



Pemanfaatan Batu Kapur Madura sebagai Katalis dalam Pembuatan Bioedesel dari Minyak Nyamplung

Ike Dayi Febriana^a, Abdul Hamid^{a,*}, Amin Jakfar^a, Mohammad Abdullah^b, Faizatur Rohmah^a, Tri Esti Purbaningtyas^c, Zeni Rahmawati^d, Septian Dwi Wijaya^a

^aJurusan Teknik Mesin Alat Berat, Politeknik Negeri Madura, Indonesia

^bJurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Negeri Madura, Indonesia

^cJurusan Kimia, Prodi Analisis Kimia, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

^dJurusan Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*corresponding author: ahamchimie@poltera.ac.id

DOI : [10.20885/ijca.vol5.iss1.art2](https://doi.org/10.20885/ijca.vol5.iss1.art2)

ARTIKEL INFO

Diterima : 23 Oktober 2021
Direvisi : 18 November 2021
Diterbitkan : 01 Maret 2022
Kata Kunci : Biodiesel, Batu Kapur,
Minyak Nyamplung, Transesterifikasi

ABSTRAK

Pemanfaatan batu kapur dari Pamekasan, Madura sebagai katalis heterogen pada reaksi pembuatan biodiesel dipelajari pada penelitian ini. Batu kapur dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 3 jam untuk membentuk katalis CaO. Katalis CaO yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-X (XRD), spektroskopi inframerah (FTIR) dan Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Analysis (SEM-EDX). Produk biodiesel yang terbentuk dianalisis menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS). Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak karakteristik CaO pada $2\theta = 36,95^\circ; 54,38^\circ; 64,28^\circ$ dan $78,61^\circ$. Analisis FTIR menunjukkan bahwa CaO yang disintesis dari batu kapur belum memperoleh senyawa CaO murni. Hasil karakterisasi menggunakan SEM-EDX menunjukkan bahwa morfologi padatan menyerupai balok dan prisma serta diperoleh ukuran partikel sekitar 10 μm . Proses transesterifikasi dari minyak nyamplung dilakukan dengan rasio mol minyak terhadap methanol sebesar 1:16 pada temperatur 60 °C selama 1 jam dengan katalis CaO sebesar 4 % (w/w). Hasil analisis GC-MS diperoleh *yield* biodiesel sebesar 54% dengan konversi sebesar 49%.

ARTICLE INFO

Received : 23 October 2021
Revised : 18 November 2021
Published : 01 March 2022
Keywords : Biodiesel, Limestone,
Nyamplung Oil, Transesterification

ABSTRACT

Utilization of limestone from Pamekasan, Madura as heterogeneous catalyst in the biodiesel production reaction has been studied. Limestone was calcined at 900 C for 3 hours to form CaO catalyst. The CaO catalyst formed was characterized using X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Analysis (SEM-EDX). The biodiesel product formed was analyzed using Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS). The result of XRD characterization shows the characteristic peak of CaO at $2\theta = 36.95^\circ; 54.38^\circ; 64.28^\circ$ and 78.61° . FTIR analysis showed that CaO synthesized from limestone had not obtained pure CaO compounds. The results of characterization using SEM-EDX showed that the morphology of the solids resembled formed beams and prisms, and it obtained particle size around 10 μm . The transesterification



process of nyamplung oil was carried out with mole ratio of oil to methanol of 1:16 at 60 °C for 1 hour with CaO catalyst of 4% (w/w). The results of GC-MS analysis was obtained biodiesel yield of 54% with conversion at 49%.

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dan industri berdampak pada peningkatan konsumsi energi, khususnya bahan bakar fosil. Padahal, bahan bakar fosil merupakan energi tak terbarukan yang jumlahnya semakin terbatas, sehingga energi ramah lingkungan dan terbarukan seperti biodiesel sangat dibutuhkan untuk menggantikan bahan bakar fosil [1]. Biodiesel merupakan salah satu produk hasil reaksi transesterifikasi antara minyak nabati/lemak hewani (trigliserida) dan mono-alkohol dengan adanya katalis, juga dikenal sebagai *fatty acid methyl esters*, adalah bahan bakar lebih bersih yang ramah lingkungan dan dapat memainkan peran penting dalam energi terbarukan [2]. Secara kimiawi, alkil metil ester dengan rantai panjang asam lemak dapat diproduksi melalui esterifikasi asam lemak atau transesterifikasi minyak nabati, lemak hewani dan minyak goreng. Reaksi terjadi karena adanya alkohol dengan rantai pendek dan katalis homogen atau heterogen yang sesuai [3]. Meningkatnya permintaan energi global akibat pertumbuhan penduduk dunia dan industrialisasi serta menipisnya bahan bakar fosil telah mendorong penelitian terhadap produksi sumber energi terbarukan dan berkelanjutan. Minyak alam yang berasal dari tanaman pertanian seperti kelapa sawit, ubi kayu, jagung dan kelapa diteliti sebagai sumber produksi biofuel. Namun, memanen tanaman pertanian yang dapat dimakan untuk produksi biofuel menyebabkan masalah etika dan oleh karena itu pemanfaatan tanaman yang tidak dapat dimakan menjadi jalur yang layak untuk mempertahankan produksi biodiesel. Minyak alami yang diekstrak dari tanaman yang tidak dapat dimakan seperti biji kapas (*Gossypium arboretum* L.) biji jarak (*Jatropha curcas* L.), biji palem (*Areca catechu* L.) dan biji nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) telah diteliti sebagai sumber potensial untuk produksi biodiesel [4].

Penggunaan katalis dalam produksi biodiesel diperlukan untuk meningkatkan laju reaksi dan meningkatkan *yield* biodiesel yang dihasilkan. Katalis heterogen terus dipelajari oleh peneliti dalam upaya untuk membangun proses yang lebih berkelanjutan. Kalsium oksida (CaO) adalah salah satu katalis heterogen yang paling banyak dipelajari karena aktivitasnya yang sangat baik dalam reaksi transesterifikasi, ketersediaan dan biaya rendah, dan dapat diperoleh dari mineral alam [5]. Oksida logam seperti CaO telah diteliti sebagai katalis padat. Katalis padat ini tidak dikonsumsi atau larut dalam reaksi, oleh karena itu dapat dengan mudah dipisahkan dari produk [6]. Sebagai hasilnya, produk tidak mengandung pengotor dari katalis dan biaya pemisahan akhir dapat dikurangi. Katalis ini juga bisa diregenerasi dan digunakan kembali serta lebih ramah lingkungan karena tidak dibutuhkan perlakuan asam atau air pada tahap pemisahannya [7]. Selain itu katalis oksida logam seperti CaO terdiri atas kation yang mempunyai sisi asam Lewis dan anion yang mempunyai sisi basa Bronsted. Diantara oksida-oksida logam dari alkali tanah, kalsium oksida telah menarik banyak perhatian untuk reaksi transesterifikasi karena mempunyai beberapa kelebihan seperti kebasahan yang tinggi, lebih ramah lingkungan karena kelarutan yang rendah dalam metanol, dan dapat disintesis dari bahan-bahan yang murah seperti batu kapur dan kalsium hidroksida [8]. Selain itu, penggunaan katalis CaO pada beberapa minyak tumbuhan menghasilkan biodiesel dengan *yield* yang tinggi, yaitu >89% pada minyak microalgal atau *chlorella vulgaris* [9], 97,96 % pada minyak tumbuhan *Hydnocarpus Wightiana* [10], >90% pada minyak kedelai [11] dan > 90 % pada minyak jarak [12].

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan biodiesel dari minyak nyamplung menggunakan katalis CaO dari batu kapur yang berasal dari Pamekasan, Madura. Aktivitas katalis CaO dari batu kapur madura diteliti sebagai katalisator untuk reaksi transesterifikasi minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) yang berasal dari biji nyamplung. Padatan katalis CaO yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan teknik XRD, FTIR dan SEM-EDX. Sedangkan untuk mengetahui produk biodiesel yang terbentuk dianalisis menggunakan GC-MS.

2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain peralatan-peralatan gelas, *hotplate magnetic stirrer*, stirer (pengaduk magnetik), oven, neraca analitik, termometer, kondensor refluks, instrumen *X-Ray Diffraction Phillips Expert*, FTIR Shimadzu *Instrument Spectrum One 8400S*, *Scanning Electron Microscopy (SEM)* (Zeiss Evo MA10) dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)* (Teknologi Agilent 6820).

Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah akuades, minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) sebagai sumber minyak, batu kapur dari Pamekasan, Madura sebagai katalis CaO, metanol (Merck, 99%), H₂SO₄, n-Heksan dan HCl (Smart-Lab).

2.2 Pembuatan katalis CaO dari batu kapur

Batu kapur terlebih dahulu dihancurkan hingga menjadi serbuk. Kemudian di ayak menggunakan ayakan 125 mesh. Kemudian di keringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 2 jam. Sampel batu kapur yang sudah kering kemudian di furnace pada suhu 900 °C selama 3 jam agar terbentuk padatan CaO.

2.3 Karakterisasi katalis CaO dari batu kapur

Padatan hasil sintesis dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X, FTIR dan SEM-EDX. Pengukuran XRD dilakukan dengan radiasi Cu K α pada difraktometer XRD merek Bruker D2 Phaser pada kisaran 5°-80° (2 θ), $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ untuk identifikasi fase. Spektrum inframerah (Nicolet Avatar 360 IR) dilakukan menggunakan pelet KBr pada bilangan gelombang antara 1400 dan 400 cm⁻¹. Padatan yang dihasilkan dikarakterisasi dengan SEM-EDX (Phenom Desktop ProXL). Sampel *dicoating* dengan Pd/Au selama 15 detik pada tekanan 6x10⁻² mbar kemudian diletakkan pada alas *carbon tape*. Selanjutnya sampel dianalisa menggunakan SEM dan EDX.

2.4 Preparasi minyak nyamplung

Proses esterifikasi dari minyak nyamplung dilakukan dengan rasio mol minyak terhadap methanol sebesar 1:16. Minyak nyamplung dimasukkan ke dalam labu bundar yang dilengkapi dengan pengaduk magnet dan refluks kondensor untuk menghindari penguapan methanol. Kemudian ditambahkan H₂SO₄ sebanyak 1 % (w/w) dari berat minyak. Labu bundar diletakkan di atas *hotplate magnetic stirrer* dengan suhu 60 °C selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 800 rpm. Hasil reaksi terdiri atas dua lapisan yang kemudian dipisahkan dengan corong pisah. Minyak pada lapisan bawah di ambil dan selanjutnya digunakan untuk reaksi transesterifikasi.

2.5 Reaksi transesterifikasi

Transesterifikasi minyak nyamplung menjadi biodiesel dilakukan pada labu bundar yang dilengkapi dengan *magnetic stirrer* dan termometer. Reaksi transesterifikasi dimulai dengan mereaksikan minyak *nyamplung* hasil esterifikasi dengan metanol menggunakan katalis CaO dari batu kapur sebesar 4 % (w/w) terhadap berat minyak. Reaksi transesterifikasi dilakukan dalam labu bundar dengan rasio mol minyak terhadap methanol sebesar 1:16 yang dilengkapi refluks kondensor untuk menghindari penguapan metanol. Reaksi transesterifikasi dilakukan pada suhu 60 °C selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 1000 rpm. Minyak biodiesel yang terbentuk dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui kandungan metil esternya. Analisis kuantitatif konversi minyak dan *yield* biodiesel dihitung menggunakan persamaan 1 dan 2 [13].

$$\text{Konversi} = \frac{W_a - W_b}{W_a} 100\% \quad (1)$$

Dimana: W_a: massa minyak awal (gram), W_b: massa biodiesel yang terbentuk (gram).

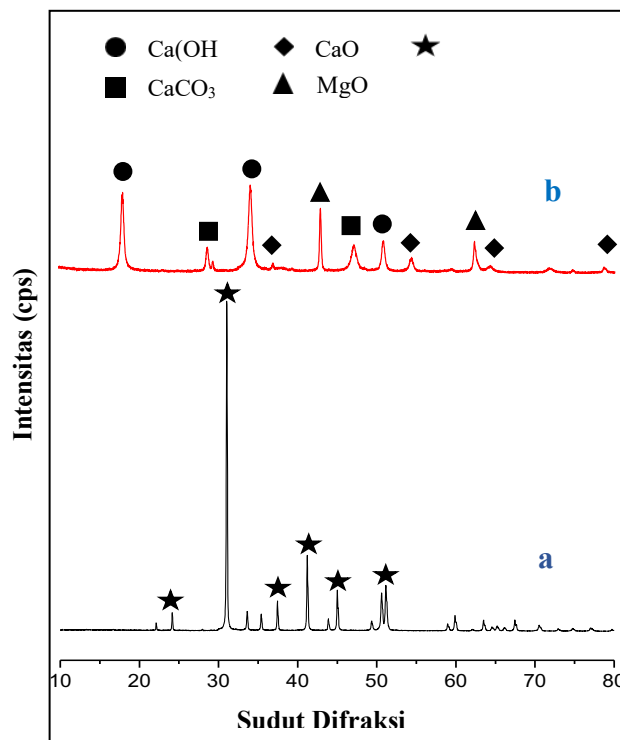
$$\text{Yield biodiesel} = \left(\frac{FAME}{A_{is}} \right) \left(\frac{C_{is} \times V_{is}}{M_{sampel}} \right) 100\% \quad (2)$$

Dimana: ΣA ME merupakan jumlah area semua puncak metil ester, A_{is} : luas puncak internal standard, C_{is} : konsentrasi internal standard (ppm), V_{is} : volume internal standard (ml) dan M_{sampel} merupakan berat sampel (mg).

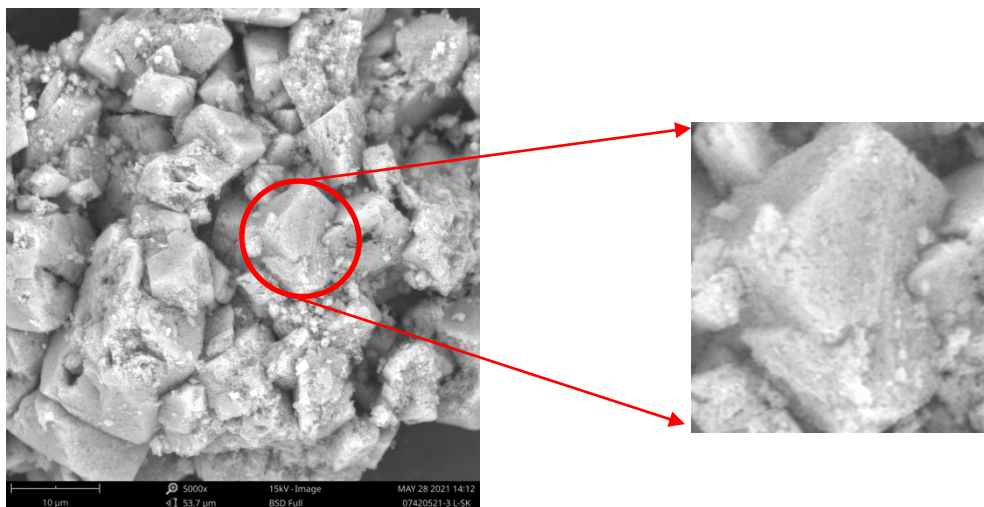
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*) digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal, struktur kristal dan kristalinitas dari suatu sampel [14]. Sampel yang dikarakterisasi menggunakan XRD adalah sampel batu kapur sebelum dan sesudah kalsinasi. Sampel dianalisis menggunakan sudut (2θ) antara 10° - 80° . Sampel batu kapur dikasikasi pada suhu 900°C selama 3 jam untuk melihat perubahan dari CaCO_3 menjadi katalis CaO . Hasil karakterisasi XRD dari sampel batu kapur ditunjukkan pada Gambar 1. Perubahan pola difraksi sinar-X dari sampel sebelum dan sesudah kalsinasi terlihat pada gambar tersebut. Puncak difraktogram dari sampel sebelum kalsinasi menunjukkan puncak-puncak utama seperti $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit). Setelah kalsinasi puncak tersebut kemudian menghilang dan terlihat puncak-puncak baru seperti puncak CaO . Hal ini mengindikasikan bahwa batu kapur bertransformasi dari CaCO_3 menjadi CaO dengan adanya pemanasan pada suhu tinggi.

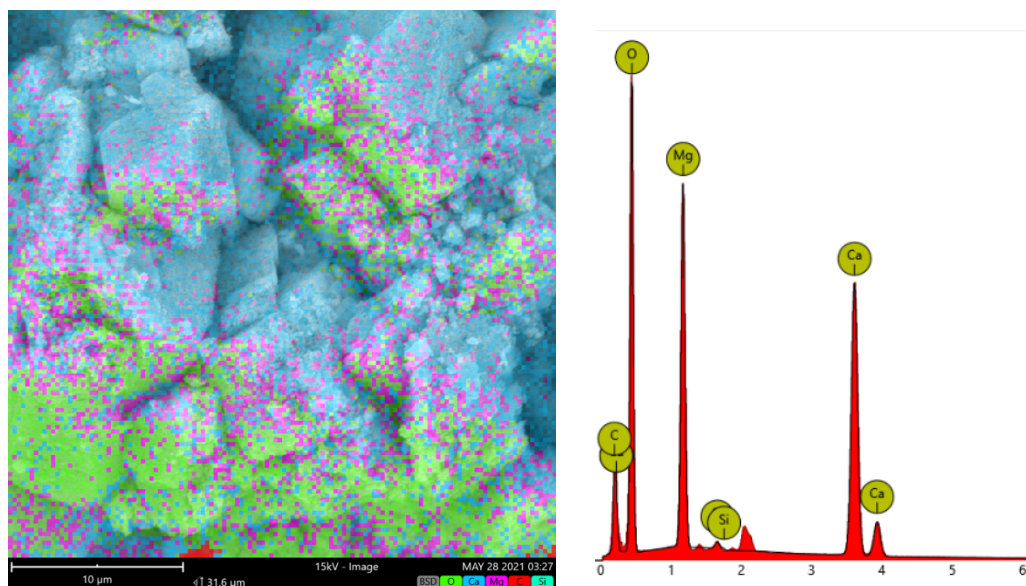
CaO dari kalsium karbonat diperoleh melalui proses kalsinasi batu kapur. Kalsium karbonat (CaCO_3) dapat diperoleh dari batuan sedimen seperti batu kapur yang mengandung senyawa CaCO_3 dari proses kalsinasi untuk mendekomposisi kalsium karbonat menjadi kalsium oksida (CaO) dan gas karbondioksida atau CO_2 [15]. Difraktogram Sampel batu kapur sebelum kalsinasi menunjukkan puncak-puncak pada $2\theta = 24,15^\circ$; $31,03^\circ$; $37,45^\circ$; $41,21^\circ$; $45,02^\circ$ dan $51,47^\circ$. Puncak-puncak tersebut menunjukkan adanya fase $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Sedangkan untuk sampel batu kapur setelah kalsinasi menunjukkan puncak-puncak baru yaitu pada $2\theta = 18,01^\circ$; $34,01^\circ$ dan $50,81^\circ$ merupakan fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pada $2\theta = 28,68^\circ$ dan $47,13^\circ$ merupakan fase CaCO_3 dan pada $2\theta = 42,93^\circ$ dan $62,29^\circ$ merupakan fase MgO . Untuk puncak karakteristik dari CaO sendiri terlihat pada $2\theta = 36,95^\circ$; $54,38^\circ$; $64,28^\circ$ dan $78,61^\circ$ [16].



Gambar 1. Difraktogram sampel batu kapur sebelum kalsinasi (a) dan sesudah kalsinasi (b)



Gambar 2. Morfologi dari sampel batu kapur setelah kalsinasi



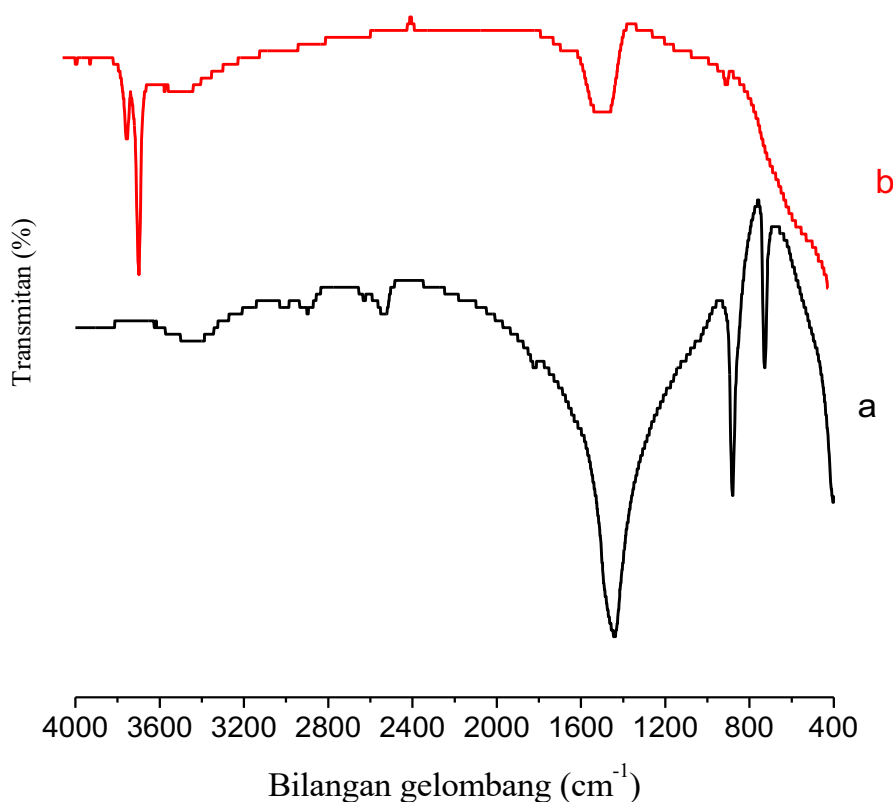
Gambar 3. Mapping unsur dan spektrum EDX dari sampel batu kapur setelah kalsinasi

Hasil karakterisasi menggunakan SEM-EDX untuk sampel batu kapur setelah kalsinasi ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3. Karakterisasi menggunakan SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan dari sampel padatan. Morfologi dan ukuran partikel dari sampel diamati dengan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur yang terdapat pada sampel digunakan Energy Dispersive X-ray (EDX). Pada Gambar 5 menunjukkan morfologi yang tidak teratur dari sampel batu kapur setelah kalsinasi. Terdapat beberapa padatan yang menyerupai balok dan prisma. Berdasarkan analisis menggunakan SEM diperoleh ukuran partikel sekitar 10 μm . Hasil spektrum EDX ditunjukkan pada gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sampel terdiri dari unsur-unsur Ca, Si, Mg, C dan O. Unsur oksigen, kalsium dan magnesium merupakan kandungan utama dari material batu kapur. Komposisi unsur-unsur penyusun sampel batu kapur juga bisa dilihat dari hasil *mapping* dari instrumen SEM. Gambar tersebut menunjukkan persebaran masing-masing unsur penyusun batu kapur. Komposisi unsur-unsur yang terdapat pada sampel batu kapur ditunjukkan pada Tabel 1. Kandungan unsur tertinggi dalam sampel batu kapur yaitu kalsium diperoleh sekitar 36,84 %.

TABEL I. Komposisi unsur-unsur dalam sampel batu kapur

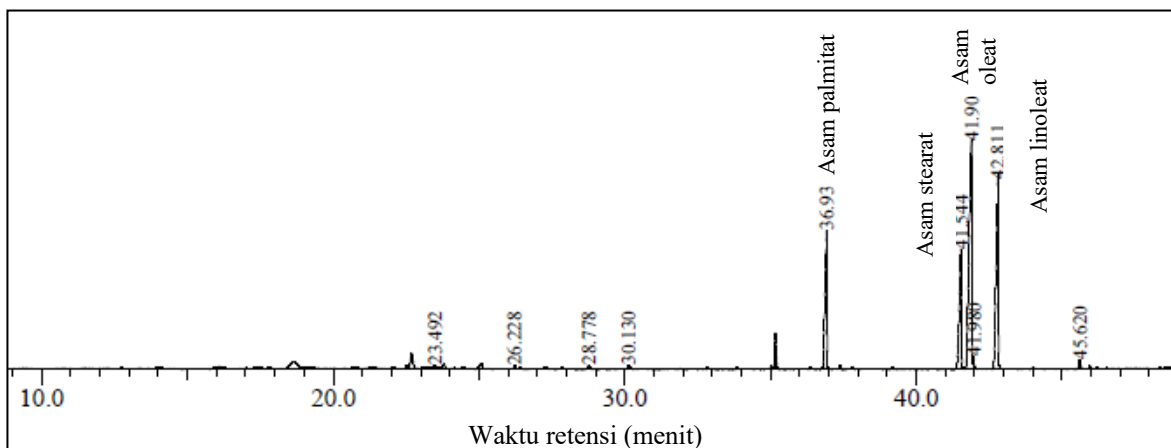
Unsur	Kadar unsur (% berat)
O	32,93
Ca	36,84
Mg	19,03
Si	0,19
C	11,01

Hasil karakterisasi FTIR dari sampel batu kapur sebelum dan sesudah kalsinasi ditunjukkan pada Gambar 4. Dari kedua gambar tersebut menunjukkan regangan OH dari air dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada puncak yang melebar di sekitar $3400\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ dan puncak yang tajam pada 3641 cm^{-1} [6]. Puncak penyerapan utama pada bilangan gelombang $1471,51\text{ cm}^{-1}$ dan puncak serapan minor pada bilangan gelombang $873,9\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi peregangan asimetris [17]. Hasil ini menunjukkan bahwa CaO yang disintesis dari batu kapur belum memperoleh senyawa CaO murni karena CaO yang disintesis telah terkontaminasi CO_2 dan H_2O dari udara.



Gambar 4. Spektra FTIR dari sampel batu kapur sebelum kalsinasi (a) dan setelah kalsinasi (b)

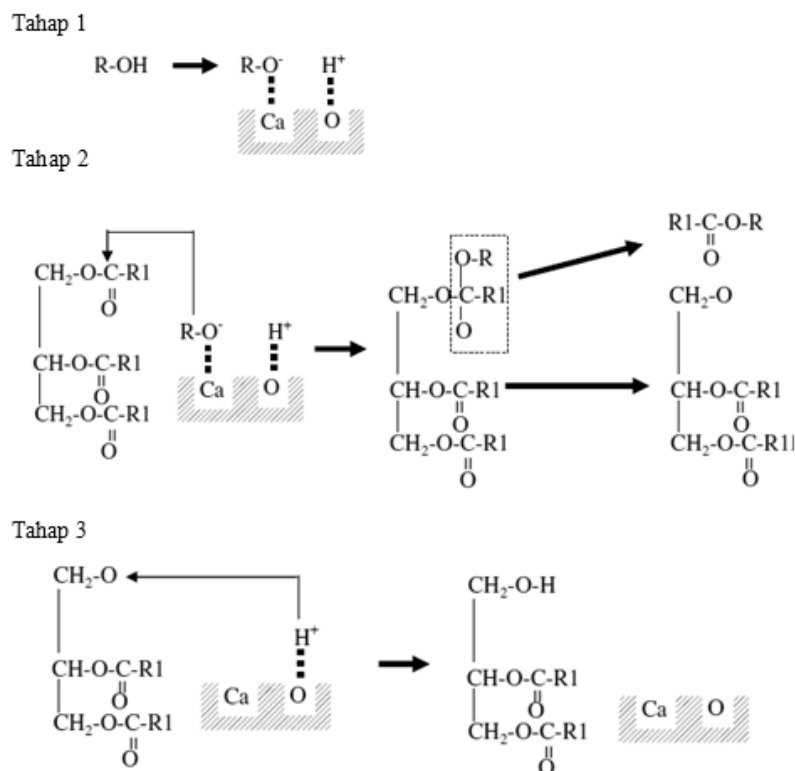
CaO merupakan senyawa yang tidak stabil, mudah bereaksi dengan udara dan uap air membentuk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 yang kemungkinan besar diperoleh selama preparasi sebelum CaO dianalisis dengan FTIR [6]. Hasil ini juga sesuai dengan karakterisasi menggunakan XRD yang menunjukkan bahwa CaO yang diperoleh mengandung fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Oleh karena itu, kalsinasi sangat penting untuk mengubah batu kapur menjadi CaO [18].



Gambar 5. Kromatogram dari sampel biodiesel

Kandungan minyak yang digunakan sebagai *feedstock* merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi, khususnya kandungan asam lemak bebas (FFA). Kadar FFA yang rendah sangat diperlukan untuk mendapatkan *yield* biodiesel yang tinggi pada reaksi transesterifikasi, karena kandungan FFA yang tinggi menyebabkan reaksi pembentukan sabun (reaksi saponifikasi) dan pada akhirnya akan menyebabkan penurunan konversi dan *yield* [19]. Reaksi penyabunan sangat tidak diharapkan terjadi dalam reaksi transesterifikasi karena selain mengurangi *yield* biodiesel juga menghambat pemisahan ester dari gliserol [20]. Oleh karena itu, untuk *feedstock* yang mempunyai kandungan FFA yang tinggi diperlukan preparasi terlebih dahulu. Kandungan FFA untuk minyak nyamplung pada penelitian ini diperoleh sebesar 5,3 %. Penurunan kadar FFA dapat dilakukan melalui reaksi esterifikasi. FFA dapat bereaksi dengan alkohol untuk membentuk ester (biodiesel) dengan katalis asam [19]. Oleh sebab itu perlu dilakukan preparasi minyak berupa reaksi esterifikasi sebelum dilakukan reaksi transesterifikasi. Hasilnya menunjukkan bahwa kandungan FFA pada minyak hasil reaksi esterifikasi sebesar 1,9 %. Minyak hasil reaksi esterifikasi selanjutnya digunakan pada reaksi transesterifikasi. Pada transesterifikasi dengan metanol menggunakan katalis basa, proton dari metanol sebagai sisi utama membentuk anion metoksida pada tahap pertama reaksi. Anion metoksida menyerang karbon karbonil dari trigliserida, yang membentuk intermediet alkoksi karbonil. Kemudian, intermediet alkoksikarbonil terbagi menjadi 2 molekul yaitu metil ester dan anion digliserida [18]. Reaksi transesterifikasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.

Pada penelitian ini reaksi transesterifikasi dilakukan dengan perbandingan mol metanol terhadap minyak sebesar 16:1. Katalis yang digunakan adalah katalis CaO yang berasal dari batu kapur Pamekasan, Madura, sebesar 4 % (w/w) dari berat minyak. Penggunaan katalis CaO yang mempunyai kadar kebasahan yang tinggi sangat berpengaruh terhadap *yield* biodiesel. Banyaknya katalis mempengaruhi sisi aktif CaO yang menghasilkan anion metoksida dari metanol. Sebagai molekul nukleofilik reaktif, anion metoksida menyerang karbon karbonil elektrofilik dalam trigliserida untuk menghasilkan biodiesel [21]. Kromatogram dari hasil analisis GC-MS ditunjukkan pada Gambar 5. Kromatogram tersebut menunjukkan bahwa sampel biodiesel terdiri dari asam palmitat, asam stearat, asam oleat dan asam linoleat. Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai konversi sebesar 49% dan *yield* biodiesel sebesar 54%.



Gambar 6. Mekanisme reaksi dari transesterifikasi trigliserida dengan metanol menggunakan katalis CaO

4. KESIMPULAN

Batu kapur dari Pamekasan, Madura dapat digunakan sebagai katalis heterogen dalam pembuatan biodiesel dari minyak nyamplung (*Calophyllum inophyllum*). Analisis XRD menunjukkan puncak karakteristik CaO dari sampel batu kapur pada $2\theta = 36,95^\circ$; $54,38^\circ$; $64,28^\circ$ dan $78,61^\circ$. CaO merupakan senyawa yang tidak stabil, mudah bereaksi dengan udara dan uap air membentuk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 yang muncul pada spektrum FTIR. Analisis menggunakan SEM-EDX menunjukkan katalis CaO dari batu kapur memiliki morfologi padatan menyerupai balok dan prisma serta diperoleh ukuran partikel sekitar $10 \mu\text{m}$. *Yield* biodiesel sebesar 54% diperoleh pada suhu reaksi 60°C selama 1 jam dengan rasio mol metanol terhadap minyak 1:16 dan katalis sebesar 4% (w/w).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah memberikan pendanaan penelitian Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun 2020.

Daftar Pustaka

- [1] S. uprpto, T. R. Fauziah, M. S. Sangi, T. P. Oetami, I. Qoniah, and D. Prasetyoko, "Calcium oxide from limestone as solid base catalyst in transesterification of Reutealis trisperma oil," *Indones. J. Chem.*, vol. 16, no. 2, pp. 208–213, 2016.
- [2] E. O. Ajala, M. A. Ajala, A. O. Ajao, H. B. Saka, and A. C. Oladipo, "Calcium-carbide Residue: A Precursor for the Synthesis of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaSO}_4$ Solid Acid Catalyst for Biodiesel Production

- using Waste Lard,” *Chem. Eng. J. Adv.*, p. 100033, 2020.
- [3] A. M. Rabie, M. Shaban, M. R. Abukhadra, R. Hosny, S. A. Ahmed, and N. A. Negm, “Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil,” *J. Mol. Liq.*, vol. 279, pp. 224–231, 2019.
- [4] Hartati *et al.*, “Highly selective hierarchical ZSM-5 from kaolin for catalytic cracking of Calophyllum inophyllum oil to biofuel,” *J. Energy Inst.*, 2020.
- [5] I. Lawan, Z. N. Garba, W. Zhou, M. Zhang, and Z. Yuan, “Synergies between the microwave reactor and CaO/zeolite catalyst in waste lard biodiesel production,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 2550–2560, 2020.
- [6] M. L. Granados *et al.*, “Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 73, no. 3, pp. 317–326, 2007.
- [7] T. F. Dossin, M. F. Reyniers, R. J. Berger, and G. B. Marin, “Simulation of heterogeneously MgO-catalyzed transesterification for fine-chemical and biodiesel industrial production,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 67, no. 1–2, pp. 136–148, 2006.
- [8] M. Zabeti, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, “Activity of solid catalysts for biodiesel production: A review,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 6, pp. 770–777, 2009.
- [9] P. R. Pandit and M. H. Fulekar, “Biodiesel production from microalgal biomass using CaO catalyst synthesized from natural waste material,” *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 837–845, 2019.
- [10] K. N. Krishnamurthy, S. N. Sridhara, and C. S. Ananda Kumar, “Optimization and kinetic study of biodiesel production from *Hydnocarpus wightiana* oil and dairy waste scum using snail shell CaO nano catalyst,” *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 280–296, 2020.
- [11] A. A. Ayodeji, M. E. Ojewumi, B. Rasheed, and J. M. Ayodele, “Data on CaO and eggshell catalysts used for biodiesel production,” *Data Br.*, vol. 19, pp. 1466–1473, 2018.
- [12] K. Sudsakorn, S. Saiwuttikul, S. Palitsakun, A. Seubsai, and J. Limtrakul, “Biodiesel production from *Jatropha Curcas* oil using strontium-doped CaO/MgO catalyst,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 2845–2852, 2017.
- [13] T. Maneerung, S. Kawi, and C. H. Wang, “Biomass gasification bottom ash as a source of CaO catalyst for biodiesel production via transesterification of palm oil,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, pp. 234–243, 2015.
- [14] A. Hamid, D. Prasetyoko, T. Esti, F. Rohmah, and I. Dayi, “Pengaruh Tahap Kristalisasi pada Sintesis ZSM-5 Mesopori dari Kaolin Alam,” vol. 03, no. 02, pp. 40–49, 2020.
- [15] Rakhmad, N. Hindryawati, and Daniel, “Pembuatan Katalis Basa Heterogen Dari Batu Gamping (Limestone),” *Pros. Semin. Nas.*, pp. 101–105, 2017.
- [16] N. Widiarti *et al.*, “Upgrading catalytic activity of NiO/CaO/MgO from natural limestone as catalysts for transesterification of coconut oil to biodiesel,” *Biomass Convers. Biorefinery*, 2021.
- [17] T. Maneerung, S. Kawi, Y. Dai, and C. H. Wang, “Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 487–497, 2016.
- [18] M. Kouzu, T. Kasuno, M. Tajika, Y. Sugimoto, S. Yamanaka, and J. Hidaka, “Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production,” *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2798–2806, 2008.
- [19] N. U. Soriano, R. Venditti, and D. S. Argyropoulos, “Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification,” *Fuel*, vol. 88, no. 3, pp. 560–565, 2009.
- [20] D. Y. C. Leung, X. Wu, and M. K. H. Leung, “A review on biodiesel production using catalyzed transesterification,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1083–1095, 2010.
- [21] X. Liu, H. He, Y. Wang, S. Zhu, and X. Piao, “Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst,” *Fuel*, vol. 87, no. 2, pp. 216–221, 2008.