Potensi Pemanfaatan Oli Bekas Menjadi Marine Fuel Oil (MFO) dengan Metode Acid Clay Treatment

Vannia Anggraeni[1*], Ismi Khairunnissa Ariani[1], Intan Dwi Wahyu Setyo Rini[1]

[1] Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknologi Kemaritiman, Fakultas Pembangunan Berkelanjutan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Kalimantan Timur 76127

*Korespondensi: vannia.anggraeni@gmail.com

Abstrak. Pengoperasian mesin generator set pada suatu hotel menghasilkan limbah oli bekas yang termasuk ke dalam kategori Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (LB3). Oli bekas dapat mencemari lingkungan jika tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Oli bekas berpotensi menjadi bahan bakar alternatif, salah satunya *Marine Fuel Oil* (MFO). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pemanfaatan oli bekas menjadi MFO dengan metode acid clay treatment menggunakan HCl dan zeolit. Konsentrasi HCl yang digunakan adalah 2 M dengan volume 10 mL dan zeolit dengan variasi massa 20 g (A), 26,5 g (B), dan 33 g (C). Hasil penelitian menunjukkan perolehan 4 (empat) karakteristik utama bahan bakar yang memenuhi standar baku mutu antara lain, viskositas kinematik 50 ℃, densitas 15 ℃, titik nyala, dan titik tuang. Namun, ada 2 (dua) karakteristik yang masih belum memenuhi standar baku mutu antara lain, kadar sulfur dan kadar air. Variasi A dengan massa adsorben 20 g dipilih sebagai variasi terbaik dengan perolehan jumlah karakteristik yang paling mendekati standar baku mutu MFO terbanyak dibandingkan dengan variasi massa zeolit lainnya. Hasil penelitian menyatakan perolehan nilai karakteristik pada variasi A, yaitu viskositas kinematik 50 ℃ sebesar 55,61 cSt, densitas 15 ℃ sebesar 885 kg/m^3, kadar sulfur sebesar 0,549 % m/m, kadar air sebesar 0,622 % v/v, titik nyala sebesar 116 ℃, dan titik tuang sebesar -18 ℃. Penelitian dilakukan untuk mengoptimalkan pengolahan limbah oli bekas yang termasuk kategori LB3 agar tidak mencemari lingkungan dengan memanfaatkannya sebagai bahan bakar alternatif MFO melalui metode *acid clay treatment*.

Kata Kunci: *acid clay treatment*, HCl, *Marine Fuel Oil*, oli bekas, zeolit

1. PENDAHULUAN

Oli bekas adalah jenis limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang paling banyak dihasilkan oleh operasi perhotelan, terhitung sekitar 786 kg sampah per tahun di Kota Jambi, bersama dengan kain lap, lampu, dan barang-barang lainnya. Oli bekas tersebut dihasilkan dari proses *maintenance* mesin generator set, yang dioperasikan sebagai sumber energi listrik cadangan ketika terjadi gangguan atau pemadaman pada pasokan energi listrik utama dari PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) (Pratiwi et al., 2024). Pengolahan yang tepat dapat mengurangi bahaya lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah oli bekas, seperti pengolahan dengan solidifikasi, insinerasi, pirolisis, kimia, dan lain-lain (Nuruddin et al., 2020). Oli bekas berpotensi menjadi bahan bakar karena memiliki nilai energi karena berasal dari proses ekstraksi minyak bumi. Pengolahan oli bekas

menjadi bahan bakar diperlukan pengolahan khusus, baik dengan menambahkan bahan (kimia) maupun dengan cara dibakar (fisika) (Suparta et al., 2015). Jenis bahan bakar yang paling umum digunakan oleh industri untuk mesin diesel adalah solar, diesel, dan *Marine Fuel Oil* (MFO). MFO dikenal lebih efisien terhadap kinerja mesin dan menghemat biaya penggunaan bahan bakar sebesar 40% (Hidayat et al., 2023).

Metode *acid clay treatment* dipilih karena memiliki kelebihan dibandingkan metode pengolahan lainnya karena mampu menurunkan kandungan kontaminan dan dinilai lebih efisien (Diphare et al., 2015). Pada metode *acid clay treatment* dalam penelitian ini, digunakan asam klorida (HCl) sebagai pelarut utama dan zeolit teraktivasi HCl sebagai adsorben. Asam klorida dipilih karena mampu meningkatkan rasio Si/Al dan penurunan kontaminan pada zeolit (Side et al., 2023). Selain itu, HCl digunakan dalam penelitian Muzhaffar *et al.* (2021) dalam mengubah oli bekas menjadi bahan bakar alternatif mesin diesel. Zeolit dipilih karena mampu menurunkan kadar sulfur yang berbahaya bagi efektivitas kinerja mesin (Wicakson, 2020). Penelitian telah dilakukan untuk menganalisis potensi oli bekas menjadi MFO dengan jenis MFO 180 dengan *acid clay treatment*. Penelitian ini menggunakan HCl berkonsentrasi 2 M dengan volume 10 mL dan variasi massa adsorben 20 g, 26,5 g, dan 33 g. Pengujian oli bekas menjadi MFO 180 mencakup beberapa karakteristik utama bahan bakar yaitu, viskositas kinematik 50 ℃, densitas 15 ℃, kadar sulfur, kadar air, titik nyala, dan titik tuang.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa variabel, antara lain variabel bebas yaitu massa adsorben zeolit, variabel terikat yaitu viskositas kinematik 50 ℃, densitas 15 ℃, kadar sulfur, kadar air, titik nyala, dan titik tuang, serta variabel kontrol yaitu oli bekas 200 mL dan HCl 2 M 10 mL. Konsentrasi dan volume HCl didasari oleh penelitian dari Annisa (2024) bahwa HCl 2 M 10 mL/200 mL oli bekas mampu menurunkan kadar logam berat Fe tertinggi sebesar 66%. Kemudian adsorben yang digunakan adalah zeolit dengan memvariasikan massa adsorben antara lain 20 g/200 mL oli bekas, 26,5 g/200 mL oli bekas, dan 33 g/200 mL oli bekas. Variasi massa zeolit didasari oleh penelitian dari Annisa (2024) bahwa massa zeolit 20 g/200 mL oli bekas merupakan konsentrasi optimum dan Rahmadhaniar, et al. (2020) bahwa massa zeolit 26,5 g/200 mL oli bekas merupakan konsentrasi optimum, serta massa zeolit 33 gr dipilih sebagai variasi eksperimental. Tiap variasi dilakukan secara duplo untuk mengetahui keakuratan hasil perhitungan.

Tabel 1. Variabel Penelitian

Kode	Variasi Massa Adsorben	Senyawa Asam	Sampel
A	Zeolit 20 g	HCl 2M 10 mL	Oli Bekas 200 mL
B	Zeolit 26,5 g		
C	Zeolit 33 g		

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

2.2 Penelitian Laboratorium

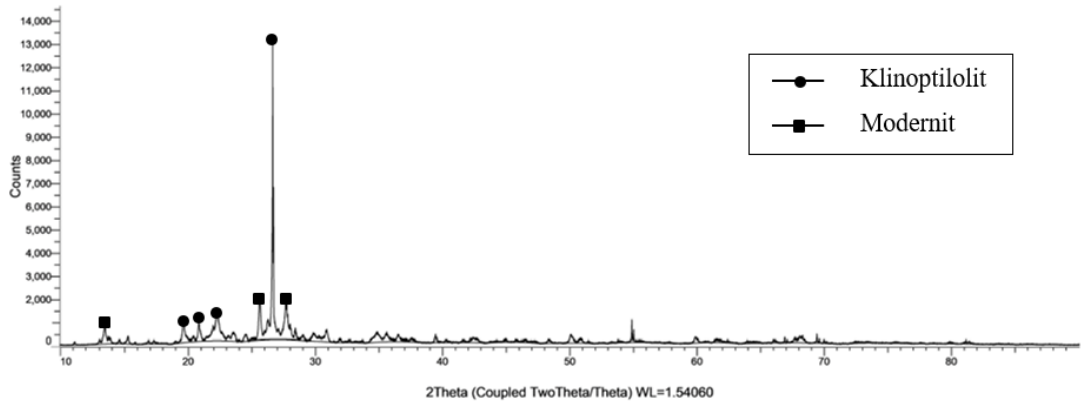
Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan antara lain, preparasi dan aktivasi zeolit, uji karakteristik zeolit, *pre-treatment* oli bekas, pengolahan oli bekas dengan *acid clay treatment,* dan uji karakteristik oli bekas.

- Preparasi dan Aktivasi Zeolit
  Zeolit sebanyak 650 g direndam aquades 1,3 L (1:2) dan dihomogenkan pada kecepatan 100 rpm pada suhu ± 25 ℃ selama 3 jam. Hasil endapan disaring dan dikeringkan di dalam oven bersuhu 110 ℃ selama 6 jam. Setelah kering, zeolit diayak sebesar 100 mesh kemudian diambil sebanyak 600 g untuk diaktivasi ke dalam 1,2 L HCl 2 M (1:2). Larutan diaduk selama 4 jam dengan kecepatan 100 rpm pada suhu 70 ℃. Larutan disaring dan dicuci hingga pH-nya netral menggunakan aquades. Zeolit yang telah netral lalu dikeringkan di dalam oven bersuhu 110 ℃ selama 12 jam. Ayak kembali zeolit yang telah kering dengan ayakan 100 mesh (Annisa, 2024).
- Uji Karakteristik Zeolit
  Pengujian karakteristik zeolit dilakukan dengan uji XRD, SEM-EDX, dan SAA-BET. Uji XRD dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral zeolit (Mbiliyora, 2024). Uji SEM-EDX dilakukan untuk mengetahui morfologi dan komposisi zeolit (Dera, 2018). Uji SAA-BET untuk mengetahui luas permukaan aktif pada zeolit (Sholikhah, et al., 2021).
- *Pre-Treatment* Oli Bekas
  Oli bekas disaring dengan corong *buchner* dan *vacuum pump*. Filtrat diambil dan diaduk pada suhu 50 ℃ selama 1 jam (Kevin et al., 2023).
- Pengolahan Oli Bekas dengan *Acid Clay Treatment*
  Oli bekas sebanyak 200 mL ditambahkan dengan HCl 2 M 10 mL dan diaduk dengan kecepatan 100 rpm ke masing-masing reaktor selama 3 jam. Larutan didiamkan selama 24 jam hingga terbentuk 2 lapisan dan dipisahkan. Lapisan di atas diambil dan ditambahkan zeolit sesuai variasi massanya, kemudian diaduk pada kecepatan 100 rpm selama 4 jam. Filtrat diambil pada tiap-tiap reaktor sebanyak 100 mL untuk diuji karakteristiknya (Oey et al., 2023).
- Uji Karakteristik Oli Bekas
  Pengujian karakteristik oli bekas dilakukan untuk mengetahui perbedaan oli bekas sebelum dan setelah diolah. Karakteristik yang diuji antara lain, viskositas kinematik 50 ℃, densitas 15 ℃, kadar sulfur, kadar air, titik nyala, dan titik tuang dengan spesifikasi MFO berdasarkan Kepdirjen Migas No. 0179.K/10/DJM.S/2019. Viskositas kinematik 50 ℃ diuji untuk mengetahui nilai hambatan aliran bahan bakar saat megalami tegangan, densitas 15 ℃ diuji untuk menghindari terjadinya penggumpalan dalam proses pembakaran, kadar sulfur diuji untuk menghindari kandungan sulfur berlebih dalam bahan bakar yang dapat menyebabkan kerusakan pada mesin pembakaran, kadar air diuji untuk menghindari kandungan air berlebih dalam bahan bakar yang dapat menimbulkan korosif pada mesin pembakaran jika bercampur dengan kadar sulfur, titik nyala diuji untuk mengetahui suhu terendah dari bahan bakar dapat terbakar, dan titik tuang diuji untuk mengetahui suhu terendah dari bahan bakar masih dapat mengalir atau tidak membeku.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil Uji XRD Zeolit

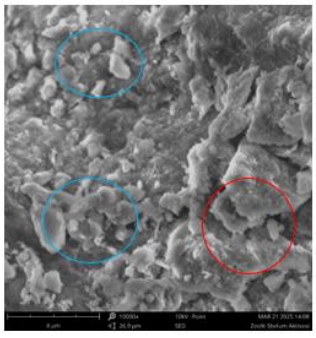
Hasil XRD menunjukkan puncak 2θ pada sekitar 13,43°; 19,63°; 20,81°; 22,26°; 25,62°; 26,62°; dan 27,69°. Puncak 2θ tersebut kemudian dibandingkan dengan referensi standar JCPDS. Puncak 2θ pada 19,63°; 20,81°; 22,26°; dan 26,62° menunjukkan adanya fasa klinoptilolit berdasarkan data JCPDS 47-1870 dan puncak 2θ pada 13,43°; 25,62°; dan 27,69° menunjukkan adanya fasa modernit berdasarkan data JCPDS 06-0239. Zeolit dengan mineral klinoptilolit memiliki rasio Si/Al yang tinggi sehingga tahan pada perlakuan asam dan panas (Musseng, 2021), sedangkan zeolit dengan mineral modernit memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi (Fitriyah, 2016).



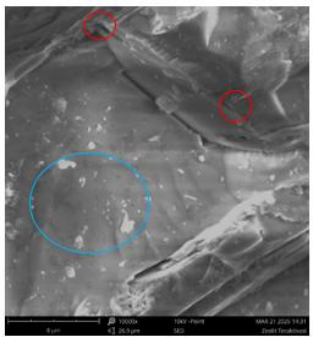
Gambar 1. Difraktogram Zeolit Alam

3.2 Hasil Uji SEM-EDX Zeolit

Hasil SEM menunjukkan morfologi zeolit sebelum diaktivasi dengan HCl 2 M memiliki bentuk tidak beraturan, menggumpal, dan tidak membentuk bidang datar yang dapat dilihat pada bagian yang diberi tanda lingkaran pada Gambar 2. Bentuk-bentuk ini dikaitkan dengan keberadaan zat pengotor seperti kuarsa dan korundum (Side et al., 2023). Pengaktivasian dengan HCl 2 M menyebabkan perubahan morfologi menjadi lebih teratur, membentuk bidang datar, dan sudut tajam yang dapat dilihat pada tanda lingkaran pada Gambar 3. Hal ini menandakan bahwa aktivasi



Gambar 2. Morfologi Zeolit Sebelum Diaktivasi



Gambar 3. Morfologi Zeolit Setelah Diaktivasi

asam mampu menghilangkan fase amorf (tak beraturan) dan memperkuat karakter kristalinnya,sehingga meningkatkan kemurnian zeolit dan memperkaya kandungan silika dan alumina aktif (Huntley et al., 2021).

Selain pengujian SEM, dilakukan pula pengujian EDX yang menunjukkan perbedaan komposisi yang terkandung pada zeolit sebelum dan setelah diaktivasi dengan HCl 2 M. Hasil uji EDX pada zeolit sebelum dan setelah diaktivasi dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Uji EDX pada Zeolit Sebelum dan Setelah Diaktivasi

Unsur	Sebelum Aktivasi		Setelah Aktivasi	
	% Atom	% Berat	% Atom	% Berat
O	69,48	56,15	71,08	59,27
Si	22,00	31,22	25,77	37,72
Al	5,95	8,11	1,05	1,47
K	1,82	3,60	0,00	0,00
Mg	0,75	0,92	0,00	0,00
N	0,00	0,00	2,10	1,54

Rasio Si/Al pada zeolit mengalami peningkatan setelah diaktivasi menggunakan HCl, sehingga mengindikasikan bahwa zeolit tersebut memiliki kemampuan penyerapan yang kuat (Musseng, 2021). Peningkatan unsur O juga terjadi akibat pemutusan ikatan yang energi disosiasinya rendah (Al-O) dan membentuk gugus silanol (Si-OH), mengakibatkan struktur kristal zeolit terbentuk lebih sempurna dan meningkatkan kristalinitasnya sehingga baik digunakan sebagai adsorben (Side et al., 2023). Zat-zat pengotor seperti K dan Mg juga menghilang dari permukaan zeolit setelah dilakukan aktivasi dengan HCl, mengakibatkan peningkatan luas permukaan zeolit sehingga penyerapan kontaminan menjadi lebih baik (Anggraini et al., 2022). Kadar nitrogen yang terdeteksi pada pengujian XRD ini diperkirakan berasal dari teradsorpsinya gas nitrogen dari udara sekitar selama penelitian. Namun, kadar nitrogen ini tidak berpengaruh terhadap kinerja zeolit (Khoramzadeh et al., 2019).

3.3 Hasil Uji SAA-BET Zeolit

Hasil uji SAA-BET menunjukkan adanya peningkatan rata-rata volume gas nitrogen yang teradsorpsi, serta peningkatan luas permukaan spesifik pada zeolit setelah diaktivasi dengan HCl. Hal ini menyatakan bahwa semakin tinggi rata-rata volume gas nitrogen yang teradsorpsi, maka semakin besar luas permukaan aktif pada zeolit. Peningkatan ini terjadi karena hilangnya zat pengotor dari struktur zeolit sehingga membuka permukaan aktif. Oleh karena itu, kemampuan adsorpsi pada zeolit juga semakin kuat (Syuhada, 2023).

Tabel 3. Hasil Uji SAA-BET Zeolit Sebelum dan Setelah Aktivasi

Parameter	Zeolit	
	Sebelum Aktivasi	Setelah Aktivasi
Rata-Rata Volume Gas N_2 yang Teradsorpsi (cc/g)	6,192	9,522
Luas Permukaan Spesifik (m^2/g)	20,873	30,494

3.4 Hasil Uji Karakteristik Oli Bekas

Karakteristik oli bekas sebelum dan setelah diolah menggunakan metode *acid clay treatment* perlu diketahui agar dapat membandingkan kualitas oli bekas pada kondisi awal dengan kualitas oli bekas setelah pengolahan yang diharapkan mampu memenuhi spesifikasi MFO 180.

Tabel 4. Hasil Uji Karakteristik Oli Bekas Sebelum dan Setelah Pengolahan

Karakteristik	Standar MFO	Variasi X (Kondisi Awal)	Variasi A (Zeolit 20 g)	Variasi B (Zeolit 26,5 g)	Variasi C (Zeolit 33 g)
Viskositas Kinematik 50℃ (cSt)	Maks. 180	55,36	55,61	55,46	55,45
Densitas 15 ℃ (kg/m^3)	Maks. 991	886	885	885,45	885,55
Kadar Sulfur (% m/m)	Maks. 0,5	0,567	0,549	0,553	0,549
Kadar Air (% v/v)	Maks. 0,5	0,87	0,622	0,935	0,935
Titik Nyala (℃)	Min. 60	105	116	117,25	109
Titik Tuang (℃)	Maks. 30	-22,5	-18	-24	-27

Tabel 4 menunjukkan bahwa di antara 6 (enam) karakteristik yang diuji, ada 2 (dua) karakteristik yang masih belum memenuhi standar baku mutu yaitu kadar sulfur dan kadar air. Namun, dapat dilihat pada variasi A dengan massa adsorben zeolit 20 g bahwa perolehan nilai kadar sulfur dan kadar airnya paling mendekati batas maksimum dibandingkan dengan variasi lainnya. Analisis setiap parameter tercantum pada penjelasan di bawah ini.

3.4.1 Viskositas Kinematik 50 ℃

Nilai viskositas kinematik 50 ℃ pada kondisi awal disebabkan oleh pemecahan rantai karbon dan terbentuknya zat-zat kontaminan akibat berkontak dengan suhu tinggi selama proses pengoperasiannya. Nilai viskositas kinematik pada variasi A mengalami kenaikan akibat hilangnya kontaminan penyebab penurunan viskositas kinematik. Namun, penambahan massa adsorben zeolit mengakibatkan penurunan nilai viskositas kinematik akibat proses adsorpsi yang telah mencapai titik jenuh (Da Cunha et al., 2022).

3.4.2 Densitas 15 ℃

Nilai densitas 15 ℃ pada kondisi awal cenderung lebih tinggi dikarenakan terkandung kontaminan seperti logam berat, *sludge, acid,* air, dan lainnya (Da Cunha et al., 2022). Setelah pengolahan dengan *acid clay treatment,* nilai densitas menurun dikarenakan kontaminan tersebut telah diadsorpsi oleh zeolit (Da Cunha et al., 2022). Seiring penambahan variasi massa zeolit, nilai densitas mengalami kenaikan namun tidak signifikan. Hal ini sama seperti penelitian dari Lathifah et al. (2019) yang menggunakan adsorben bentonit, Sonjaya & Rahmasari (2019) yang menggunakan adsorben pasir silika, karbon aktif, dan bentonit, serta Da Cunha et al. (2022) yang menggunakan adsorben zeolit. Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa dengan metode *acid clay treatment* dengan variasi jenis dan massa adsorben tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai densitas.

3.4.3 Kadar Sulfur

Nilai kadar sulfur pada kondisi awal disebabkan oleh adanya gesekan antar komponen mesin dan masuknya senyawa sulfur dari bahan bakar. Selain itu, zat aditif dan hidrokarbon pada oli juga terurai dan menghasilkan senyawa sulfur selama pengoperasiannya (Udonne & Bakare, 2013; dalam Anisuzzaman et al., 2021). Penurunan kadar sulfur oli bekas pada variasi A menunjukkan

bahwa proses adsorpsi cukup efektif dalam menghilangkan senyawa sulfur. Namun, pada variasi B mengalami kenaikan dan pada variasi C kembali menurun. Perubahan nilai ini tidak signifikan dan cenderung memiliki nilai yang sama, walaupun masih melebihi batas maksimum. Pada penelitian ini, suhu yang digunakan pada metode *acid clay treatment* adalah 25 ℃, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Zhitao et al. (2004) dalam Honarmand et al. (2020) menyatakan bahwa 45 ℃ merupakan suhu optimal dalam desulfurisasi pada proses adsorpsi menggunakan adsorben zeolit. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan terhadap variasi suhu pada metode *acid clay treatment.*

3.4.4 Kadar Air

Nilai kadar air pada kondisi awal disebabkan oleh masuknya air akibat kebocoran sistem pendingin, air hujan, dan lain-lain (Da Cunha et al., 2022). Penurunan kadar air pada variasi A menunjukkan kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi air pada oli bekas. Namun, seiring penambahan adsorben menyebabkan kadar air meningkat. Menurut Muckti (2012) dalam Kevin et al. (2023), kadar air yang masih tinggi setelah pengolahan dapat disebabkan oleh lama waktu pengovenan sampel dan waktu kontak antara senyawa asam kuat HCl dan adsorben zeolit. Harahap et al. (2021) tingginya kadar air juga dapat dipengaruhi oleh lamanya oli bekas digunakan dalam proses operasional, yang berpotensi meningkatkan kandungan air di dalamnya. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan terhadap *treatment* tambahan untuk menurunkan kadar air seperti purifikasi.

3.4.5 Titik Nyala

Nilai titik nyala pada kondisi awal disebabkan oleh proses termal yang dialami oleh oli bekas selama pengoperasiannya sehingga senyawa hidrokarbon ringan menguap dan mengakibatkan peningkatan volatilitas yang membuatnya mudah terbakar di suhu rendah. Namun, penambahan massa adsorben yang berlebih pada pengolahan *acid clay treatment* menjadikan titik nyala menurun karena dapat meningkatkan nilai kalor. Nilai kalor yang tinggi mengandung senyawa hidrokarbon yang menyebabkan tingginya volatilitas (Nasution et al., 2025).

3.4.6 Titik Tuang

Nilai titik tuang pada kondisi awal disebabkan oleh hilangnya komponen aditif yang berfungsi untuk mempertahankan kestabilan viskositas oli pada suhu rendah yang berperan penting dalam menjaga kemampuan oli agar tetap mengalir dalam kondisi suhu dingin. Proses adsorpsi pada variasi A belum optimal sehingga senyawa berat masih tersisa dalam oli bekas dan meningkatkan nilai titik tuang. Pada saat dilakukan penambahan massa adsorben, terjadi penurunan titik tuang pada variasi B dan variasi C yang disebabkan oleh peningkatan efisiensi adsorben dalam menghilangkan fraksi berat penyebab pembekuan, seperti lilin dan parafin (Bendjerad et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Hasil uji XRD zeolit diklasifikasikan sebagai zeolit tipe klinoptilolit dan mordenit. Hasil SEM-EDX zeolit menunjukkan bahwa terjadi perubahan morfologi zeolit teraktivasi HCl menjadi lebih teratur sehingga meningkatkan rasio Si/Al. Hasil uji SAA-BET zeolit menunjukkan perluasan permukaan aktif zeolit setelah diaktivasi dengan HCl. Hasil analisis sampel pada variasi A, B, dan C dengan pengolahan *acid clay treatment* berdasarkan 6 (enam) parameter yang menunjukkan

kualitas MFO antara lain, viskositas kinematik 50 ℃, densitas 15 ℃, kadar sulfur, kadar air, titik nyala, dan titik tuang, kadar sulfur dan kadar air belum memenuhi standar MFO berdasarkan Kepdirjen No. 0179.K/10/DJM.S/2019. Variasi A merupakan variasi terbaik dengan perolehan jumlah karakteristik yang paling mendekati standar baku mutu MFO terbanyak dibandingkan dengan variasi massa zeolit lainnya. Namun, keseluruhan variasi belum memenuhi standar MFO yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait penurunan kadar sulfur dan kadar air.

REFERENSI

Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiah, F. (2022). Pengaruh pH dalam pengolahan air limbah laboratorium dengan metode adsorpsi untuk penurunan kadar logam berat Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 20*(2), 345–355. https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355

Anisuzzaman, S. M., Jumaidi, M. H., & Nasir, N. N. M. (2021). Used lubricating oil recovery process and treatment methods: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1195*(1), 012031. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1195/1/012031

Annisa, N. (2024). Analisis penurunan konsentrasi logam besi (Fe) pada minyak pelumas bekas dengan metode acid clay treatment menggunakan zeolit teraktivasi asam klorida (HCl) sebagai adsorben (Skripsi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan).

Bendjerad, A. M., Cheikh, N., Benmehdi, H., Montrelay, N., Houessu, K. J., Pierens, X., Ben-Habib, K., Goullieux, A., & Dheilly, R. M. (2023). Valorization of used lubricating oils as a possible base oil source to avoid groundwater pollution in the South of Algeria. *Energies, 16*(1), 1–17. https://doi.org/10.3390/en16010030

Da Cunha, T. M., Fone, M. Y. B, Tawa, B. D., & Ola, A. R. B. (2022). Karakteristik pelumas bekas hasil adsorpsi menggunakan arang batang Kesambi (*Schleichera oleosa*) dan zeolit alam Ende teraktivasi H_3PO_4. *Chemistry Notes, 4*(1), 1–11. https://doi.org/10.35508/cn.v4i(1).7734

Dera, N. S. (2018). Pengaruh pH larutan terhadap nukleasi dan pertumbuhan kristal barium sulfat di dalam pipa beraliran laminar: Pengamatan kristal menggunakan SEM-EDX dan XRD. *Jurnal Ilmu Teknik, 1*(2), 2–9.

Diphare, M. J., Muzenda, E., Pilusa, T. J., & Mollagee, M**.** (2013, 25-26 Agustus). *A comparison of waste lubricating oil treatment techniques*. Dalam *Prosiding Konferensi Internasional ke-2 tentang Lingkungan, Pertanian, dan Ilmu Pangan (ICEAFS'2013)* (hal. 106-109). Kuala Lumpur, Malaysia.

Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2019). *Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi No. 0179.K/DJM.S/2019*.

Fitriyah, F. (2016). Interkalasi xilenol orange pada zeolit alam Lampung sebagai elektroda zeolit termodifikasi. *Jurnal Kimia dan Pendidikan, 1*(2), 162–175.

Harahap, M. R., Mursidah, & Alfizatunnisa, A. (2021). Analisis kadar air dan flash point pada sampel pelumas bekas di PT Pupuk Iskandar Muda. *Amina, 3*(1), 13–17.

Hidayat, S., Hidayatullah, M., Jaya, A., & Topan, P. A. (2023). Analysis of the effectiveness of using marine fuel oil (MFO) on diesel engine performance work cycle parameters at PT Sumber Rejeki Power, Sumbawa Besar. *Jurnal Altron: Jurnal Elektronika, Sains dan Sistem Energi, 2*(2), 216–222. https://doi.org/10.51401/altron.v2i02.3243

Honarmand, S., Mousavi, E. S., & Karimzadeh, R. (2020). Synthesis of zeolite Y from kaolin and its model fuel desulfurization performance: Optimized by Box-Behnken method. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 39*(1), 79–90.

Huntley, G. M., Moore, J. D., & Smith, P. J. (2021). Hydrochloric acid modification and lead removal studies on naturally occurring zeolites from Nevada, New Mexico, and Arizona. *Processes*, 9(7). https://doi.org/10.3390/pr9071238

Kevin, S. R., Pratiwi, I. A., & Yuliani, N. (2023). Analisis penurunan konsentrasi logam besi (Fe) pada minyak pelumas bekas menggunakan metode acid clay treatment dengan substitusi bentonit sebagai adsorben. *Jurnal Teknologi*, 6(2623), 280–284.

Khoramzadeh, E., Mofarahi, M., & Lee, C.-H. (2019). Equilibrium adsorption study of CO_2 and N_2 on synthesized zeolites 13X, 4A, 5A, and Beta. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 64(12), 5648–5664. https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00690

Lathifah, T., Yuliani, N., & Ayu, G. (2019). Bentonit teraktivasi asam sulfat sebagai adsorben. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 12(2), 100–106.

Mbiliyora, C. (2024). Analisis karakteristik mineral pada pasir besi dengan metode X-ray diffraction (XRD) di Pantai Nangaba Kecamatan Ende Flores. *Jurnal Geologi Indonesia*, 9(1), 9–12.

Musseng, M. A. (2021). Studi dealuminasi zeolit menggunakan asam sitrat dari jeruk nipis (Citrus aurantifolia Swingle) sebagai bahan adsorben. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(3), 150–160.

Muzhaffar, I., Nasution, P. A. L., & Lathifah, T. (2021). Pengolahan oli bekas menjadi bahan bakar diesel dengan metode pemurnian menggunakan asam klorida dan natrium hidroksida. *E-Proceeding of Engineering*, 8(2), 1884–1890.

Nasution, P. A. L., Rahmadhaniar, A., & Sonjaya, A. N. (2025). Potensi oli bekas sebagai bahan bakar kompor dapat ditingkatkan melalui proses pre-treatment. *Jurnal Energi Terbarukan*, 10(2021).

Nuruddin, A., Khoramzadeh, E., & Oey, Y. W. (2020). Studi literatur: Pengolahan dan pemanfaatan limbah B3 (oli bekas). *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 5(1), 108–112.

Oey, Y. W., Sholikhah, H. I., & Muzhaffar, I. (2023). Analisis penurunan konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada limbah berbahaya dan beracun pelumas bekas menggunakan metode acid clay treatment dengan substitusi bentonit sebagai adsorben. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 6(2623), 275–279.

Pratiwi, I. A., Naswir, M., & Guspianto. (2024). Analisis pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) di industri perhotelan Kota Jambi. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 24(3), 2403–2412. https://doi.org/10.46799/jsa.v4i2.562

Rahmadhaniar, A., Sholikhah, H. I., & Lathifah, T. (2020). Lead adsorption in lubricant waste using zeolite. *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(1), 1–7. https://doi.org/10.22146/jrekpros.49489

Sholikhah, H. I., Putri, H. R., & Inayati. (2021). Pengaruh konsentrasi aktivator asam fosfat (H_3PO_4) pada pembuatan karbon aktif dari sabut kelapa terhadap adsorpsi logam kromium. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 5(1), 3–8.

Side, S., Sonjaya, A. N., & Sholikhah, H. I. (2023). The effect of acid treatment on the characteristics of modernite zeolite. *Sainsmat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 12(2), 114–123. https://doi.org/10.35580/sainsmat122511932023

Sonjaya, A. N., & Rahmasari, F. (2019). Pengujian pelumas bekas SAE 15W-40 API CI-4. *Jurnal Teknologi*, 7(1), 76–85. https://doi.org/10.31479/jtek.v7i1.33

Suparta, I. N., Guhhri, A., & Septiadi, W. N. (2015). Daur ulang oli bekas menjadi bahan bakar diesel dengan proses pemurnian menggunakan media asam sulfat dan natrium hidroksida. *Jurnal METTEK*, 1(2), 9–19.

Syuhada, N. (2023). Fabrikasi dan uji luas permukaan material microsphere-nanorod titanium dioksida. *Spin*, 5(1), 146–155. https://doi.org/10.20414/spin.v5i1.7157

Wicakson, M. A. (2020). *Pembuatan Sulfur Trap Pada Alat Gas Chromatograph Dengan Menggunakan Zeolit Yang Diaktivasi Menggunakan NaOH* (Skripsi Sarjana, Universitas Muhammadiyah Palembang).