



Produksi energi hijau (*biogasoline* dan bioavtur) dengan katalis CeN berpendukung Si/Al dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS)

PUAN MAHA FIRA^{1*}, MAI WENDY JESIKA SITINJAK¹, RISKA FEBRIANTI WULANDARI¹, FEBI DWI PURNAMASARI², DILA AULIA¹, DAN HASANUDIN¹

¹Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, 30862, Indonesia. ²Jurusan Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, 30862, Indonesia.

<p>Kata kunci: <i>biogasoline</i>, <i>bioavtur</i>, <i>crude palm oil</i>, <i>hydrocracking</i>, katalis CeN-Si/Al, tandan kosong kelapa sawit.</p>	<p>ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk memproduksi <i>biogasoline</i> dan bioavtur melalui konversi <i>Crude Palm Oil</i> (CPO) menggunakan katalis CeN berpendukung Si/Al dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Katalis ini dihasilkan dari silika TKKS, memiliki sifat bifungsional dengan logam cerium sebagai komponen utama. Proses <i>hydrocracking</i> CPO dilakukan pada berbagai suhu, yaitu 300°C, 350°C, dan 400°C. Hasil analisis GC-MS menunjukkan konversi CPO menghasilkan produk berupa <i>biogasoline</i>, bioavtur, dan biosolar. Produktivitas <i>biogasoline</i> maksimal pada suhu 300°C, sementara bioavtur maksimal pada suhu 350°C. Penelitian ini menciptakan alternatif ramah lingkungan dari limbah pertanian (TKKS) untuk memproduksi bahan bakar nabati. Katalis CeN-Si/Al dari TKKS menjadi langkah menuju energi hijau yang berkelanjutan.</p>
<p>Keywords: <i>biogasoline</i>, <i>bioavtur</i>, <i>crude palm oil</i>, <i>hydrocracking</i>, CeN-Si/Al catalyst, empty palm oil bunches.</p>	<p>ABSTRACT: This research aims to produce <i>biogasoline</i> and bioavtur through the conversion of <i>Crude Palm Oil</i> (CPO) using a CeN catalyst supported by Si/Al from Empty Palm Oil Bunches (TKKS). This catalyst is produced from EFB silica, has bifunctional properties with cerium metal as the main component. The CPO <i>hydrocracking</i> process is carried out at various temperatures, namely 300°C, 350°C and 400°C. The results of GC-MS analysis show that the conversion of CPO produces products in the form of <i>biogasoline</i>, bioavtur and biodiesel. <i>Biogasoline</i> productivity is maximum at a temperature of 300°C, while bioavtur is maximum at a temperature of 350°C. This research creates an environmentally friendly alternative from agricultural waste (TKKS) to produce biofuel. The CeN-Si/Al catalyst from TKKS is a step towards sustainable green energy.</p>

1 PENDAHULUAN

Emisi gas rumah kaca menjadi salah satu tantangan terbesar umat manusia dalam menghadapi abad-21 [1]. Sekitar dua pertiga dari total emisi gas rumah kaca disumbangkan oleh emisi karbon dioksida. Emisi gas karbon dioksida mulai dari tahun 2015 hingga tahun 2019 meningkat sebesar 1,1% setiap tahunnya, dimana persentase terbesar emisi karbon dioksida berasal dari sistem energi seperti bahan bakar fosil [2]. Upaya untuk menurunkan emisi karbon dioksida dapat dilakukan dengan cara mensubstitusi bahan bakar fosil dengan bahan bakar nabati yang lebih ramah lingkungan, seperti *biogasoline* dan bioavtur yang didapat dari hasil konversi *Crude Palm Oil* (CPO) [3].

Crude Palm Oil (CPO) adalah minyak kelapa sawit yang diperoleh dari hasil ekstraksi buah kelapa sawit yang banyak mengandung trigliserida dan asam lemak bebas [4]. CPO memiliki rantai karbon panjang yang dapat dikonversi menjadi *biogasoline* dan bioavtur melalui proses *hydrocracking* katalitik [5]. *Hydrocracking* katalitik adalah suatu proses perengkahan katalitik yang melibatkan penghapusan ikatan rangkap dan gugus karboksil dalam asam lemak untuk mendapatkan senyawa dengan jumlah atom karbon yang lebih sedikit [6]. Proses *hydrocracking* melibatkan pemutusan ikatan C dengan bantuan termal yang didukung oleh katalis yang tepat untuk mendapatkan hasil hidrogenasi dan deoksigenasi yang maksimal [7].

Katalis yang digunakan dalam proses *hydrocracking* berupa katalis bifungsional yang merupakan

* Corresponding Author: email: puanmhafira4@gmail.com

gabungan dari katalis asam dan logam [8]. Logam yang memiliki aktivitas selektivitas yang tinggi antara lain logam cerium. Berdasarkan hasil penelitian menyatakan bahwa silika yang didoping logam cerium 5% sebagai promotor katalis terbaik karena dapat meningkatkan aktivitas katalitik dan memiliki luas permukaan karbon aktif (BET) tertinggi [9]. Selain itu, katalis utama logam aktif cerium jarang diteliti tetapi berpotensi karena selain memiliki permukaan pori yang banyak, juga memiliki stabilitas termal yang baik pada suhu tinggi dan terbukti dapat menjadi katalis *converter* untuk membersihkan gas buang kendaraan dan mereduksi nitrogen oksida menjadi gas nitrogen [10]. Logam murni memiliki aktivitas katalitik yang rendah, dimana aktivitasnya akan menurun setelah reaksi berlangsung dikarenakan hilangnya komponen logam aktif setelah dilakukan pencucian, sehingga diperlukan *supported catalyst* atau katalis pendukung dan modifikasi logam murni tersebut.

Silika alumina digunakan sebagai *supported catalyst* karena memiliki aktivitas yang tinggi sehingga tidak mudah terdeaktivasi. Silika alumina memiliki sifat yang stabil pada suhu tinggi, inert, murah, mudah disintesis, kemampuan absorpsi yang tinggi, luas permukaan yang besar, terdapat banyak struktur pori aktif serta menghasilkan selektivitas yang memadai untuk produk biofuel [6], [11]. Selain *supported catalyst*, perlu adanya modifikasi logam katalis yang digunakan untuk proses *hydrocracking*. Oleh karena itu, cerium yang digunakan dikembangkan menjadi cerium nitrida sebagai logam prekursor pada silika untuk meningkatkan sifat fungsional dari cerium dan nitrida sebagai promotor. Modifikasi katalis cerium menjadi katalis Cerium Nitrida (CeN) dengan uap amonia dapat meningkatkan kinerja katalis [12].

Studi ini mengenai produksi energi hijau *biogasoline* dan bioavtur dengan menggunakan katalis CeN berpendukung Si/Al sebagai perwujudan dari *net zero emission* visi *International Energy Agency*. Biofuel yang diteliti menggunakan Si/Al yang disintesis dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) karena kadar biosilika yang tinggi sekitar 60,42% dan potensial dijadikan katalis heterogen. Katalis dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dalam mengamati struktur dan kristalinitas dari katalis, *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk uji morfologi pada katalis, *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengamati gugus fungsi katalis hasil modifikasi. Sementara produk hasil *hydrocracking* berupa *biogasoline* dan bioavtur dianalisis dengan *Gas Chromatography-mass Spectrum* (GC-MS).

2 BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan selama empat bulan setelah mendapatkan pendanaan PKM-RE di Laboratorium Kimia Fisika, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya, Indralaya, Sumatera Selatan.

Alat dan Bahan

Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah gelas beaker, gelas ukur, cawan krus, cawan porselin, pipet tetes, pH meter, gelas arloji, labu ukur, sudip, *milling*, desikator, *furnace*, oven, labu leher tiga, seperangkat alat tabung oksigen, ayakan, hot plate, magnetic stirrer, reaktor *hydrocracking* dan seperangkat alat karakterisasi/analisa SEM EDX, XRD, FTIR dan GC-MS.

Bahan

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), cerium (IV) sulfat tetrahidrat, KHFTalat 10%, *Crude Palm Oil*, asam sulfat, asam klorida, asam nitrat, akuademin, natrium hidroksida, aluminium hidroksida, ammonia dan piridin.

Metode

Preparasi Silika dari TKKS

TKKS dipotong-potong hingga ukuran 8-10 cm dan dihaluskan dengan mesin *milling*, lalu dikeringkan di dalam oven pada 120°C selama 24 jam. TKKS yang telah kering kemudian dibakar di dalam *furnace* selama 6 jam pada suhu 800°C untuk kondisi pembakaran terbaik menghasilkan abu TKKS dengan kandungan silika yang lebih murni. Sampel diayak dengan ukuran 60 *mesh*. Diambil 20 gram hasil ayakan dan dicuci dengan 120 mL HCl untuk pemurnian (*leaching*) dan distirer selama 1 jam. Sampel dibilas dengan akuademin hingga pH netral dan dikeringkan pada suhu 120°C [13].

Pembuatan Natrium Aluminat

Proses pembuatan natrium aluminat dengan melarutkan 20 g NaOH dalam 100 mL akuademin. Sebanyak 8,5 g Al(OH)₃ dimasukkan ke dalam larutan NaOH/H₂O tersebut sambil distirer. Setelah semua Al(OH)₃ larut, kemudian didiamkan hingga terbentuk endapan. Endapan kemudian disaring dan dipanaskan dalam oven.

Sintesis Katalis Si/Al Template KHFTalat

Pembuatan natrium Si/Al memerlukan sampel silika TKKS 20 gram dan NaOH 2 M sebanyak 330 mL yang kemudian dilarutkan dan distirrer hingga mengental. Larutan tersebut didestruksi selama 30 menit pada suhu 500°C hingga diperoleh abu kering, kemudian dilarutkan dengan akuademin dan disentrifugasi hingga menghasilkan endapan. Endapan natrium silikat tersebut ditambahkan 20 mL larutan KHFtalat 10% diaduk selama 3 jam. Kemudian larutan ditambahkan campuran natrium aluminat dan NaOH ditambahkan dengan 10 mL akuademin. Kedua suspensi tersebut dicampur untuk menghasilkan suspensi 3, kemudian dilakukan pengadukan selama 30 menit dan dimasukkan ke dalam *autoclave* selama 12 jam pada suhu 180°C. Padatan yang dihasilkan dari pemanasan menggunakan *autoclave* dicuci dengan akuademin, kemudian dikeringkan selama 6 jam pada suhu 120°C. Setelah itu, produk dikalsinasi di dalam *furnace* dengan suhu 600°C selama 3 jam.

Si/Al Cerium Nitrida Template KHFtalat

Impregnasi dilakukan dengan mengembankan komponen aktif logam utama sebagai katalis ke *support catalyst* yaitu Si/Al. Proses impregnasi dilakukan dengan melarutkan Ce dari Cerium (IV) sulfat tetrahidrat kedalam 100 mL akuademin. Larutan kemudian dicampur dengan sejumlah massa Si/Al yang dimodifikasi KHFtalat, distirrer selama 1 jam, lalu kemudian distirrer sambil dipanaskan pada suhu 80°C selama 3 jam hingga pelarut menguap dan dipanaskan di dalam oven pada suhu 120°C dalam waktu 24 jam. Sampel kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C selama 3 jam dan terbentuk CeO₂-Si/Al KHFtalat.

CeO₂-Si/Al KHFtalat dilarutkan ke dalam asam nitrat yang telah dicampur dengan akuademin dan diaduk selama 1 jam tanpa pemanasan. Lalu, diaduk kembali dengan pemanasan selama 5 jam hingga pelarut menguap dalam labu leher tiga yang dilengkapi pendingin *leibig*. Kemudian larutan dipanaskan di dalam oven pada suhu 120°C selama 24 jam. Sampel lalu dikalsinasi di dalam *furnace* dengan suhu 600°C selama 3 jam. Serbuk yang terbentuk dilakukan hidrogenasi dengan sampel sebanyak 1 g pada reaktor yang dialiri gas hidrogen dan amonia dengan laju alir sebesar 30 mL/ jam selama 3 jam hingga didapatkan CeN-SiO₂ KHFtalat [3], [14].

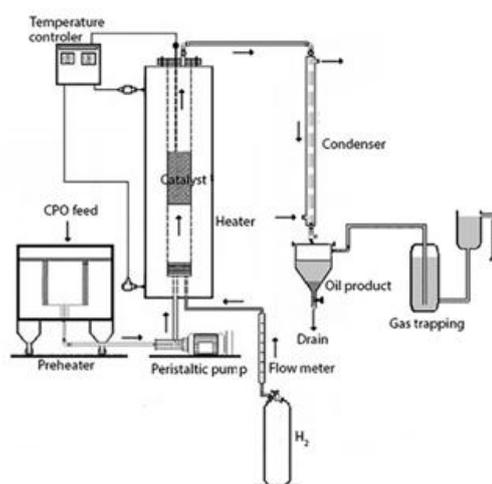
Karakterisasi Katalis

Struktur kristalinitas katalis CeN-SiO₂ KHFtalat dianalisis menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD). Gugus fungsi katalis hasil modifikasi diamati menggunakan *Fourier-Transform Infrared Spectros-*

copy (FTIR). *Scanning Electron Microscope* (SEM) digunakan untuk uji morfologi pada katalis [3].

Hydrocracking CPO dengan Katalis CeN Berpendukung Si/Al TKKS

Sebanyak 0,5 gram katalis yang digunakan dimasukkan ke dalam wadah katalis dan tabung reaktor (dengan rangkaian seperti pada Gambar 1) dan dialiri gas hidrogen dengan laju alir sebesar 30 mL/jam pada variabel suhu 300, 350, dan 400°C selama 3 jam. Lalu, dialirkan umpan minyak dengan laju alir sebesar 20 mL/jam menggunakan *syringe pump* selama 2 jam dan ditampung di dalam labu didih. Lalu, produk dianalisa dengan GC-MS [3].



Gambar 1. Reaktor *hydrocracking* CPO [4].

Analisis Data

Total konversi

$$\% \text{ Total konversi} = \frac{\text{Jumlah Feed (g)} - \text{W Residu (g)}}{\text{W Feed (g)}} \times 100\%$$

Selektivitas yield

$$\% \text{ Selektivitas yield} = \frac{\text{Jumlah Peak Area}}{\text{Total Peak}} \times 100\%$$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Katalis

Potongan TKKS yang telah dibersihkan, dikeringkan dan dikalsinasi menghasilkan abu tkks berupa serbuk silika yang berwarna kehitaman. Abu tkks yang diperoleh mengandung kandungan silika yang lebih murni. Serbuk abu TKKS yang diayak dengan ukuran 60 mesh ditambahkan HCl untuk proses pemurnian (*leaching*). Hasil akhir yang didapatkan setelah dipanaskan pada suhu 120°C yaitu padatan berwarna putih dengan struktur yang halus.

Campuran natrium hidroksida dan aluminium hidroksida membentuk sistem koloid yang menghasilkan endapan berwarna putih. Endapan tersebut dikeringkan menggunakan oven pada suhu 120°C selama 6 jam sehingga dihasilkan serbuk Natrium Aluminat yang berwarna putih. Sintesis Si/Al KHFtalat dilakukan dengan mencampurkan larutan natrium silikat template KHFtalat dengan natrium aluminat yang telah dilarutkan dengan NaOH dan akuademin sehingga dihasilkan larutan yang berwarna putih. Larutan tersebut distirrer selama 30 menit dan dimasukkan ke dalam autoclave selama 12 jam dengan suhu 180°C. Padatan yang dihasilkan dari pemanasan menggunakan autoclave dicuci dengan akuademin, kemudian dikeringkan selama 6 jam pada suhu 120°C. Setelah itu, produk dikalsinasi di dalam furnace pada suhu 600°C selama 3 jam sehingga diperoleh hasil serbuk Si/Al template KHFtalat berwarna putih.

Proses impregnasi dilakukan dengan menggunakan prekursor logam cerium yang berasal dari senyawa cerium (IV) sulfat tetrahidrat. Massa cerium (IV) sulfat tetrahidrat yang digunakan dalam proses impregnasi sebesar 3,607 g yang kemudian terdispersi pada silika. Serbuk yang diperoleh sebagai hasil dari proses impregnasi kemudian diaktivasi menggunakan asam nitrat sebanyak 2,2491 g untuk memperluas sisi aktif katalis sehingga meningkatkan aktivitas katalitik katalis. Hasil akhir diperoleh massa total katalis CeN-SiO₂ KHFtalat. Katalis CeN-SiO₂ KHFtalat digunakan dalam proses hydrocracking dan menghasilkan produk minyak yang kemudian dianalisa menggunakan GC-MS.



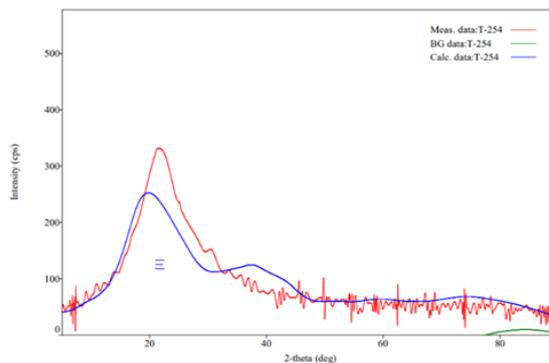
Gambar 2. (a) Katalis CeN-SiO₂ KHFtalat; (b) Produk hasil hydrocracking suhu 300°C, 350 °C dan 400 °C.

Karakterisasi Katalis CeN-SiO₂ KHFtalat

Karakterisasi katalis menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Katalis CeN-SiO₂ KHFtalat dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristalinitas dari katalis. Berdasarkan Gambar 2 data XRD yang terdeteksi adalah Si, Al, O, dan H dalam fasa halloysite. Puncak Ce tidak terdeteksi dalam difraktogram XRD karena konsentrasinya terlalu kecil. Pola difraksi

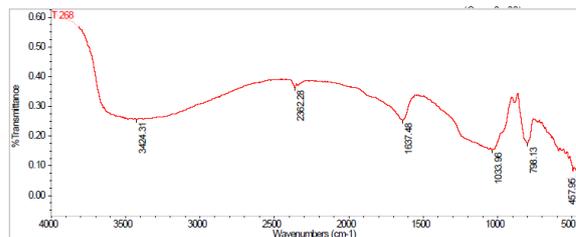
menampilkan intensitas puncak yang tidak tajam atau lebar pada angka 21,5° menandakan bahwa partikel Si/Al masih berbentuk amorf dengan struktur partikel yang tidak teratur dan belum membentuk kristalin.



Gambar 3. Difraktogram katalis CeN-SiO₂ Template KHFtalat hasil XRD

Karakterisasi katalis menggunakan Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Katalis CeN-SiO₂ dikarakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi pada katalis yang telah dimodifikasi.



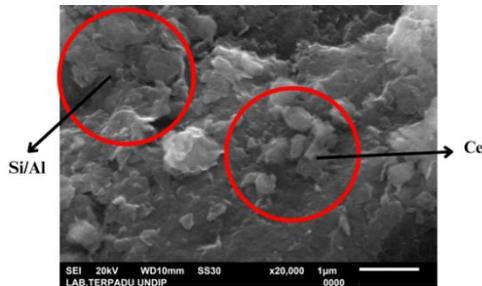
Gambar 4. Hasil Karakterisasi FTIR katalis CeN-SiO₂ template KHFtalat

Berdasarkan difraktogram FTIR menunjukkan pada daerah panjang gelombang 3424,31 cm⁻¹ terdapat gugus -OH ulur dari Si-OH, daerah panjang gelombang 1637,48 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi tekuk -OH dari Si-OH. Pita spektrum pada daerah panjang gelombang 1033,96 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi ikatan Si-O dari Si-O-Si, daerah 798,13 cm⁻¹ merupakan vibrasi ulur simetri Si-O dari Si-O-Si yang menunjukkan adanya gugus siloksan dan daerah 457,96 menunjukkan adanya vibrasi tekuk Si-O-Si.

Karakterisasi katalis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM)

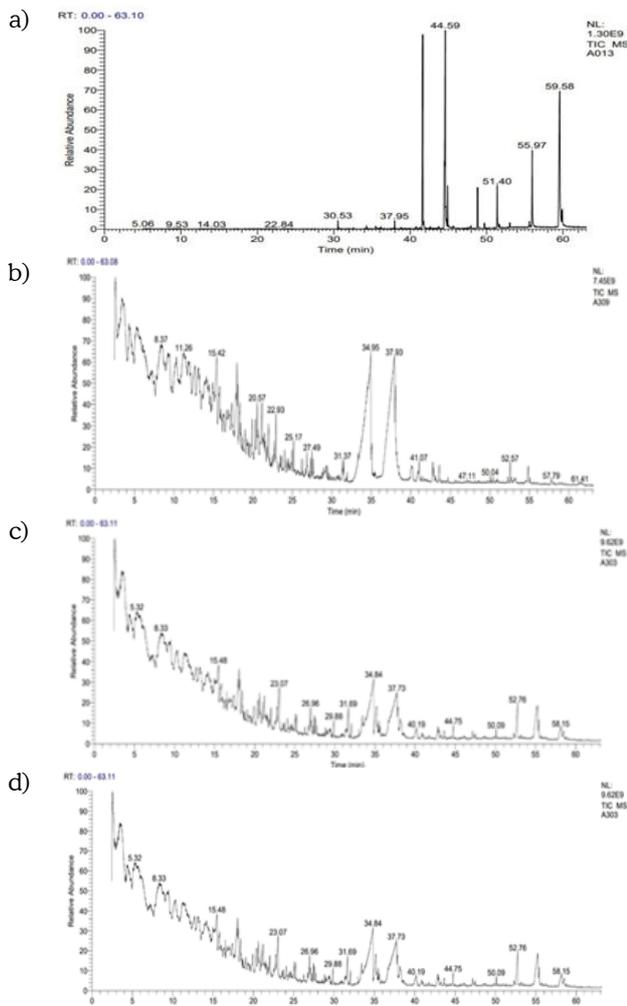
Analisis menggunakan SEM-EDS bertujuan untuk mengamati morfologi permukaan dan komposisi katalis CeN-SiO₂ template KHFtalat. Karakterisasi SEM-EDS pada penelitian ini dilakukan dengan perbesaran 20000x. Hasil EDS seperti pada (Gambar 5) menunjukkan struktur permukaan Si/Al yang mem-

bentuk lapisan atau layer dengan pori-pori berukuran kecil. Selain itu, pada permukaan Si/Al terdapat penyebaran gumpalan putih yang menandakan adanya logam cerium.



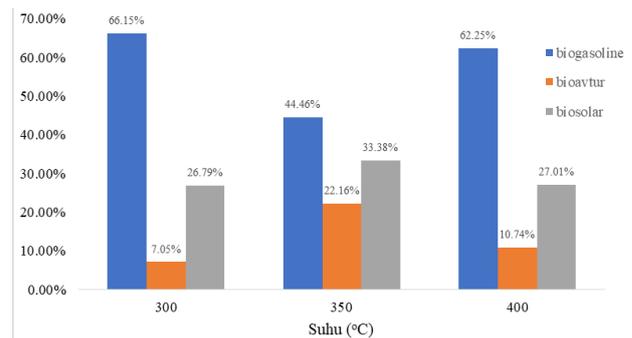
Gambar 5. Hasil perbesaran 20000x katalis CeN-SiO₂ template KHFTalat menggunakan SEM-EDS

Hasil Kromatogram Produk Hydrocracking CPO dengan Katalis CeN Berpendukung Si/Al TKKS Menggunakan Analisis GCMS



Gambar 6. (a) Kromatogram CPO (b) Kromatogram hasil hydrocracking dengan katalis CeN-SiO₂ template KHFTalat Suhu 300°C, (c) hydrocracking suhu 350°C, (d) hydrocracking suhu 400°C.

Berdasarkan Gambar 6(a) dapat dilihat bahwa munculnya puncak yang tajam di daerah waktu retensi di atas 40. Puncak yang tajam ini menandakan adanya kandungan senyawa asam lemak dari CPO yang belum dilakukan *hydrocracking*. Setelah dilakukan proses *hydrocracking* maka puncak-puncak kromatogram yang dihasilkan akan semakin banyak dan puncak-puncak tersebut banyak terletak di daerah waktu retensi di bawah 40. Hal ini dapat dilihat dari kromatogram GC-MS yang berasal dari produk minyak hasil *hydrocracking* pada variasi suhu 300°C, 350°C dan 400°C.



Gambar 7. Persentase yield produk hasil hydrocracking dengan katalis CeN-SiO₂ template KHFTalat

Berdasarkan data kromatogram, konversi CPO dengan proses *hydrocracking* pada suhu 300°C menghasilkan persen area produk biogasoline sebesar 66,15% pada rentang waktu retensi 5,11-22,93, persen area produk bioavtur sebesar 7,05% pada rentang waktu retensi 23,49-31,37 dan persen area produk biosolar sebesar 26,79% pada rentang waktu retensi 31,53-54,85. Kromatogram hasil *hydrocracking* pada suhu 350°C menunjukkan bahwa persen area produk biogasoline yang dihasilkan sebesar 44,46% pada rentang waktu retensi 5,08-22,60, persen area produk bioavtur sebesar 22,16% pada rentang waktu retensi 23,28-31,39 dan persen area produk biosolar sebesar 33,38% pada rentang waktu retensi 31,54-57,91. Kromatogram *hydrocracking* pada suhu 400°C menunjukkan bahwa produk biogasoline muncul pada rentang waktu retensi 5,09-22,80 dengan persen area produk yang dihasilkan sebesar 62,25%, sedangkan produk bioavtur dan biosolar masing-masing muncul pada rentang waktu retensi 23,06-31,39 dan 31,68-58,49 dengan persen area produk yang dihasilkan masing-masing sebesar 10,74% dan 27,01%. Berdasarkan data-data tersebut, produk biogasoline akan mencapai hasil yang maksimal pada suhu *hydrocracking* 300°C, produk bioavtur yang dihasilkan secara maksimal ada pada suhu *hydrocracking* 350°C dan produk biosolar paling banyak dihasilkan ketika suhu *hydrocracking* 350°C. Persentase total konversi CPO pada *hydrocracking*

suhu 300°C, 350°C dan 400°C masing-masing sebesar 92,66%, 94,52% dan 94,94%.

4 KESIMPULAN

Karakteristik katalis CeN-SiO₂ KHFTalat dianalisa menggunakan XRD, SEM dan FTIR. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan bahwa partikel Si/Al memiliki bentuk amorf yang ditandai dengan intensitas puncak yang tidak tajam atau lebar pada angka 21,5°. Hasil analisa menggunakan SEM-EDS menunjukkan struktur permukaan SiO₂ yang membentuk lapisan atau layer dengan pori-pori berukuran besar dan terdapat gumpalan putih yang menunjukkan keberadaan cerium. Hasil analisa FTIR menunjukkan adanya gugus Si-O pada daerah panjang gelombang 1033,96 cm⁻¹ dan 798,13 cm⁻¹.

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu *hydrocracking* mempengaruhi persen *yield* dari produk biofuel yang dihasilkan. Variasi suhu *hydrocracking* yang digunakan yaitu 300°C, 350°C dan 400°C. Data hasil analisa GC-MS menunjukkan bahwa persen *yield biogasoline* yang optimal dihasilkan pada suhu *hydrocracking* 300°C, pada suhu ini persen *yield biogasoline* yang dihasilkan sebesar 66,15%, sementara suhu 350°C menjadi suhu terbaik untuk menghasilkan produk bioavtur dengan persen *yield* bioavtur sebesar 22,16%. Nilai konversi tertinggi dihasilkan dari proses *hydrocracking* pada suhu 400°C dengan persentase total konversi sebesar 94,94%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Direktorat Jenderal Perguruan Tinggi, Riset dan Teknologi yang telah mendanai penelitian kami melalui Program Kreativitas Mahasiswa bidang Riset Eksakta tahun 2023.

REFERENSI

- [1] Y. Su, Y. Yu, and N. Zhang, "Science of the Total Environment Carbon emissions and environmental management based on Big Data and Streaming Data : A bibliometric analysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 733, p. 138984, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138984.
- [2] K. A. Oyewole *et al.*, "Carbon dioxide emission , mitigation and storage technologies pathways," *Int. J. Environ. Heal. Sustain.*, vol. 9, no. 1, pp. 0–17, 2023, doi: 10.1080/27658511.2023.2188760.
- [3] H. Hasanudin *et al.*, "Facile Fabrication of SiO₂/Zr Assisted with EDTA Complexed-Impregnation and Templated Methods for Crude Palm Oil to Biofuels Conversion via Catalytic Hydrocracking," *Catalysts*, vol. 12, no. 12, p. 1522, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/catal12121522>.
- [4] H. Hasanudin, A. Rachmat, M. Said, and K. Wijaya, "Kinetic model of crude palm oil hydrocracking over ni/mo zro2 -pillared bentonite catalyst," *Period. Polytech. Chem. Eng.*, vol. 64, no. 2, pp. 238–247, 2020, doi: 10.3311/PPch.14765.
- [5] H. Hasanudin *et al.*, "Hydrocracking optimization of palm oil to bio-gasoline and bio-aviation fuels using molybdenum nitride-bentonite catalyst," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 26, pp. 16431–16443, 2022, doi: 10.1039/d2ra02438a.
- [6] H. Hasanudin *et al.*, "Hydrocracking of crude palm oil to a biofuel using zirconium nitride and zirconium phosphide-modified bentonite," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 34, pp. 21916–21925, 2022, doi: 10.1039/d2ra03941a.
- [7] Z. Fanani, A. Rachmat, and M. Said, "Optimization of Bio-Oil Pyrolysis Product from Palm Empty Fruit Bunches over H-Zeolite Catalyst using Response Surface Methodology (RSM)," *Indones. J. Fundam. Appl. Chem.*, vol. 6, no. 2, pp. 122–129, 2021, doi: 10.24845/ijfac.v6.i3.122.
- [8] Z. Fanani, H. Hasanudin, A. Rachmat, and M. Said, "Comparison of Cr/C and Cr₂O₃/Z Catalysts on Hydrocracking of Bio-Oil from Pyrolysis of Palm Empty Fruit Bunches Zainal," *Molekul*, vol. 16, no. 3, pp. 242–250, 2021, doi: <https://doi.org/10.20884/1.jm.2021.16.3.812>.
- [9] S. Basu, V. Shree, and A. K. Sen, "Role of cerium as a promoter and process optimization studies for dehydration of glycerol to acetol over copper chromite catalyst," *J. Rare Earths*, vol. 40, no. 1, pp. 63–72, 2022, doi: 10.1016/j.jre.2021.01.013.
- [10] Samin and T. Susanna, "Studi Metode Uji Homogenitas dan Stabilitas Kandidat CRM Cerium Oksida," in *Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, 2016, pp. 57–65.
- [11] M. U. Rahman and A. Hayat, "Green synthesis, properties, and catalytic application of zeolite (P) in production of biofuels from bagasse," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 9, pp. 4820–4827, 2019, doi: 10.1002/er.4628.
- [12] G. Nazir, A. Rehman, and S. Park, "Self-activated , urea modified microporous carbon cryogels for high-performance CO₂ capture and separation," *Carbon N. Y.*, vol. 192, pp. 14–29, 2022, doi: 10.1016/j.carbon.2022.02.040.
- [13] N. A. S. A. Samat, S. A. Zulkafly, U. Z. K. Jaman, N. S. A. Zauzi, M. R. Rahman, and R. Baini, "Characteristics analysis of bio-based silica extracted from sarawak palm oil waste," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3.18 Special Issue 18, pp. 94–96, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.18.16685.
- [14] Q. U. Putri, E. E. S. Putri, Hasanudin, W. Purwaningrum, and F. Riyanti, "Hydrodeoxygenation of Crude Palm Oil into Biogasoline with Composite Catalyst Bentonite Cobalt Nitride," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2638, no. August, 2022, doi: 10.1063/5.0104039.