

Kinerja Katalis Ni-Cu/HZSM-5 dalam Pembuatan *Biogasoil* dari Minyak Bintaro (*Cerbera manghas*) dengan Proses *Hydrocracking*

(Performance of Ni-Cu/HZSM-5 Catalyst in Hydrocracking Process to Produce Biogasoil from *Cerbera manghas* Oil)

Afrida Nur Aini^{1*}, Muhammad Al-Muttaqii², Achmad Roesyadi¹, Firman Kurniawansyah¹

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Teknik Kimia, Sukolilo, Surabaya 60111

²Balai Penelitian Teknologi Mineral, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jl. Ir. Sutami Km.15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan 35361

^{*}Penulis Korespondensi E-mail: afrida.ad@gmail.com

Abstrak

Catalytic cracking dan *hydroprocessing* merupakan dua proses yang digunakan untuk mengubah minyak nabati menjadi *biofuel*, gabungan dari kedua proses tersebut dinamakan reaksi *hydrocracking*. Minyak bintaro yang bersifat *non-edibleoil* serta memiliki kadar minyak cukup banyak yakni sebesar 35-50% dapat direkomendasikan sebagai salah satu sumber minyak nabati yang dapat diolah menjadi *biogasoil*. Penambahan logam nikel (Ni) dan tembaga (Cu) ialah untuk memperoleh *yield* yang lebih baik daripada menggunakan satu jenis katalis. Preparasi katalis dilakukan dengan menggunakan metode *incipient wetness impregnation*. Variabel *loading support* HZSM-5 yang digunakan sebesar 5% dan 10%, serta ratio logam Ni-Cu yaitu 1:1. Katalis Ni-Cu/HZSM-5 dianalisa menggunakan BET, EDX, dan XRD untuk mengetahui karakteristik katalis. Selanjutnya proses *hydrocracking* dilakukan dengan mencampurkan 2 gram katalis Ni-Cu/HZSM-5 dan 250 ml minyak bintaro ke dalam reaktor *batch* berpengaduk pada suhu reaksi 375°C selama 2 jam. Produk cair (*biofuel*) yang dihasilkan dari proses *hydrocracking* dianalisa menggunakan GC-MS untuk mengetahui komposisi hidrokarbon. Rute reaksi yang mendominasi dalam penelitian ini ialah reaksi dekarbinolasi dan dekarboksilasi. Hal itu terlihat dari komposisi hidrokarbon terbanyak dari produk *biogasoil* yang dihasilkan ialah C15 dan C17. Hasil dari penelitian diperoleh Ni-Cu/HZSM-5 dengan *loading* 5% dan ratio logam 1:1 optimum digunakan pada proses *hydrocracking* minyak bintaro untuk menghasilkan *biogasoil* dengan *yield* sebesar 82,7%.

Kata Kunci: *hydrocracking*, minyak bintaro, Ni-Cu/HZSM-5, dan *biogasoil*.

Abstract

Catalytic cracking and hydroprocessing are two processes used to convert vegetable oils into biofuels, a combination of the two processes is called a hydrocracking reaction. Bintaro oil which is non-edibleoil and has a high oil content of 35-50% can be recommended as a source of vegetable oil that can be processed into biogasoil. The addition of nickel (Ni) and copper (Cu) is to obtain a better yield than using one type of catalyst. The catalyst preparation was carried out using the incipient wetness impregnation method. The loading support variable HZSM-5 used is 5% and 10%, and the Ni-Cu metal ratio is 1: 1. Ni-Cu / HZSM-5 catalysts were analyzed using BET, EDX, and XRD to determine the catalyst characteristics. The hydrocracking process is then carried out by mixing 2 grams of Ni-Cu / HZSM-5 catalyst and 250 ml of bintaro oil into a stirred batch reactor at a reaction temperature of 375°C for 2 hours. The biofuel produced from the hydrocracking process is analyzed using GC-MS to determine the hydrocarbon composition. The reaction route that dominates in this study is the decarbinolation and decarboxylation reaction. This can be seen from the composition of the most hydrocarbons from the biogasoil product produced is C15 and C17. The results of the study obtained Ni-Cu / HZSM-5 with a loading of 5% and optimum metal 1: 1 ratio used in the hydrocracking process of Bintaro oil to produce biogasoil with a yield of 82.7%.

Keywords: *hydrocracking, bintaro oil, Ni-Cu/HZSM-5, and biogasoil.*

PENDAHULUAN

Penggunaan minyak fosil secara terus menerus menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan seperti percepatan pemanasan global (*the accelerate of global warming*), emisi gas CO₂, efek rumah kaca, polusi udara dan masalah-masalah lingkungan lainnya. Di sisi lain kebutuhan terhadap minyak bumi terus mengalami peningkatan sejalan dengan pertumbuhan penduduk di Indonesia. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya

Mineral(ESDM), produksi minyak mentah di Indonesia dari tahun 2012 hingga 2017 terus mengalami penurunan. Produksi minyak mentah di tahun 2012 mencapai 859.743BOPD sedangkan pada tahun 2017 produksi minyak mentah hanya mencapai 801.024 BOPD. Apabila konsumsi bahan bakar minyak bumi di Indonesia tidak berubah dan tidak adanya upaya suatu alternatif baru, maka diperkirakan cadangan minyak bumi di Indonesia akan habis dalam 12 tahun mendatang [1].

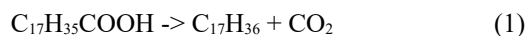
Salah satu upaya yang dilakukan pemerintah untuk mengatasi krisis energi yaitu mengembangkan sumber daya terbarukan. Melalui Instruksi Presiden No. 1/2006 tentang penyediaan dan pemanfaatan bahan bakar nabati (*biofuel*) sebagai bahan bakar lain, merupakan suatu instruksi yang menegaskan pentingnya pengembangan Bahan Bakar Nabati [2].

Sumber biomassa yang berpotensi sebagai bahan bakar nabati ialah bintaro (*Cerbera manghas*). Buah bintaro terdiri atas 8% biji dan 92% daging buah. Bijinya sendiri terbagi dalam cangkang 14% dan daging biji 86%. Biji bintaro mengandung minyak antara 35-50% [3]. Bila seluruh kebutuhan *biofuel* disuplai dari bintaro, akan dibutuhkan biodiesel sebanyak 720.000 kiloliter atau setaradengan 5,1 juta ton biji bintaro, dengan asumsi bahwa 2,5 kg biji bintaro akan menghasilkan 1 liter minyak bintaro [4].

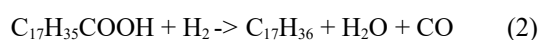
Hydrocracking merupakan salah satu metode yang dapat mengkonversi minyak nabati menjadi *biofuel* melalui proses pemecahan molekul *hydrocarbon* dengan menggunakan panas, katalisator, dan adanya penambahan gas hidrogen [5]. Penambahan gas hidrogen dapat membantu menghilangkan atom oksigen dan membentuk H₂O, CO, dan CO₂; serta mampu meminimalkan pembentukan coke sehingga memperlambat deaktivasi katalis oleh *pore blockage* [7].

Trigliserida yang terdapat pada minyak bintaro mula-mula dikonversi menjadi paraffin atau hidrokarbon alkana, kemudian mengalami proses berturut-turut yaitu *decarboxylation*, *decarbonylation*, dan *hydrodeoxygenation* [6]. Adapun uraian lengkap reaksi *hydrocracking* adalah sebagai berikut:

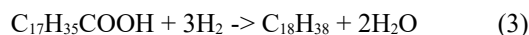
a. Reaksi dekarboksilasi, pada reaksi ini terjadi pembentukan CO₂



b. Reaksi dekarbonisasi, reaksi ini menghasilkan hidrokarbon utama dengan bilangan karbon ganjil dengan *byproduct* H₂O dan CO.



c. Reaksi hidrodoksigenasi (reduksi), reaksi ini menghasilkan hidrokarbon utama dengan bilangan karbon genap dengan *byproduct* H₂O



Penggunaan zeolite HZSM-5 yang mempunyai *strong acidity* telah diaplikasi pada beberapa studi tentang proses *hydrocracking* dan *hydroisomerization* minyak nabati menjadi *gasoline range hydrocarbons* [7]. Namun, katalis ini memiliki kelemahan yaitu masih rendahnya *yield* fraksi liquid yang dihasilkan serta mudahnya katalis terdeaktivasi. Zeolit HZSM-5 ini mempunyai pori ukuran mikro (< 2 nm) sehingga dapat menyebabkan polimerisasi *by-product* atau *reaction intermediates* yang menutupi inti aktif katalis (*active sites*) di dalam saluran mikropori [20]. Hal tersebut mengakibatkan laju difusi berlangsung lambat.

Oleh karena itu, penelitian ini mengkombinasi logam transisi Ni dan Cu (dengan beberapa variabel rasio logam) untuk meningkatkan aktivitas dari support zeolit HZSM-5. Penambahan fungsi asam pada katalis dikarenakan reaksi

isomerisasi yang terbentuk dapat meningkatkan produk dengan rantai bercabang sehingga dapat memperbaiki stabilitas produk (*gasoil*) pada suhu rendah [8].

METODE PENELITIAN

Bahan

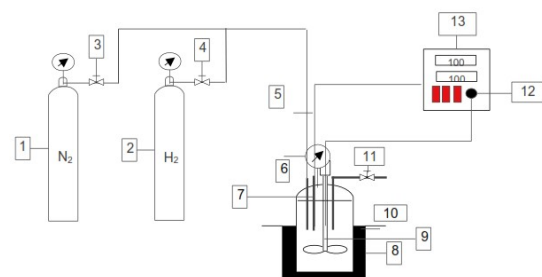
Bahan baku yang digunakan adalah biji bintaro yang telah dipress menjadi minyak bintaro; NH₄-ZSM-5 (CAS No. 1318-02-1) dengan rasio SiO₂/Al₂O₃=40 yang diperoleh dari Zeolyst International (CBV 8014) yang kemudian dikalsinasi untuk menjadi HZSM-5; logam Ni(NO₃)₂·6H₂O dan Cu(NO₃)₂·3H₂O Merck.

Metode

Melakukan preparasi katalis menggunakan metode *incipient wetness impregnation* [9][10][11]. Impregnasi zeolit HZSM-5 dilakukan dengan menambahkan larutan garam Ni(NO₃)₂·6H₂O dengan rasio logam(1:1) pada support HZSM-5 dengan variabel *loading* (5%, 10%). Selanjutnya impregnasi dilakukan bertahap dengan garam prekursor Cu(NO₃)₂·3H₂O. Lalu katalis disimpan semalaman di dalam desikator. Kemudian dikeringkan di dalam oven pada temperatur 120°C selama 12 jam. Kemudian dikalsinasi dengan udara pada temperatur 500°C selama 3 jam dan dilanjutkan dengan proses reduksi dengan gas H₂ pada temperatur 550°C selama 2 jam.

Katalis dilakukan uji karakterisasi dengan metode *Brunauer Emmett Teller* (BET) untuk mendapatkan nilai luas permukaan dan volume pori katalis, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui bentuk kristalinitas katalis dan unsur-unsur yang terdapat pada katalis, dan analisa *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) untuk melihat kandungan logam pada katalis.

Langkah selanjutnya yaitu proses *hydrocracking*, dimana mencampurkan 2 gram katalis Ni-Cu/HZSM-5 dan 250 ml minyak bintaro ke dalam reaktor *batch* berpengaduk. Gambar 1 menunjukkan seperangkat peralatan proses *hydrocracking* yang terdiri dari: 1) Tabung gas N₂, 2) Tabung gas H₂, 3) Valve tube gas N₂, 4) Valve tube gas H₂, 5) Tube reaktor gas N₂/H₂, 6) Indikator tekanan reaktor, 7) Thermocouple, 8) Furnace, 9) Pengaduk, 10) Reaktor, 11) Valve tube sampling cairan, 12) Pengatur kecepatan pengaduk, 13) Panel kontrol heater reaktor. Model reaktor *batch* yaitu Model 4563 Parr Instrument Company dengan volume 600 mL. Kondisi operasi yang digunakan ialah 375°C, initial tekanan 11 bar, dan waktu reaksi 120 menit (2 jam). Hasil dari *hydrocracking* dianalisa menggunakan GC-MS untuk mengetahui rantai hidrokarbon yang terbentuk.



Gambar 1. Reaktor *hydrocracking* [3].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik katalis

Gambar 2 menunjukkan difraktogram katalis Ni-Cu/HZSM-5 dengan berbagai variasi rasio *loading* logam Ni/Cu. Pada tipe katalis Ni-Cu/HZSM-5, keberadaan partikel Cu terlihat pada sudut $2\theta = 45^\circ$ dan $45,55^\circ$, hal ini sesuai dengan data file JCPDS No. 00-004-0850, sedangkan keberadaan partikel Ni terlihat pada sudut $2\theta = 44,5^\circ$, sesuai dengan data data ICDD:00-004-0850. Keberadaan logam

Ni dan Cu di dalam katalis tidak mengubah struktur kristal dari zeolite HZSM-5, namun hanya mengurangi intensitas masing-masing peak difraksi [12].

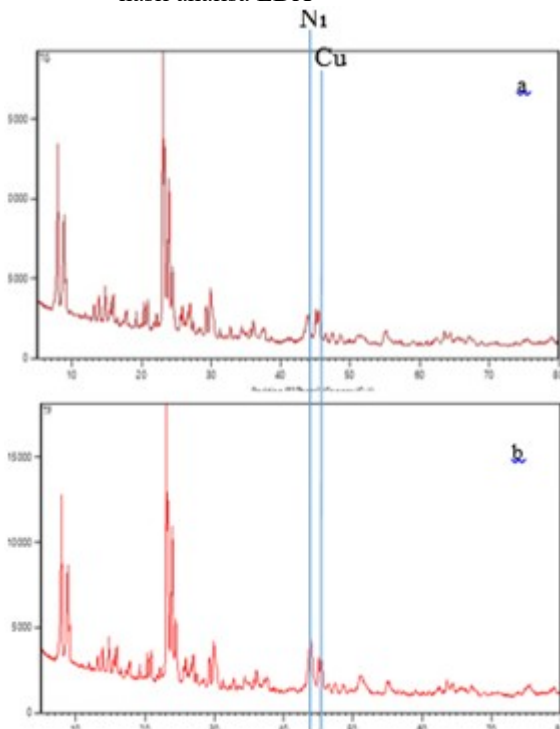
Tabel 1 menunjukkan sifat katalis Ni-Cu/HZSM-5. Setelah dilakukan proses impregnasi logam Ni dan Cu pada support HZSM-5, luas permukaan dan diameter pori dari katalis Ni-Cu/HZSM-5 yang dihasilkan mengalami penurunan. Katalis HZSM-5 yang mempunyai luas permukaan $407.386 \text{ m}^2/\text{g}$ [3] mengalami penurunan sekitar 15% setelah proses impregnasi dengan bimetal Ni-Cu.

Tabel 1. Hasil Analisa Katalis Ni-Cu/HZSM-5

Katalis	Surface area ^a , S (m^2/g)	Diameter pori rata-rata ^b , D (nm)	Volume pori total ^c , V (cm^3/g)	Kadar logam d, wt.%	
				Ni	Cu
HZSM-5	407,386	3,120	0,3177	-	-
Ni-Cu/HZSM-5_5(1:1)	336,766	3,261	0,3976	1,26	1,47
Ni-Cu/HZSM-5_10(1:1)	356,173	3,240	0,2885	5,24	4,69

*a,b,c = hasil analisa BET

*d = hasil analisa EDX



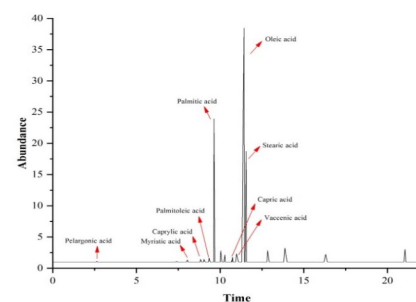
Gambar 2. Difraktogram XRD a) Ni-Cu/HZSM-10(1:1), b) Ni-Cu/HZSM-5(1:1), c) Ni-Cu/HZSM-5(1:2), d) Ni-Cu/HZSM-5(1:1)

Penurunan luas permukaan untuk masing-masing katalis dikarenakan mikropori dari zeolite HZSM-5 terisi dengan logam. Semakin banyak logam yang ditambahkan pada permukaan padatan HZSM-5, maka akan berpengaruh terhadap menurunnya luas permukaan dari katalis tersebut. Hal ini disebabkan jumlah logam yang semakin banyak, maka akan terjadi kompetisi untuk berdifusi ke dalam mulut pori [13]. Penambahan logam pada support HZSM-5 diharapkan mampu meningkatkan aktivitas dari katalis yang dihasilkan [14]. Berkurangnya luas permukaan dari katalis

bukan berarti efektifitas dari katalis menjadi berkurang, tetapi justru logam akan menambah sisi aktif pada katalis yang akan mempengaruhi laju reaksi didalam katalis [15].

Fenomena pada variabel yaitu total volume pori dari katalis yang dihasilkan yaitu semakin besar *loading* dan rasio logam setelah impregnasi, maka total volume pori yang dihasilkan mengalami penurunan. Hal tersebut menunjukkan bahwa partikel bimetal berhasil terdispersi dan masuk ke dalam pori-pori HZSM-5. Walaupun pada variabel Ni-Cu/HZSM-5_5(1:1) volume pori mengalami kenaikan karena kelebihan beban parsial permukaan support yang menghalangi sistem berpori [15] namun hal tersebut tidak menyebabkan efektifitas dari katalis berkurang.

Analisa Produk Gasoil

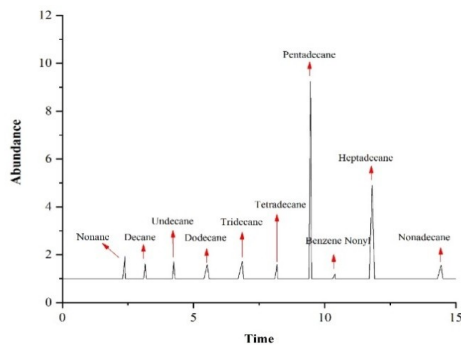


Gambar 3. Spektra GC-MS minyak bintaro

Gambar 3 Hasil analisa minyak bintaro menunjukkan bahwa asam lemak terdiri dari beberapa komponen asam lemak yaitu, asam pelargonat/asam oksalat pada waktu tinggal 2,6; asam miristat pada waktu tinggal 7,4; asam kaprilat pada waktu tinggal 8,8; asam palmitoleat pada waktu tinggal 9,3; asam palmitat pada waktu tinggal 9,6-10,3; asam kaprik pada waktu tinggal 10,7; asam vaccenic pada waktu tinggal 10,74; asam oleat pada waktu tinggal 11,4 dan 16-21; asam stearat pada waktu tinggal 11,5.

Asam lemak terbanyak yang terkandung dalam minyak bintango adalah oleat, palmitat, dan stearat sebanyak 39,32%, 27,64%, dan 17,73%. Dimana asam lemak tersebut akan tercracking menjadi rantai hidrokarbon yang lebih pendek untuk menghasilkan produk *gasoil*.

Gambar 4 menunjukkan spectra GC-MS produk cair yang dihasilkan dari *hydrocracking* minyak bintango menggunakan katalis Ni-Cu/HZSM-5 pada waktu tinggal 2-15. Hasil ini menunjukkan, terjadinya proses penghilangan atom oksigen dari asam lemak yang memiliki molekul rantai panjang menjadi molekul rantai pendek.



Gambar 4. Spektra GC-MS produk *hydrocracking* dengan menggunakan Ni-Cu/HZSM-5_10%(1:1)

Setelah melakukan pengelompokan berdasarkan rantai hidrokarbon C14-C20 yang mana merupakan kelompok *gasoil* berdasarkan perhitungan persamaan 4 [17] maka didapatkan *yield gasoil* sebesar 82,7% dan 23,75% dengan penggunaan variabel ratio dan *loading* katalis Ni-Cu/HZSM-5 berturut-turut 5(1:1) dan 10(1:1).

$$\text{Yield gasoil} = \frac{\text{gasoil} \times \text{berat total produk cair}}{\text{berat umpan}} \times 100\% \quad (4)$$

Yield gasoil yang diperoleh cenderung lebih besar dibandingkan dengan proses *hydrocracking* menggunakan katalis HZSM-5 tanpa dilakukan impregnasi logam. Pada *hydrocracking* minyak kemiri sunan, minyak kelapa, dan minyak biji karet menggunakan katalis HZSM-5 diperoleh *yield gasoil* berturut-turut sebesar 42,7%, 4%, dan 31,25% [18] [19].

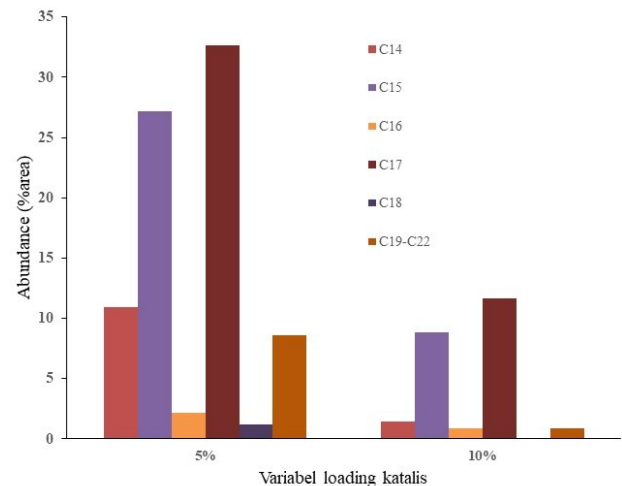
Secara umum, katalis yang digunakan dalam proses *hydrocracking* minyak nabati harus terdiri dari dua sites yaitu *metallic sites* dan *acid sites*. *Metallic sites* diperlukan untuk reaksi hidrogenasi, dekarboksilasi, dekarbonilasi, dan reaksi hidrideksigenasi. *Acid sites* diperlukan untuk isomerisasi dan reaksi perengkahan (*cracking*) [21]. Oleh karena itu, menyeimbangkan antara logam dan asam merupakan faktor yang sangat penting dalam mendesain katalis untuk mengubah selektivitas, aktivitas, dan daya tahan katalis. Dalam penelitian ini komposisi *loading support* HZSM-5 5% dengan rasio logam 1:1 lebih efektif menghasilkan *gasoil* dibandingkan dengan Ni-Cu/HZSM-5 10%(1:1).

Hal tersebut didukung dengan hasil penelitian terdahulu yang menggunakan beberapa jenis *bimetal* dalam proses *hydrocracking* minyak bintango, antara lain: Ni-Co/HZSM-5; Ni-Fe/HZSM-5; serta Ni-Zn/HZSM-5 dengan 5% dan 10%

loading menghasilkan *yield gasoil* berturut-urur 60% dan 42%; 44,3% dan 22,4%; serta 45,4% dan 27,3% [3][18].

Dari Gambar 5 menunjukkan komponen hidrokarbon dari produk *gasoil* yang dihasilkan. Trigliserida pada minyak bintango terpecah menjadi komponen hidrokarbon dengan rantai yang lebih pendek. Rasio n-alkana dengan jumlah atom karbon ganjil (seperti n-C15) dengan n-alkana bilangan atom karbon genap (seperti n-C16) dapat bertindak sebagai indikator untuk mengevaluasi jalur reaksi *hydrocracking* [18].

Terlihat bahwa rantai pentadekan (C15) dan heptadekan (C17) atau rantai hidrokarbon ganjil mendominasi hasil reaksi pada kedua variabel *loading*.



Gambar 5. Rantai hidrokarbon produk *gasoil* dari *hydrocracking* minyak bintango

Banyaknya rantai hidrokarbon ganjil atau rasio C15/C16 dan C17/C18 menunjukkan bahwa reaksi dekarbonilasi dan dekarboksilasi (HDC) menjadi reaksi utama pada proses *hydrocracking* minyak bintango. Hasil samping dari reaksi tersebut yaitu gas CO dan CO₂.

Di sisi lain dekarboksilasi dan dekarbonilasi merupakan reaksi endotermis sehingga membutuhkan temperatur yang lebih tinggi. Sedangkan hidrideksigenasi merupakan reaksi eksotermis [23]. Hal tersebut menyebabkan dekarbonilasi dan dekarboksilasi menjadi rute reaksi dominan pada proses *hydrocracking* dengan temperatur tinggi. Reaksi ini juga menyebabkan penggunaan konsumsi hidrogen dapat dikurangi, sehingga pada akhirnya, kelayakan ekonomi proses produksi *biofuel* akan tercapai [6].

KESIMPULAN

Preparasi katalis Ni-Cu/HZSM-5 menggunakan metode *incipient wetness impregnation* telah berhasil dilakukan sebagaimana yang ditunjukkan oleh hasil analisa karakteristik katalis yaitu BET, EDX, dan XRD. Penambahan bimetal Ni-Cu pada HZSM-5 sangat efektif dalam meningkatkan aktivitas katalis untuk memproduksi *gasoil*. Dilihat dari variabel katalis yang terkecil (5%; 1:1) menghasilkan *yield gasoil* sebesar 82.7%. Reaksi hidridekarbonilasi atau hidridekarboksilasi (HDC) merupakan reaksi utama pada proses *hydrocracking* minyak bintango.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian yang didanai oleh Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi melalui Program Magister tahun 2019-2020. Karenanya diucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pertanian, Outlook Komoditas Pertanian Perkebunan, Pusat Data dan Informasi Pertanian Kementerian Pertanian, Jakarta, 2010.
- [2] Kementerian ESDM, Kebijakan Pengembangan Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE), Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2006.
- [3] M.A. Muttaqii, Hydrocracking Minyak Nabati Menjadi *Biofuel* Menggunakan Katalis Bimetal Berbasis Ni/HZSM-5, Teknik Kimia ITS, Surabaya, 2016.
- [4] D. Endriana, Sintesis Biodiesel (Metil ester) dari Minyak Biji Bintaro (Cerbera Odollam Gaertn) hasil ekstraksi, Kimia MIPA-UI, Universitas Indonesia, Jakarta, 2007.
- [5] G.W. Huber, P. O'Connor, dan A. Corma, Processing biomass in conventional oil refineries: production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures, *Applied Catalysts A*, vol. 329, pp. 120-129, 2007.
- [6] E. Rosyadi, Konversi Minyak Nabati menjadi Green Diesel dan Green Gasoline dengan Proses Hydrocracking dan Hydrotreating pada Katalis NiMo/Al₂O₃, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2012.
- [7] R. Sotelo-Boyás, F. Trejo-Zárraga, F.J. Hernández-Loyo, Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels, Ch. 8, 2012.
- [8] C. Barrón, J. A. Melo-Banda, E. J. M. Dominguez, M. E. Hernández, R. R. Silva, T. A. I. Reyes, M.M.A Meraz, Catalytic hydrocracking of vegetable oil for agrofuels production using Ni-Mo, Ni-W, Pt and TFA catalysts supported on SBA-15, *Catalysis Today*, vol. 166 no. 1, pp. 102-110, 2011.
- [9] S. Vichaphund, D. Aht-ong, V. Sricharoenchaikul, Catalytic upgrading pyrolysis vapors of Jatropha waste using metal promoted ZSM-5 catalysts, *Renewable Energy*, vol. 65, pp. 70-77, 2014.
- [10] S. Sartipi, M. Alberts, M. J. Meijerink, T. C. Keller, J. Pérez-Ramírez, J. Gascon, and F. Kapteijn, Towards Liquid Fuels from Biosyngas: Effect of Zeolite Structure in Hierarchical-Zeolite-Supported Cobalt Catalysts, *ChemSusChem*, vol. 6, no. 9, pp. 1646-1650, 2013.
- [11] G. W. Huber, P. O'Connor, dan A. Corma, Processing biomass in conventional oil refineries: production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures, *Applied Catalysts A*, vol. 329, pp. 120-129, 2007.
- [12] S. Vichaphund, D. Aht-ong, V. Sricharoenchaikul, Production of aromatic compounds from catalytic fast pyrolysis of Jatropha residues using metal/HZSM-5 prepared by ion-exchange and impregnation methods, *Renewable Energy*, vol. 79, pp. 28-37, 2015.
- [13] E. Astuti, Pengaruh Konsentrasi Katalisator dan Rasio Bahan terhadap Kualitas Biodiesel dari Minyak Kelapa, *Jurnal Rekayasa Proses*, Fakultas Teknik Universitas Gajah Maja, Yogyakarta, 2012.
- [14] H. Li, P. Yu, B. Shen, *Biofuel* potential production from cottonseed oil: a comparison of non-catalytic and catalytic pyrolysis on fixed-fluidized bed reactor, *Fuel Process Technology*, vol. 90, pp. 1087-1092, 2009.
- [15] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 3rd edition, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Series, 1999.
- [16] H. V. Bekkum, E. M. Flanigen, P. A. Jacobs, J. C. Jansen, *Introduction to Zeolite Science and Practice*, Elsevier, Oxford, 2007.
- [17] Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D. H., Roesyadi, A., "Bio-kerosene and Bio-gasoil from Coconut Oils via Hydrocracking Process over Ni-Fe/HZSM-5 Catalyst", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14.2: 309, 2019.
- [18] L. Marlinda, M. Al-Muttaqii, A. Roesyadi, Formation of hydrocarbon compounds during the hydrocracking of non-edible vegetable oils with cobalt-nickel supported on hierarchical HZSM-5 catalyst, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 67, no. 1, IOP Publishing, 2017.
- [19] P. Yotsomnuk, W. Skolpap, *Biofuel* Production from Waste Virgin Coconut oil by Hydrocracking over HZSM-5 Zeolite, *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, vol. 5, pp. 60-63, 2017.
- [20] N. Kyungsu, C. Minkee, R. Ryong, Recent Advances in the synthesis of Hierarchically nanoporous zeolites, Microporous and Mesoporous, *Materias*, vol. 166, pp. 3-19, 2013.
- [21] B. Al Alwan, *Biofuels Production Via Catalytic Hydrocracking of Corn Oil And Hydrothermal Decarboxylation Of Oleic Acid Over Transition Metal Carbides Supported On Al-Sba-15*, Ph.D. Disertation, Wayne State, University, Detroit, Michigan, 2014.
- [22] L. Chen, H. Li, J. Fu, C. Miao, Lv. Pengmei, Z. Yuan, Catalytic hydroprocessing of fatty acid methyl esters to renewable alkane fuels over Ni/HZSM-5 catalyst, *Catalyst Today*, vol. 259, pp. 266-276, 2016.