



Deoksigenasi Katalitik Metil Ester Asam Lemak Menjadi Biohidrokarbon Menggunakan Katalis Cr₂O₃/Zeolit

(Catalytic Deoxygenation of Fatty Acid Methyl Esters into Biohydrocarbons using Cr₂O₃/Zeolite Catalysts)

Isalmi Aziz^{a*}, Nanda Saridewi^b, Fitri Febriyani^a, Lisa Adhani^c

^aProgram Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta
Jalan. Ir. H. Juanda No 95, Ciputat, Tangerang Selatan, 15412, Indonesia

^bProgram Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta
Jalan Ir. H. Juanda No 95, Ciputat, Tangerang Selatan, 15412, Indonesia

^cJurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya
Jalan RM Harsono No 67, Pasar Minggu, Jakarta Selatan, 12550, Indonesia

*Corresponding author: isalmikimia@uinjkt.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.19.2.72521.170-176

Received 25 March 2023, Revised 11 June 2023, Accepted 20 July 2023, Published 30 September 2023

Kata kunci:

biohidrokarbon;
deoksigenasi katalitik;
metil ester asam lemak;
zeolit alam.

ABSTRAK. Deoksigenasi katalitik merupakan proses yang dapat mengkonversi metil ester asam lemak (*fatty acid methyl esters*, FAME) menjadi biohidrokarbon seperti gasolin, kerosin dan diesel. Katalis yang digunakan berupa Cr₂O₃ dengan penyangga zeolit alam. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh konsentrasi Cr₂O₃ terhadap karakteristik dan aktivitas katalitik katalis pada deoksigenasi katalitik FAME menjadi biohidrokarbon. Katalis dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR DAN SAA. Semua katalis menunjukkan puncak Cr₂O₃ pada 2θ 24,5°; 33,6°; 36,2°; 54,8° dan ukuran kristal 19 – 21 nm. Serapan pada bilangan gelombang 470 – 900 cm⁻¹ mengindikasikan adanya peregangan Cr–O. Peningkatan konsentrasi Cr₂O₃ menyebabkan luas permukaan menjadi turun. Katalis Cr₂O₃/zeolit 1% menunjukkan aktivitas terbesar dengan konversi 60,36% dan selektivitas biohidrokarbon 43,15% yang terdiri dari gasolin 7,23%, kerosin 15,08% dan diesel 20,84%.

Keywords:

biohydrocarbon;
catalytic deoxygenation;
fatty acid methyl ester;
natural zeolite.

ABSTRACT. Catalytic deoxygenation is a process that can convert fatty acid methyl esters (FAME) into biohydrocarbons such as gasoline, kerosene, and diesel. The catalyst used is Cr₂O₃ with natural zeolite as support. This study aims to determine the effect of Cr₂O₃ concentration on the characteristics and catalytic activity in the catalytic deoxygenation of FAME into biohydrocarbons. The catalysts were characterized using XRD, FTIR, and SAA. All catalysts show a Cr₂O₃ peak at 2θ 24.5°, 33.6°, 36.2°, 54.8° and a crystal size of 19 – 21 nm. The Cr–O stretching is observable at wavenumbers 470 – 900 cm⁻¹. Increasing the concentration of Cr₂O₃ causes the surface area to decrease. Cr₂O₃/zeolite 1% catalyst showed the most excellent activity with 60.36% conversion and 43.15% selectivity for biohydrocarbons consisting of 7.23% gasoline, 15.08% kerosene, and 20.84% diesel.

PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan salah satu efek dari penggunaan bahan bakar fosil karena emisi gas CO₂ yang dihasilkan. Usaha untuk mengurangi efek ini muncul berbagai energi alternatif, salah satunya adalah biohidrokarbon. Biohidrokarbon adalah salah satu jenis *biofuel* generasi kedua yang dapat dihasilkan dari minyak nabati sehingga bersifat dapat diperbarui dan ramah lingkungan (Kamaruzaman et al., 2020). Gas CO₂ yang dihasilkan akan digunakan kembali oleh tumbuhan dalam proses fotosintesis sehingga menghasilkan *zero waste* (Hongloi et al., 2021). Penggunaan biohidrokarbon juga merupakan salah satu cara untuk mengantisipasi penurunan cadangan bahan bakar fosil. Minyak nabati berupa minyak goreng bekas dapat dikonversi menjadi biohidrokarbon. Minyak ini merupakan limbah industri makanan dan rumah tangga. Penggunaannya dapat menurunkan biaya proses (harga murah) sekaligus dapat mengatasi permasalahan limbah. Konversi minyak goreng

Cite this as: Aziz, I., Saridewi, N., Febriyani, F., and Adhani, L., 2023. Catalytic Deoxygenation Fatty Acid Methyl Esters Menjadi Biohidrokarbon Menggunakan Katalis Cr₂O₃/Zeolit. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19(2), 170-176. <https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.19.2.72521.170-176>.

bekas menjadi biohidrokarbon dapat dipercepat terlebih dahulu melalui reaksi transesterifikasi sehingga dihasilkan *fatty acid methyl ester* (FAME) (Yu et al., 2022), selanjutnya FAME dikonversi menjadi biohidrokarbon.

Deoksigenasi katalitik merupakan metode yang sudah terbukti dalam menghasilkan biohidrokarbon. Oksigen dihilangkan melalui rute reaksi dekarboksilasi dan dekarbonilasi. Proses ini tidak membutuhkan gas hidrogen sehingga biaya proses lebih murah (Baharudin et al., 2020). Safa Gamal et al. (2019) menggunakan proses deoksigenasi katalitik untuk menghasilkan biohidrokarbon (90%) dengan selektivitas *green diesel* 72% dari *palm fatty acid distillate*. Katalis logam mulia menunjukkan aktivitas yang sangat baik pada proses deoksigenasi katalitik tetapi harganya yang mahal menjadi kekurangannya. Logam transisi seperti Ni, Cr, Co, dan Cu juga menunjukkan aktivitas katalitik yang baik dan harganya murah dibandingkan logam mulia. Wijaya et al. (2013) menggunakan katalis Cr/H-Zeolit (1%) pada *hydrocracking* minyak jelantah menghasilkan konversi 82,05% dengan fraksi gasolin terbesar. Aziz et al. (2020) mempelajari pengaruh konsentrasi Cr₂O₃ yang diimpregnasikan pada penyangga karbon aktif pada *catalytic cracking* minyak jarak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis dengan konsentrasi Cr₂O₃ 5% menghasilkan aktivitas katalitik terbesar dengan konversi 67,77% dan fraksi terbesar adalah gasolin (36,97%).

Pada penelitian ini digunakan kromium oksida dengan penyangga zeolit alam sebagai katalis pada deoksigenasi katalitik FAME menjadi biohidrokarbon. Zeolit alam dipilih sebagai penyangga karena memiliki pori, stabilitas termal yang tinggi dan cukup banyak tersedia (Nugrahaningtyas et al., 2016). Selain itu, zeolit mempunyai situs asam Bronsted dan Lewis yang dapat menunjang aktivitas katalis (Aziz et al., 2022). Konsentrasi Cr₂O₃ yang diimpregnasikan divariasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap karakteristik katalis dan aktivitas katalitiknya.

METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan terdiri dari reactor *autoclave* (*stainless steel*), *Gas Chromatography-Mass Spectrometer* (GC-MS) Shimadzu QP 2010, *X-Ray Diffraction* Rigaku MiniFlex 600, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Shimadzu, *Surface Area Analyzer* Quantachrome Nova Win dan alat gelas. Bahan-bahan yang digunakan adalah zeolit alam dari CV. Minatama Lampung, minyak goreng bekas (Rumah makan Hoesen di daerah Ciputat), AgNO₃ p.a (Merck), Cr(NO₃)₃.9H₂O p.a (Merck) dan NH₄Cl p.a (Merck).

Sintesis dan Karakterisasi Katalis Cr₂O₃/Zeolit

Zeolit alam yang sudah dicuci dengan akuades, dimasukkan ke dalam alat refluks dan ditambahkan larutan NH₄Cl 1 M. Proses berlangsung pada suhu 90 °C dan waktu 3 jam. Zeolit dipisahkan dengan cara penyaringan dan dicuci sampai pH netral. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi pada temperatur 450 °C sehingga diperoleh zeolit aktif (H-Zeolit). Selanjutnya impregnasi basah dilakukan menggunakan prekursor Cr(NO₃)₃.9H₂O dengan variasi konsentrasi 1%, 3%, dan 5% selama 6 jam dan hasil yang diperoleh kemudian dikeringkan. Zeolit yang sudah diimpregnasi selanjutnya dikalsinasi pada temperatur 500 °C sehingga diperoleh Cr₂O₃/zeolit (Aziz et al., 2021). Katalis ditentukan luas permukaannya menggunakan metode BET (*Brunauer Emmett Teller*) dengan instrumen *Surface Area Analyzer* (SAA) Quantachrome Nova Win. Katalis dimasukkan ke dalam tube, kemudian dilakukan *degassing* selama 2 jam pada suhu 200 °C sambil dialirkan gas N₂ pada tekanan 200 KPa. Jenis fasa katalis ditentukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) Rigaku MiniFlex 600 pada kondisi 40 kV, 25 mA dan sudut 5° – 90°. Berdasarkan data XRD (2θ dari puncak Cr₂O₃ tertinggi) digunakan untuk menghitung ukuran kristal menggunakan persamaan Debye Scherrer dengan nilai $k = 0,9$; $\lambda = 0,15406$. Penentuan gugus fungsi katalis menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Shimadzu. Sampel dihaluskan bersama dengan KBr dengan perbandingan 1:10 dan diukur pada panjang bilangan gelombang 400 – 4000 cm⁻¹.

Uji Aktivitas Katalis Cr₂O₃/Zeolit

Minyak goreng bekas konversi menjadi FAME melalui reaksi transesterifikasi. Metanol sebanyak 200 mL ditambahkan KOH (0,5 g) sambil diaduk sehingga membentuk larutan kalium metoksida. Kalium metoksida yang terbentuk dimasukkan ke dalam labu leher tiga dan ditambahkan minyak goreng bekas sebanyak 50 mL. Campuran dipanaskan pada suhu 60 °C dan direaksikan selama 1 jam sambil diaduk. Produk dimasukkan ke dalam corong pisah sehingga terbentuk 2 lapisan. Lapisan atas merupakan FAME dan lapisan bawah gliserol. FAME dipisahkan dari gliserol dan diukur volumenya. Komposisi yang terkandung ditentukan dengan GC-MS (Aziz, 2007). FAME selanjutnya dimasukkan ke dalam reaktor dan ditambahkan katalis (7% b/b FAME). Setelah reaktor ditutup dengan rapat, reaksi dijalankan selama 3 jam pada suhu 375 °C (Aziz et al., 2019). Produk dikeluarkan

dari reaktor dan dipisahkan dari katalis dengan cara penyaringan. Produk diuji komposisinya dengan GC-MS. Sampel diinjeksikan ke dalam kolom (fase diam DB5-MS UI, 30 m; 0,25 mm; 0,25 μm dan fase gerak gas Helium). Berdasarkan data area produk yang dihasilkan dapat dihitung konversi dan selektivitas biohidrokarbon pada masing-masing konsentrasi katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ menggunakan [Persamaan \(1\)](#) dan [\(2\)](#) ([Ashokkumar *et al.*, 2018](#)). Biohidrokarbon yang dihasilkan dikelompokkan menjadi gasolin ($\text{C}_5 - \text{C}_{12}$), kerosin ($\text{C}_{13} - \text{C}_{14}$) dan diesel ($\text{C}_{15} - \text{C}_{18}$) ([Istadi *et al.*, 2020](#)).

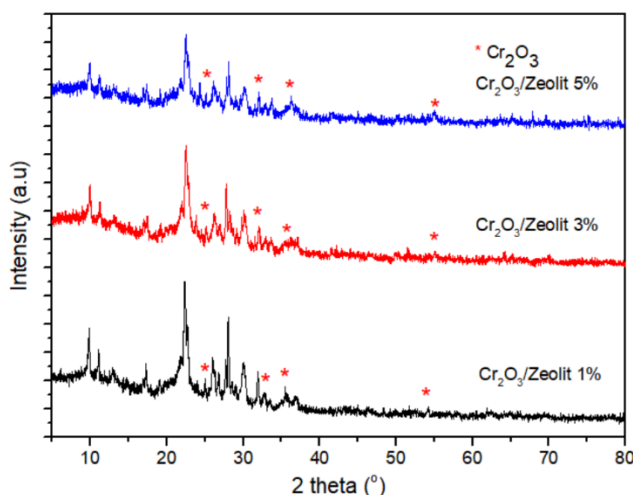
$$\text{Konversi} = \frac{\% \text{ Area Awal FAME} - \% \text{ Area Akhir FAME}}{\% \text{ Area Awal FAME}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Selektivitas} = \frac{\% \text{ Area Produk yang diinginkan}}{\% \text{ Area Total Produk}} \times 100\% \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Katalis

[Gambar 1](#) menunjukkan pola XRD semua katalis yang menunjukkan adanya puncak Cr_2O_3 pada 2θ : $24,5^\circ$; $33,6^\circ$; $36,2^\circ$ dan $54,8^\circ$ dengan indeks hkl 012, 104, 110 dan 116 (JCPDS No. 84-1616). Hal ini menunjukkan bahwa Cr_2O_3 telah berhasil diimpregnasi dipermukaan penyangga (zeolit). [Rahmani *et al.* \(2015\)](#) juga mendapatkan puncak Cr_2O_3 pada 2θ : $24,5^\circ$; $33,6^\circ$; $36,2^\circ$; $41,5^\circ$ dan $50,8^\circ$. Ukuran kristal dari Cr_2O_3 dihitung berdasarkan persamaan Debye Scherrer ($2\theta = 24,5^\circ$) seperti yang terlihat pada [Tabel 1](#). Ketiga katalis menghasilkan ukuran yang hampir sama yaitu 19 sampai 21 nm. Semakin kecil ukuran kristal maka aktivitas katalis akan semakin meningkat ([Ameen *et al.*, 2020](#)). Impregnasi Cr_2O_3 tidak mempengaruhi fasa kristal dari zeolit yaitu klinoptilolit. Fasa ini terdeteksi pada 2θ : $9,82^\circ$; $11,11^\circ$; $21,94^\circ$; $22,35^\circ$ dan $22,7^\circ$ (JCPDS No. 71-1425) dengan indeks hkl (020), (200), (331), (131), dan (421). Sistem kristal yang dihasilkan adalah *monoclinic*. Peningkatan konsentrasi Cr_2O_3 menyebabkan luas permukaan semakin kecil ([Tabel 1](#)).



Gambar 1. Pola XRD katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$.

Tabel 1. Luas permukaan dan ukuran kristal katalis.

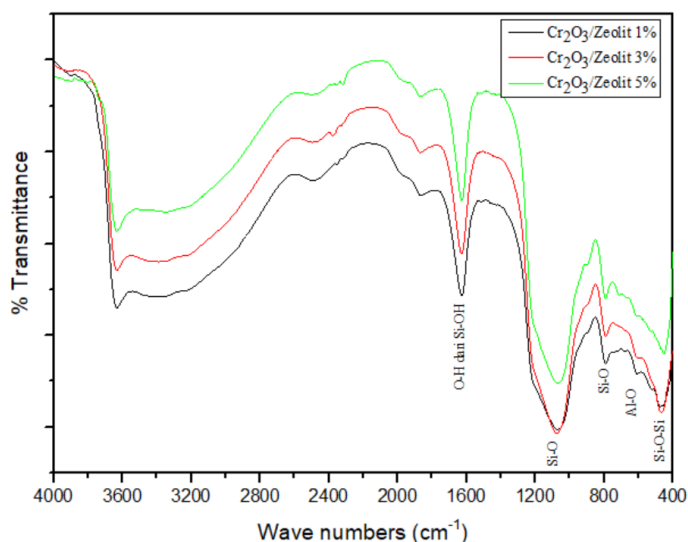
Katalis	Luas Permukaan (m^2/g)	Ukuran kristal (nm)
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1%	31,852	20,24
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 3%	28,653	21,07
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 5%	22,901	19,34

Keterangan :

Ukuran kristal dihitung pada $2\theta = 24,5^\circ$

Banyaknya jumlah Cr_2O_3 menyebabkan pori-pori penyangga menjadi tertutup sehingga luas permukaan menjadi turun. [Baharudin *et al.* \(2019\)](#) menyatakan, impregnasi logam dapat menutupi permukaan pori-pori penyangga sehingga permukaan menjadi turun. [Jeon *et al.* \(2022\)](#) juga mendapatkan penurunan luas permukaan, ketika konsentrasi Ni yang diimpregnasikan semakin tinggi. Hasil FT-IR ([Gambar 2](#)) menunjukkan tidak ada

perubahan posisi pita serapan setelah impregnasi Cr_2O_3 . Vibrasi tekuk Si–O–Si dari struktur aluminosilikat (zeolit) muncul pada daerah $500 - 400 \text{ cm}^{-1}$ teridentifikasi pada semua katalis. Pada daerah serapan $650 - 820 \text{ cm}^{-1}$ muncul vibrasi ulur simetri Si–O dan Al–O sekitar 620 cm^{-1} (Saraswati, 2016). Pada daerah serapan sekitar $1060 - 950 \text{ cm}^{-1}$ terdapat vibrasi ulur asimetri dari Si–O dan vibrasi tekuk O–H dari Si–OH pada $1870-1645 \text{ cm}^{-1}$.



Gambar 2. Spektrum FT-IR katalis.

Hasil Uji Aktivitas Katalis

Fatty acid methyl ester (FAME) yang dihasilkan dari transesterifikasi minyak goreng bekas sebanyak 200 mL atau 80% dari total produk. FAME mengandung senyawa terbesar metil linoleat 37,55% dan metil oleat 27,51% (Aziz et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa C18 paling banyak. Proses deoksigenasi katalitik menghasilkan produk cair dan dianalisis menggunakan GC-MS (Gambar S1). Konversi reaksi terbesar terdapat pada katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1% yaitu 60,36% (Tabel 2). Semakin besar konsentrasi Cr_2O_3 maka konversi yang dihasilkan semakin turun. Hal ini disebabkan pada konsentrasi Cr_2O_3 tinggi, luas permukaan yang dihasilkan paling rendah sehingga situs aktif katalis juga sedikit. Selektivitas biohidrokarbon yang dihasilkan juga sebanding dengan konversi, dimana katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1% menghasilkan selektivitas terbesar yaitu 43,15%. Katalis H-zeolit (tanpa Cr_2O_3) jika dibandingkan dengan konversi akan menghasilkan hasil yang lebih tinggi, yaitu sebesar 62,71%. Namun, selektivitas biohidrokarbon yang dihasilkan lebih rendah, yaitu sebesar 25,18% (Aziz et al., 2021). Rendahnya selektivitas dari H-zeolit disebabkan karena tidak adanya kandungan Cr_2O_3 sehingga tidak semua FAME terkonversi menjadi biohidrokarbon.

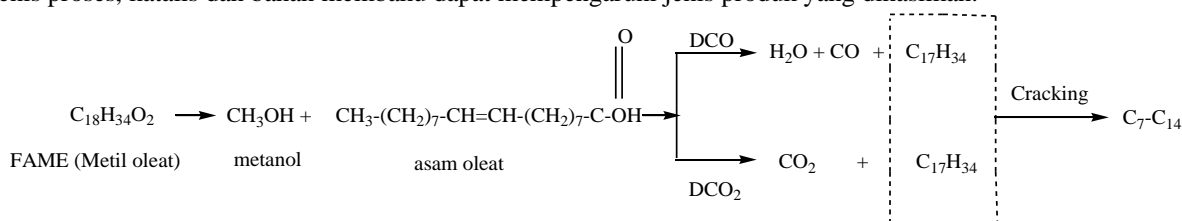
Tabel 2. Konversi dan selektivitas biohidrokarbon hasil deoksigenasi katalitik FAME.

Katalis	Konversi (%)	Selektivitas Biohidrokarbon (%)
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1%	60,36	43,15
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 3%	40,17	24,89
$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 5%	42,29	30,98

Penambahan komponen aktif Cr_2O_3 akan meningkatkan situs Lewis pada katalis sehingga deoksigenasi bisa berjalan maksimal. Adanya senyawa biohidrokarbon menunjukkan bahwa proses deoksigenasi telah berhasil dilakukan. Proses deoksigenasi dimulai dengan terjadinya hidrolisis pada FAME menjadi asam karboksilat (asam oleat) dan metanol (Gambar 3). Selanjutnya deoksigenasi (penghilangan oksigen) terjadi melalui rute dekarboksilasi (DCO_2) dan dekarbonilasi (DCO) (Gamal et al., 2020). DCO_2 menghasilkan senyawa alkena ($\text{C}_{17}\text{H}_{34}$) dan CO_2 . Adapun jalur DCO menghasilkan alkena yang sama ditambah CO dan H_2O . Jadi C_{17} yang dihasilkan merupakan hasil DCO dan DCO_2 dari asam oleat yang terdapat dalam FAME. Jika dilihat dari komposisi biohidrokarbon yang dihasilkan (Gambar 4), fraksi diesel menunjukkan selektivitas yang paling tinggi pada katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1% dan $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 3%. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi yang dominan pada kedua katalis ini adalah DCO dan DCO_2 . Selain itu juga terjadi reaksi *cracking* dari diesel menjadi kerosin dan gasolin.

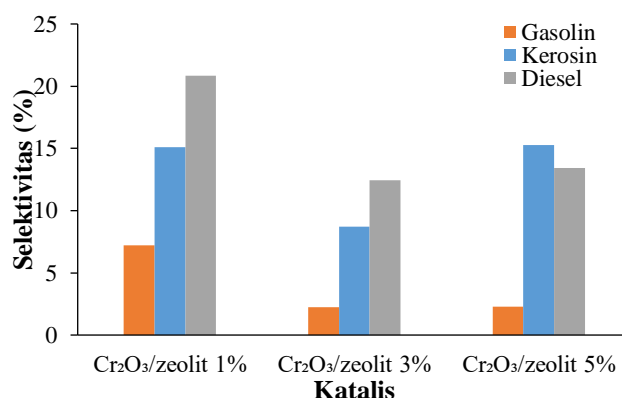
Pada katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 5% selektivitas kerosin lebih tinggi dibandingkan gasolin dan diesel. Banyaknya konsentrasi Cr_2O_3 yang diimpregnasikan mampu meningkatkan jalur reaksi *cracking*.

Sundaryano dan Budiyanto (2010) juga mendapatkan fraksi kerosin terbesar (54,12%) pada *catalytic cracking* FAME yang berasal dari *palm oil mild effluent* (POME) menggunakan katalis Cr-H-ZA. Kerosin (31,15%) juga menunjukkan konsentrasi paling tinggi pada perengkahan katalitik metil ester dari minyak limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dengan katalis Cr/Mo/HZA (Sundaryono et al., 2015). Aziz et al. (2021) mendapatkan selektivitas biohidrokarbon 48,55% dengan fraksi kerosin terbesar (29,64%) pada *catalytic cracking crude biodiesel* (FAME) menggunakan katalis NiO/zeolit 1%. Jujarama et al. (2014) mendapatkan fraksi gasolin terbesar pada *hydrocracking* minyak goreng bekas menggunakan katalis Cr-activated natural zeolite. Liu et al. (2016) menggunakan proses hidrodeoksigenasi untuk mengkonversi FAME menjadi biohidrokarbon. Kondisi proses yang digunakan adalah suhu 340 °C, tekanan 20 bar, WHSV 2,5/jam dan kandungan Ni dalam katalis 3% (NiP/SAPO-11). Konversi FAME yang dihasilkan sebesar 97,8% dengan rendemen $\text{C}_{15} - \text{C}_{17}$ 84,5%. Perbedaan jenis proses, katalis dan bahan pembaku dapat mempengaruhi jenis produk yang dihasilkan.



Gambar 3. Jalur reaksi deoksigenasi katalitik FAME menjadi biohidrokarbon.

Penggunaan minyak goreng bekas (yang merupakan limbah industri makanan dan rumah tangga) sebagai bahan baku FAME yang selanjutnya dikonversi menjadi biohidrokarbon (bahan bakar) merupakan langkah strategis dalam pengolahan limbah. Minyak goreng bekas yang bernilai rendah dan mencemari lingkungan mampu ditingkatkan kualitas dan daya gunanya sehingga mampu menjadi bahan bakar alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa minyak goreng bekas bisa dikonversi menjadi gasolin, kerosin dan diesel dari beberapa tahapan proses (transesterifikasi dan deoksigenasi katalitik). Bahan bakar yang dihasilkan ini lebih terjamin ketersediaannya (*renewable*) karena bersumber dari bahan alam (minyak nabati). Pada konversi minyak goreng bekas menjadi FAME melalui reaksi transesterifikasi juga menghasilkan produk samping berupa gliserol. Seperti diketahui gliserol adalah senyawa yang banyak digunakan sebagai bahan baku di industri farmasi dan petrokimia.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi Cr_2O_3 pada katalis terhadap selektivitas produk biohidrokarbon.

KESIMPULAN

Katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ telah berhasil disintesis. Semakin kecil konsentrasi Cr_2O_3 menyebabkan luas permukaan semakin besar. Hal ini berdampak pada aktivitas katalitik katalis. Konsentrasi $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{zeolit}$ 1% menghasilkan aktivitas katalitik terbaik pada deoksigenasi katalitik FAME dengan konversi sebesar 60,36 % dan selektivitas biohidrokarbon 43,15% terdiri dari gasolin 7,23%, kerosin 15,08 % serta diesel 20,84%.

INFORMASI PENDUKUNG

Informasi pendukung (Supplementary Information, SI) artikel ini dapat dilihat pada tautan <https://jurnal.uns.ac.id/alchemy/editor/downloadFile/72521/225858>.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

IA: Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Data, Penulisan Manuskrip; NS: Analisis Data; FB: Software, Analisis Data; LA: Analisis Data, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Penerbitan (Puslitpen) UIN Syarif Hidayatullah Jakarta yang sudah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ameen, M., Azizan, M. T., Ramli, A., Yusup, S., and Abdullah, B., 2020. The Effect of Metal Loading Over Ni/ γ - Al_2O_3 and Mo/ γ - Al_2O_3 Catalysts on Reaction Routes of Hydrodeoxygenation of Rubber Seed Oil for Green Diesel Production. *Catalysis Today*, 355, 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.03.028>.
- Ashokkumar, S., Ganesan, V., Ramaswamy, K. K., and Balasubramanian, V., 2018. Bimetallic Co–Ni/TiO₂ Catalysts for Selective Hydrogenation of Cinnamaldehyde. *Research on Chemical Intermediates*, 44(11), 6703–6720. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3517-7>.
- Aziz, I., 2007. Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas. *Jurnal Kimia VALENSI*, 1(1). <https://doi.org/10.15408/jkv.v1i1.209>.
- Aziz, I., Adhani, L., Yolanda, T., and Saridewi, N., 2019. Catalytic Cracking of Jatropa Curcas Oil Using Natural Zeolite of Lampung as a Catalyst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 299(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/299/1/012065>.
- Aziz I., Ardine, E. A. F., Saridewi, N., and Adhani, L., 2021. Catalytic Cracking of Crude Biodiesel into Biohydrocarbon Using Natural Zeolite Impregnated Nickel Oxide Catalyst. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 24(7), 222–227. <https://doi.org/10.14710/jksa.24.7.222-227>.
- Aziz I., Gustama D., Retnaningsih T., Saridewi N., Adhani L., Dwiatmoko A. A., and Ridwan M., 2022. Synthesis of NiCo/Hierarchical Zeolite Catalyst for Catalytic Cracking of Jatropa oil. *RASAYAN Journal of Chemistry*, 15(03), 2026–2031. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1537003>.
- Aziz I., Kurnianti, Y., Saridewi, N., Adhani, L., and Permata, W., 2020. Utilization of Coconut Shell as Cr₂O₃ Catalyst Support for Catalytic Cracking of Jatropa Oil into Biofuel. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 23(2), 39–45. <https://doi.org/10.14710/jksa.23.2.39-45>.
- Baharudin K. B., Abdullah, N., Taufiq-Yap, Y. H., and Derawi, D., 2020. Renewable Diesel Via Solventless and Hydrogen-Free Catalytic Deoxygenation of Palm Fatty Acid Distillate. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122850. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122850>.
- Baharudin. K. B., Taufiq-Yap, Y. H., Hunns, J., Isaacs, M., Wilson, K., and Derawi, D., 2019. Mesoporous NiO/Al-SBA-15 Catalysts for Solvent-Free Deoxygenation of Palm Fatty Acid Distillate. *Microporous and Mesoporous Materials*, 276, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.09.014>.
- Gamal M. S., Asikin-Mijan, N., Khalit, W. N. A. W., Arumugam, M., Izham, S. M., and Taufiq-Yap, Y. H., 2020. Effective Catalytic Deoxygenation of Palm Fatty Acid Distillate for Green Diesel Production Under Hydrogen-Free Atmosphere Over Bimetallic Catalyst Como Supported on Activated Carbon. *Fuel Processing Technology*, 208, 106519. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106519>.
- Hongloi N., Prapainainar, P., and Prapainainar, C., 2022. Review of Green Diesel Production From Fatty Acid Deoxygenation Over Ni-Based Catalysts. *Molecular Catalysis*, 523, 111696. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111696>.
- Istadi I., Riyanto, T., Buchori, L., Anggoro, D. D., Saputra, R. A., and Muhamad, T. G., 2020. Effect of Temperature on Plasma-Assisted Catalytic Cracking of Palm Oil into Biofuels. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1), 107–112. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.107-112>.
- Jeon K.-W., Park, H.-R., Lee, Y.-L., Kim, J.-E., Jang, W.-J., Shim, J.-O., and Roh, H.-S., 2022. Deoxygenation of Non-Edible Fatty Acid For Green Diesel Production: Effect of Metal Loading Amount over Ni/MgO–Al₂O₃ on The Catalytic Performance and Reaction Pathway. *Fuel*, 311, 122488. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122488>.

- Jujarama, Wijaya, K., Shidiq, M., Fahrurrozi, M., and Suheryanto, 2014. Synthesis of Biogasoline from Used Palm Cooking Oil Through Catalytic Hydrocracking by Using Cr-Activated Natural Zeolite as Catalyst. *Asian Journal of Chemistry*, 26(16), 5033–5038. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.16299>.
- Kamaruzaman, M. F., Taufiq-Yap, Y. H., and Derawi, D., 2020. Green Diesel Production from Palm Fatty Acid Distillate Over SBA-15-Supported Nickel, Cobalt, And Nickel/Cobalt Catalysts. *Biomass and Bioenergy*, 134, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105476>.
- Liu, C., Yang, H., Jing, Z., Xi, K., and Qiao, C., 2016. Hydrodeoxygenation of Fatty Acid Methyl Esters and Isomerization of Products over NiP/SAPO-11 Catalysts. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 44(10), 1211–1216. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(16\)30052-4](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(16)30052-4).
- Nugrahaningtyas K. D., Cahyono, E., and Widjonarko, D. M., 2016. The Paraffin Cracking Reaction With Nimo/Active Natural Zeolite Catalyst: The Effect Temperature on Catalytic Activity the Paraffin Cracking Reaction With Nimo/Active Natural Zeolite Catalyst: The Effect Temperature on Catalytic Activity. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 11(2), 111–126. <https://doi.org/10.20961/alchemy.11.2.712.111-126>.
- Rahmani, F., Haghighi, M., and Amini, M., 2015. The Beneficial Utilization of Natural Zeolite in Preparation of Cr/Clinoptilolite Nanocatalyst Used In CO₂-Oxidative Dehydrogenation of Ethane to Ethylene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 31, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.06.018>.
- Safa Gamal, M., Asikin-Mijan, N., Arumugam, M., Rashid, U., and Taufiq-Yap, Y. H., 2019. Solvent-free Catalytic Deoxygenation of Palm Fatty Acid Distillate Over Cobalt and Manganese Supported on Activated Carbon Originating from Waste Coconut Shell. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 144, 104690. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104690>.
- Saraswati, I., 2016. Zeolite-A Synthesis from Glass. *Jurnal Sains Dan Matematika*, 23(4), 112–115. <<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/sm/article/view/10485>>.
- Sundaryano, A. and Budiyanto, 2010. Pembuatan Bahan Bakar Hidrokarbon Cair Melalui Reaksi Cracking Minyak pada Limbah Cair Pengolahan Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi. Industri Pertanian*, 20(1), 1–9. <<http://repository.unib.ac.id/id/eprint/7907>>.
- Sundaryono, A., Handayani, D., Budiman, and Winda, S., 2015. Perengkahan Katalitik Metil Ester dari Minyak Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Dengan Katalis Cr/Mo/HZA Dan Ni/Mo/HZA. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 25(1), 78–84. <<https://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnaltin/article/view/9707>>.
- Wijaya, K., Baobalabuana, G., Trisunaryanti, W., and Syoufian, A., 2013. Hydrocracking of Palm Oil into Biogasoline Catalyzed by Cr/Natural Zeolite. *Asian Journal of Chemistry*, 25(16), 8981–8986. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.14946>.
- Yu, C., Yu, S., and Li, L., 2022. Upgraded Methyl Oleate to Diesel-Like Hydrocarbons Through Selective Hydrodeoxygenation Over Mo-Based Catalyst. *Fuel*, 308, 122038. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122038>.