

## Produksi *Biofuel* dari Minyak Nyamplung Menggunakan Reaksi *Hydrocracking*

Muhammad Al-Muttaqii<sup>1</sup>, Nino Rinaldi<sup>1</sup>, Chairul Irawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset Kimia, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jalan Puspitpek Serpong Gate II  
Muncul Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat, Jl.  
A. Yani KM. 35,5 Banjarbaru, Kalimantan Selatan, 70714, Indonesia

### ABSTRACT

*Studies on hydrocracking of nyamplung oil into biofuel have been studied using the HZSM-5 catalyst. The HZSM-5 catalyst was modified into HZSM-5 mesopore and impregnated using transition metals namely Cobalt, Nickel and Cuprum with a metal loading of 5% and a metal ratio ratio of 1:1:1. The resulting catalyst was then characterized using X-Ray Difrraction (XRD), Brunauer Emmet Teller (BET), and Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). The hydrocracking process was carried out in a batch reactor by adding 0.5 grams of catalyst and a volume of Nyamplung oil of 15 mL. The temperatures used vary from 250, 300, and 350 °C with a hydrogen gas pressure of 20 bar, and a reaction time of 2 hours. The resulting biofuel product is analyzed using Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS). The resulting biofuel product has a compound composition of n-paraffin with an area % of 26.72%, cycloparaffin 3.34%, olefin 0.33%, aromatic compounds 15.83% and polycyclic aromatics 12.56%, with a conversion of 72.1% in temperatur 350 °C. Biofuel from nyamplung oil can be used as an alternative fuel to reduce dependence on fossil fuels through the hydrocracking process.*

Keywords: Nyamplung Oil, Biofuel, Hydrocracking, HZSM-5

### ABSTRAK

*Studi tentang hydrocracking minyak nyamplung menjadi biofuel telah dipelajari dengan menggunakan katalis HZSM-5. Katalis HZSM-5 dimodifikasi menjadi mesopore HZSM-5 dan diimpregnasi menggunakan logam transisi yaitu Cobalt, Nikel, dan Cuprum dengan loading logam 5% dan perbandingan rasio logam 1:1:1. Katalis yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan X-Ray Difrraction (XRD), Brunauer Emmet Teller (BET), dan Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). Proses hydrocracking dilakukan dalam reaktor batch dengan memasukkan 0.5 gram katalis dan volume minyak Nyamplung 15 mL. Temperatur yang digunakan bervariasi dari 250, 300, dan 350 °C dengan tekanan gas hidrogen 20 bar, dan waktu reaksi selama 2 jam. Produk biofuel yang dihasilkan di analisa menggunakan Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS). Produk biofuel yang dihasilkan memiliki komposisi senyawa n-paraffin dengan % area 26,72%, cycloparaffin 3,34%, olefin 0,33%, senyawa aromatik 15,83% dan polisiklik aromatik 12,56%, dengan konversi sebesar 72,1% pada temperatur 350 °C. Biofuel dari minyak nyamplung dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil melalui proses hydrocrack.*

Kata kunci: Minyak Nyamplung, Biofuel, Hydrocracking, HZSM-5

---

Correspondence : Muhammad Al-Muttaqii

Email : [almuttaqiimuhammad@gmail.com](mailto:almuttaqiimuhammad@gmail.com)

## 1 PENDAHULUAN

Konsumsi bahan bakar fosil cair yang terus meningkat, terkait dengan peningkatan jumlah penduduk, menjadi salah satu penyebab pemanasan global dan perubahan iklim. Untuk memerangi perubahan iklim secara efektif dan transisi global menuju ekonomi berbasis bio sangat penting. Perubahan ini membutuhkan bahan bakar yang berkelanjutan dan terbarukan, terutama di sektor transportasi dan pembangkit listrik. Maka dari itu, para peneliti secara aktif mencari sumber energi alternatif untuk mengatasi meningkatnya permintaan energi dan masalah lingkungan (Aslam, 2022; Nakagawa et al., 2019).

Salah satu bahan alternatif untuk memproduksi bahan bakar terbarukan atau *biofuel* adalah minyak nyamplung. Minyak nyamplung dihasilkan dari biji tanaman Nyamplung (*Callophyllum inophyllum* L). Minyak nyamplung digunakan sebagai bahan baku *biofuel* karena tidak bersaing dengan konsumsi manusia. Selain itu, kandungan dari minyak nyamplung berkisar 40-73% w/w yang menghasilkan minyak dari kisaran 4680 kg/ha (Kustanto et al., 2021).

Minyak nyamplung ini tidak dapat langsung digunakan sebagai *biofuel* karena masih sangat kental. Oleh karena itu, minyak nabati ini perlu ditingkatkan menjadi *biofuel* yang bermanfaat melalui berbagai teknologi modern (Salwa et al., 2017). Proses produksi yang dapat digunakan untuk produksi *biofuel* meliputi transesterifikasi/esterifikasi, pirolisis (perengkahan katalitik), gasifikasi, mikroemulsi, dan *hydrocracking*. (Zhao et al., (2017); Al-Muttaqii et al., (2019); Kurniawan et al., (2023)). *Hydrocracking* lebih menguntungkan dibandingkan teknik produksi *biofuel* lainnya seperti transesterifikasi dan pirolisis karena kemampuannya untuk menghasilkan produk bernilai dengan kualitas lebih baik dan hasil yang lebih tinggi Molefe et al., (2019); Al Muttaqii et al., (2024))

Pada proses ini, katalis memiliki peran yang sangat penting. Salah satu katalis yang sangat sering digunakan dalam proses *hydrocracking* adalah *zeolite* HZSM-5. Hal ini dikarenakan *zeolite* memiliki sifat yang bagus seperti struktur kristal yang tinggi, luas

permukaan yang besar, porositas yang baik, memiliki situs asam, dll. Namun, keterbatasan ukuran pori-pori dari *zeolite* menghambat aplikasinya untuk molekul-molekul yang besar dari minyak nabati atau minyak bumi. Untuk mengatasi masalah ini, dapat dilakukan dengan mengubah ukuran pori *zeolite* menjadi *zeolite* hierarkis, yang terdiri dari sistem mikro dan mesopore didalamnya. Sehingga, *zeolite* dapat bertindak sebagai katalis yang efisien dalam proses *hydrocracking* (Zhu et al., (2013); Peron et al., (2019); Qin et al., (2020)).

Sebagian besar katalis yang digunakan dalam proses *hydrocracking* merupakan katalis bifungsional, karena katalis tersebut terdiri dari logam sebagai proses dehidrogenasi hidrogen dan *support* ZSM-5. oksida logam mono-transisi yaitu Ni, Co, Cu, Fe, dan Zn telah dipelajari secara luas untuk meningkatkan hasil hidrokarbon dalam reaksi perengkahan katalitik dan dianggap sebagai katalis yang menjanjikan (Thangadurai et al., (2021); Khalit et al., (2020); Hafriz et al., (2020); Naji et al., (2022)).

Pada dasarnya, selama reaksi, deoksigenasi melalui dekarboksilasi atau dekarbonilasi dikatalisis oleh katalis oksida logam. Pemutusan ikatan C-C yang berdekatan dengan gugus karboksil dalam asam lemak, melepaskan CO<sub>2</sub> melalui dekarboksilasi dan membentuk hidrokarbon. Sementara itu, pemutusan ikatan C-O dalam asam lemak didorong dengan membentuk kompleks logam-karbonil antara, yang kemudian dipecah untuk melepaskan CO dan air melalui dekarbonilasi. Secara umum, katalis berbasis Ni telah ditemukan sebagai salah satu katalis logam transisi penting untuk mendorong pembelahan C-C dan C-O melalui jalur dekarboksilasi dan dekarbonilasi (Abdulkareem-Alsultan et al., 2019). Namun, keasaman Ni yang tinggi dapat menyebabkan pembentukan kokas yang signifikan, yang mengakibatkan penonaktifan katalis (Santillan-Jimenez et al., 2013). Spesies Ni menunjukkan stabilitas yang rendah dan rentan terhadap penonaktifan pada suhu reaksi yang tinggi (Tang et al., 2023). Oleh karena itu, hal ini telah menyebabkan pengembangan katalis oksida trimetalik yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan stabilitas katalis.

Gousi et al. (2020) menemukan bahwa ZnO-NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> memiliki situs asam yang berkurang dibandingkan dengan NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sehingga menghambat deaktivasi oleh pembentukan kokas, dan memperpanjang perengkahan trigliserida. Aini et al (2020), telah melakukan penelitian dengan menggunakan katalis bimetal Ni-Cu pada HZSM-5 dimana sangat efektif dalam meningkatkan aktivitas katalis untuk memproduksi gasoil. Dilihat dari variabel katalis yang terkecil (5%; 1:1) dengan menghasilkan yield gasoil sebesar 82.7%. Dalam penelitian ini, mesopore HZSM-5 diaplikasikan sebagai katalis dan diimpregnasi menggunakan logam transisi (Co, Ni, Cu) untuk *hydrocracking* minyak nyamplung menjadi *biofuel*.

## 2 METODE PENELITIAN

### 2.1 Pembuatan Katalis Meso-HZSM-5

Katalis *Zeolite* HZSM-5 dikalsinasi selama 5 jam dengan temperatur 550 °C. Setelah itu, padatan HZSM-5 ditambahkan larutan NaOH 0.3M sebanyak 250 mL, lalu dipanaskan pada suhu 80 °C menggunakan *hotplate*. Setelahnya, campuran didinginkan di dalam pendingin lalu dicuci menggunakan akuades sampai didapatkan padatan dengan pH netral = 7. Padatan tersebut kemudian dilakukan pertukaran ion dengan *ammonium Chloride* (NH<sub>4</sub>Cl) 98%. Campuran NH<sub>4</sub>-ZSM-5 dicuci menggunakan akuades sampai didapatkan padatan dengan pH netral. Padatan NH<sub>4</sub>-ZSM-5 yang sudah netral dihilangkan kadar airnya semalaman lalu diubah bentuk melalui kalsinasi pada temperatur 500 °C

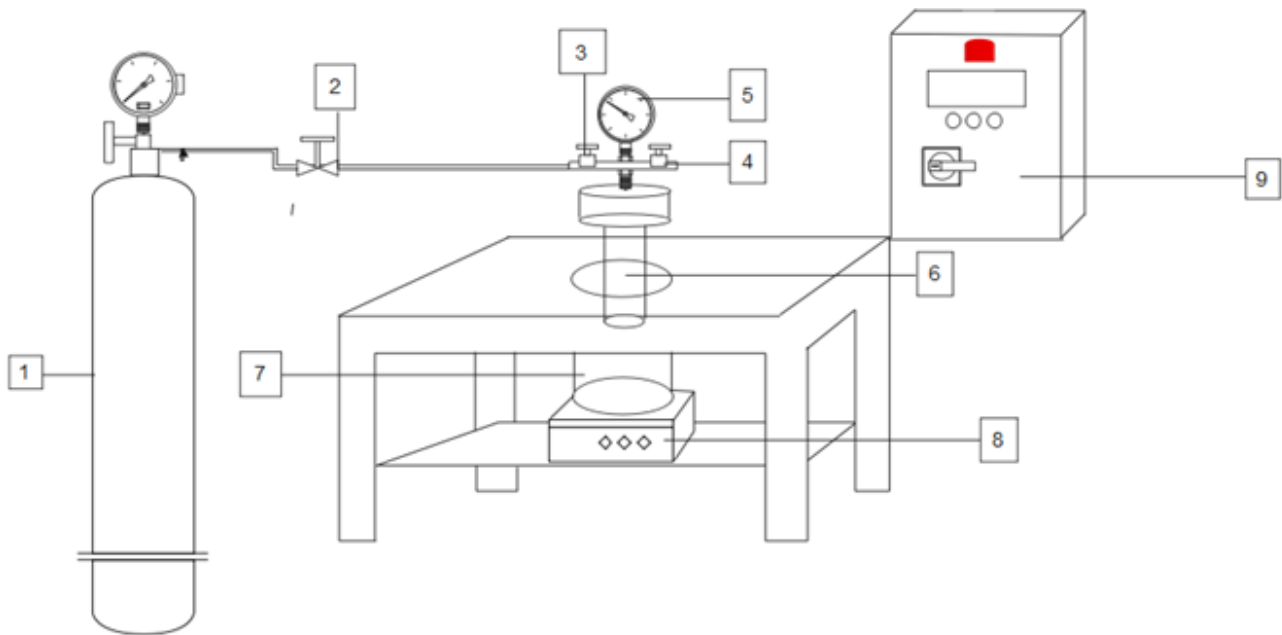
selama 5 jam. Didapat padatan Meso-HZSM-5.

### 2.2 Impregnasi Logam kedalam Meso-HZSM-5

Impregnasi logam ke meso-HZSM-5 menggunakan metode impregnasi basah menggunakan logam yang digunakan meliputi Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (98% MERCK), CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O (98% MERCK), dan Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (98% Sigma Aldrich), dengan rasio logam 1:1:1 dan loading logam 5%. Logam cobalt, nikel, dan cuprum dilarutkan menggunakan aquades dan didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya, dioven selama 12 jam pada suhu 110 °C. Kemudian, padatan katalis yang sudah dikeringkan dikalsinasi selama 3 jam dengan temperatur 500 °C dan direduksi selama 2 jam menggunakan gas H<sub>2</sub> dengan temperatur 450 °C. Padatan katalis kemudian dianalisa menggunakan XRD, BET, dan SEM-EDX.

### 2.3 *Hydrocracking* Minyak Nyamplung

Aktivitas katalitik dari katalis yang telah dipersiapkan diuji pada proses *hydrocracking* untuk menghasilkan *biofuel* menggunakan reaktor batch. Gambar 1 menunjukkan rangkaian alat proses *hydrocracking* pada reaktor batch. Sebanyak 0,5 gram katalis dimasukkan dalam reaktor dan ditambahkan 15 mL minyak Nyamplung. Gas hidrogen dialirkan kedalam reaktor dengan tekanan 20 bar. Reaksi *hydrocracking* dilakukan selama 2 jam dengan variasi suhu berupa 250, 300, dan 350 °C. Produk hasil *biofuel* dianalisa menggunakan teknik Gas *Cromatography-Mass Spectrometry* Merk *Agilent Tipe 19091S-433UI: 93.92873 HP-5MSUI 5% Phenyl Methyl Silox.*



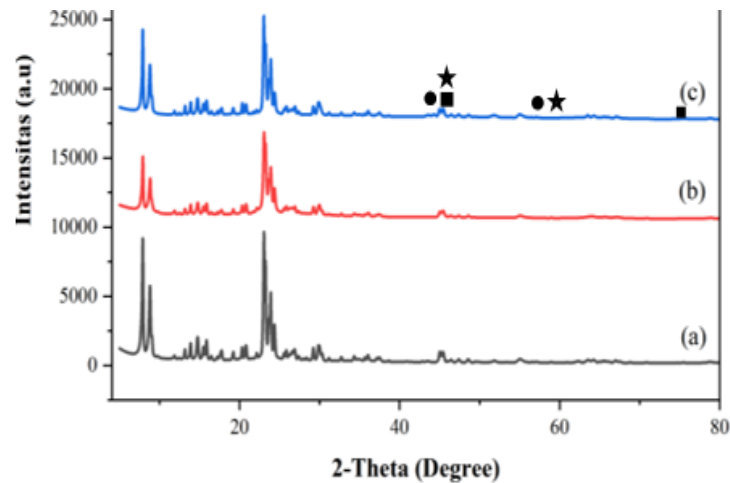
**Gambar 1.** Rangkaian Peralatan Proses *Hydrocracking*, terdiri dari: 1) Tabung gas H<sub>2</sub>, 2) *Valve tube* gas H<sub>2</sub>, 3) *Valve* masuk, 4) *Valve* gas keluar, 5) Indikator tekanan reaktor, 6) Reaktor, 7) *Heater*, 8) *Hotplate*, 9) Panel kontrol *heater-reactor*.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

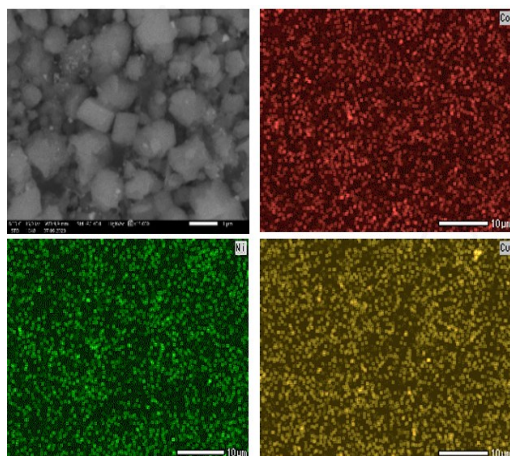
#### 3.1 Karakterisasi Katalis

Katalis HZSM-5 memiliki luas permukaan sebesar 312.6177 m<sup>2</sup>/g, setelah proses modifikasi menjadi mesopori HZSM-5 didapatkan luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan HZSM-5 sebesar 386.4775 m<sup>2</sup>/g. Penambahan logam pada support membuat luas permukaan logam menurun. Hal ini disebabkan karena logam berhasil masuk dan terdispersi kedalam bahan *support* (Vichapund et al., 2015). Luas permukaan katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5 5% 1:1:1 didapatkan sebesar

267,4289 m<sup>2</sup>/g. Gambar 2 menunjukkan difraktogram Katalis (a) HZSM-5 (b) Mesopori HZSM-5 (c) Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5 5% 1:1:1. Puncak HZSM-5 terlihat pada sudut 2 $\theta$ : 7,91°; 8,79°; 23,05°; 23,89°; 24,38° yang dikaitkan dengan bidang kristal zeolit (101; 020; 301; 501; 303; dan 133) dari kerangka MFI (JCPDS 96-154-02468) (Anekwe et al., 2023). Hasil XRD menunjukkan bahwa penambahan logam transisi seperti Co, Ni, dan Cu tidak mengubah struktur *support* katalis, namun menyebabkan berkurangnya kristalinitas dari katalis dan luas permukaannya menjadi lebih rendah (Vichaphund et al., 2014).



**Gambar 2.** Difraktogram Katalis (a) HZSM-5 (b) Mesopori HZSM-5 (c) Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5



| Element               | Line | Mass%                | Atom%      |
|-----------------------|------|----------------------|------------|
| O                     | K    | 60.67±0.15           | 74.30±0.18 |
| Al                    | K    | 2.21±0.03            | 1.61±0.02  |
| Si                    | K    | 32.37±0.10           | 22.58±0.07 |
| Co                    | K    | 1.02±0.03            | 0.34±0.01  |
| Ni                    | K    | 1.16±0.04            | 0.39±0.01  |
| Cu                    | K    | 2.57±0.06            | 0.79±0.02  |
| Total                 |      | 100.00               | 100.00     |
| Map_001_wholespectrum |      | Fitting ratio 0.1997 |            |

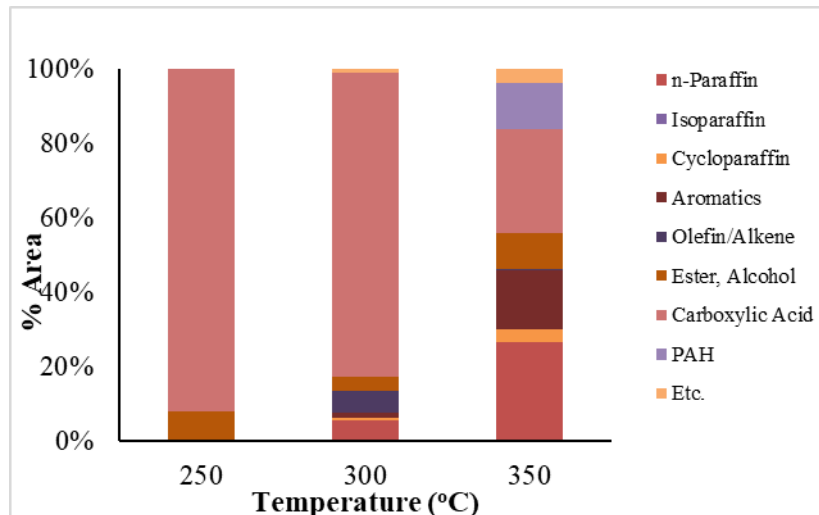
**Gambar 3** Morfologi Permukaan Katalis Co-Ni Cu/Mesopori HZSM-5

Hasil analisa SEM-EDX berupa morfologi permukaan dan kandungan unsur dari katalis Co-Ni-Cu/Meso-HZSM-5 5% 1:1:1 ditunjukkan pada Gambar 3 dengan perbesaran 15.000x. Dari gambar tersebut, terlihat adanya partikel berbentuk kubus yang merupakan karakteristik dari HZSM-5 (Nurdin

et al., 2018). Al Muttaqii et al., (2019) menjeaskan bahwa adanya penambahan logam pada *zeolite* menyebabkan partikel padatan kecil terhubung ke partikel yang lebih besar. Kandungan unsur pada katalis didapatkan dari hasil analisa EDX. Katalis Co-Ni-Cu/Meso-HZSM-5 5% 1:1:1 memiliki unsur kobalt 1,02%, nikel 1,16% dan *copper* 2,57%.

### 3.2 Pengaruh Temperatur Reaksi terhadap Produk *Biofuel*

Komposisi senyawa dari produk *biofuel* yang dihasilkan dari reaksi *hydrocracking* dengan variasi temperatur digambarkan dalam grafik histogram pada Gambar 4. Terlihat pada temperatur reaksi 250 °C, senyawa asam karboksilat terlihat tinggi dengan nilai % area 91,96% dan senyawa oksigenat 7,84%. Suhu reaksi dinaikkan menjadi 350 °C, hasil yang diperoleh *n-paraffin* sebesar 26.72%, *cycloparaffin* 3.34%, aromatik 15.83%, dan produk senyawa lainnya. Pada reaksi menggunakan temperatur 250 °C, asam lemak dari minyak Nyamplung tidak sempurna terputus dikarenakan suhu yang digunakan rendah. Temperatur reaksi yang tinggi membantu konversi asam lemak menjadi *biofuel* untuk memutus ikatan yang ada pada asam lemak minyak nyamplung.



**Gambar 4.** Pengaruh Temperatur Reaksi terhadap Komposisi Produk *Biofuel* menggunakan Katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5

**Tabel 1.** Komposisi Senyawa *Biofuel* Hasil *Hydrocracking* Minyak Nyamplung dengan Variasi Temperatur Menggunakan Katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5

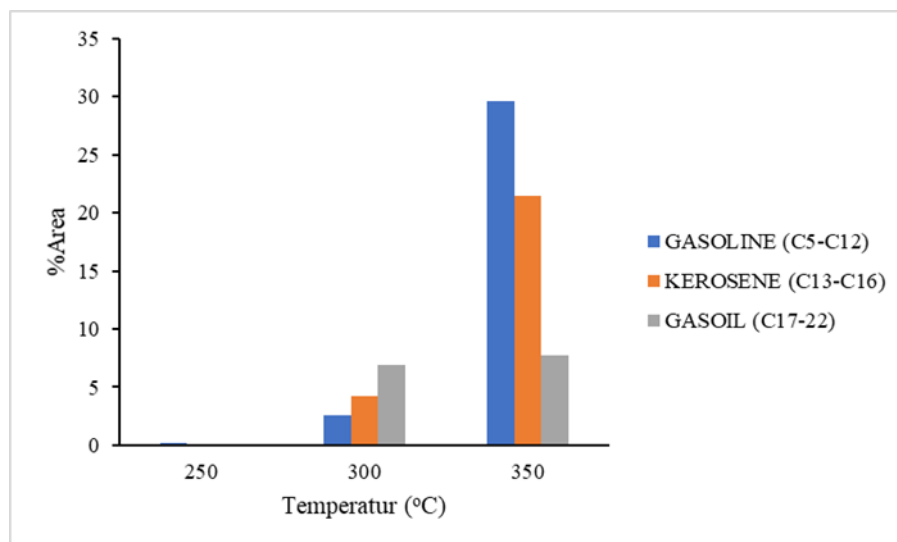
| Suhu (°C) | <i>n-Paraffin</i> | <i>Cycloparaffin</i> | <i>Olefin</i> | Aromatik | PAH   |
|-----------|-------------------|----------------------|---------------|----------|-------|
| 250       | 0,16              | -                    | -             | -        | -     |
| 300       | 5,62              | 0,83                 | 5,99          | 1,10     | 0,17  |
| 350       | 26,72             | 3,34                 | 0,33          | 15,83    | 12,56 |

Tabel 1 menunjukkan Komposisi Senyawa *Biofuel* Hasil *Hydrocracking* minyak Nyamplung dengan variasi temperatur. Berdasarkan hasil GC-MS (Gambar 5), produk *biofuel* paing banyak didapat pada suhu 350 °C dengan komposisi *n-paraffin*, aromatik, *cycloparaffin*, *olefin* dan PAH disebabkan karena peningkatan suhu dapat meningkatkan aktivitas *cracking* yang terjadi sehingga dapat membantu memutuskan molekul rantai hidrokarbon dari rantai panjang menjadi molekul rantai yang lebih pendek (Cheng et al., 2012).

### 3.3 Pengaruh Temperatur terhadap Fraksi Produk *Biofuel*

Produk *biofuel* memiliki kandungan senyawa hidrokarbon dan diklasifikasikan menurut rantai karbonnya untuk mengetahui fraksi produknya. Produk *biofuel* dibagi

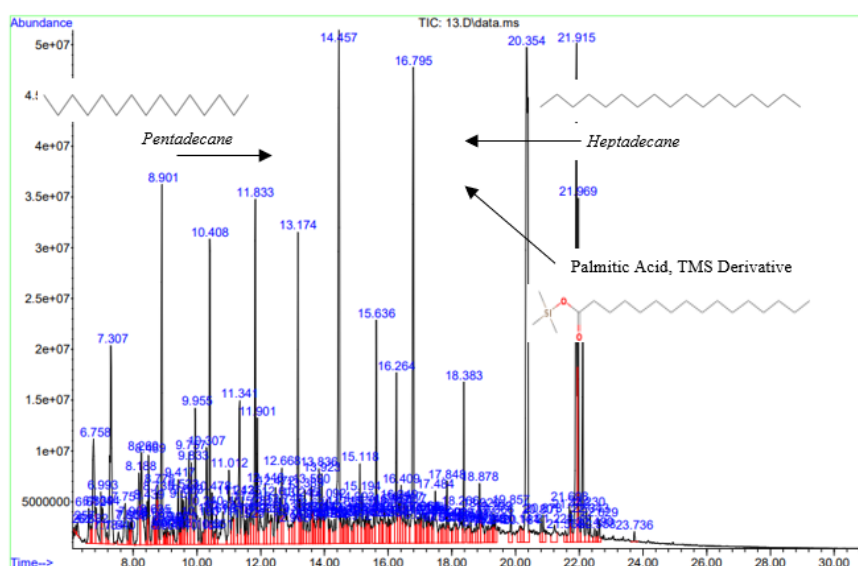
menjadi *biogasoline* (C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub>), *biokerosene* (C<sub>13</sub>-C<sub>16</sub>) dan biosolar (C<sub>17</sub>>) (Hasanudin et al., 2022). Gambar 5 menunjukkan grafik pengaruh temperatur terhadap fraksi yang dihasilkan menggunakan katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5 (5%, 1:1:1) terhadap persen area yang dihasilkan. Pada temperatur 250 °C hanya didapatkan produk *biogasoline* sebesar 0,16%. *Biokerosene* dan gasoil terlihat belum terbentuk pada reaksi menggunakan temperatur ini. Fraksi meningkat dengan meningkatnya juga temperatur 300 °C. produk *biogasoline* didapatkan sebesar 2,57%, *biokerosene* 4,2% dan *biogasoil* 6,94%. Pada temperatur 350 °C terjadi peningkatan yang cukup tinggi berupa *biogasoline* 29,58%, *biokerosene* 21,45%, dan *biogasoil* 7,75%. Hal ini membuktikan bahwa temperatur berpengaruh penting dalam peningkatan produk (Al-Muttaqii et al., 2019).



**Gambar 5.** Pengaruh Temperatur Reaksi terhadap Fraksi Produk *Biofuel* menggunakan Katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5

Hidrideoksigenasi berlangsung dengan baik terlihat pada temperatur 350 °C pada Gambar 6. Ini dibuktikan dengan menurunnya asam karboksilat yang ada pada produk. Asam karboksilat didapatkan dengan nilai persen area 27,89% yang ditunjukkan pada puncak kromatogram dengan waktu retensi 20,35 terdeteksi senyawa *Palmitic Acid, TMS Derivative* dan 21,91 senyawa *13-Octadecenoic acid, (E)-, TMS derivative*. Puncak-puncak kecil dari waktu retensi terlihat banyak pada *biofuel* hasil reaksi *hydrocracking* temperatur 350 °C yang

menunjukkan adanya senyawa hidrokarbon seperti *Benzene, Naphtalene, Decane* dan lain-lain. Puncak tertinggi didapatkan pada waktu retensi 14,5 dan 16,79 berturut-turut yang menunjukkan senyawa *Pentadecane* dan *Heptadecane*. Komposisi senyawa hidrokarbon yang dihasilkan terdiri dari hidrokarbon rantai lurus *n-Paraffin* 26,72%, rantai lurus siklik *cycloparaffin* 3,34%, olefin 0,33%, senyawa aromatik 15,83% dan polisiklik aromatik 12,56%.



**Gambar 6.** Kromatogram *Biofuel* Hasil *Hydrocracking* dengan Katalis Co-Ni-Cu/Mesopori HZSM-5 5% 1:1:1 Suhu 350 °C

#### 4 KESIMPULAN

Pengembangan sumber energi terbarukan melalui implementasi *hydrocracking* minyak nyamplung dapat mendukung program nasional dan global untuk meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energi, sejalan dengan target pengurangan emisi karbon. Melalui penelitian ini, hasil yang diperoleh menunjukkan temperatur yang digunakan dalam reaksi *hydrocracking* sangat berpengaruh terhadap hasil *biofuel* yang didapat. Temperatur reaksi yang tinggi membantu konversi asam lemak dari minyak nyamplung menjadi *biofuel* untuk memutus ikatan C=O. Hasil menunjukkan dengan menggunakan katalis logam/Mesopori HZSM-5 didapat konversi asam lemak mencapai 72,1% dibandingkan dengan temperatur yang lain dengan temperatur terbaik yaitu 350 °C. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, perlu dilakukan penelitian mengenai regenerasi dan reusabilitas katalis yang digunakan dalam proses *hydrocracking* sehingga membantu mengurangi biaya produksi dan meningkatkan keberlanjutan proses.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Abdulkareem-Alsultan, G., Asikin-Mijan, N., Lee, H. V., Rashid, U., Islam, A., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019). A review on thermal conversion of plant oil (edible and inedible) into green fuel using carbon-based nanocatalyst. *Catalysts*, 9(4), 350. <http://dx.doi.org/10.3390/catal9040350>.
- Aini, A. N., Al-Muttaqii, M., Roesyadi, A., & Kurniawansyah, F. (2020). Kinerja Katalis Ni-Cu/HZSM-5 dalam Pembuatan Biogasol dari Minyak Bintaro (Cerbera manghas) dengan Proses *Hydrocracking*. *BERKALA SAINSTEK*, 8(3), 84–88. <https://doi.org/10.19184/bst.v8i3.17937>.
- Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D. H., Roesyadi, A. (2019). *Hydrocracking* of coconut oil over Ni-Fe/HZSM-5 catalyst to produce hydrocarbon *biofuel*. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(2), 319–327. DOI: 10.22146/ijc.33590.
- Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D. H., & Roesyadi, A. (2019). Bio-kerosene and bio-gasol from coconut oils via *hydrocracking* process over Ni-Fe/HZSM-5 catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14(2), 309–319. <https://doi.org/10.9767/bcrec.14.2.2669>.
- Al Muttaqii, M., Marbun, M. P., Sudibyo, S., Aunillah, A., Pranowo, D., Hasanudin, H., Rinaldi, N & Bardant, T. B. (2024). Conversion of Sunan Candlenut Oil to Aromatic Hydrocarbons with *Hydrocracking* Process Over Nano-HZSM-5 Catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 19(1), 141-148. <https://doi.org/10.9767/bcrec.20116>.
- Anekwe, I. M. S., Oboirien, B., & Isa, Y. M. (2023). Catalytic conversion of bioethanol over cobalt and nickel-doped HZSM-5 zeolite catalysts. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.2536>.
- Aslam, M. (2022). Transformation of 1-G and 2-G liquid biomass to green fuels using hydroprocessing technology: A promising technology for biorefinery development. *Biomass and Bioenergy*, 163, 106510. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106510>.
- Cheng, Y. T., Jae, J., Shi, J., Fan, W., & Huber, G. W. (2012). Production of renewable aromatic compounds by catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass with bifunctional Ga/ZSM-5 catalysts. *Angewandte Chemie -International Edition*, 51(6), 1387–1390. <https://doi.org/10.1002/anie.201107390>.
- Fivga, A., Speranza, L. G., Branco, C. M.,

- Ouadi, M., & Hornung, A. (2019). A review on the current state of the art for the production of advanced liquid *biofuels*. *Aims Energy*, 7(1), 46-76. <https://doi.org/10.3934/energy.2019.1.46>
- Gousi, M., Kordouli, E., Bourikas, K., Simianakis, E., Ladas, S., Panagiotou, G. D., Kordulis, C., & Lycourghiotis, A. (2020). Green diesel production over nickel-alumina nanostructured catalysts promoted by zinc. *Catalysis Today*, 355, 903-909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.034>.
- Hafriz, R. S. R. M., Shafizah, I. N., Salmiaton, A., Arifin, N. A., Yunus, R., Yap, Y. T., & Abd Halim, S. (2020). Comparative study of transition metal-doped calcined Malaysian dolomite catalysts for WCO deoxygenation reaction. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 8146-8159. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.046>.
- Hasanudin, H., Asri, W. R., Fanani, Z., Adisti, S. J., Hadiah, F., Maryana, R., Al Muttaqii, M., Zhu, Z., & Machado, N. T. (2022). Facile Fabrication of SiO<sub>2</sub>/Zr Assisted with EDTA Complexed-Impregnation and Templated Methods for Crude Palm Oil to *Biofuels* Conversion via Catalytic *Hydrocracking*. *Catalysts*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/catal12121522>.
- Khalit, W. N. A. W., Marliza, T. S., Asikin-Mijan, N., Gamal, M. S., Saiman, M. I., Ibrahim, M. L., & Taufiq-Yap, Y. H. (2020). Development of bimetallic nickel-based catalysts supported on activated carbon for green fuel production. *RSC advances*, 10(61), 37218-37232. <https://doi.org/10.1039/D0RA06302A>.
- Kurniawan, H.H., Dwiarmoko, A.A., Dahnum, D., Yati, I., Rinaldi, N., Amin, M., Prasetyo, E., Muttaqii, M.A. (2023). *Hydrocracking* of palm oil over metal transition/natural *zeolite* catalyst. *AIP Conference Proceedings*, 2902(1), 040005. <https://doi.org/10.1063/5.0173200>.
- 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. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00384>.
- Naji, S. Z., Tye, C. T., & Mohamed, A. R. (2022, October). *Biofuel* production via catalytic cracking of waste cooking oil using sulfonated activated carbon supported La/Ce bimetallic catalysts. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1257, No. 1, p. 012008). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1257/1/012008>.
- Nakagawa, Y., Tamura, M., & Tomishige, K. (2019). Recent development of production technology of diesel-and jet-fuel-range hydrocarbons from inedible biomass. *Fuel Processing Technology*, 193, 404-422. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.028>.
- Nurdin, A., Saputra, H., Yunilawati, R., & Restu Finalis, E. (2018). Pembuatan Dan Karakterisasi Katalis Zeolit Zsm-5 Untuk Konversi Bioetanol Menjadi Bioetilena Synthesis and Characterisation of Zsm-5 *Zeolite* Catalyst For Bioethanol To Bioethylene Conversion. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 12(2), 79-84. <http://dx.doi.org/10.29122/mipi.v12i2.2741>.
- Peron, D. V., Zholobenko, V. L., De Melo, J. H., Capron, M., Nuns, N., De Souza, M. O., Feris L. A, Marcilio N. R, Ordonsky V. V & Khodakov, A. Y. (2019). External surface phenomena in dealumination and desilication of large single crystals of ZSM-5 *zeolite* synthesized from a

sustainable source. Microporous and Mesoporous Materials, 286, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.05.033>.

Qin, Z., Hafiz, L., Shen, Y., Van Daele, S., Boullay, P., Ruaux, V., Mintova S, Gilson J.P & Valtchev, V. (2020). Defect-engineered *zeolite* porosity and accessibility. Journal of Materials Chemistry A, 8(7), 3621-3631. <https://doi.org/10.1039/c9ta11465c>.

Salwa, A. E. K., Samia, A. H., Arief, M. M. H., & Eslam, F. A. A. (2017). Production of petroleum-Like fractions from waste cooking oil. Egypt. J. Chem, 60(1), 147-60. <http://dx.doi.org/10.21608/EJCHEM.2017.2349>.

Santillan-Jimenez, E., Morgan, T., Lacny, J., Mohapatra, S., & Crocker, M. (2013). Catalytic deoxygenation of triglycerides and fatty acids to hydrocarbons over carbon-supported nickel. Fuel, 103, 1010-1017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.035>.

Tang, H., Dai, Q., Cao, Y., Li, J., Wei, X., Jibrán, K., & Wang, S. (2023). Production of jet fuel range hydrocarbons using a magnetic Ni-Fe/SAPO-11 catalyst for solvent-free hydrodeoxygenation of jatropha oil. Biomass and Bioenergy, 177, 106927. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106927>.

Thangadurai, T., Tye, C. T. "Performance of Activated Carbon Supported Cobalt Oxides and Iron Oxide Catalysts in Catalytic Cracking of Waste Cooking Oil", Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 65(3), pp. 350–360, 2021. <https://doi.org/10.3311/PPch.16885>.

Vichaphund, S., Aht-ong, D., Sricharoenchaikul, V., & Atong, D. (2014). Catalytic upgrading pyrolysis

vapors of Jatropha waste using metal promoted ZSM-5 catalysts: An analytical PY-GC/MS. Renewable Energy, 65, 70–77.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.016>.

Vichaphund, S., Aht-Ong, D., Sricharoenchaikul, V., & Atong, D. (2015). Production of aromatic compounds from catalytic fast pyrolysis of Jatropha residues using metal/HZSM-5 prepared by ion-exchange and impregnation methods. Renewable Energy, 79(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.013>.

Zhao, X., Wei, L., Cheng, S., & Julson, J. (2017). Review of Heterogeneous Catalysts for Catalytically Upgrading Vegetable Oils into Hydrocarbon Biofuels. Catalysts, 7(3), 83. <https://doi.org/10.3390/catal7030083>.

Zhu, J., Meng, X., & Xiao, F. (2013). Mesoporous *zeolites* as efficient catalysts for oil refining and natural gas conversion. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 7, 233-248. <https://doi.org/10.1007/s11705-013-1329-2>.