in Engineering Research*, 203, 317-320.
- [2] Anwar, H., Muis, L., Haviz, M. 2018. Pengaruh Temperatur pada Proses Pencairan Batubara Antarsit Menggunakan Pelarut Short Residue. *Jurnal Civronlit Universitas Batanghari*, 3(2), 74-81.
- [3] Ardisa, T., Mulyadi, D., Muharam, S., Program, M., Kimia, S., Program, D., Kimia, S. 2017. Pirolisis Limbah Plastik Polietilena Berdensitas Rendah Menggunakan Katalis Dolomit. *Jurnal Santika*, 7(2), 647-655.
- [4] Gusniar, I. N. 2018. Metode Pembuatan Paving Block Segi Enam Berbahan Sampah Plastik dengan Mesin Injection Molding. *Barometer*, 3(2), 130-133.
- [5] Hanif, M., Varischa, V., Pauzi, G. A., Azwar, E. 2016. Pengaruh Dolomit Terkalsinasi pada Karakteristik Produk Cair Pirolisis Limbah Plastik Jenis Polistirena dan Polipropilena. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 4(2), 227-232.
- [6] Kumar, S. and Singh, R. K. 2013. Thermolysis of High Density Polyethylene to Petroleum Products. *Journal of Petroleum Engineering*, 1(1), 1-7.
- [7] Lubi, A., Firman, L. O. M., Harahap, S. 2017. Rancang Bangun Mesin Pengolahan Sampah Plastik High Density Polyethelene Menjadi Bahan Bakar Menggunakan Proses Pirolisis. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 2(2), 81-88.
- [8] Lubis, D. A., Fitriyaningsih, Y., Pramadita, S., Christiadora Asbanu, G. 2022. Pengolahan Sampah Plastik HDPE (High Density Polyethylene) dan PET (Polyethylene Terephtalate) Sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Proses Pirolisis. *Jurnal Santika* 20(4), 735-742.
- [9] Marpaung, P. A. G., Alfernando, O., Muis, L. 2024. The Effect of Temperature Variation on the Liquefaction of High-Density Polyethylene Plastic Waste. *REKAYASA Journal of Science and Technology*, 17(2), 298-305.
- [10] Musta, R., Nurliana, L., Studi, P., Kimia, P., Kimia, J. P., Anduonohu, K. B., Kimia, P. S., Kimia, J., Baru, K. 2021. Identifikasi Senyawa Penyusun Produk Cair Hasil Pirolisis Aspal Alam dari Lawele Kabupaten Buton. *Jurnal Riset Aspal*, 9(1), 1-7.
- [11] Nurahman, W. V., Nugraheni, K. I., Anggun, A. B. 2017. Uji Emisi Buang Pemanfaatan Bahan Bakar Pirolisis HDPE pada Motor Bensin 4 Tak Silinder. *Jurnal Elemen*, 4(2), 39-46.
- [12] Praputri, E., Mulyazmi, Sari, E., Martynis, M. 2016. Pengolahan Limbah Plastik Polypropylene sebagai Bahan Bakar Minyak (BBM) dengan Proses Pyrolysis. *Teknologi Oleo Petro Kimia Indonesia Pekanbaru, Indonesia*, 1(1), 159-168.
- [13] Sya'diah, K. dan Rachmania, S. J. 2015. Pengaruh Jumlah Katalis Zeolit Alam pada Produk Proses Pirolisis Limbah Plastik Polipropilen (PP). *Jurnal Bahan Alam Terbaharukan (JBAT)*, 4(2).
- [14] Safiruddin., Wajdi, B., Novianti, A. B., Zahara, L. 2020. Pengolahan Sampah Plastik menjadi Bahan bakar Minyak (BBM) dengan Metode Pirolisis Sebagai Energi Alternatif. *Kappa Journal*, 4(1), 100-112.

- [15] Sonawane, Y. B., Shindikar, M. R., Khaladkar, M. Y. 2017. High Calorific Value Fuel from Household Plastic Waste by Catalytic Pyrolysis. *Journal of Nature Environment and Pollution Technology*, 16(3), 879-882.
- [16] Surono, B. U. and Ismanto. 2016. Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal (JMST)*, 1(1), 32-37.