

PEMANFAATAN TEKNOLOGI PERENKAHAN KATALITIK UNTUK PEMBUATAN BAHAN BAKAR NABATI BERBASIS KELAPA SAWIT

Muhammad Erlangga Habibi Nasution*, Meta Rivani, Muhammad Ansori Nasution, Fadlin Qisthi Nasution, dan M. Anshari

Abstrak - Bahan bakar fosil yang terbatas menjadi salah satu energi yang tidak dapat diperbarui di Indonesia, sehingga membuat wacana untuk menciptakan sumber energi alternatif dari bahan baku lain yang jumlahnya melimpah dan dapat diperbarui. Salah satu sumber energi alternatif tersebut yaitu bahan bakar nabati (*biofuel*). Penelitian ini bertujuan untuk menggunakan teknologi perengkahan katalitik dalam proses pembuatan bahan bakar nabati dengan menggunakan bahan baku berbasis kelapa sawit. Hasil penelitian menunjukkan bahan baku *Crude Palm Oil* (CPO) merupakan bahan bakar yang optimum yaitu pada kondisi operasi dengan suhu 450°C selama 2 jam dan penggunaan katalis dengan rasio 2,5%. Karakterisasi OLP diperoleh yield perengkahan sebesar 94,50% serta analisis fisikokimia yakni densitas, viskositas, titik nyala dan titik kabut masing-masing diperoleh 0,8668 gr/cm³, 9,87 N/m², 31°C dan 6,4°C.

Kata kunci: Bahan bakar nabati, Biofuel, Kelapa sawit, Perengkahan katalitik, Teknologi

PENDAHULUAN

Produksi minyak bumi nasional dewasa ini semakin menurun. Indonesia telah menjadi negara pengimpor bahan bakar karena produksi minyak bumi dalam negeri yang terus berkurang. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2023) produksi minyak bumi pada tahun 2022 sekitar 612.300 *Barrel Per Day* (BPD) dan pada tahun 2021 sekitar 660.300 BPD. Sementara itu, Kebutuhan Bahan Bakar di masyarakat semakin meningkat dan ketersediaan bahan bakar minyak bumi semakin hari semakin terbatas. Untuk itu perlu dikembangkan sumber energi lain yang dapat mensubstitusi minyak bumi sehingga pasokan bahan bakar tetap terjamin, salah satu alternatif yang mungkin memenuhi kriteria tersebut adalah pemanfaatan minyak nabati sebagai bahan bakar nabati (*Biofuel*). Secara umum minyak nabati dapat terurai secara biologis dan lebih sempurna (lebih dari 90% dalam waktu 21 hari) daripada bahan bakar minyak bumi (sekitar 20%

dalam waktu 21 hari). Di samping itu, pemanfaatan minyak nabati sebagai bahan bakar diharapkan dapat memberikan nilai ekonomi di bidang pertanian. Salah satu minyak nabati yang mempunyai potensi untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif adalah minyak kelapa sawit (Nugroho et al., 2014). Beberapa tahun ini telah banyak dilakukan pengembangan terhadap bahan baku pembuatan biofuel dari tumbuh-tumbuhan, terutama kelapa sawit (Chuaykleang & Ratanawilai, 2014).

Kelapa sawit sebagai tanaman penghasil minyak kelapa sawit (*Crude Palm Oil*) dan inti kelapa sawit merupakan salah satu primadona tanaman perkebunan yang menjadi sumber penghasil devisa terbesar, lokomotif perekonomian nasional, kedaulatan energi, pendorong sektor ekonomi kerakyatan, dan penyerapan tenaga kerja (Purba & Sipayung, 2018). Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tanaman perkebunan yang memegang peranan penting dalam industri pangan. Produksi minyak kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2022 meningkat dibandingkan tahun sebelumnya hingga mencapai 48.235.405 juta ton (Ditjenbun, 2022).

Industri kelapa sawit saat ini berkembang cukup pesat dari tahun ke tahun. Meskipun demikian, Indonesia sebagai salah satu produsen minyak kelapa

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Muhammad Erlangga Habibi Nasution* (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamsno No. 51 Medan 20158, Indonesia

Email: erlanggahabibi58@gmail.com



sawit terbesar dunia, sampai saat ini masih mendapatkan nilai tambah terkecil dari produksi minyak kelapa sawit karena sebagian besar minyak sawit masih diekspor dalam bentuk *crude palm oil* (CPO) padahal nilai tambah dari industri hilir CPO ini sangat besar. Minyak sawit memiliki rantai hidrokarbon panjang yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar nabati (*Biofuel*). Minyak kelapa sawit memiliki asam oleat terbanyak dibandingkan dengan asam lemak yang lain. Karena kandungan asam oleat yang tinggi minyak kelapa sawit dapat digunakan sebagai dasar untuk bahan baku dalam produksi *biofuel* dari minyak kelapa sawit (Nugroho et al., 2014). Indonesia memiliki potensi dalam mengembangkan *biofuel* untuk konsumsi domestik dan ekspor karena Indonesia merupakan salah satu negara produsen minyak sawit terbesar di dunia.

Biofuel dapat diartikan sebagai bahan bakar padat, cair atau gas yang dihasilkan dari pengolahan substrat biomassa dan dapat digunakan sebagai substitusi sebagian bahan bakar fosil (Deora et al., 2022). *Biofuel* biasanya dibuat dari biomassa atau materi yang berasal dari tumbuhan dan hewan, tetapi biasanya dari tumbuhan. *Biofuel* dapat dibagi menjadi beberapa generasi berdasarkan bahan baku, proses konversi, spesifikasi teknis bahan bakar, dan penggunaan. *Biofuel* generasi pertama, juga dikenal sebagai *Biofuel* konvensional, berasal dari pakan ternak atau tanaman pangan. Seperti *biofuel* konvensional, teknologi seperti fermentasi, distilasi, dan transesterifikasi digunakan untuk membuat *biofuel* terbaru. *Biofuel* generasi kedua dibuat dan diolah dari bahan non-makanan, residu pertanian, residu hutan, dan bahan limbah lainnya, termasuk sampah kota dan minyak jelantah (minyak masak yang telah digunakan). Selain itu, ada *biofuel* generasi ketiga yang dibuat dari mikroalga melalui proses transesterifikasi konvensional atau pengolahan hidro minyak alga. Biogas generasi kedua dan ketiga biasanya disebut sebagai *advanced biofuel* (Pertamina, 2022).

Pengembangan *biofuel* banyak menarik perhatian akhir-akhir ini. Hal ini disebabkan karena *biofuel* memiliki beberapa keunggulan selain dapat diperbaharui, juga ramah lingkungan (Zabermawi et al., 2022), berpotensi tinggi menghilangkan efek rumah kaca, dan stok bahan bakunya melimpah (Arbab et al., 2013). *Biofuel* berbeda dengan jenis energi alternatif lainnya, seperti batu bara yang mengandung karbon berbahaya dan sumber daya tak

terbarukan, baterai yang mahal dan kompleks, gas alam yang membutuhkan modal yang besar, dan energi surya, yang meskipun gratis tetapi membutuhkan biaya yang besar.

Biofuel dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin diesel dan mesin bensin karena sifat fisikokimianya yang mirip dengan hasil minyak bumi (USEIA, 2022). Perkembangan teknologi produksi *biofuel* semakin meluas dengan berbagai jenis bahan baku dan produk. Teknologi untuk mengganti minyak bumi dengan bahan bakar minyak alternatif terus berkembang (Ambaye et al., 2021). Saat ini, Masyarakat di Indonesia lebih mengenal biodiesel sebagai *biofuel*, yang berasal dari minyak sawit. Teknologi generasi pertama berbasis minyak nabati telah digunakan untuk membuat biodiesel, yang setara dengan minyak solar, melalui reaksi transesterifikasi trigliserida (senyawa utama dalam minyak nabati) dengan metanol, reaksi transesterifikasi merupakan reaksi reversible dan dapat berjalan dengan atau tanpa katalis (Sharma et al., 2018).

Selain reaksi transesterifikasi *biofuel* juga dapat diproduksi melalui proses perengkahan. Dibandingkan dengan Transesterifikasi, proses perengkahan memiliki beberapa keuntungan: (1) biaya pemrosesan yang lebih rendah, (2) produksi bahan bakar mesin standar, (3) fleksibilitas dalam penggunaan bahan baku (trigliserida dari sumber biomassa dapat digunakan), dan (4) kompatibilitas dengan infrastruktur yang ada (Prabasari et al., 2019).

Pengertian proses perengkahan adalah proses pemecahan molekul hidrokarbon besar menjadi molekul kecil dengan bantuan panas dan atau tanpa menggunakan katalis. Proses perengkahan sangat tepat untuk menghasilkan *biofuel*, khususnya bensin (*biogasoline*) tanpa katalis atau dengan katalis (Cassio et al., 2015). Terdapat tiga jenis proses perengkahan yaitu perengkahan termal, perengkahan hidro dan perengkahan katalitik.

Perengkahan termal adalah proses di mana hidrokarbon yang ada dalam minyak mentah terkena panas pada suhu tinggi untuk memecah ikatan molekul dan memecah hidrokarbon berantai panjang dan bertitik didih lebih tinggi menjadi hidrokarbon berantai pendek dan bertitik didih lebih rendah. Proses ini digunakan untuk mengekstrak komponen yang dapat digunakan, yang dikenal sebagai fraksi, yang dilepaskan selama proses perengkahan (Pinheiro,

2016). Reaksi perengkahan termal dilakukan dalam reaktor fixed bed. Selama proses ini, suhu dan tekanan harus diperhatikan untuk memastikan bahwa reaksi bergerak menuju pembentukan produk yang diinginkan.

Perengkahan hidro adalah proses di mana produk minyak bumi yang berat diubah menjadi bahan kimia yang lebih ringan dengan titik didih yang lebih rendah dengan adanya hidrogen dan katalis yang sesuai. Dibandingkan dengan perengkahan termal, perengkahan hidro dilakukan pada suhu yang relatif rendah (Park et al., 2018), memiliki aktivitas katalitik yang lebih baik, dan memfasilitasi konversi bahan bakar menjadi produk berkualitas tinggi dengan rasio hidrogen dan karbon yang tinggi dan kandungan pengotor yang rendah (mis. Logam). Hal ini menghilangkan proses pasca-perengkahan yang biasanya diperlukan dalam perengkahan termal dan dengan demikian mengurangi total biaya pemrosesan secara signifikan (Saab et al., 2020).

Perengkahan katalitik merupakan suatu cara untuk memecah hidrokarbon kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dengan bantuan katalis sehingga dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produk sementara jumlah residu yang dihasilkan juga dapat diturunkan (Yuhernita et al., 2021). Fungsi katalis adalah mengurangi energi aktivasi substansi dan mengontrol selektivitas produk (Roesyadi et al., 2013). Katalis ZSM-5 merupakan katalis umum yang digunakan dan efektif untuk perengkahan minyak nabati (Molefe et al., 2019). Katalis ini memiliki kemampuan yang tinggi dalam selektivitas dan aktivitas untuk memecah molekul-molekul berat, seperti trigliserida, yang berpengaruh pada hasil proses perengkahan (Ramya et al., 2015). Metode perengkahan katalitik lebih disukai daripada perengkahan termal karena pada proses perengkahan katalitik lebih menguntungkan dibandingkan dengan perengkahan termal karena suhu perengkahannya yang lebih rendah. Selain itu, produk dari teknologi perengkahan katalitik mengandung bensin oktan tinggi dan fraksi gas yang rendah (Naji et al., 2021).

Tujuan penelitian ini untuk memanfaatkan teknologi perengkahan katalitik untuk memproduksi bahan bakar nabati menggunakan bahan baku berbasis kelapa sawit untuk membantu diversifikasi sumber energi. Selain itu, penelitian ini berkontribusi pada keberlanjutan energi global melalui pengembangan bahan bakar nabati yang terbarukan

untuk mengurangi energi fosil dengan menghasilkan bahan bakar nabati berbasis kelapa sawit yang memenuhi syarat sebagai *biofuel*, pada skala laboratorium.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Crude Palm Oil* (CPO), *Refined Bleached Deodorized Stearin* (RBD Stearin), minyak jelantah, dan *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD). Katalis yang digunakan dalam proses ini adalah Zeolit ZSM-5. Kegiatan penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jenis reaktor *batch* bertekanan (*High Pressure Reactor*) dengan tipe parr 4848 pada skala laboratorium.

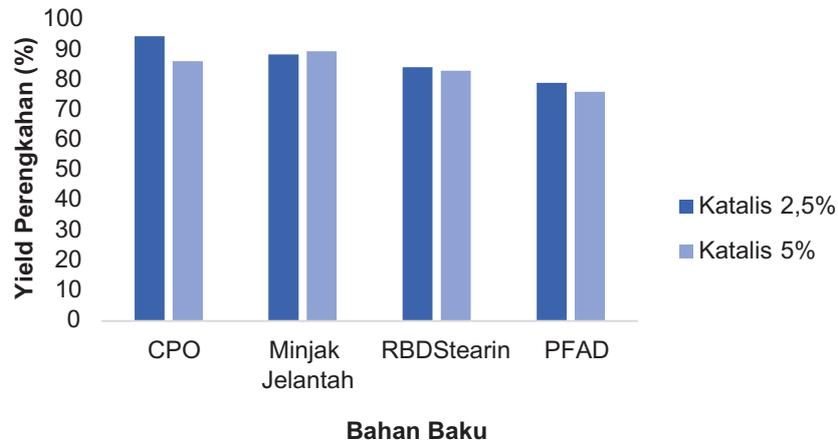
Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode perengkahan katalitik yang dilakukan pada suhu 450°C selama 2 jam menggunakan reaktor bertekanan tipe parr 4848. Komposisi *organic liquid product* (OLP) ditentukan berdasarkan range titik didih seperti pada proses pengolahan minyak bumi. Sebagai contoh fraksi gasoline/bensin pada suhu (60°C-120°C), fraksi kerosin pada suhu (120°C-180°C) dan fraksi diesel pada suhu (180°C-200°C). Analisa *Organic Liquid Product* (OLP) ditentukan sifat fisikokimianya menggunakan densitas dan viskositas menggunakan alat piknometer dan viskometer serta dianalisis titik nyala (*flash point*) dan titik kabut nya (*cloud point*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Optimasi Proses Perengkahan Katalitik

Optimasi proses perengkahan katalitik dilakukan pada suhu 450°C dengan variasi rasio katalis 2,5% dan 5% selama 2 jam. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap *yield* perengkahan dapat dilihat pada gambar 1 yang menunjukkan *yield* perengkahan (%) atau hasil konversi perengkahan katalitik pada berbagai jenis bahan baku berbasis kelapa sawit terlihat hasil konversi tertinggi didapatkan pada bahan baku *crude palm oil* (CPO) dengan rasio katalis 2,5% sebesar 94.50% sedangkan hasil konversi terendah diperoleh pada bahan baku PFAD dengan rasio katalis 5% sebesar 76.13%.

Gambar 1. Pengaruh rasio katalis terhadap *yield* perengkahan OLP

Pada bahan baku minyak jelantah terlihat *yield* perengkahan meningkat dari 88,53% pada rasio katalis 2,5% menjadi 89,50% pada rasio katalis 5%. Hal ini disebabkan karena banyaknya produk yang dihasilkan dari perengkahan katalitik dipengaruhi secara langsung oleh keaktifan dari katalis yang digunakan. Menurut (Aziz et al., 2022) rasio katalis berbanding lurus dengan *yield* perengkahan yang dihasilkan. Semakin besar rasio katalis maka semakin besar juga *yield* perengkahan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan dengan semakin besar rasio katalis maka situs aktif katalis juga semakin banyak sehingga reaktan yang bereaksi juga semakin banyak dan produk yang dihasilkan semakin besar.

Namun, pada bahan baku CPO, RBD Stearin, dan PFAD, *yield* hasil perengkahan menurun pada rasio katalis 5%. Penurunan *yield* ini terjadi karena penambahan katalis pada proses perengkahan katalitik menyebabkan penurunan persentase *yield*. Hal ini disebabkan oleh katalis yang merengkah asam lemak dalam bahan baku, membentuk fraksi hidrokarbon seperti gasoline, kerosene, diesel, serta senyawa lain seperti keton dan aldehid. Selain itu, juga membentuk berbagai macam komponen fraksi hidrokarbon yang lebih ringan, sehingga produk gas semakin meningkat. Fraksi hidrokarbon yang ringan ini sulit untuk terkondensasi sehingga lepas ke udara dan hal inilah yang menyebabkan terjadi penurunan *yield* hasil perengkahan (Annur, 2015).

Analisa Sifat Fisikokimia OLP

Produk yang dihasilkan dari proses perengkahan

katalitik terdiri dari fasa cair atau *Organic Liquid Product* (OLP), gas dan fasa padat berupa kokas yang menempel pada permukaan katalis (Dewajani et al., 2016). OLP yang diperoleh dari hasil perengkahan katalitik pada berbagai bahan baku berbasis kelapa sawit ini kemudian dianalisa sifat fisikokimianya diantaranya Viskositas, massa jenis (densitas), titik kabut (cloud point) dan titik nyala (flash point) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Densitas OLP

Densitas atau massa jenis merupakan jumlah massa per jumlah volume dari suatu cairan. Densitas merupakan indikator banyaknya zat pengotor hasil reaksi. Jika massa jenis suatu bahan bakar melebihi ketentuan, maka akan meningkatkan keausan mesin dan menyebabkan kerusakan mesin (Eldwita & Lestari, 2020). Dapat dilihat pada gambar 2. densitas terkecil didapatkan oleh bahan baku PFAD dengan rasio katalis 5% sebesar 0,8468 gr/cm³ dan densitas terbesar didapatkan oleh minyak jelantah dengan rasio katalis 2,5% sebesar 0,8744 gr/cm³.

Densitas dari OLP produk perengkahan katalitik tetap lebih tinggi daripada densitas bensin komersial karena OLP ini tidak hanya mengandung bahan bakar bensin, tetapi juga mencakup asam lemak serta fraksi dari kerosin dan diesel, tetapi densitas OLP yang didapatkan sudah sesuai dengan standar densitas *biofuel* yaitu 0.82-0,87 menurut SNI 7182-2015.

Tabel 1. Analisis sifat fisikokimia OLP

Bahan Baku	Viskosita (N/m ²)	Densitas (gr/cm ³)	Titik Nyala (°C)	Titik Kabut (°C)
CPO 2,5%	9,87	0,8668	31	6,4
CPO 5%	7,16	0,8513	32	8,2
Minyak Jelantah 2,5%	11,8	0,8744	32	9
Minyak Jelantah 5%	8,57	0,8617	36	11,4
RBD Stearin 2,5%	21,63	0,8714	31	8,4
RBD Stearin 5%	19,28	0,8665	58	16,7
PFAD 2,5%	15,9	0,8472	46	8,9
PFAD 5%	14,6	0,8468	48	10,3



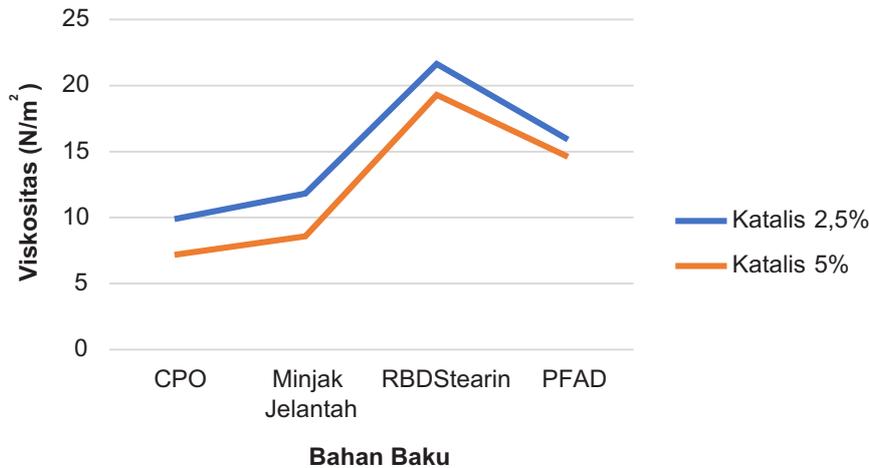
Gambar 2. Pengaruh rasio katalis terhadap densitas OLP

Viskositas OLP

Viskositas merupakan ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar nilai viskositas suatu fluida, maka makin sulit fluida tersebut mengalir dan makin sulit suatu benda bergerak di dalam fluida tersebut (Ariyanti & Mulyono, 2010).

Gambar 3 menunjukkan bahwa viskositas tertinggi, sebesar 21,63 N/m², diperoleh dari bahan baku RBD Stearin dengan rasio katalis 2,5%, sementara viskositas terendah, sebesar 7,16 N/m²,

diperoleh dari bahan baku CPO dengan rasio katalis 5%. Pada dasarnya yang mempengaruhi viskositas adalah jenis kandungan hidrokarbon dalam produk cair, dimana jika kandungan hidrokarbon dengan ikatan jenuh semakin tinggi, maka terjadi pula peningkatan viskositas. Hal ini didasarkan atas fakta, bahwa produk dengan kandungan utamanya terdiri atas rantai hidrokarbon jenuh akan membentuk suatu cairan kental atau bahkan semipadat. Viskositas juga dapat disebabkan oleh hadirnya deposit karbon pada produk perengkahan yang menyebabkan cairan bersifat lebih kental (Pangestu & Gunawan, 2020).



Gambar 3. Pengaruh rasio katalis terhadap viskositas OLP

Viskositas yang didapat pada perengkahan katalitik ini masih sangat tinggi dikarenakan masih mengandung senyawa senyawa lainnya sehingga harus dilakukan proses destilasi lanjutan untuk mendapatkan produk bahan bakar yang dapat digunakan secara langsung yang setara dengan bensin dan diesel.

Titik Nyala dan Titik Kabut OLP

Titik nyala menyatakan suhu terendah dari suatu bahan untuk menghasilkan nyala api. Penentuan titik nyala dilakukan untuk mengetahui daya tahan *biofuel* terhadap pemanasan. Hal ini dilakukan untuk keamanan mesin, Pada suhu ruang penyimpanan bahan bakar tidak mudah terbakar jika memiliki titik nyala yang semakin tinggi (Mesak et al., 2023). Titik kabut merupakan suhu pada saat *biofuel* berkabut, tidak jernih pada saat didinginkan. Titik kabut dilakukan untuk mengetahui karakteristik *biofuel* jika digunakan pada daerah dingin (Suleman et al., 2019).

Titik nyala OLP dari seluruh jenis bahan baku yang dihasilkan sudah lebih tinggi dari titik nyala bensin (-43°C) dan lebih rendah dari diesel (100°C). Hal ini disebabkan karena *biofuel* yang dihasilkan masih berupa campuran senyawa, sehingga titik nyalanya merupakan gabungan dari semua senyawa yang ada. Titik nyala berkaitan dengan sistem pembakaran bahan bakar. Jika titik nyala tinggi, maka pembakaran akan memerlukan lebih banyak waktu, yang pada akhirnya mempengaruhi kinerja mesin. Selain itu, titik nyala juga memiliki peran penting dalam aspek

keselamatan saat menangani dan menyimpan bahan bakar (Aziz et al., 2022).

Menurut ketentuan SNI 7182-2015, batas maksimal untuk titik kabut pada biofuel adalah 18°C. Dalam penelitian ini, titik kabut OLP dari proses perengkahan ini sudah memenuhi standar SNI namun demikian masih sangat jauh diatas bensin dan kerosin. Oleh karena itu, produk penelitian ini masih belum dapat digunakan secara langsung menggantikan fungsi bensin dan kerosin sebagai bahan bakar dan perlu dilakukan destilasi lebih lanjut untuk memisahkan OLP sesuai fraksi-fraksinya.

KESIMPULAN

Bahan baku bahan bakar nabati (*biofuel*) berbasis kelapa sawit dari proses perengkahan katalitik yang paling optimum didapatkan oleh *crude palm oil* (CPO) dengan kondisi operasi pada suhu 450°C selama 2 jam dan penggunaan katalis dengan rasio 2,5% dan didapatkan *yield* perengkahan sebesar 94,50%. Karakteristik OLP yang dihasilkan, yaitu densitas, titik nyala dan titik kabut dari bahan bakar nabati hasil perengkahan katalitik *crude palm oil* (CPO) telah memenuhi standar yaitu berturut-turut 0,8668 gr/cm³, 31°C dan 6,4°C. Namun viskositas yang diperoleh masih tergolong tinggi yaitu 9,87 N/m², sehingga perlu dilakukan proses destilasi lanjutan untuk mendapatkan produk bahan bakar yang dapat digunakan secara langsung yang setara dengan bensin dan diesel.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Bonilla-Petriciolet, A., Prasad, S., van Hullebusch, E. D., & Rtimi, S. (2021). Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 290, 112627.
- Annur, M. Y. (2015). Perengkahan Katalitik Palm Fatty Acid Distillate Menjadi Biofuel Menggunakan Katalis Natrium Karbonat dengan Variasi Temperatur dan Konsentrasi Katalis Natrium Karbonat. In *Jom FTEKNIK* (Vol. 2, Issue 2).
- Arbab, M. I., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Imtenan, S., & Sajjad, H. (2013). *Experimental investigation of optimum blend ratio of jatropha, palm and coconut based biodiesel to improve fuel properties, engine performance and emission characteristics*. SAE Technical Paper.
- Ariyanti, E. S., & Mulyono, A. (2010). Otomatisasi Pengukuran koefisien viskositas zat cair menggunakan gelombang ultrasonik. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*.
- Aziz, I., Nurbayti, S., & Falepi, R. (2022). Optimization of Biofuel Production from Used Cooking Oil Using Natural Zeolite Catalyst. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, 7(2), 193–203.
- Cassio, H. Z., Bravo, C. O., & Machado, N. F. (2015). *Biofuel production from thermocatalytic processing of vegetable oils: a review*.
- Chuaykleang, J., & Ratanawilai, S. (2014). Biogasoline from catalytic cracking of refined palm oil using H-ZSM-5 catalyst. *Int. J. Adv. Chem. Eng. Biol. Sci.*, 1(1), 114–118.
- Deora, P. S., Verma, Y., Muhal, R. A., Goswami, C., & Singh, T. (2022). Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1178–1184.
- Dewajani, H., Rochmadi, R., Purwono, S., & Budiman, A. (2016). Effect of modification ZSM-5 catalyst in upgrading quality of organic liquid product derived from catalytic cracking of Indonesian nyamplung oil (*Calophyllum inophyllum*). *AIP Conference Proceedings*, 1755(1).
- Ditjenbun. (2022). *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2020-2022*.
- Eldwita, K., & Lestari, S. D. (2020). PENGARUH JUMLAH KATALIS DAN TEMPERATUR PADA PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR DARI BAN BEKAS DENGAN METODE PERENKAHAN KATALITIK. *KINETIKA*, 11(2), 19–25.
- KESDM. (2023). *Handbook of Energy And Economic Statistic of Indonesia 2022*.
- Mesak, N. S., Presson, J., & Kolo, S. M. D. (2023). SINTESIS METIL ESTER DARI MINYAK BIJI FEUN KASE (*Thevetia peruviana*) MENGGUNAKAN KATALIS NaOH 1% DENGAN VARIASI SUHU. *Journal of Chemical Science and Application*, 1(1), 21–28.
- Molefe, M., Nkazi, D., & Mukaya, H. E. (2019). Method selection for biojet and biogasoline fuel production from castor oil: a review. *Energy & Fuels*, 33(7), 5918–5932.
- Naji, S. Z., Tye, C. T., & Abd, A. A. (2021). State of the art of vegetable oil transformation into biofuels using catalytic cracking technology: Recent trends and future perspectives. *Process Biochemistry*, 109, 148–168.
- Nugroho, A. P. P., Fitriyanto, D., & Roesyadi, A. (2014). Pembuatan Biofuel dari Minyak Kelapa Sawit melalui Proses Hydrocracking dengan Katalis Ni-Mg/ γ -Al₂O₃. *Jurnal Teknik ITS*, 3(2), F117–F121.
- Pangestu, M. R., & Gunawan, I. (2020). *PROSES PEMBUATAN BIOGASOLINE DENGAN MENGGUNAKAN CRUDE PALM OIL (CPO) DALAM FASA GAS MELALUI REAKSI PERENKAHAN KATALITIK DENGAN KATALISALUMINA*.
- Park, H.-B., Kim, K.-D., & Lee, Y.-K. (2018). Promoting asphaltene conversion by tetralin for hydrocracking of petroleum pitch. *Fuel*, 222, 105–113.
- Pertamina. (2022). *Pertamina Energy Outlook 2022*.
- Pinheiro, C. I. C. (2016). A Multivariable Model Predictive Control Project in a Computer Aided Master's Degree Course. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 38, pp. 871–876). Elsevier.
- Prabasari, I. G., Sarip, R., & Rahmayani, S. (2019). Catalytic cracking of used cooking oil using



- cobalt-impregnated carbon catalysts. *Makara J. Sci*, 23(3), 162–168.
- Purba, J. H. V., & Sipayung, T. (2018). Perkebunan kelapa sawit indonesia dalam perspektif pembangunan berkelanjutan. *Masyarakat Indonesia*, 43(1).
- Ramya, G., Sivakumar, T., Arif, M., & Ahmed, Z. (2015). Application of microporous catalysts in the production of biofuels from non edible vegetable oils and used restaurant oil. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37(8), 878–885.
- Roesyadi, A., Hariprajitno, D., Nurjannah, N., & Savitri, S. D. (2013). HZSM-5 catalyst for cracking palm oil to gasoline: A comparative study with and without impregnation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 7(3), 185–190.
- Saab, R., Polychronopoulou, K., Zheng, L., Kumar, S., & Schiffer, A. (2020). Synthesis and performance evaluation of hydrocracking catalysts: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 83–103.
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., & Pandey, L. M. (2018). Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*, 1(1), 11–21.
- Suleman, N., Abas, & Paputungan, M. (2019). Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel. *Jurnal Teknik*, 17(1), 66–77. <https://doi.org/10.37031/jt.v17i1.54>
- USEIA. (2022). *Biofuels explained: Biodiesel, renewable diesel, and other Biofuels*. <https://www.eia.gov/energyexplained/Biofuels/biodiesel-rd-other-basics.php>
- Yuhermita, N. M., Nazarudin, N., Alfernando, O., Prabasari, I. G., & Haviz, M. (2021). Perengkahan Katalitik Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Co-Carbon Yand Dihasilkan Dengan Metode Ion Exchange. *Journal BiGME*, 1(1), 1–22.
- Zabermawi, N. M., Alsulaimany, F. A. S., El-Saadony, M. T., & El-Tarabily, K. A. (2022). New eco-friendly trends to produce biofuel and bioenergy from microorganisms: An updated review. *Saudi Journal of Biological Sciences*.