

Esterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* Menggunakan Katalis Karbon Kulit Buah Kakao (*Theobroma cacao*) Tersulfonasi

Andre Agustin¹, Umar Kalmar Nizar^{*2}

^{1,2}Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang
Jln.Prof. Dr.Hamka Air Tawar Padang, Indonesia

*umar_kn@fmipa.unp.ac.id

Abstract – Catalyst is a substance that plays an important role in biodiesel production because the reaction for biodiesel formation is slow. This catalyst can be synthesized by utilizing organic waste such as cocoa pods. This study aimed to study the physicochemical properties and catalytic activity of sulfonated cocoa pod carbon catalyst for biodiesel production from PFAD. This catalyst was synthesized through a calcination process at temperatures of 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C for 1 hour and sulfonation with H₂SO₄ p.a then characterized using FTIR, XRD, and acid site test. The catalyst is then applied in the manufacture of biodiesel through an esterification reaction between PFAD and methanol with a mole ratio of 1 : 15. The biodiesel produced was tested for its physicochemical properties in the form of density test, flow rate, acid number, and percent conversion. The results showed that the highest number of carbon catalyst sites for cocoa pod shells was KKBK-450. Based on the FTIR analysis, there are absorption bands at wave numbers of 1036 cm⁻¹ and 1181 cm⁻¹ indicating the presence of an O=S=O group which proves that the sulfonate group was successfully substituted onto the carbon surface of the cocoa pod. Characterization using XRD showed the results in the form of a carbon catalyst of cocoa pods having an amorphous structure. Based on the test results of the physicochemical properties of the catalyst from the biodiesel produced, KKBK-450 showed the optimum catalytic activity with the percent conversion of FFA to FAME of 52.28%.

Keywords — Sulfonated carbon catalyst, cocoa pods, biodiesel, PFAD

I. PENDAHULUAN

Energi fosil menjadi salah satu sumber energi global yang ketersediaannya terbatas, tidak dapat diperbarui dan meningkatkan emisi CO₂ dari proses pembakarannya yang berdampak negative pada pemanasan global. Oleh sebab itu dibutuhkanlah salah satu energy alternative terbarukan yang ramah lingkungan seperti biodiesel. Biodiesel merupakan bahan bakar terbaru yang bersifat biodegradable, tidak beracun, ramah lingkungan dan memiliki emisi yang lebih sedikit dari pada dari minyak diesel yang berbasis minyak bumi [1]. Biodiesel dapat disintesis dari minyak nabati dan lemak hewani dengan bantuan katalis yang sesuai dengan feedstock yang digunakan. Namun, kelemahan utama pada pembuatan biodiesel adalah harga minyak nabati yang relatif mahal dan lebih baik dimanfaatkan untuk dibidang pangan [2]. Oleh karena itu, bahan baku yang digunakan adalah bahan baku murah yang tidak bersaing dalam bidang pangan seperti PFAD[3].

Limbah PFAD mengandung sekitar 85% FFA (Free Fatty Acid), < 10% trigliserida, sejumlah kecil sterol, vitamin E dan squalene [4]. PFAD mengandung asam lemak bebas tinggi sehingga katalis yang cocok untuk digunakan adalah katalis asam [5]. Katalis asam yang potensial dan banyak

dikembangkan oleh peneliti yaitu katalis karbon tersulfonasi. Katalis karbon tersulfonasi adalah katalis yang disintesis melalui proses kalsinasi dan sulfonasi. Penggunaan katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi dianggap sangat ideal untuk banyak reaksi karena stabilitas termal dan sifat mekanisnya. Katalis ini dapat disintesis melalui karbonisasi limbah organik yang mengandung sukrosa, pati, selulosa dan lignin [6] seperti kulit kakao [7], *Cyrtopleura costata* [8], cangkang kelapa sawit, dan juga bambu [9]. Kulit buah kakao memiliki kandungan senyawa utama berupa selulosa, hemiselulosa, lignin, pektin, dan serat kasar sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon [10].

Bureros et all [7] dalam penelitiannya telah melakukan proses sintesis katalis melalui karbonisasi kulit buah kakao dengan aliran nitrogen yang efektif pada rentang suhu 300 - 400°C dengan pengaplikasian katalis terhadap pembuatan biodiesel menggunakan asam oleat. Namun, belum ada penelitian yang mengkaji pemanfaatan katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi secara spesifik untuk produksi biodiesel dari Palm Fatty Acid Distillate (PFAD).

Berdasarkan penjelasan diatas maka akan dilakukan sintesis katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi dengan metode kalsinasi dan sulfonasi menggunakan H₂SO₄. Katalis

akan dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR, XRD, dan penentuan situs asam serta akan diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD. Biodiesel yang diperoleh akan dilakukan uji densitas, laju alir, bilangan asam, dan persen konversinya.

II. METODA PENELITIAN

A. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan untuk penelitian ini meliputi kulit buah kakao, H_2SO_4 p.a (Merck) dan aquades untuk sintesis katalis. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan dan analisis produk biodiesel terdiri dari Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) yang diambil dari PT. Wilmar Nabati Indonesia, metanol, katalis karbon kulit kakao tersulfonasi, NaOH, KOH, dan etanol. Semua bahan yang komersial sudah memiliki spesifikasi produk dari perusahaan seperti massa molar, densitas, dan persen berat. Massa molar PFAD ditentukan melalui uji saponifikasi dengan metoda titrasi.

B. Alat

Peralatan pada penelitian ini yaitu peralatan analisis dan peralatan karakterisasi. Peralatan untuk analisis adalah labu leher tiga, magnet stirer, erlenmeyer, hot plate, termometer, statif dan klem, labu ukur, furnace, dan gelas kimia. Peralatan untuk karakterisasi adalah FTIR, XRD, dan penentuan situs asam.

C. Preparasi dan Aplikasi Katalis

Katalis kulit buah kakao disintesis melalui proses kalsinasi dalam furnace selama 1 jam dengan memvariasikan suhu kalsinasi yaitu pada suhu $250^\circ C$, $300^\circ C$, $350^\circ C$, $400^\circ C$, dan $450^\circ C$. Suhu kalsinasi divariasikan bertujuan untuk memperbesar kandungan karbon pada sampel. Karbon hasil kalsinasi selanjutnya disulfonasi dengan H_2SO_4 p.a dalam labu refluks dan direfluks selama 4 jam dengan suhu $160^\circ C$. Karbon yang telah disulfonasi kemudian dinetralkan dengan aquades hingga mencapai pH netral atau pH aquades.

Katalis diaplikasikan dalam proses pembuatan biodiesel dengan metoda esterifikasi antara PFAD dengan metanol, dengan perbandingan mol metanol terhadap PFAD adalah 15 : 1 dan jumlah katalis yang digunakan sebanyak 3% terhadap massa PFAD. Biodiesel yang dihasilkan kemudian diuji sifatnya berupa uji densitas, laju alir dan bilangan asamnya, serta dihitung persen konversi FFA nya untuk melihat aktivitas katalitik dari katalis yang digunakan.

TABEL I
KODE SAMPEL YANG DISINTESIS

No.	Sampel	Kode
1.	Karbon kulit buah kakao	KBK
2.	Katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi	KKBK
3.	Biodiesel yang menggunakan katalis kulit buah kakao tersulfonasi	B-KKBK

D. Karakterisasi Katalis

Sampel hasil kalsinasi dan sulfonasi dianalisis dan dikarakterisasi menggunakan instrument FTIR (Fourier Transform Infrared) pada bilangan $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$, XRD (X-Ray Diffraction), dan penentuan situs asam dengan metode titrasi sama basa. Berikut persamaan untuk perhitungan situs asam;

$$N - SO_3H = \frac{[NaOH] \times V NaOH}{\text{berat sampel}} \times \frac{50}{20}$$

E. Uji Sifat Biodiesel

Analisis produk biodiesel melalui uji sederhana seperti uji densitas, laju alir, bilangan asam, dan persen konversi. Berikut persamaan untuk perhitungan situs asam;

1. Densitas

$$\rho = \frac{w_2 - w_1}{v \text{ (ml)}}$$

Dimana:

- w1 = berat piknometer kosong
- w2 = berat piknometer + sampel
- v = volume piknometer

2. Laju Alir

$$\text{Laju alir} = \frac{\text{Volume (ml)}}{\text{Waktu (S)}}$$

3. Bilangan Asam

$$\text{Bil. Asam} = \frac{V \text{ KOH. etanol} \times N \text{ KOH. etanol} \times BM \text{ KOH}}{\text{berat sampel}}$$

4. Persen Konversi

$$\% \text{ yield} = \frac{\text{Bilangan asam PFAD} - \text{Bilangan asam sampel}}{\text{Bilangan asam PFAD}} \times 100$$

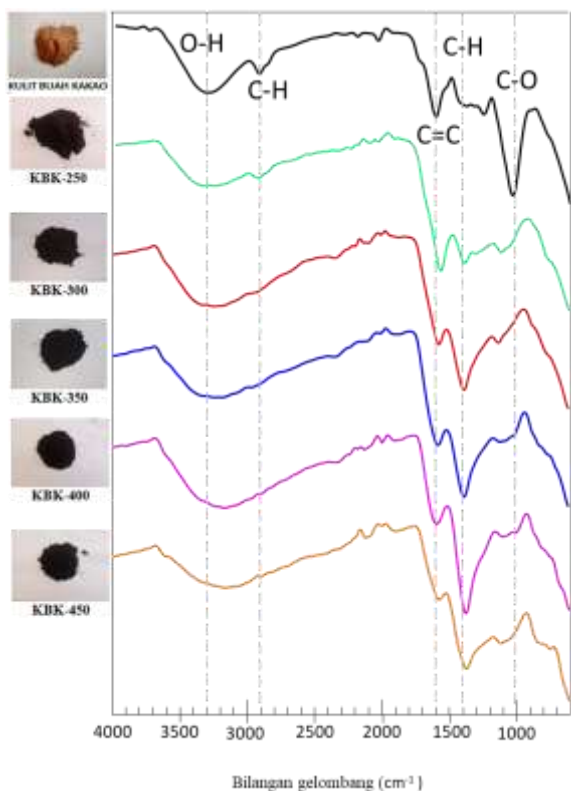
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karbon dan Katalis Kulit Buah Kakao

Karbon dapat diperoleh dari limbah organik yang mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin serta pati. Karbon disintesis dari bahan organik melalui proses karbonisasi. Kulit buah kakao dikarbonisasi pada variasi suhu $250^\circ C$, $300^\circ C$, $350^\circ C$, $400^\circ C$, dan $450^\circ C$ sehingga menghasilkan karbon polisiklik aromatik yang tidak terbakar sempurna. Apabila karbon ini disulfonasi akan mengakibatkan pusat aktif asam terbentuk di permukaan karbon. Cincin aromatik polisiklik memberikan struktur yang kuat dan stabil secara kovalen dengan gugus HSO_3 sebagai bahan asam padat yang tidak larut [6].

B. Karakterisasi Karbon dan Katalis Kulit Buah Kakao

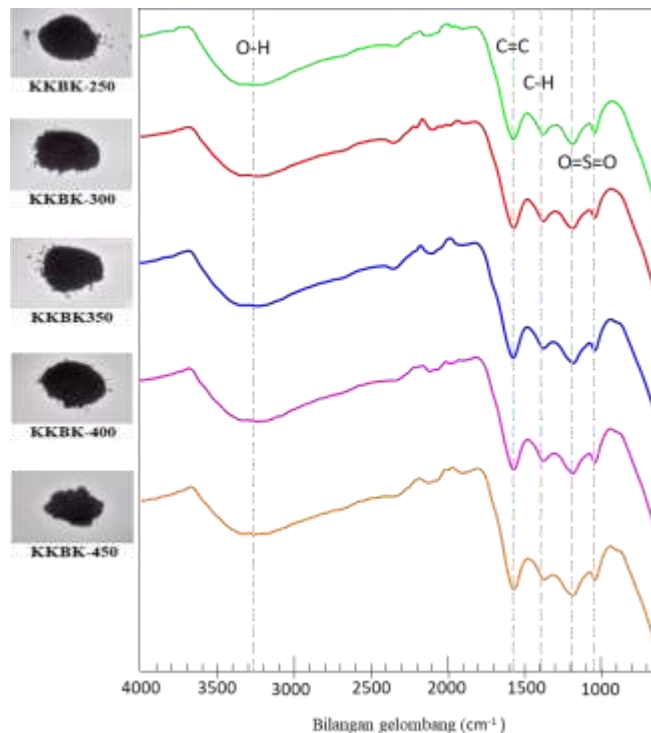
1. FTIR Karbon dan Katalis Kulit Buah Kakao



Gambar 1. Spektrum FTIR karbon kulit buah kakao

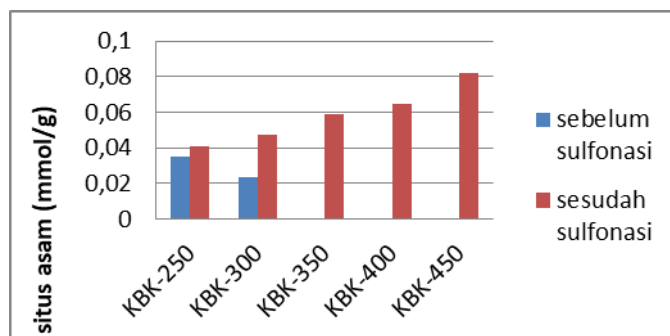
Berdasarkan spektrum FTIR pada Gambar 1, pita serapan pada bilangan gelombang 3306 cm^{-1} merupakan vibrasi dari gugus O-H yang kemungkinan berasal dari ikatan hidroksil pada selulosa atau lignin. Pita serapan pada bilangan gelombang 2923 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-H [11]. Pada FTIR Gambar 1 dan Gambar 2 kulit buah kakao mengalami pengurangan intensitas pada ikatan C-H setelah karbonisasi dan sulfonasi. Puncak ini menunjukkan adanya aktivasi kimia yang menghilangkan sejumlah besar hidrokarbon dari sampel yang dikalsinasi dan disulfonasi [12]. Pada bilangan gelombang 1584 - 1629 cm^{-1} menunjukkan serapan gugus C=C yang merupakan peregangan cincin aromatik dari karbon polisiklik aromatik. Pada bilangan gelombang 1300 - 1050 cm^{-1} merupakan vibrasi dari ikatan glikosida C-O-C atau ikatan C-O dari C-O-H [13].

Gambar 2 merupakan spektrum FTIR dari katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi. Pada bilangan gelombang 3200 - 3500 cm^{-1} menjadi lebih lebar, hal ini dikarenakan adanya penambahan -OH dari gugus $-\text{SO}_3\text{H}$. Bilangan gelombang 1300-1000 cm^{-1} menunjukkan pita serapan dari gugus O=S=O simetris dan asimetris katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi terdapat pada bilangan gelombang 1036 cm^{-1} dan 1181 cm^{-1} menunjukkan bahwa adanya gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ yang berikatan kovalen dengan karbon polisiklik aromatik [3]. Hal ini membuktikan bahwa gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ dari asam sulfat melalui reaksi sulfonasi berhasil disubstitusi ke permukaan karbon kulit buah kakao.



Gambar 2. Spektrum FTIR Katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi

2. Situs Asam Karbon Sebelum dan Sesudah Sulfonasi

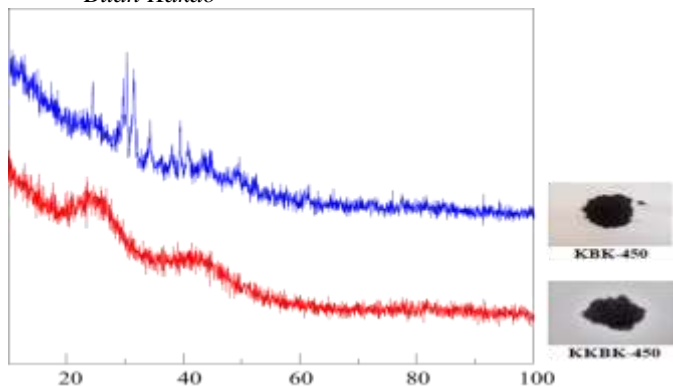


Gambar 3. Situs asam karbon kulit buah kakao sebelum dan sesudah sulfonasi

Penentuan jumlah situs asam sampel karbon dan katalis karbon kulit buah kakao dilakukan dengan metode titrasi asam basa. Jumlah situs asam yang terkandung dalam katalis akan mempengaruhi aktivitas katalitik dalam reaksi esterifikasi untuk pembuatan biodiesel [14]. Berdasarkan Gambar 3, jumlah situs asam karbon kulit buah kakao sebelum sulfonasi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi. Jumlah situs asam tertinggi yaitu karbon kulit buah kakao dengan suhu kalsinasi 250°C (KBK-250) sebesar 0,03523 mmol.g^{-1} . Hal ini menunjukkan bahwa masih adanya kandungan asam-asam lemak setelah proses kalsinasi. Jumlah situs asam karbon kulit buah kakao setelah disulfonasi mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi. Jumlah situs asam tertinggi yaitu katalis karbon kulit buah kakao dengan suhu kalsinasi 450°C sebesar 0,08221 mmol.g^{-1} .

Hal ini menunjukkan bahwa gugus sulfonat telah tersubstitusi ke permukaan katalis karbon kulit buah kakao [7].

3. Pola Difraktogram XRD Karbon dan Katalis Kulit Buah Kakao



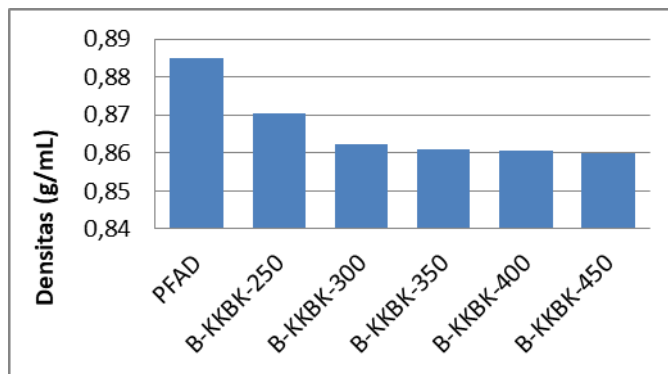
Gambar 4. Pola Difraktogram XRD karbon dan katalis kulit buah kakao optimum

Pada difraktogram KBK-450 menunjukkan puncak difraksi yang kuat dan tajam pada $2\theta = 24^\circ; 29^\circ; 30^\circ; 31^\circ; 33^\circ$, dan 39° . Puncak ini merupakan karakteristik dari struktur karbon grafit atau struktur karbon yang teratur. Kemudian pada difraktogram KKBK-450 menunjukkan perubahan dengan menghilangnya puncak grafit menjadi puncak difraksi yang luas dan lemah pada $2\theta = 20^\circ - 35^\circ$ dan $2\theta = 37^\circ - 45^\circ$. Puncak ini merupakan karakteristik dari karbon amorf yang terdiri dari lembaran karbon polisiklik aromatik yang tidak teratur. Pada proses ini terjadi pemutusan ikatan glikosida (C-O-C) yang menunjukkan proses karbonisasi berlanjut dan terjadi dehidrasi molekul air yang dilanjutkan dengan proses sulfonasi [15].

C. Uji Sifat Biodiesel

1. Uji Densitas

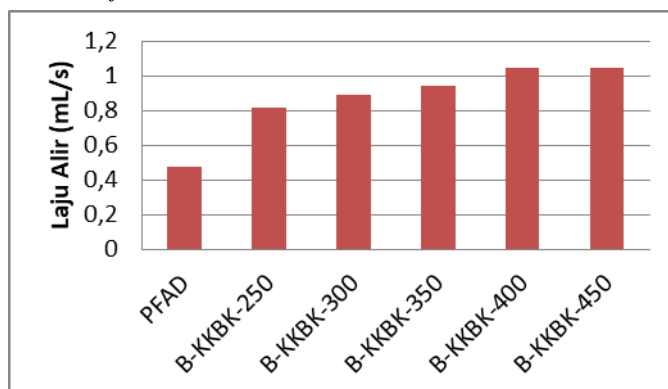
Densitas merupakan suatu sifat fisikokimia untuk menentukan kualitas dari biodiesel. Biodiesel yang memiliki nilai densitas terlalu tinggi dapat memicu terjadinya pembakaran yang tidak sempurna pada mesin [16]. Standar nilai densitas biodiesel yang digunakan yaitu SNI 7182:2015 dengan nilai densitas berkisar 0,85 – 0,89 g/mL [17]. Nilai densitas biodiesel yang dihasilkan mengalami penurunan dibandingkan dengan densitas PFAD. Hal ini menunjukkan bahwa adanya aktivitas katalitik katalis pada reaksi esterifikasi dalam pembuatan biodiesel.



Gambar 5. Uji densitas biodiesel

Berdasarkan hasil uji densitas pada Gambar 5 nilai densitas $PFAD > B-KKBK-250 > B-KKBK-300 > B-KKBK-350 > B-KKBK-400 > B-KKBK-450$ secara berurutan yaitu sebesar 0,885032 g/mL, 0,870268 g/mL, 0,862352 g/mL; 0,860808 g/mL, 0,860704 g/mL, dan 0,860076 g/mL. Berdasarkan data hasil penelitian, diperoleh bahwa biodiesel dengan menggunakan katalis kulit buah kakao memiliki nilai densitas yang memenuhi standar SNI untuk densitas biodiesel.

2. Laju Alir

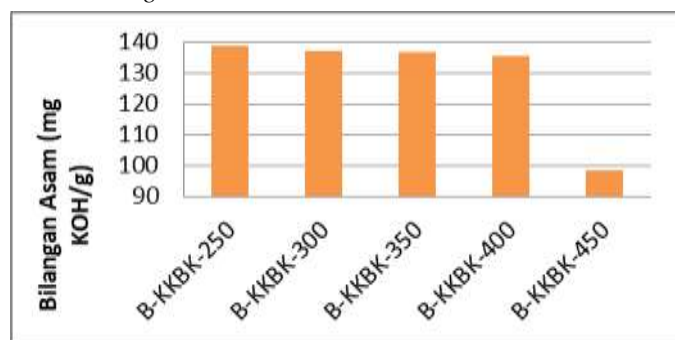


Gambar 6. Uji laju alir biodiesel

Viskositas dapat ditentukan dengan menentukan laju alir biodiesel. Semakin rendah viskositas maka semakin tinggi laju alir yang dimiliki oleh biodiesel. Viskositas yang rendah menjadikan biodiesel lebih mudah untuk mengalir dan teratomisasi [18]. Viskositas yang tinggi dapat mengakibatkan pembakaran yang buruk dan menghasilkan emisi yang lebih tinggi [19].

Berdasarkan hasil uji pada Gambar 8 nilai laju alir biodiesel $PFAD < B-KKBK-250 < B-KKBK-300 < B-KKBK-350 < B-KKBK-400 < B-KKBK-450$, secara berurutan yaitu sebesar 0,47732 mL/s, 0,81300 mL/s, 0,88731 mL/s, 0,94339 mL/s, 1,04384 mL/s, dan 1,04493 mL/s. Meningkatnya laju alir disebabkan oleh proses konversi FFA menjadi FAME (biodiesel). Hal ini menunjukkan bahwa laju alir dari PFAD berhasil ditingkatkan dengan reaksi esterifikasi.

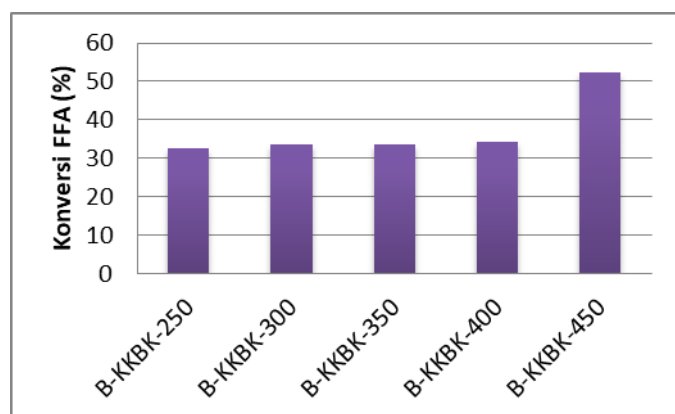
3. Bilangan Asam



Gambar 7. Uji bilangan asam biodiesel

Jumlah asam lemak yang terkandung dalam biodiesel dapat diketahui dengan melakukan uji bilangan asam. Bilangan asam yang diperoleh dapat menentukan persen konversi FFA menjadi FAME (biodiesel). Bilangan asam yang tinggi dapat menyebabkan terbentuknya sabun apabila bereaksi dengan katalis basa, serta dapat menyebabkan korosi pada mesin. Berdasarkan hasil uji bilangan asam, pada Gambar 7 jumlah bilangan asam PFAD > B-KKBK-250 > B-KKBK-300 > B-KKBK-350 > B-KKBK-400 > B-KKBK-450, secara berurutan yaitu sebesar 206,2865 mg KOH/g, 138,7760 mg KOH/g, 137,2015 mg KOH/g, 136,6668 mg KOH/g, 135,6623 mg KOH/g, dan 98,4256 mg KOH/g. Penurunan bilangan asam yang terjadi pada biodiesel dari PFAD menunjukkan aktifitas katalitik katalis dalam mengkonversi FFA menjadi biodiesel [20].

4. Persen Konversi FFA



Gambar 8. Persen konversi FFA pada biodiesel

Nilai persen konversi ini menentukan banyak kandungan asam lemak bebas yang terdapat pada PFAD terkandung menjadi biodiesel. Persen konversi dari biodiesel dipengaruhi oleh aktivitas katalitik dari katalis karbon kulit buah kakao tersulfonasi yang dihasilkan. Berdasarkan data bilangan asam, hasil persen konversi pada Gambar 8 menunjukkan bahwa konversi yang paling tinggi adalah biodiesel B-KKBK-450 yaitu sebesar 52,28%.

IV. KESIMPULAN

Kulit buah kakao dapat dimanfaatkan sebagai katalis karbon tersulfonasi dan dapat diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD. Hasil analisis FTIR menunjukkan pita serapan pada bilangan gelombang 1036 cm^{-1} dan 1181 cm^{-1} yang menunjukkan bahwa gugus sulfonat berhasil disubstitusi ke permukaan karbon. Pada uji situs asam menunjukkan bahwa katalis yang memiliki situs asam tertinggi adalah KKBK-450. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa katalis berstruktur amorf. Aktivitas katalitik optimum dari katalis pada penelitian ini adalah KKBK-450. Katalis ini mampu mengkonversi FFA menjadi FAME sebesar 52,28%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Andre agustin mengucapkan terima kasih kepada tim riset dan PLP Laboratorium Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

REFERENSI

- [1] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, S. Sharma, and D. Kumari, "Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review," *Fuel*, vol. 253, no. March, pp. 60–71, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.174.
- [2] S. I. Akinfalabi, U. Rashid, R. Yunus, and Y. H. Taufiq-Yap, "Synthesis of biodiesel from palm fatty acid distillate using sulfonated palm seed cake catalyst," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 611–619, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.056.
- [3] S. K. Sangar, C. S. Lan, S. M. Razali, M. S. A. Farabi, and Y. H. Taufiq-Yap, "Methyl ester production from palm fatty acid distillate (PFAD) using sulfonated cow dung-derived carbon-based solid acid catalyst," *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, no. June, pp. 1306–1315, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.073.
- [4] S. Akinfalabi, U. Rashid, and C. Ngamcharussrivichai, "Environmental Technology & Innovation Synthesis of reusable biobased nano-catalyst from waste sugarcane bagasse for biodiesel production," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 18, p. 100788, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100788.
- [5] J. Li and X. Liang, "Magnetic solid acid catalyst for biodiesel synthesis from waste oil," *Energy Convers. Manag.*, vol. 141, pp. 126–132, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.072.
- [6] I. M. Lokman, U. Rashid, and Y. H. Taufiq-Yap, "Production of biodiesel from palm fatty acid distillate using sulfonated-glucose solid acid catalyst: Characterization and optimization," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 11, pp. 1857–1864, 2015, doi: 10.1016/j.cjche.2015.07.028.
- [7] G. M. A. Bureros *et al.*, "Cacao shell-derived solid acid catalyst for esterification of oleic acid with methanol," *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 489–501, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.082.
- [8] O. N. Syazwani, U. Rashid, M. S. Mastuli, and Y. H. Taufiq-Yap, "Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) to biodiesel using Bi-functional catalyst synthesized from waste angel wing shell (*Cyrtopleura costata*)," *Renew. Energy*, vol. 131, pp. 187–196, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.031.
- [9] M. S. A. Farabi, M. L. Ibrahim, U. Rashid, and Y. H. Taufiq-Yap, "Esterification of palm fatty acid distillate using sulfonated carbon-based catalyst derived from palm kernel shell and bamboo," *Energy Convers. Manag.*, vol. 181, no. September 2018, pp. 562–570, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.033.
- [10] M. Adjin-Tetteh, N. Asiedu, D. Dodo-Arhin, A. Karam, and P. N. Amaniampong, "Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana," *Ind. Crops Prod.*, vol. 119, no. February, pp. 304–312, 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.02.060.
- [11] M. Woźniak *et al.*, "Chemical and Structural Characterization of Maize Stover Fractions in Aspect of Its Possible Applications," 2021.
- [12] S. F. Ibrahim, N. Asikin-mijan, M. L. Ibrahim, and G. Abdulkareem-alsultan, "Sulfonated functionalization of carbon derived corncob

- residue via hydrothermal synthesis route for esterification of palm fatty acid distillate,” vol. 210, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112698.
- [13] J. Laohapornchaiphon, C. B. Smith, and S. M. Smith, “One-step Preparation of Carbon-based Solid Acid Catalyst from Water Hyacinth Leaves for Esterification of Oleic Acid and Dehydration of Xylose,” *Chem. - An Asian J.*, vol. 12, no. 24, pp. 3178–3186, 2017, doi: 10.1002/asia.201701369.
- [14] T. Ha, T. Vu, M. H. Nguyen, and M. D. Nguyen, “Synthesis of Acidic Heterogeneous Catalysts with High Stability Based on Graphene Oxide / Activated Carbon Composites for the Esterification of Lactic Acid,” vol. 2019, 2019.
- [15] I. M. Lokman, U. Rashid, and Y. H. Taufiq-Yap, “Meso- and macroporous sulfonated starch solid acid catalyst for esterification of palm fatty acid distillate,” *Arab. J. Chem.*, vol. 9, no. 2, pp. 179–189, 2016, doi: 10.1016/j.arabjc.2015.06.034.
- [16] D. Wulandari, S. V. Rasmulya, U. K. Nizar, and S. B. Etika, “Studi Perbandingan Metoda Kalsinasi dengan dan Tanpa Okigen pada Sintesis Katalis Karbon Ampas Bengkuang Tersulfonasi untuk Produksi Biodiesel menggunakan Palm Fatty Acid Distilate,” vol. 4, no. 2, pp. 17–21, 2021.
- [17] Edwin Permana, M. Naswir, M. E. T. Sinaga, H. Alfairuz, and S. S. Murti, “KUALITAS BIODIESEL DARI MINYAK JELANTAH BERDASARKAN PROSES SAPONIFIKASI DAN TANPA SAPONIFIKASI,” vol. 6, 2020.
- [18] Miranda Dwi Putri Gultom, U. K. Nizar, E. Nasra, and D. Kurniawati, “Pengaruh Waktu Reaksi Produksi Biodiesel dengan PFAD Menggunakan Katalis Karbon Kulit Ubi Kayu Tersulfonasi,” vol. 4, no. 2, pp. 12–16, 2021.
- [19] P. Saxena, S. Jawale, and M. H. Joshipura, “A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel,” *Procedia Eng.*, vol. 51, no. NUiCONE 2012, pp. 395–402, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.01.055.
- [20] A. G. Isva *et al.*, “Aplikasi Karbon Ampas Teh Tersulfonasi Sebagai Katalis Dalam Produksi Biodiesel Dari Pfad (Palm Fatty Acid Destilate),” vol. 4, no. 2, pp. 2–7, 2021.