

Sintesis Biodiesel Menggunakan Katalis Campuran Calcium Hydroxide dan Calcite

Horasdia Saragih

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Advent Indonesia
Jalan Kolonel Masturi No. 288 Parongpong, Bandung Barat, Indonesia 40559
*Email: horas@unai.edu

ABSTRACT

Fatty acid methyl esters (FAME, biodiesel) have been synthesized using a mixture of calcium hydroxide $[Ca(OH)_2]$ and calcite $[CaCO_3]$ catalyst. The fabrication was carried out by transesterifying triglycerides from palm oil using methanol at temperature of $60^\circ C$. The mixture of calcium hydroxide $[Ca(OH)_2]$ and calcite $[CaCO_3]$ catalyst was synthesized from CaO by exposed CaO to the air at room temperature. Various transesterification times have been involved in transesterification process. Based on the results obtained, it was found that the mixture of $Ca(OH)_2$ and $CaCO_3$ has catalytic characteristics, so that it can transesterify triglycerides and produce the FAME. There are 10 types of FAME produced from the palm oil triglycerides in this transesterification. Five of this types were saturated FAME and others were unsaturated FAME. The highest concentration of FAME is cis-9-octadecenoic acid methyl ester. The longer transesterification process, the more FAME is produced. Referring to the results of this study, it shows that the mixture of $Ca(OH)_2$ and $CaCO_3$ has the potential to be used as a catalyst for synthesizing biodiesel in the future.

Keywords: Biodiesel, catalyst, calcium hydroxide, calcite.

ABSTRAK

Fatty acid methyl ester (FAME, biodiesel) telah disintesis dengan menggunakan katalis campuran calcium hydroxide $[Ca(OH)_2]$ dan calcite $[CaCO_3]$. Sintesis dilakukan dengan mentransesterifikasi trigliserida yang bersumber dari minyak kelapa sawit menggunakan metanol pada temperature $60^\circ C$. Material campuran $Ca(OH)_2$ dan $CaCO_3$ disintesis dari CaO dengan cara memaparkannya ke udara terbuka pada temperatur ruang. Beragam waktu transesterifikasi dilibatkan pada proses transesterifikasi. Dari hasil yang diperoleh ditemukan bahwa material campuran $Ca(OH)_2$ dan $CaCO_3$ memiliki sifat katalitik yang baik sehingga dapat mentransesterifikasi trigliserida dan menghasilkan FAME. Ada 10 jenis FAME yang dihasilkan dari trigliserida minyak kelapa sawit. Lima FAME tersaturasi dan lima FAME tidak tersaturasi. Konsentrasi FAME yang paling tinggi yang dihasilkan adalah cis-9-octadecenoic acid methyl ester. Semakin lama transesterifikasi dilakukan semakin banyak FAME yang dihasilkan. Merujuk pada hasil penelitian ini menunjukkan bahwa material campuran $Ca(OH)_2$ dan $CaCO_3$ berpotensi digunakan sebagai katalis untuk mensintesis biodiesel di masa yang akan datang.

Kata kunci: Biodiesel, katalis, calcium hydroxide, calcite.

PENDAHULUAN

Kebutuhan biodiesel saat ini terus meningkat. Hal ini disebabkan oleh sumber dan ketersediaan bahan bakar solar yang semakin terbatas. Biodiesel dapat dijadikan sebagai alternatif pengganti bahan bakar solar. Biodiesel merupakan bahan bakar yang dapat dibarukan, dan saat ini telah digunakan untuk mensubstitusi bahan bakar solar pada berbagai kebutuhan. Biodiesel dapat disintesis melalui proses transesterifikasi trigliserida, yang berasal dari minyak tumbuh-tumbuhan atau lemak hewan, menjadi *fatty acid methyl (ethyl)*

ester (biodiesel) ^[1]. Proses transesterifikasi dilakukan dengan menggunakan suatu katalis ^[2]. Katalis berperan sebagai pembangkit dan sekaligus mediator proses transesterifikasi. Katalis menentukan terjadi dan atau tinggi rendahnya laju transesterifikasi. Oleh karena itu katalis memiliki peranan yang sangat sentral pada proses transesterifikasi.

Pencarian beragam jenis katalis yang dapat mentransesterifikasi trigliserida menjadi *fatty acid methyl ester* (FAME) terus dilakukan terutama yang mampu menghasilkan laju transesterifikasi yang tinggi. Selama ini katalis yang banyak digunakan adalah KOH dan NaOH ^[3,4]. Kedua katalis ini mampu mentransesterifikasi triglyceride menjadi FAME dengan laju yang tinggi. Kedua katalis ini memiliki harga yang relatif murah dan tersedia dalam jumlah yang besar. Namun dibalik kelebihan tersebut, menggunakan kedua jenis katalis ini membutuhkan biaya operasional yang tinggi. Biodiesel yang dihasilkan menyatu secara homogen dengan katalis setelah proses transesterifikasi terjadi. Proses pemisahannya sangat sulit, berbiaya tinggi dan menghasilkan limbah berbahaya dalam jumlah yang besar. Unsur K dan Na, yang masing-masing berasal dari KOH dan NaOH, yang tersisa di dalam biodiesel sulit dipisahkan, dan kedua unsur ini sering membentuk endapan dalam bentuk gel di dalam mesin ketika digunakan. Endapan ini merusak kerja mesin. Oleh karena itu pencarian katalis lain perlu dilakukan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemilihan katalis yang bersifat heterogen adalah cara yang paling baik ^[5]. Katalis heterogen adalah katalis yang ketika proses transesterifikasi telah selesai terjadi, katalis langsung terpisah dari biodiesel yang dihasilkan. Dengan demikian proses pemisahan terjadi dengan sendirinya dan oleh karena itu biaya pemisahan tidak lagi ada. Selain itu tidak menghasilkan limbah berbahaya sehingga proses sintesisnya akrab dengan lingkungan dan berbiaya murah.

Saat ini katalis heterogen yang telah ditemukan dan banyak mendapat perhatian salah satunya adalah *calcium oxide* (CaO) ^[6]. Katalis ini telah ditemukan mampu mentransesterifikasi beragam jenis minyak nabati mejadi FAME. Katalis ini memiliki laju transesterifikasi yang tinggi. Katalis CaO dapat digunakan secara berulang untuk mentransesterifikasi trigliserida. Karena itu penggunaannya memberikan efisiesnsi yang tinggi. Penggunaan CaO sebagai katalis telah banyak memberikan kemajuan dalam proses transesterifikasi trigliserida menjadi FAME. Biaya operasionalnya dapat direduksi secara signifikan karena bersifat heterogen dan masalah limbah berbahaya yang dihasilkan dapat teratasi. Keuntungan yang lainnya adalah CaO memiliki harga yang relatif murah dan tersedia dalam jumlah yang sangat besar.

Dibalik hal-hal yang sangat menguntungkan seperti diterangkan di atas, katalis CaO memiliki stabilitas kimia yang kurang baik. CaO sangat higroskopis dan juga mudah bereaksi dengan gas CO₂ ^[7,8]. Ketika terpapar ke udara bebas CaO bereaksi dengan uap air sehingga CaO dengan mudah berubah fase menjadi *calcium hydroxide* [Ca(OH)₂] melalui reaksi: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ ^[7]. Selain itu ketika bereaksi dengan gas CO₂ di ruang terbuka pada temperatur ruang CaO mudah berubah fase menjadi *calcite* (CaCO₃) melalui reaksi: $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ ^[8]. Oleh karena itu penyimpanannya dan saat penggunaannya harus terbebas dari lingkungan yang mengandung uap air dan gas CO₂ sehingga membutuhkan perlakuan khusus. Perlakuan khusus ini membutuhkan biaya tambahan dan kehati-hatian. Dengan demikian penggunaan CaO sebagai katalis belum menjadi pilihan yang terbaik.

Ca(OH)₂ adalah fase yang sangat stabil ^[9]. CaCO₃, dalam bentuk *calcite*, juga adalah fase yang sangat stabil ^[10]. Campurannya, yaitu Ca(OH)₂ dan *calcite*, juga sangat stabil. Oleh karena itu penyimpanan dan penggunaan material ini tidak membutuhkan teknik dan biaya khusus. Bila pun kedua material ini dan campurannya terpapar ke udara bebas pada ruang

terbuka pada saat penyimpanan dan penggunaan, tidak mengubah fasenya. Maka menggunakan Ca(OH)_2 atau CaCO_3 atau campurannya sangat menguntungkan untuk berbagai keperluan, termasuk sebagai katalis pada proses sintesis biodiesel. Selain itu, khusus untuk menghasilkan campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 , prosesnya sangat sederhana yaitu cukup dengan memaparkan material CaO ke ruang terbuka pada temperatur ruang untuk selama waktu tertentu. Dengan demikian bilamana campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 digunakan sebagai katalis akan lebih menguntungkan dibandingkan dengan menggunakan CaO . Oleh karena itu pada penelitian ini campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 telah digunakan sebagai katalis untuk mentransesterifikasi trigliserida. Campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 bersifat heterogen, yaitu tidak menyatu dengan biodiesel yang dihasilkan setelah proses transesterifikasi terjadi.

Kemampuan katalitik campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 yang disintesis dari CaO , telah diteliti. Hasilnya diuraikan pada paper ini. Beragam lamanya waktu transesterifikasi telah dilibatkan. Teknik menghasilkan campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 dari CaO diuraikan. Persentasi campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 yang terbentuk telah dihitung dan karakteristik FAME yang dihasilkan telah diinvestigasi. Sejauh yang kami ketahui melalui penelusuran berbagai referensi, penggunaan material campuran Ca(OH)_2 dan CaO_3 sebagai katalis untuk mentransesterifikasi trigliserida menjadi FAME dan teknik penggunaannya serta karakteristik hasilnya, sampai saat ini belum ada dilaporkan.

METODE

Sintesis dan Karakterisasi Katalis Campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3

Katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 disintesis dari material CaO . Material CaO dibeli dari Sigma-Aldrich Pte. Ltd. (CAS-No.: 1305-78-8, Singapore) dengan tingkat kemurnian 99,99%. Material ini langsung digunakan tanpa dilakukan purifikasi tambahan. Untuk menghasilkan campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 , material CaO dipapar secara terbuka ke udara bebas yang memiliki kelembapan rata-rata 93% pada temperatur ruang selama 90 hari. Setelah dipapar ke udara bebas selama 90 hari, material CaO sebahagian berubah menjadi Ca(OH)_2 dan sebahagian yang lain berubah menjadi CaCO_3 (berstruktur *calcite*) sehingga membentuk material campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 . Perubahan CaO ke campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 diinvestigasi menggunakan pola difraksi sinar-X yang dihasilkannya. Difraksi sinar-X nya diukur dengan menggunakan peralatan *X-ray diffractometer* Philips PW3710 yang dioperasikan pada panjang gelombang ($\text{CuK}\alpha$) $\lambda = 1.54059$ nm. Puncak-puncak difraksi sinar-X yang dihasilkan diidentifikasi dengan menggunakan pola puncak difraksi sinar-X standar dari Ca(OH)_2 (JCPDS: 01-084-1263) dan pola puncak difraksi sinar-X standar dari CaCO_3 (JCPDS: 00-047-1743). Setelah proses identifikasi dilakukan, persentasi masing-masing fase yaitu persentasi Ca(OH)_2 dan persentasi CaCO_3 di dalam campuran, dihitung.

Sintesis Biodiesel menggunakan Katalis Campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3

Dengan menggunakan katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 yang dihasilkan melalui proses sebagaimana diterangkan di atas, selanjutnya biodiesel dalam bentuk *fatty acid methyl ester* (FAME), disintesis. Sintesisnya dilakukan melalui proses transesterifikasi, yaitu mentransesterifikasi trigliserida menjadi FAME. Pada penelitian ini minyak kelapa sawit digunakan sebagai sumber trigliserida, dan metanol dengan kemurnian 99% (Merck, USA) digunakan sebagai sumber *methyl* untuk menghasilkan *fatty acid methyl ester*.

Sebanyak 2 gram katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 di atas dilarutkan ke dalam 40 mL metanol dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada laju 100 rpm dan pada

temperatur ruang selama 1 jam. Bersamaan dengan itu, sebanyak 20 mL minyak kelapa sawit dipanaskan dengan laju pemanasan $2^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dengan menggunakan plat pemanas (*hot plate*) yang dilengkapi dengan *magnetic stirrer* dan diaduk dengan laju 100 rpm. Pemanasan dilakukan sampai minyak kelapa sawit mencapai dan dipertahankan pada temperatur 60°C . Dengan menggunakan parameter-parameter eksperimen tersebut, FAME dapat diperoleh tanpa kehadiran pengotor monogliserida atau pun digliserida.

Ketika minyak kelapa sawit telah mencapai temperature 60°C , campuran katalis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 yang terlarut di dalam metanol dimasukkan ke dalamnya sehingga proses transesterifikasi dimulai. Campuran keseluruhan material ini secara terus menerus diaduk agar menjadi dan tetap homogen. Temperaturnya dijaga tetap di 60°C . Perlu diperhatikan bahwa ketika campuran katalis dan metanol dimasukkan ke dalam minyak kelapa sawit yang panas, temperatur minyak kelapa sawit akan turun secara tiba-tiba. Temperatur yang turun ini secepatnya dinaikkan kembali ke 60°C dan dipertahankan agar proses transesterifikasi selama waktu yang dibutuhkan dapat berjalan dengan baik. Pada penelitian ini, lamanya waktu transesterifikasi divariasikan, yaitu: 1,5 jam; 3 jam; 4 jam; dan 6 jam. Setelah proses transesterifikasi terjadi selama ragam waktu tersebut, FAME yang dihasilkan dikarakterisasi.

Karakterisasi Biodiesel Hasil Transesterifikasi

Ketika proses transesterifikasi telah selesai dilakukan merujuk kepada waktu yang disebut di atas, biodiesel dalam bentuk FAME dan *glycerol*, dihasilkan. FAME selanjutnya dipisahkan dari *glycerol* dan katalis dengan cara disentrifugasi. Setelah dipisahkan, selanjutnya FAME dikarakterisasi. Untuk mengetahui apakah telah terbentuk FAME yang dicirikan oleh group-group fungsional CH_3 dan ikatan $\text{CH}_3\text{-O}$, karakterisasi *Fourier Transform Infrared* (FTIR), dilakukan. Selanjutnya, untuk mengetahui jenis *methyl ester*-nya, karakterisasi *gas chromatography-mass spectroscopy* (GC-MS), dilakukan. Karakterisasi FTIR dilakukan dengan menggunakan peralatan Shimadzu IR Prestige 21 dan karakterisasi GC-MS dilakukan dengan menggunakan peralatan GC-MS Saturn CP-3800/2200MS.

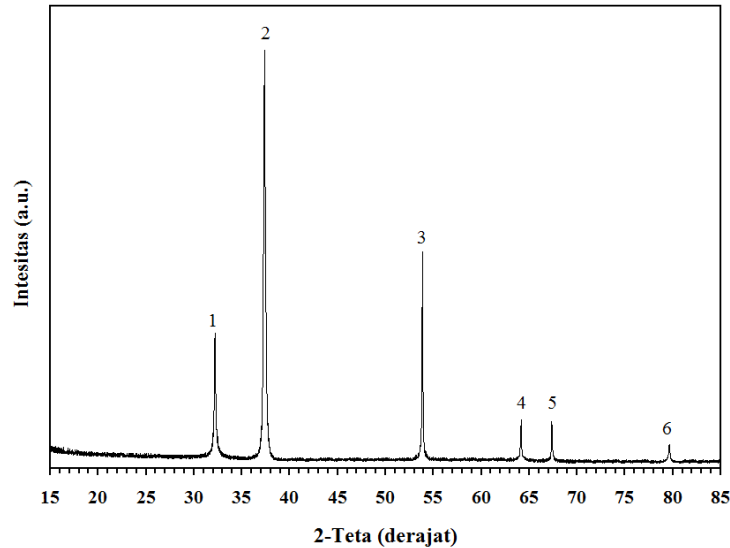
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum dipapar ke udara bebas di ruang terbuka, karakteristik fase dan struktur material CaO yang digunakan pada penelitian ini terlebih dahulu diinvestigasi untuk mengetahui kondisi awalnya. Untuk itu respon difraksinya terhadap sinar-X, diukur. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 1. Ada 6 puncak difraksi yang dihasilkan pada rentang sudut 2-teta: 15-85 derajat. Puncak-puncak difraksi ini memiliki nilai intensitas yang berbeda-beda. Selanjutnya puncak-puncak difraksi ini diidentifikasi.

Puncak difraksi yang paling intens terjadi pada sudut 2-teta sebesar $37,35$ derajat. Kemudian yang paling intens berikutnya berturut-turut adalah terjadi pada sudut 2-teta: $53,85$; $32,18$; $64,15$; $67,36$ derajat; dan yang intens terakhir adalah pada sudut $79,66$ derajat. Karakteristik urutan intensitas dan posisi sudut 2-teta dari masing-masing intensitas puncak-puncak difraksi ini, diidentifikasi. Hasilnya identik dengan yang terdapat pada data standar pola difraksi sinar-X CaO , JCPDS: 37-1497. Urutan besar intensitasnya serta posisi sudut 2-teta tiap-tiap intensitas tersebut, sama. Dengan demikian tiap-tiap puncak dapat diterangkan sebagaimana selengkapnya didaftarkan pada Tabel 1.

Dengan menggunakan data JCPDS: 37-1497, bidang-bidang kristal yang menghasilkan puncak-puncak difraksi yang ditunjukkan pada Gambar 1, dapat diketahui. Dengan demikian bahwa material CaO yang dibeli dari Sigma-Aldrich yang digunakan dalam

penelitian ini adalah material yang berstruktur kristalin yang kristalit-kristalitnya dibangun oleh bidang-bidang kristal: (1,1,1); (2,0,0); (2,2,0); (3,1,1); (2,2,2); dan (4,0,0).



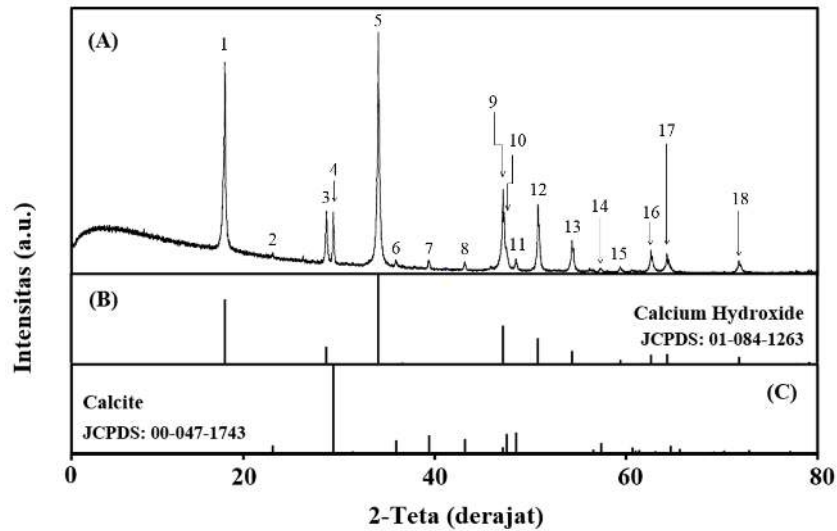
Gambar 1. Respon difraksi sinar-X CaO (kemurnian 99,99%) yang dibeli dari Sigma-Aldrich Pte. Ltd. (Singapore) (CAS-No.: 1305-78-8).

Material CaO dengan karakteristik struktur seperti diterangkan di atas selanjutnya dipapar ke udara bebas di ruang terbuka pada temperatur ruang untuk menghasilkan material campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 . Material CaO dipapar selama 90 hari, sebagaimana diterangkan pada bagian metode. Selanjutnya dikarakterisasi. Respon difraksinya terhadap sinar-X kembali diukur dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 2A. Diperoleh ada sebanyak 18 puncak difraksi yang terjadi pada rentang sudut 2-teta: 15-85 derajat. Hasil ini sangat berbeda dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 1. Ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan fase material CaO menjadi fase lain setelah dipapar ke udara bebas di ruang terbuka. Bahkan puncak-puncak difraksi CaO sama sekali tidak muncul lagi.

Puncak-puncak difraksi yang terjadi setelah dipapar ini yang paling intens ada pada sudut 2-teta sebesar 34,09 derajat. Disusul secara berurutan oleh puncak-puncak difraksi pada sudut 18,05; 47,14; 50,79; 28,68; 47,48 derajat. Hasil ini berbeda sekali dengan yang diperoleh ketika CaO belum dipapar ke udara terbuka. Besar jarak antar bidang kristal (d) yang menghasilkan ke enam puncak difraksi yang paling intens ini berturut-turut adalah 2,63006; 4,91460; 1,92796; 1,79764; 3,11267; dan 1,91494 Angstrom.

Tabel 1. Hasil Identifikasi Puncak-puncak Difraksi sinar-X CaO Merujuk pada Pola Difraksi Standar yang Terdapat pada JCPDS: 37-1497.

Puncak #	2-teta (derajat)	d (Angstrom)	Intensitas (cps)	Intensitas Relatif (%)	Bidang Kristal
1	32,18	2,7773	1845	32	{1,1,1}
2	37,35	2,4058	5695	100	{2,0,0}
3	53,85	1,7009	2950	52	{2,2,0}
4	64,15	1,4505	660	12	{3,1,1}
5	67,36	1,3887	640	11	{2,2,2}
6	79,66	1,2025	264	5	{4,0,0}



Gambar 2. (A) Respon Difraksi Sinar-X Material CaO yang telah Dipapar ke Udara Bebas di Ruang Terbuka Selama 90 hari. (B) Puncak-puncak Difraksi Sinar-X Material Standar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (JCPDS: 01-084-1263). (C) Puncak-puncak Difraksi Sinar-X Material Standar CaCO_3 berstruktur Calcite (JCPDS: 00-047-1743).

Tabel 2. Hasil Identifikasi Puncak-puncak Difraksi sinar-X Material CaO yang telah Dipapar ke Udara Bebas di Ruang Terbuka Selama 90 hari.

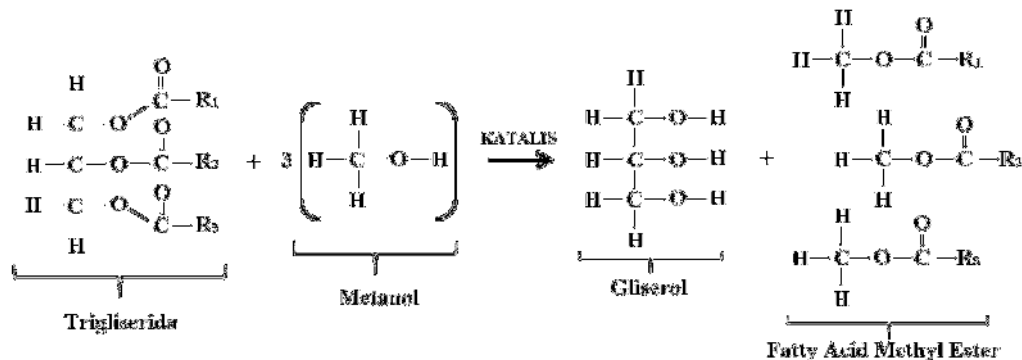
Puncak #	2-teta (Derajat)	Intensitas Relatif (%)	d (Angstrom)	FWHM (Derajat)	Rata-rata Diameter Kristalit (Angstrom)	Fase	Bidang Kristal
1	18,05	73,34	4,91460	0,1514	555,02	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{0,0,1}
2	23,04	0,93	3,86025	0,1769	478,56	CaCO_3	{0,1,2}
3	28,68	17,61	3,11267	0,1390	616,25	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{1,0,0}
4	29,41	12,83	3,03705	0,1251	685,83	CaCO_3	{1,0,4}
5	34,09	100	2,63006	0,1676	517,89	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{0,1,1}
6	35,95	1,79	2,49814	0,1977	441,13	CaCO_3	{1,1,0}
7	39,37	2,65	2,28866	0,1514	581,91	CaCO_3	{1,1,3}
8	43,14	2,61	2,09699	0,1891	471,74	CaCO_3	{2,0,2}
9	47,14	28,75	1,92796	0,1365	662,98	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{0,1,2}
10	47,48	16,92	1,91494	0,3444	263,17	CaCO_3	{0,1,8}
11	48,47	4,01	1,87812	0,1404	648,30	CaCO_3	{1,1,6}
12	50,79	28,48	1,79764	0,1474	622,96	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{1,1,0}
13	54,35	15,45	1,68801	0,1608	579,86	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{1,1,1}
14	57,34	1,17	1,60690	0,2221	425,77	CaCO_3	{1,2,2}
15	59,39	1,92	1,55623	0,2126	449,28	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{2,0,0}
16	62,58	10,68	1,48436	0,1690	574,65	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{2,0,1}
17	64,27	11,07	1,44935	0,2180	449,52	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{1,0,3}
18	71,78	7,46	1,31506	0,2086	490,86	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	{2,0,2}

Untuk mengetahui perubahan fase ini, ke enam puncak difraksi yang paling intens tersebut dijadikan sebagai parameter identifikasi dengan menggunakan metode *Hanawalt Search*

Manual [11]. Keenam puncak difraksi di atas diurutkan sesuai dengan besar intensitasnya, kemudian nilai d (jarak antar bidang kristal yang menghasilkan masing-masing puncak) tiap-tiap puncak dicari, sehingga kita memiliki enam nilai d yang urutannya berdasarkan besar intensitas puncak difraksinya. Selanjutnya urutan nilai d ini dicocokkan dengan salah satu data dari material standar yang terdapat pada *Hanawalt Search Manual*. Bila ditemukan urutan nilai d yang tepat sama, maka fase material dapat ditentukan.

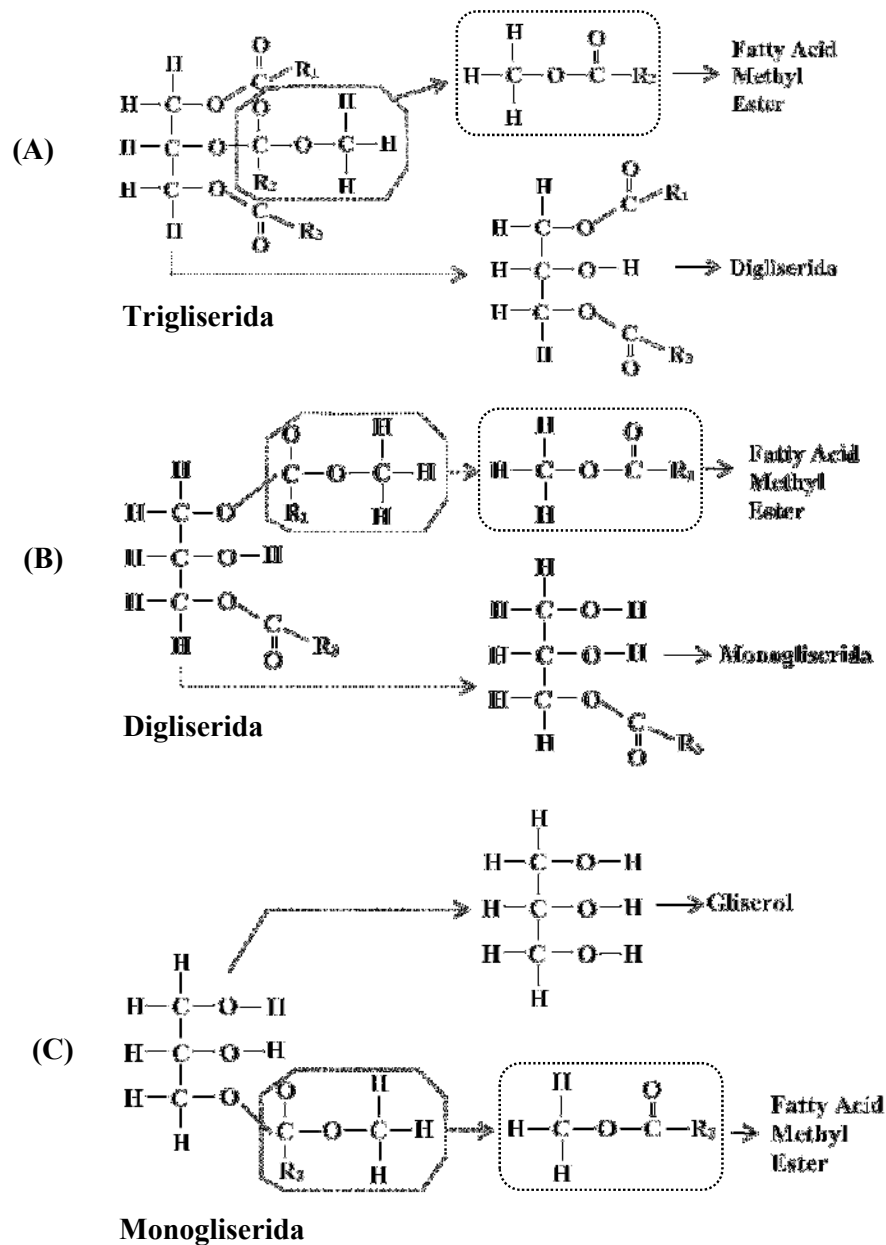
Setelah dilakukan pencocokan urutan nilai d di atas, yang paling cocok adalah terhadap karakteristik material $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Material $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terdapat di *Hanawalt Search Manual* memiliki urutan nilai d yang betul-betul sama dengan urutan nilai d di atas, dari yang pertama sampai yang ke lima, yaitu: 2,63006; 4,91460; 1,92796; 1,79764; dan 3,11267 Angstrom. Hanya nilai d pada urutan yang keenam yang tidak cocok. Karena telah ada sebanyak 5 nilai d yang urutannya cocok, maka disimpulkan bahwa material CaO yang dipapar ke udara bebas di atas berubah fase salah satu menjadi $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Lima urutan nilai d di atas juga tepat sama dengan urutan nilai d yang terdapat pada JCPDS: 01-084-1263, yaitu data standar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Gambar 2B). Oleh karena itu untuk mengidentifikasi puncak-puncak difraksi yang lain yang dimiliki oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selain lima puncak yang telah diketahui berdasarkan urutan nilai d di atas, dapat menggunakan data JCPDS: 01-084-1263. Hasil identifikasinya didaftarkan pada Tabel 2. Perhatikan puncak #: 1, 3, 5, 9, 12, 13, dan 15-18 yang adalah puncak-puncak difraksi yang telah diidentifikasi dihasilkan oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Di dalam Tabel 2, bidang-bidang kristal yang menghasilkan puncak-puncak difraksi tersebut, juga disertakan.



Gambar 3. Skema Proses Transesterifikasi Triglisidrida Menjadi Fatty Acid Methyl Ester (Biodiesel) dan Gliserol. R1, R2, dan R3 merepresentasikan rantai panjang grup alkil.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, kita lihat bahwa ada puncak-puncak difraksi yang lain selain yang dihasilkan oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$, seperti puncak # 2, 4, 6-8, 10, 11, dan 14. Ini menunjukkan bahwa ada fase lain yang terbentuk di dalam material selain $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Oleh karena itu kita harus kembali mengidentifikasi puncak-puncak tersebut. Diketahui bahwa nilai d yang ada pada urutan ke enam (terakhir) dari urutan nilai d yang kita telah peroleh di atas, yaitu: $d = 1,91494$ Angstrom, tidak dimiliki oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan belum kita identifikasi. Untuk itu kita harus kembali melakukan proses identifikasi yang sama seperti sebelumnya, yaitu mengurutkan puncak-puncak difraksi yang ada pada Gambar 2 berdasarkan besar intensitasnya tanpa melibatkan puncak-puncak difraksi yang dihasilkan oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Setelah hal ini dilakukan diperoleh empat urutan nilai d yang diurut berdasarkan besar intensitas difraksinya, yaitu: 1,91494; 3,03705; 1,87812; dan 2,28866 Angstrom. Urutan nilai d ini selanjutnya dicocokkan kembali dengan salah satu data urutan nilai d yang terdapat pada data *Hanawalt Search Manual*.



Gambar 4. Skema Proses Tahapan Transesterifikasi Triglisidrida Menjadi *Fatty Acid Methyl Ester* (Biodiesel) dan Gliserol.

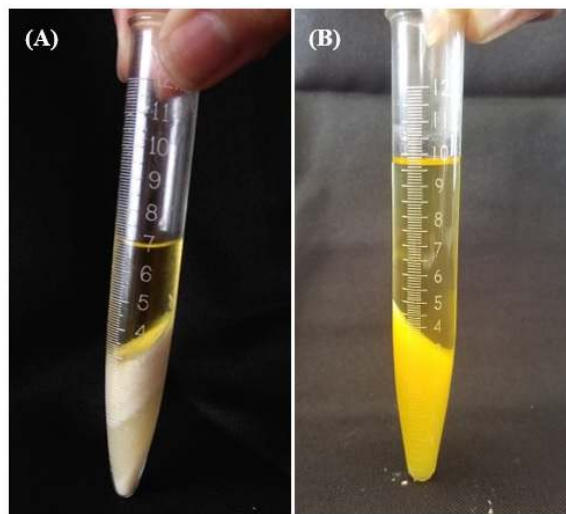
Setelah dicocokkan diperoleh bahwa urutan yang paling tepat adalah urutan nilai d yang dimiliki oleh CaCO_3 berstruktur *calcite*. Data pada *Hanawalt Search Manual*, nilai d dari CaCO_3 (*calcite*) yang dihasilkan oleh puncak-puncak difraksi yang paling intens secara berurut adalah: 1,91494; 3,03705; 1,87812; dan 2,28866 Angstrom. Urutan ini persis sama dengan urutan nilai d di atas. Ini menunjukkan bahwa fase CaCO_3 berstruktur *calcite* juga terbentuk di dalam material. Selain itu, urutan nilai d ini juga persis sama seperti yang terdapat pada data standar JCPDS: 00-047-1743, yaitu data standar CaCO_3 (lihat Gambar 2C). Dengan demikian data JCPDS: 00-047-1743 ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi puncak-puncak difraksi yang lain yang dihasilkan oleh material CaCO_3

selain empat puncak difraksi yang telah diketahui tersebut di atas. Setelah diidentifikasi diperoleh bahwa CaCO_3 memiliki puncak-puncak difraksi: #2, 4, 6-8, 10,11, dan 15.

Semua puncak-puncak difraksi yang ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu sebanyak 18 puncak, telah teridentifikasi. Tidak ada puncak difraksi yang lain yang tidak teridentifikasi. Dengan demikian kita menyatakan bahwa material CaO yang dipapar ke udara terbuka pada temperatur ruang selama 90 hari sebagaimana diterangkan pada bagian metode di atas berubah fase ke dua jenis fase, yaitu: Ca(OH)_2 dan CaCO_3 . Dengan menggunakan data standar JCPDS: 01-084-1263 [Ca(OH)_2] dan JCPDS: 00-047-1743 [CaCO_3], bidang-bidang kristal (h,k,l) yang menghasilkan ke 18 puncak difraksi tersebut juga telah dapat identifikasi (selengkapnya dirangkumkan pada Tabel 2).

Persentasi volume dari masing-masing fase, Ca(OH)_2 dan CaCO_3 , dapat diestimasi dengan menghitung volume total masing-masing dengan menggunakan data ukuran diameter rata-rata kristalitnya. Ukuran rata-rata diameter kristalit-kristalit masing-masing fase telah didaftarkan di dalam Tabel 2. Setelah dihitung, diperoleh persen volume Ca(OH)_2 adalah 59,72 % dan persen volume CaCO_3 adalah 40,28 %. Selanjutnya, material campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 ini digunakan sebagai katalis untuk mensintesis biodiesel. Sintesisnya dilakukan dengan mentransesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit menjadi FAME. Material campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 di atas sebanyak 2 gram dilarutkan ke dalam 40 mL metanol. Diaduk sampai homogen. Selanjutnya dicampur dengan 20 mL minyak kelapa sawit yang akan ditransesterifikasi. Transesterifikasi dilakukan pada temperatur 60°C selama waktu yang berbeda-beda: 1,5 jam; 3 jam; 4 jam; dan 6 jam. Prosedur selengkapnya diuraikan pada bagian metode. Setelah transesterifikasi selesai, selanjutnya disentrifugasi untuk memisahkan FAME dari katalis dan gliserol.

Proses transesterifikasi secara skematis ditunjukkan pada Gambar 3 [12]. Trigliserida yang disusun oleh gliserol dan tiga ragam *fatty acid ester* direaksikan dengan methanol. Pada proses transesterifikasi, satu molekul trigliserida akan direaksikan dengan tiga molekul metanol untuk menghasilkan tiga molekul *fatty acid methyl ester* dan satu molekul gliserol.



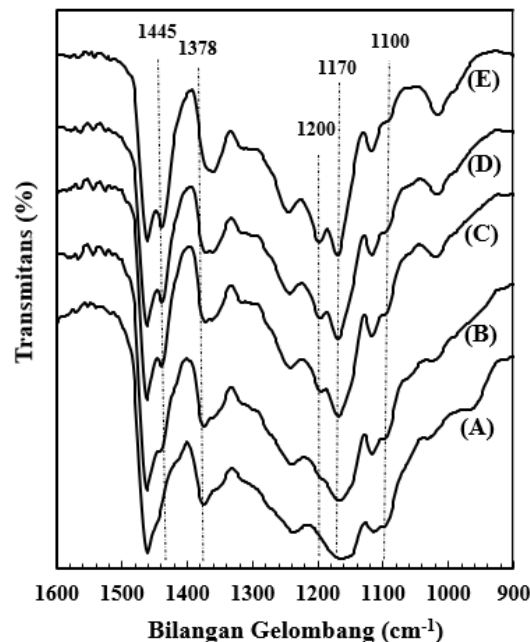
Gambar 5. (A) Potret Hasil Pemisahan FAME dari Katalis dan Gliserol setelah Disentrifugasi Selama 30 Menit pada Laju 3000 rpm. (B) Potret Trigliserida dan Campuran Katalis + Metanol sebelum Transesterifikasi.

Pada saat transesterifikasi, trigliserida dikonversi secara bertahap menjadi digliserida, selanjutnya menjadi monogliserida dan terakhir menjadi gliserol. Proses ini secara skematis

ditunjukkan pada Gambar 4 [12]. Di setiap tahapan tersebut, satu molekul *fatty acid methyl ester* dihasilkan. Untuk menghasilkan setiap molekul *fatty acid methyl ester*, metoksi (CH_3O^-) yang berasal dari metanol bereaksi dengan atom C dari karbonil yang ada pada molekul trigliserida (lihat Gambar 4). Pertama-tama metoksi bereaksi dengan atom C dari karbonil yang memiliki rantai grup alkil R2 (Gambar 4A) dan menghasilkan satu molekul *fatty acid methyl ester* yang memiliki karakteristik yang dicirikan oleh R2.

Selanjutnya molekul metoksi yang lain bereaksi dengan atom C dari karbonil yang memiliki rantai grup alkil R1 (Gambar 4B) dan menghasilkan satu molekul *fatty acid methyl ester* yang memiliki karakteristik yang dicirikan oleh R1. Terakhir, atom metoksi yang lain bereaksi dengan atom C dari karbonil yang memiliki rantai grup alkil R3 (Gambar 4C) dan menghasilkan satu molekul *fatty acid methyl ester* yang memiliki karakteristik yang dicirikan oleh R3. Dengan demikian tiga molekul *fatty acid methyl ester* dihasilkan dari setiap satu molekul trigliserida. Kesempurnaan proses transesterifikasi ini (berhasilnya trigliserida dikonversi secara sempurna menjadi gliserol) bergantung secara utama pada kinerja katalis yang digunakan, ketersediaan molekul metoksi, temperatur transesterifikasi, dan lamanya waktu transesterifikasi.

Setelah proses transesterifikasi dilakukan, selanjutnya FAME dihasilkan. Kemudian FAME dipisahkan dari katalis dan gliserol dengan cara disentrifugasi. Sentrifugasi dilakukan pada laju 3000 rpm selama 30 menit. Hasilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5A. Keadaan sebelum ditransesterifikasi juga ditunjukkan sebagai bandingan (Gambar 5B). Setelah disentrifugasi terlihat hasilnya terbagi ke dalam tiga bagian secara berlapis (Gambar 5A). Lapisan bagian bawah adalah katalis, lapisan bagian tengah adalah gliserol, dan lapisan bagian atas adalah FAME. Sementara sebelum ditransesterifikasi (Gambar 5B), hasilnya terbagi ke dalam dua bagian, yaitu: lapisan trigliserida (bagian atas) dan campuran katalis dan methanol (bagian bawah). Selanjutnya, cairan bagian atas pada Gambar 5A disedot dan dipisahkan untuk dikarakterisasi.

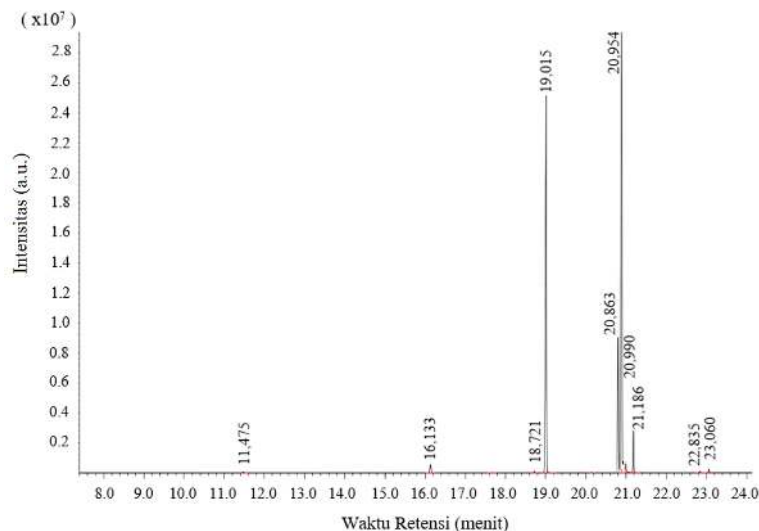


Gambar 6. Karakteristik FTIR FAME hasil transesterifikasi minyak kelapa sawit selama: (B) 1,5 jam; (C) 3 jam; (D) 4 jam; dan (E) 6 jam, menggunakan katalis campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 . (A) Karakteristik FTIR trigliserida.

Karakterisasi FTIR dilakukan terlebih dahulu untuk mengetahui apakah molekul *fatty acid methyl ester* telah terbentuk, yang dicirikan oleh hadirnya grup fungsional CH_3 dan ikatan O-CH_3 yang dimiliki oleh FAME (lihat molekul FAME pada Gambar 3). Grup fungsional CH_3 dan ikatan O-CH_3 memiliki respon FTIR yang khas pada rentang bilangan gelombang mid-infra merah ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$). Secara khusus, karakteristik FAME dapat terlihat secara menonjol berbeda dari yang lain pada rentang bilangan gelombang $1600\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ [13,14]. Setelah dikarakterisasi pada rentang bilangan gelombang tersebut, diperoleh hasilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 6B sampai 6E. Masing-masing Gambar 6B sampai 6E adalah menunjukkan karakteristik FTIR FAME dari hasil transesterifikasi selama: 1,5; 3; 4; dan 6 jam.

Karakteristik FTIR trigliserida pada rentang bilangan gelombang yang sama juga disertakan sebagai bandingan (Gambar 6A). Dari hasil yang diperoleh sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 terlihat bahwa lembah-lembah transmitans yang dihasilkan oleh trigliserida berbeda dengan lembah-lembah transmitans yang dihasilkan oleh FAME. Posisi dan kedalaman lembah-lembah transmitans ditentukan oleh jenis dan konsentrasi kandungan grup-grup fungsional yang dimiliki [13]. FAME memiliki grup-grup fungsional yang berbeda dengan trigliserida (lihat perbedaan molekul FAME dan trigliserida pada Gambar 3). Perbedaan lembah transmitans yang sangat jelas antara FAME dan trigliserida terjadi pada bilangan gelombang 1445 cm^{-1} , 1378 cm^{-1} , 1200 cm^{-1} , dan 1100 cm^{-1} .

Siatis dkk. [13] dan Yuan dkk. [14] telah menginvestigasi karakteristik FTIR FAME dan trigliserida pada rentang bilangan gelombang $1600\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ dan mengidentifikasi lembah-lembah transmitans yang dihasilkan. Mereka melaporkan bahwa lembah-lembah transmitans terjadi pada bilangan gelombang 1445 cm^{-1} yang disebabkan oleh serapan energi inframerah yang dilakukan oleh grup fungsional CH_3 dari molekul FAME. Lembah transmitans terjadi pada bilangan gelombang 1378 cm^{-1} yang disebabkan oleh serapan energi inframerah yang dilakukan oleh grup fungsional O-CH_2 dari molekul trigliserida. Lembah transmitans terjadi pada bilangan gelombang 1200 cm^{-1} yang disebabkan oleh serapan energi inframerah yang dilakukan oleh grup fungsional O-CH_3 dari molekul FAME. Dan terakhir, lembah transmitans terjadi pada bilangan gelombang 1100 cm^{-1} yang disebabkan oleh serapan energi inframerah yang dilakukan oleh grup fungsional $\text{O-CH}_2\text{-C}$ dari molekul trigliserida. Pada penelitian ini lembah-lembah transmitans seperti yang dihasilkan pada penelitian Yuan dkk. dan Siatis dkk. juga terjadi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 7. Profil *total ion chromatogram* (ITC) FAME yang diperoleh dari hasil transesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit.

Pembentukan FAME pada proses transesterifikasi yang dilakukan pada penelitian ini terkonfirmasi dengan munculnya lembah transmitans pada bilangan gelombang 1445 cm^{-1} dan 1200 cm^{-1} . Dua lembah ini masing-masing dihasilkan oleh grup fungsional CH_3 dan O-CH_3 . Grup fungsional CH_3 dan O-CH_3 hanya dimiliki oleh FAME sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pada trigliserida (Gambar 6A) dua lembah transmitans ini tidak terbentuk karena trigliserida tidak memiliki grup fungsional CH_3 dan O-CH_3 . Artinya FAME telah terbentuk setelah transesterifikasi dilakukan. Semakin lama proses transesterifikasi dilakukan (Gambar 6B sampai 6E), kedua lembah ini semakin terbentuk dan semakin dalam. Artinya pembentukan FAME semakin banyak. Ketika trigliserida ditransesterifikasi selama 1,5 jam, kedua lembah tersebut mulai teramati, dan semakin dalam ketika waktu transesterifikasi ditambah.

Di lain pihak, lembah transmitans pada bilangan gelombang 1378 cm^{-1} yang ada pada trigliserida (Gambar 6A) semakin lama semakin menghilang ketika waktu transesterifikasi ditambah. Diketahui bahwa lembah transmitans ini dihasilkan oleh grup fungsional O-CH_2 yang dimiliki oleh molekul trigliserida. Ketika transesterifikasi terjadi, trigliserida akan terkonversi menjadi digliserida, selanjutnya menjadi monogliserida dan terakhir menjadi gliserol (perhatikan Gambar 4). Ketika proses ini terjadi maka serapan intensitas sinar inframerah pada bilangan gelombang 1378 cm^{-1} akan berkurang karena konsentrasi trigliserida berkurang.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa ketika waktu transesterifikasi terus ditambah, kedalaman lembah transmitans pada bilangan gelombang 1378 cm^{-1} terus berkurang. Sementara kedalaman lembah transmitans pada bilangan gelombang 1445 cm^{-1} dan 1200 cm^{-1} terus bertambah. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi trigliserida terus berkurang dan konsentrasi FAME terus bertambah ketika waktu transesterifikasi ditambah. Hal yang sama ditunjukkan oleh lembah transmitans pada bilangan gelombang 1100 cm^{-1} yang dihasilkan oleh grup fungsional $\text{O-CH}_2\text{-C}$ dari trigliserida. Kedalaman lembah ini juga terus berkurang seiring bertambahnya waktu transesterifikasi. Merujuk pada hasil di atas menunjukkan bahwa FAME telah dapat dihasilkan, dan konsentrasinya semakin besar ketika lama waktu transesterifikasi ditambah. Dengan demikian bahwa FAME dapat disintesis dengan menggunakan katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 . Katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 memiliki aktivitas katalitik yang baik.

Musharraf dkk. [15] melaporkan bahwa ada 20 jenis FAME yang telah dikenal saat ini yang dibedakan oleh struktur molekulnya (rantai panjang alkilnya: R1, R2, R3) yang dihasilkan dari beragam jenis minyak (trigliserida) dari tumbuhan maupun lemak hewan. Trigliserida dari suatu tumbuhan tertentu atau lemak hewan tertentu menghasilkan jenis-jenis FAME tertentu. Untuk mengetahui jenis FAME yang dihasilkan pada penelitian ini, selanjutnya karakterisasi GC-MS dilakukan. Karakterisasi GC-MS dapat memberikan informasi tentang jenis FAME, komposisi kimianya, dan estimasi konsentrasi masing-masing jenis FAME. Untuk tujuan ini, FAME yang dihasilkan pada penelitian ini, yang dihasilkan dari transesterifikasi selama 6 jam, dikarakterisasi. Hasilnya, dalam bentuk profil *total ion chromatogram* (TIC), ditunjukkan pada Gambar 7.

Diperoleh ada 10 puncak yang terjadi pada TIC pada rentang waktu retensi 8-24 menit. Ini menunjukkan bahwa terdapat 10 jenis senyawa (*compound*) yang telah terpisahkan secara baik di dalam kolom kapiler chromatogram yang memiliki karakteristik laju gerak yang berbeda-beda. Oleh karakteristik laju gerak yang berbeda-beda ini, detektor yang terintegrasi pada peralatan chromatogram akan mendeteksi senyawa-senyawa tersebut pada waktu yang berbeda-beda pula (*retention time*). Jumlah molekul senyawa (konsentrasi) masing-masing jenis senyawa akan menentukan tinggi rendahnya intensitas pada TIC.

Tabel 3. Jenis FAME yang dihasilkan dari proses transesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit menggunakan katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 .

Puncak #	Waktu Retensi (Menit)	Nama FAME	Struktur	Rumus Kimia	Tinggi Puncak	Luas Puncak	% Luas Puncak
1	11,475	Dodecanoic Acid, Methyl Ester	C-12:0	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$	48875	1544754	0,123
2	16,133	Tetradecanoic Acid, Methyl Ester	C-14:0	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}_2$	533528	10372944	0,827
3	18,721	<i>cis</i> -9-Hexadecenoic Acid, Methyl Ester	C-16:1 Δ^{cis-9}	$\text{C}_{17}\text{H}_{32}\text{O}_2$	108884	1851646	0,148
4	19,015	Hexadecanoic Acid, Methyl Ester	C-16:0	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$	24583833	461170382	36,776
5	20,863	<i>cis,cis</i> -9,12-Octadecadienoic Acid, Methyl Ester	C-18:2 $\Delta^{cis,cis-9,12}$	$\text{C}_{19}\text{H}_{34}\text{O}_2$	9096474	145773664	11,625
6	20,954	<i>cis</i> -9-Octadecenoic Acid, Methyl Ester	C-18:1 Δ^{cis-9}	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	29413527	573160258	45,706
7	20,990	<i>cis</i> -11-Octadecenoic Acid, Methyl Ester	C-18:1 Δ^{cis-11}	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	757160	11752128	0,937
8	21,186	Octadecanoic Acid, Methyl Ester	C-18:0	$\text{C}_{19}\text{H}_{38}\text{O}_2$	2798244	42819256	3,415
9	22,835	<i>cis</i> -13-Eicosenoic Acid, Methyl Ester	C-20:1 Δ^{cis-13}	$\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{O}_2$	92316	1808193	0,144
10	23,060	Eicosenoic Acid, Methyl Ester	C-20:0	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}\text{O}_2$	224049	3758889	0,300

Setiap puncak, yang dicirikan oleh besaran waktu retensinya, pada profil TIC di atas diidentifikasi menggunakan data standar. Setelah diidentifikasi diperoleh bahwa jenis FAME yang dihasilkan adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Diperoleh ada 10 jenis FAME yang dihasilkan dari proses transesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit menggunakan katalis campuran Ca(OH)_2 dan CaCO_3 ini, yaitu: (1) *dodecanoic acid methyl ester* (C-12:0); (2) *tetradecanoic acid methyl ester* (C-14:0); (3) *cis-9-hexadecenoic acid methyl ester* (C-16:1 Δ^{cis-9}); (4) *hexadecanoic acid methyl ester* (C-16:0); (5) *cis,cis-9,12-octadecadienoic acid methyl ester* (C-18:2 $\Delta^{cis,cis-9,12}$); (6) *cis-9-octadecenoic acid methyl ester* (C-18:1 Δ^{cis-9}); (7) *cis-11-octadecenoic acid methyl ester* (C-18:1 Δ^{cis-11}); (8) *octadecanoic acid methyl ester* (C-18:0); (9) *cis-13-eicosenoic acid methyl ester* (C-20:1 Δ^{cis-13}); dan (10) *eicosenoic acid methyl ester* (C-20:0). Lima diantaranya tersaturasi, yaitu: *dodecanoic acid methyl ester* (C-12:0); *tetradecanoic acid methyl ester* (C-14:0); *hexadecanoic acid methyl ester* (C-16:0); *octadecanoic acid methyl ester* (C-18:0); dan *eicosenoic acid methyl ester* (C-20:0), dan lima yang lain tidak tersaturasi.

Pada Tabel 3, telah juga dihitung besarnya luas daerah di bawah kurva tiap-tiap puncak (luas puncak) dan persen luas daerah tersebut. Merujuk kepada besarnya persen luas daerah ini, dapat diestimasi konsentrasi dari tiap-tiap jenis FAME. Dari ke-10 jenis FAME di atas, yang memiliki konsentrasi yang paling tinggi adalah *cis-9-octadecenoic acid methyl ester*, yaitu yang memiliki nilai persen luas daerah yang tertinggi: 45,706%. Berturut-turut diikuti oleh tiga konsentrasi terbesar selanjutnya, yaitu: *hexadecanoic acid methyl ester*; *cis,cis-9,12-octadecadienoic acid methyl ester*; dan *octadecanoic acid methyl ester*. Tidak ditemukan ada puncak lain yang terdeteksi selain ke-10 puncak di atas. Ini menunjukkan bahwa senyawa pengotor, selain FAME, tidak terdapat di dalam biodiesel.

KESIMPULAN

Dari hasil yang diperoleh pada penelitian ini sebagaimana diterangkan di bagian hasil dan diskusi di atas menunjukkan bahwa material campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 yang disintesis dari material CaO dengan cara memaparkannya ke udara terbuka pada temperatur ruang, dapat digunakan sebagai katalis. Ini terbukti dari hasil yang diperoleh ketika digunakan mentransesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit yang dilakukan pada penelitian ini. Hasilnya, trigliserida dapat ditransesterifikasi menghasilkan FAME. Sebanyak 10 jenis FAME dihasilkan ketika mentransesterifikasi trigliserida dari minyak kelapa sawit.

Semakin lama katalis digunakan mentransesterifikasi trigliserida, semakin tinggi konsentrasi FAME yang dihasilkan. Ini menunjukkan bahwa material campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 memiliki aktivitas katalitik yang baik. Setelah proses transesterifikasi selesai dilakukan, katalis ini dengan mudah dapat dipisahkan dari FAME yang dihasilkan. Pemisahannya cukup dengan cara disentrifugasi. FAME, gliserol, dan katalis terpisah dengan baik. Katalis material campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 ini berwujud padat. Ketika telah selesai digunakan mentransesterifikasi trigliserida, wujudnya pun tetap dalam bentuk padatan. Oleh karena itu katalis ini berpotensi untuk digunakan kembali secara berulang mentransesterifikasi trigliserida yang baru. Merujuk pada hasil-hasil yang diperoleh pada penelitian ini, menunjukkan bahwa material campuran $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan CaCO_3 berpotensi digunakan sebagai katalis masa depan untuk mengembangkan proses sintesis biodiesel di masa yang akan datang.

REFERENSI

- 1 Knothe, G., & Razon, L. F. 2017. Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 58, Hal. 36–59.
- 2 Chua, S. Y., Periasamy, L. A. P., Goh, C. M. H., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Kansedo, J., Khalid, M., Walvekar, R., & Abdullah, E. C. 2020. Biodiesel synthesis using natural solid catalyst derived from biomass waste-A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 81, Hal. 41-60.
- 3 Danish, M., Kale, P., Ahmad, T., Ayoub, M., Geremew, B., & Adeloju, S. 2020. Conversion of flaxseed oil into biodiesel using KOH catalyst: Optimization and characterization dataset. *Data in Brief*, Vol. 29, Hal. 105225.
- 4 Efavi, J. K., Kanbogtah, D., Apalangya, V., Nyankson, E., Tiburu, E. K., Arhin, D. D., Agyeman, B. O., & Yaya, A. 2018. The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of *Citrullus vulgaris* seed oil as a potential biodiesel feed stock. *South African Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, Hal. 98-102.
- 5 Mardhiah, H. H., Ong, H. C., Masjuki H. H., Lim, S., & Lee H. V. 2017. A review on latest developments and future prospects of heterogeneous catalyst in biodiesel production from non-edible oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, Hal. 1225-1236.
- 6 Marinković, D. M., Stanković, M. V., Veličković, A. V., Avramović, J. M., Miladinović, M. R., Stamenković, O. O., Veljković, V. B., & Jovanović, D. M. 2016. Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production: Current state and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, Hal. 1387-1408.

- 7 Serris, E., Favergeon, L., Pijolat, M., Soustelle, M., Nortier, P., Gärtner, R.S., Chopin, T., & Habib, Z. 2011. Study of the hydration of CaO powder by gas–solid reaction. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, Hal. 1078-1084.
- 8 Nikulshina, V., Gebald, C., & Steinfeld, A. 2009. CO₂ capture from atmospheric air via consecutive CaO-carbonation and CaCO₃-calcination cycles in a fluidized-bed solar reactor. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 146, No. 2, Hal. 244-248.
- 9 Schaube, F., Koch, L., Wörner, A., & Steinhagen, H.M. 2012. A thermodynamic and kinetic study of the de- and rehydration of Ca(OH)₂ at high H₂O partial pressures for thermo-chemical heat storage. *Thermochimica Acta*, Vol. 538, Hal. 9-20.
- 10 Tribble, J. S., Arvidson, R. S., Lane, M., & Mackenzie, F. T. 1995. Crystal chemistry, and thermodynamic and kinetic properties of calcite, dolomite, apatite, and biogenic silica: applications to petrologic problems. *Sedimentary Geology*, Vol. 95, No. 1-2, Hal. 11-37.
- 11 Suryanarayana, C. & Norton, M. G. 1998. X-ray Diffraction: A Practical Approach. *Plenum Press*, New York, U.S.A.
- 12 Asakuma, Y., Maeda, K., Kuramochi, H., & Fukui, K. 2009. Theoretical study of the transesterification of triglycerides to biodiesel fuel. *Fuel*, Vol. 88, Hal. 786-791.
- 13 Siatis, N. G., Kimbaris, A. C., Pappas, C. S., Tarantilis, P. A., & Polissiou, M. G. 2006. Improvement of biodiesel production based on the application of ultrasound: monitoring of the procedure by FTIR spectroscopy. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 83, No. 1, Hal. 53-57.
- 14 Yuan, T., Koble, E. A., Pinchuk, D., & Van de Voort F. R. 2014. FTIR on-line monitoring of biodiesel transesterification. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels*, Hal. 1-13.
- 15 Musharraf, S. G., Ahmed, M. A., & Zehra N. 2015. Quantification of FAMES in biodiesel blends of various sources by gas chromatography tandem mass spectrometry. *Analytical Methods*, Vol. 7, Hal. 3372-3378.