

# Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan sebagai Katalis pada Proses Transesterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* menjadi Biodiesel

Syahrizal C<sup>1</sup>, Dicky Agustian A W<sup>2</sup>, Nyoman Puspa Asri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas WR Supratman

E-mail: [Syahrizalchristian18@gmail.com](mailto:Syahrizalchristian18@gmail.com)

## ABSTRACT

*Energy in Indonesia is increasing every year and we should overcome this increasing by develop alternative energy sources. In this study, the researchers used fish bone waste as catalyst to transesterification reaction of Palm Fatty Acid Distillate into biodiesel. The reaction of biodiesel making from PFAD raw materials includes esterification and transesterification reaction. The content of free fatty acid in PFAD was 89.259% and GC-MS analysis on PFAD obtained the largest percentage of constituent compounds; Hexadecanoic Acid (C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>) of 63.14%. Fish bone waste was calcined at 900°C for 2 hours in the furnace. XRD characterization in fish bone showed the crystalline form of Ca<sub>10</sub> and Cs<sub>6</sub>In<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. The highest conversion in esterification reaction was found on PFAD molar ration, like methanol 1:12 was 98,45%. In transesterification reaction, the highest yield was 83% which was obtained from the addition of fish bone catalyst over 8% by oil wight. The biodiesel analysis result in the best condition included biodiesel density analysis which was obtaining 851.5kg/m<sup>3</sup>, the content of free fatty acid analysis was 1.112% Mg-KOH/g, iodine number analysis was 53.066 g- I<sub>2</sub> / 100g, cloud point diesel analysis was 15.3°, and GC-MS analysis containing the largest component of methyl ester compound in biodiesel was Pentadecanoic Acid methyl ester (C<sub>17</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>) at 48.72%.*

**Keywords:** PFAD, transesterification, esterification, fish bone waste, catalyst characterization

## ABSTRAK

Energi di Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya dan cara mengatasi masalah tersebut yaitu mengembangkan sumber energi alternatif. Pada penelitian ini digunakan limbah tulang ikan sebagai katalis untuk reaksi transesterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* menjadi biodiesel. Reaksi pembuatan biodiesel dari bahan baku PFAD diantaranya meliputi reaksi esterifikasi dan reaksi transesterifikasi. Kandungan asam lemak bebas pada PFAD yaitu 89,259%, analisa GC-MS pada PFAD didapatkan presentase senyawa penyusun terbesar yaitu Hexadecanoic Acid (C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>) sebesar 63,14%. Limbah tulang ikan di kalsinasi pada suhu 900°C selama 2 jam di dalam furnace. Karakterisasi XRD dalam tulang ikan menunjukkan bentuk kristal senyawa Ca<sub>10</sub> dan Cs<sub>6</sub>In<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Hasil konversi tertinggi pada reaksi esterifikasi terdapat pada rasio molar PFAD:metanol 1:12 yaitu sebesar 98,45%. Pada reaksi transesterifikasi hasil *yield* tertinggi sebesar 83% yang diperoleh dari penambahan katalis tulang ikan sebanyak 8% terhadap berat minyak. Hasil analisa biodiesel pada kondisi terbaik yaitu meliputi analisa densitas biodiesel yang mendapatkan hasil 851,4 kg/m<sup>3</sup>, analisa kadar asam lemak bebas sebesar 1,112% Mg-KOH/g, analisa angka iodine didapatkan hasil sebesar 53,066 g-I<sub>2</sub>/100g, analisa cloud point biodiesel yaitu sebesar 15,3°, dan analisa GC-MS dimana komponen senyawa metil ester terbesar dalam biodiesel yaitu Pentadecanoic Acid methyl ester (C<sub>17</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>) sebesar 48,72%.

**Kata kunci:** PFAD, transesterifikasi, esterifikasi, limbah tulang ikan, karakterisasi katalis

## PENDAHULUAN

Seiring berjalannya waktu, kebutuhan energi di Indonesia semakin meningkat dan tidak bisa dihindari dalam kehidupan bermasyarakat. Saat ini, kelangkaan pasokan energi sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia, kelangkaan tersebut meliputi pasokan BBM, gas, batubara dan energi listrik [1]. Salah satu cara untuk mengatasi masalah kelangkaan energi adalah mengembangkan sumber energi alternatif. Energi alternatif yang bisa menanggulangi kelangkaan bahan bakar minyak adalah biodiesel, dimana biodiesel dapat dibuat menggunakan senyawa

turunan dari minyak kelapa sawit. Pada penelitian kali ini akan dibuat biodiesel yang berasal dari produk samping dari industri minyak goreng kelapa sawit yaitu PFAD. Pembuatan biodiesel dari PFAD ini juga membutuhkan sebuah katalis untuk mempercepat laju reaksi dari proses pembuatan biodiesel. Katalis yang digunakan adalah katalis yang berasal dari limbah tulang ikan yang sebelumnya telah dikalsinasi pada temperatur 900°C selama 2 jam. Penggunaan katalis dari tulang ikan ini memiliki beberapa keunggulan yaitu kandungan *Kalsium Oksida* (CaO) yang relatif tinggi dan kelarutan yang rendah dalam methanol sehingga relatif mudah dalam proses pemisahan dengan produk akhir yaitu biodiesel. Selain itu penggunaan tulang ikan juga lebih ramah lingkungan karena tidak menimbulkan limbah yang berbahaya setelah proses pemisahan antara biodiesel dan produk samping berupa metanol, gliserol, dan sisa katalis.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya antara lain *Transesterification of palm oil to biodiesel by using waste obtuse horn shell-derived CaO catalyst* [4]. *Esterification of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) to biodiesel using Bifunctional catalyst synthesized from waste an gelwing shell (Cyrtopleura costata)* [7]. Berdasarkan penjelasan penelitian sebelumnya, akan dilakukan penelitian Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan sebagai katalis pada proses Transesterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* menjadi biodiesel. Bahan baku ini sebelumnya sudah pernah digunakan dengan metode yang sama meskipun dengan bantuan katalis yang berbeda. Selain itu, proses transesterifikasi memiliki beberapa faktor untuk mendapatkan *yield* yang diinginkan seperti waktu reaksi, suhu, penambahan katalis, dan rasio molar. Oleh karena itu, penelitian Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan sebagai katalis pada proses Transesterifikasi *Palm Fatty Acid Distillate* menjadi biodiesel ini layak untuk dilakukan.

## **Tinjauan Pustaka**

### **Biodiesel**

Biodiesel secara umum adalah bahan bakar mesin diesel yang terbuat dari bahan terbarukan atau secara khusus merupakan bahan bakar mesin diesel yang terdiri dari metil ester. Biodiesel dapat dibuat dari minyak nabati dan minyak hewani. Biodiesel yang sering kita temukan umumnya berasal dari minyak nabati. Minyak nabati yang paling banyak digunakan adalah minyak sawit, minyak kelapa, dan minyak jarak pagar sedangkan biodiesel yang terbuat dari minyak hewani umumnya berasal dari lemak sapi, lemak ayam, dan lemak ikan [2]. Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar yang ramah lingkungan karena memiliki emisi yang rendah sehingga berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif menggantikan bahan bakar solar [3].

### ***Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)***

PFAD atau asam lemak bebas pada sawit adalah produk samping pada proses *refinery* industri minyak goreng kelapa sawit. PFAD dihasilkan dari tahap deodorasi dalam pemurnian minyak sawit. PFAD mempunyai kandungan asam lemak bebas yang sangat tinggi yaitu antara 80% sampai 95%. PFAD mempunyai sifat fisik yaitu : berwarna coklat, mempunyai bau yang khas, dan berbentuk padat pada suhu ruang [4]. PFAD secara umum mengandung *fatty acid* yang tinggi bersama dengan beberapa bahan unsaponifiable, trigliserida netral, gliserida parsial dan zat dengan berat molekul tinggi lainnya. Komponen utama PFAD adalah asam lemak bebas (FFA) dengan asam palmitat dan asam oleat sebagai komponen dengan kandungan terbesar serta terdiri dari gliserida, squalene, sterol, vitamin E dan substansi lainnya.

### **Reaksi Pembuatan Biodiesel**

Reaksi pembuatan biodiesel dengan bahan baku PFAD diantaranya meliputi reaksi esterifikasi dan reaksi transesterifikasi. Reaksi esterifikasi adalah reaksi antara alkohol dengan asam lemak dan menghasilkan ester. Tahap esterifikasi biasanya diikuti oleh tahap transesterifikasi. Sebelum dilakukan reaksi tersebut terlebih dahulu harus dilakukan analisa FFA

agar diketahui berapa persentase FFA yang terkandung dalam PFAD. Reaksi Transesterifikasi adalah reaksi antara alkohol dengan trigliserida membentuk ester. Dalam reaksi transesterifikasi suatu ester di konversi menjadi ester lain dengan pertukaran antara gugus alkoholik atau gugus asam.

### Katalis

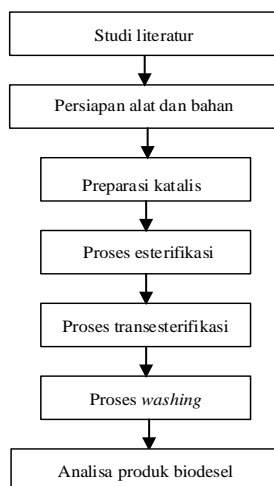
Katalis merupakan suatu zat yang dapat mempercepat laju reaksi dengan cara menurunkan energi aktivasi. Katalis dapat menurunkan energi aktivasi dengan cara membuat lintasan lain untuk menghindari tahapan reaksi yang paling lambat. Energi aktivasi sangat berhubungan dengan harga konstanta kecepatan reaksi. Semakin rendah harga energi aktivasi, maka semakin tinggi harga konstanta kecepatan reaksi [5].

### Limbah tulang ikan

Tulang ikan adalah bagian dari tubuh ikan yang biasanya tidak digemari oleh masyarakat karena strukturnya yang relatif kuat sehingga susah untuk dicerna oleh sistem pencernaan. Limbah tulang ikan biasanya dibuang begitu saja oleh masyarakat karena dianggap tidak berguna. Tulang ikan merupakan jenis limbah organik jika tidak ada yang memanfaatkan, tetapi jika ada yang memanfaatkan limbah tersebut dapat menghasilkan produk yang mempunyai nilai tambah. Pada ikan yang diolah menjadi produk, akan menghasilkan hasil samping berupa kepala ikan 30%, sisik ikan 10%, dan tulang ikan sebanyak 10% [6].

## METODE

### Pelaksanaan Penelitian



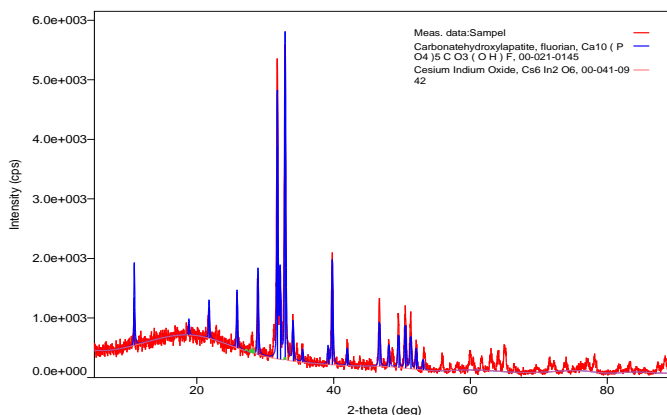
Gambar 1. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Gambar 1 menunjukkan alur pelaksanaan penelitian. Tulang ikan tongkol terlebih dahulu dicuci dengan air hingga bersih dan tidak ada sisa daging yang menempel. Setelah bersih kemudian tulang ikan di keringkan dalam oven dengan temperatur 105°C untuk menghilangkan kadar airnya. Kemudian tulang ikan dihancurkan hingga membentuk serbuk dengan menggunakan alat mortar dan alu. Tulang ikan tongkol yang telah menjadi serbuk di kalsinasi pada temperatur 900°C dan dilakukan analisa XRD untuk mengetahui karakter dari katalis tulang ikan. Selanjutnya adalah menyusun rangkaian alat yang digunakan pada reaksi esterifikasi dan transesterifikasi. Untuk reaksi esterifikasi, sebelumnya dilakukan pemanasan terhadap PFAD, setelah itu ditimbang sebanyak 100 gram dan direaksikan dengan metanol yang telah dicampurkan dengan katalis asam

sulfat sesuai dengan variabel rasio molar yang diinginkan. Reaksi esterifikasi dilakukan pada temperatur 65°C selama 2 jam disertai pengadukan dengan kecepatan 350 Rpm, kemudian dilakukan pemisahan antara hasil ester dan metanol sisa yang tidak bereaksi. Proses pemisahan dilakukan dengan corong pemisah dan di endapkan selama 24 jam. Ester dari reaksi esterifikasi kemudian dilakukan proses transesterifikasi dengan penambahan metanol dan juga katalis tulang ikan sesuai dengan variabel yang di inginkan. Tahapan reaksi transesterifikasi sama dengan reaksi esterifikasi, dimana produk akhir di dapatkan produk biodiesel dan dilakukan analisa pada produk biodiesel meliputi analisa GC-MS, FFA, % konversi, % *yield*, dan titik kabut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Uji karakterisasi katalis limbah tulang ikan

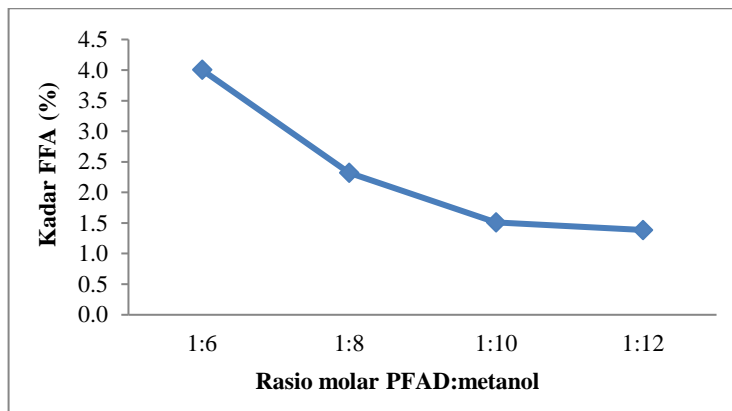


Gambar 2. Spektrum XRD pada suhu 900°C

Hasil karakterisasi XRD katalis tulang ikan dapat dilihat pada **Gambar 2**. Karakterisasi XRD dilakukan dengan menggunakan alat RIGAKU yaitu dengan meletakkan sampel 0,2 gram pada aluminium yang berdiameter 2 cm, kemudian sampel di karakterisasi dengan alat XRD dengan sudut difraksi sebesar 5° sampai 90°. Puncak tertinggi muncul pada sudut 2-theta yaitu 32,879° dan sudut lain terbentuk pada 31,736°. Pada data dari **Gambar 2** terbentuk 2 senyawa yaitu senyawa Ca 10 dan Cs<sub>6</sub>In<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Data difaktogram menunjukkan bahwa senyawa yang paling tinggi intensitasnya adalah Ca 10 dimana tinggi intensitasnya adalah 5862 cps dan 5824 cps. tinggi intensitas Ca 10 ini menyatakan bahwa kristalinitas semakin tinggi dan berpeluang untuk dijadikan katalis, karena memiliki kadar kalsium yang lumayan tinggi, dimana tingginya kadar senyawa kimia Ca 10 pada limbah tulang ikan ini mengindikasikan bahwa limbah tulang ikan berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku pembuatan katalis heterogen yang bersifat basa dan ramah lingkungan, juga mudah untuk dipisahkan karena bersifat heterogen.

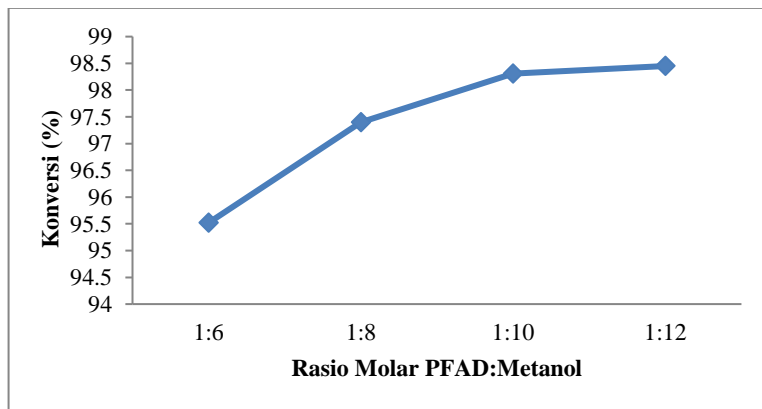
### Analisa Kadar FFA (*Free Fatty Acid*)

Pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa nilai kadar FFA pada proses esterifikasi PFAD menjadi biodiesel akan semakin menurun sesuai dengan jumlah metanol yang ditambahkan selama reaksi. Dalam penelitian ini pada rasio molar terendah PFAD : Metanol yaitu pada rasio molar 1:6 didapatkan hasil nilai kadar FFA menurun menjadi 4,003%. Selanjutnya pada percobaan dengan perbandingan rasio molar tertinggi yaitu pada rasio molar 1:12, hasil kandungan FFA pada ester sebesar 1,386%.



Gambar 3. Hubungan Rasio Molar terhadap Kadar FFA.

### Pengaruh rasio molar PFAD dan metanol terhadap % konversi yang dihasilkan pada proses esterifikasi



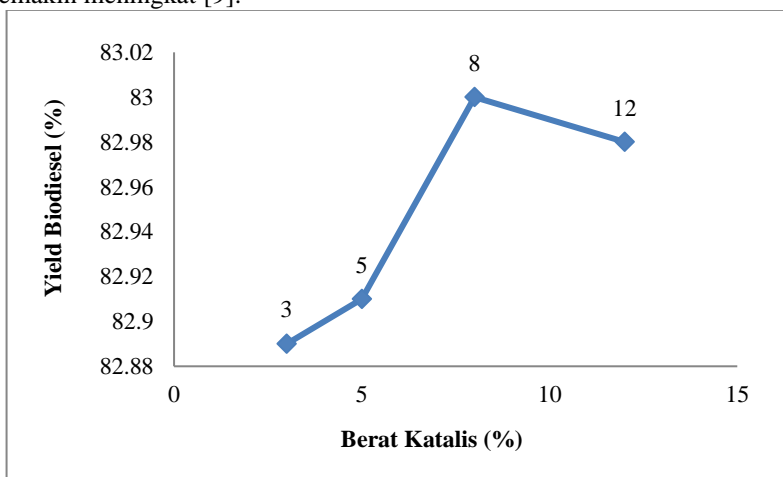
Gambar 4. Hubungan Rasio Molar terhadap Konversi PFAD.

Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa semakin tinggi rasio molar PFAD : Metanol maka didapatkan hasil konversi yang tinggi juga. Hal itu sesuai dengan konsep reaksi esterifikasi yang merupakan reaksi reversibel atau bolak-balik dimana untuk mendapatkan hasil produk ester yang tinggi maka reaksi kesetimbangan harus digeser ke arah kiri, cara menggeser kesetimbangan dapat dilakukan dengan menambahkan pelarut metanol secara berlebih pada reaksi esterifikasi. Esterifikasi PFAD, katalis  $\text{SO}_4$  CAWS-7 menghasilkan konversi tertinggi sebesar 98% dalam kondisi reaksi yang optimal yaitu, perbandingan molar 15:1 metanol terhadap PFAD, penambahan katalis sebanyak 5% berat PFAD, waktu reaksi 3 jam, dan suhu reaksi  $80^\circ\text{C}$  [8]. Sama dengan penelitian yang telah dilakukan dimana hasil konversi reaksi esterifikasi terbaik didapatkan dari perbandingan rasio molar PFAD:metanol sebesar 1:12, berat katalis asam sulfat 1,5% dari berat PFAD, waktu operasi 2 jam, dan temperatur reaksi  $65^\circ\text{C}$ , yaitu sebesar 98,45%.

### Pengaruh % berat katalis terhadap yield biodiesel yang dihasilkan pada proses transesterifikasi

Dari Gambar 5 didapatkan hasil *yield* biodiesel tertinggi pada penambahan berat katalis tulang ikan sebanyak 8% dari bobot minyak. Pada penambahan katalis dengan berat 12% dari berat minyak menyebabkan penurunan terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Hasil *yield* produk

reaksi transesterifikasi terbaik didapatkan dari perbandingan rasio molar PFAD:metanol sebesar 1:12, berat katalis limbah tulang ikan sebanyak 8% dari berat PFAD, waktu operasi 2 jam, dan temperatur reaksi 65°C, yaitu sebesar 83,0%. Kondisi terbaik proses transesterifikasi diperoleh dengan jumlah katalis limbah kulit kerang yang dikalsinasi pada suhu 650° C dan ditambahkan sebanyak 6% dari berat minyak, waktu reaksi 120 menit, rasio mol alkohol dan minyak adalah 12:1 dan suhu reaksi 65° didapatkan *yield* sebesar 79,61% [7]. Pada penambahan jumlah katalis memberikan peningkatan pembentukan trigliserida menjadi biodiesel. Akan tetapi penambahan katalis berlebih menyebabkan *yield* yang dihasilkan biodiesel semakin menurun, hal ini dikarenakan penambahan katalis yang terlalu banyak menyebabkan reaksi cenderung kembali seperti semula [8]. Penurunan *yield* biodiesel pada penggunaan katalis 12% dari bobot minyak disebabkan oleh kesetimbangan reaksi yang sudah tercapai sehingga tidak terjadi lagi penambahan jumlah *yield* biodiesel. Semakin tinggi penambahan persen katalis yang digunakan, *yield* biodiesel juga akan semakin meningkat [9].



Gambar 5. Hubungan % Katalis terhadap % Yield Biodiesel.

Dari Tabel 1 dapat diketahui beberapa senyawa asam pada *Palm fatty Acid Distillation*. Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kandungan asam dalam *Palm fatty Acid Distillation* tertinggi terdapat pada senyawa *Hexadecanoic Acid* dengan % area 63,14 % pada waktu retensi 25,887 menit. *Hexadecanoic acid* ini memiliki rumus molekul  $C_{16}H_{32}O_2$  dimana senyawa ini merupakan komponen terbesar dalam struktur asam palmitat. Kandungan asam terendah pada *Palm fatty Acid Distillation* yaitu *Carbonic Acid* dengan kandungan 1,63% area. Berdasarkan jumlah atom karbon, senyawa asam dari PFAD yang termasuk kedalam golongan asam dengan rantai C15-C18 antara lain adalah asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearad, asam oleat, dan asam linoleat.

### Hasil Analisa GC-MS pada senyawa PFAD

Tabel 1. Hasil analisa GC-MS pada PFAD

No	Qual	Cas	RT	Norm area (%)	Senyawa
1	96	1000190-13-7	28.309	28,32%	<i>Octadecanoic acid</i>
2	96	000057-10-3	25.887	63,14%	<i>Hexadecanoic Acid</i>
3	55	000000-00-0	29.161	1,63%	<i>Carbonic Acid</i>
4	97	002433-97-8	30.000	3,61%	<i>Tricosanoic Acid</i>
5	99	002442-49-1	32.291	3,30%	<i>Tetracosanoic Acid</i>
Total				100,00%	

## Hasil Analisa GC-MS pada Biodiesel dengan *yield* Tertinggi

Tabel 2. Hasil analisa GC-MS pada Biodiesel dengan *yield* tertinggi

No	Qual	Cas	RT	Norm area (%)	Senyawa
1	91	000111-11-5	4.442	0,05%	Octanoic Acid methyl ester
2	94	000111-82-0	9.718	0,20%	Dodecanoic Acid methyl ester
3	95	000124-10-7	13.670	2,02%	Methyl tetradecanoate
4	99	005129-60-2	23.072	48,72%	Pentadecanoic Acid methyl ester
5	99	056875-67-3	20.697	0,98%	Hexadecanoic Acid methyl ester
6	97	001731-92-6	26.185	1,50%	Heptadecanoic Acid methyl ester
7	99	000112-62-9	27.527	33,30%	Octadecanoic Acid methyl ester
8	99	001120-28-1	29.604	4,39%	Eicosenoic Acid methyl ester
9	92	023470-00-0	31.838	2,25%	Hexadecanoic Acid ethyl ester
10	99	000929-77-1	32.087	1,83%	Docosanoic Acid methyl ester
11	92	002433-97-8	33.749	3,16%	Tricosanoic Acid methyl ester
12	99	002442-49-1	35.861	1,60%	Tetracosanoic Acid methyl ester
Total				100,00%	

Dari Tabel 2 dapat diketahui komposisi FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) pada biodiesel menggunakan metode analisa GC-MS. Kandungan senyawa FAME tertinggi dari biodiesel terdapat pada senyawa *pentadecanoic acid methyl ester* dengan % area sebesar 48,72 % dan waktu retensi 23,072 menit. Kandungan FAME terendah pada biodiesel yaitu *dodecanoic acid methyl ester* dengan komposisi area sebesar 0,02%. Berdasarkan jumlah atom karbon, FAME dari PFAD yang termasuk kedalam golongan biodiesel dengan rantai C15-C18 antara lain adalah metil isotetradekanoat, metil palmitoleat, metil palmitat. Hasil penelitian yang telah dilakukan ini dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan [10]. Hasil FAME tertinggi pada biodiesel dari PFAD adalah methyl palmitate dengan 49,79%, methyl palmitoleate sebesar 35,80%, methyl oleat 14,01% dan methyl myristate sebesar 4,33%. Berdasarkan data tersebut, hasil penelitian yang telah dilakukan memiliki kemiripan hasil komposisi yang terkandung pada biodiesel dari *palm fatty acid distillation*.

## KESIMPULAN

Pada penelitian ini di dapatkan Karakter yang terdapat dalam katalis limbah tulang ikan dimana hasil analisa XRD menunjukkan bentuk kristal senyawa Ca 10 dan Cs<sub>6</sub>In<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, dimana senyawa yang paling tinggi intensitasnya adalah Ca 10 dengan tinggi intensitas sebesar 5862 cps dan 5824 cps. Semakin besar rasio molar PFAD terhadap metanol, maka % konversi PFAD semakin besar. % konversi tertinggi pada penelitian ini diperoleh pada rasio molar PFAD:metanol 1:12 dan didapatkan konversi sebesar 98,45%. Dari penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan bahwa Semakin banyak jumlah katalis yang ditambahkan juga mempengaruhi % *yield* produk yang dihasilkan, dimana pada penelitian ini dihasilkan % *yield* tertinggi sebesar 83% dengan penambahan katalis sebanyak 8% dari berat PFAD.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Laila, "Kaji Eksperimen Angka Asam Dan Viskositas Biodiesel Berbahan Baku Minyak Kelapa Sawit Dari Pt Smart Tbk," *J. Teknol. Proses dan Inov. Ind.*, vol. 2, no. 1, hal. 3–6, 2017, doi: 10.36048/jtpii.v2i1.2245.
- [2] A. H. Ernes, "Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa melalui Reaksi Metanolisis Menggunakan Katalis CaCO<sub>3</sub> yang dipijarkan," vol. 13, no. 65, hal. 27–32, 2019.

- 
- [3] Kusmiyati, "Transesterifikasi Crude Palm Oil ( Cpo ) Menggunakan Katalis Heterogen Cao Dari Cangkang Kerang Darah ( Anadara Granosa ) Kalsinasi 900 O C," vol. 5, no. November, hal. 23–29, 2015.
- [4] Siregar, "Transesterification of palm oil to biodiesel by using waste obtuse horn shell-derived CaO catalyst," *Energy Convers. Manag.*, vol. 93, hal. 282–288, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.067.
- [5] A. Poerwadi *et al.*, "Penggunaan Katalis CaO dari Ca ( NO 3 ) 2 dengan support Serbuk Besi pada Pembuatan Biodiesel dari Minyak Sawit Off-Grade," no. 3, hal. 1–8, 2019.
- [6] Mutmainnah, "Aktivitas Katalitik Kalsium Oksida (CaO) Tulang Ikan Terhadap Reaksi Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas," *J. Tek. Kim.*, hal. 15–20, 2017.
- [7] Jefry., U. Rofiqah, R. A. Djalal, B. Sutrisno, dan A. Hidayat, "Kinetic Study on the Esterification of *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) Using Heterogeneous Catalyst," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 358, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/358/1/012069.
- [8] Abdullah, S. O. Ceria Sitompul, R. Mohadi, dan N. Hidayati, "Characterization and Utilization of Calcium Oxide (CaO) Thermally Decomposed from Fish Bones as a Catalyst in the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil," *Makara J. Technol.*, vol. 20, no. 3, hal. 121, 2017, doi: 10.7454/mst.v20i3.3066.
- [9] Syamsudin. *dkk.*, "Catalytic Activity Of Calcium Oxide From Fishbone Waste In Waste Cooking Oil Transesterification Process," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 6, no. 2, hal. 97–106, 2017, doi: 10.15294/jbat.v6i2.8335.
- [10] Yulistiono. *dkk.*, "Esterification of *Palm Fatty Acid Distillate* for biodiesel production catalyzed by synthesized kenaf seed cake-based sulfonated catalyst," *Catalysts*, vol. 9, no. 5, 2019, doi: 10.3390/catal9050482.