

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KATALIS KARBON DAUN
ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*) TERSULFONASI
UNTUK PRODUKSI BODIESEL DARI *PALM FATTY ACID*
DESTILATE (PFAD)**



SELVI APRILIANA PUTRI
NIM/TM.18036096/2018

PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2022

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KATALIS KARBON DAUN
ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*) TERSULFONASI
UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID
DESTILATE* (PFAD)**

SKRIPSI

*Diajukan kepada Tim Penguji Skripsi Jurusan Kimia sebagai Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)*



SELVI APRILIANA PUTRI
NIM/TM.18036096/2018

PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2022

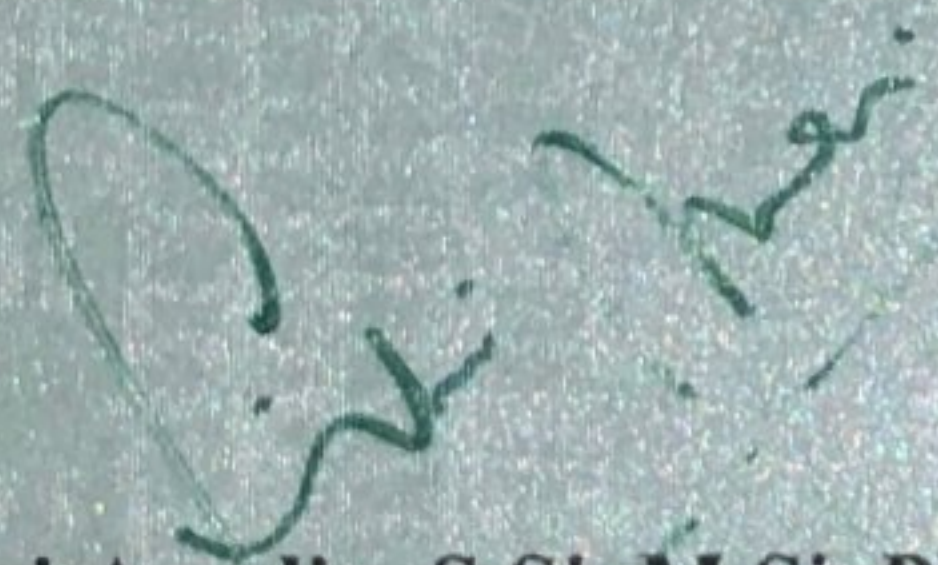
PERSETUJUAN SKRIPSI

SINTESIS DAN KARAKTERISASI KATALIS KARBON DAUN ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*) TERSULFONASI UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID DESTILATE* (PFAD)

Nama : Selvi Apriliana Putri
NIM : 18036096
Program Studi : Kimia (NK)
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

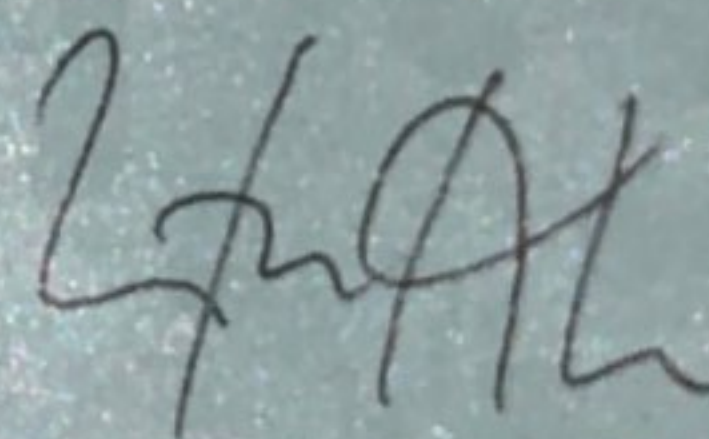
Padang, Maret 2022

Mengetahui:
Ketua Jurusan



Fitri Amelia, S.Si, M.Si, Ph.D
NIP. 19800819 200912 2 002

Disetujui oleh:
Dosen Pembimbing



Umar Kalmar Nizar, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 19770311 200312 1 003

PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI

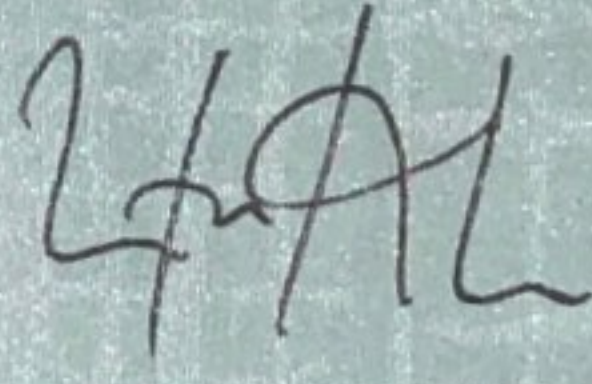
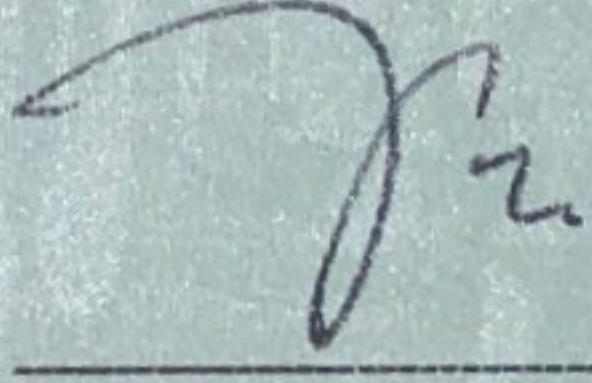
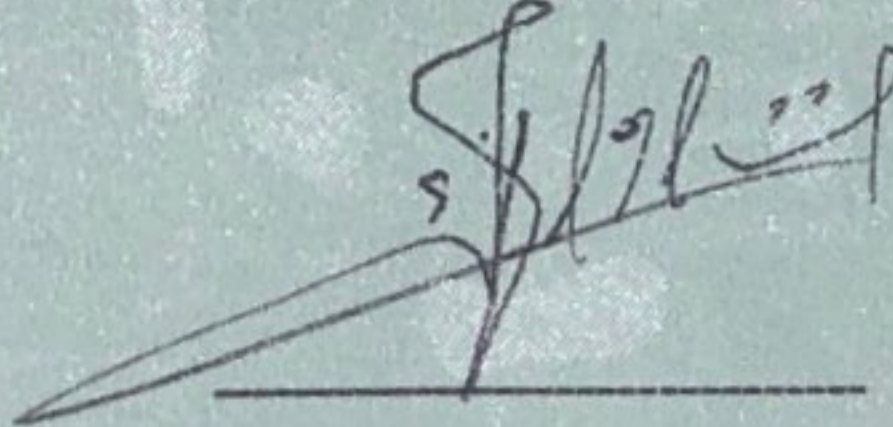
Nama : Selvi Apriliana Putri
NIM : 18036096
Program Studi : Kimia (NK)
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

SINTESIS DAN KARAKTERISASI KATALIS KARBON DAUN ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*) TERSULFONASI UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID DESTILATE* (PFAD)

Dinyatakan Lulus Setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Program Studi Kimia Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, Maret 2022

Tim Penguji

	Nama	Tanda tangan
Ketua	: Umar Kalmar Nizar, S.Si., M.Si., Ph.D	
Anggota	: Budhi Oktavia, M.Si, Ph.D	
Anggota	: Dra. Syamsi Aini, M.Si., Ph. D	

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

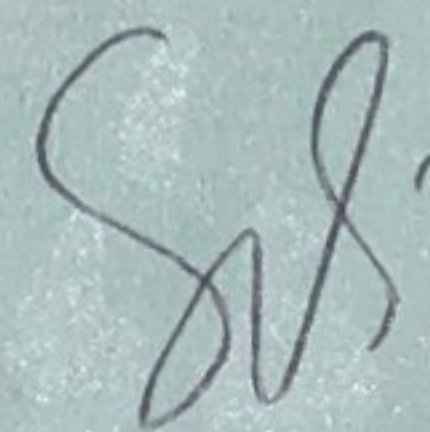
Nama : Selvi Apriliana Putri
NIM : 18036096
Tempat/Tanggal lahir : Padang panjang/ 9 April 2000
Program Studi : Kimia
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : Sintesis Dan Karakterisasi Katalis Karbon Daun Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Tersulfonasi Untuk Produksi Biodiesel Dari *Palm Fatty Acid Destilate* (PFAD)

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Karya tulis/skripsi ini adalah hasil karya saya dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik (sarjana) baik di UNP maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis/skripsi ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan tim pembimbing.
3. Pada karya tulis/skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan pada kepustakaan.
4. Karya tulis/skripsi ini sah apabila telah ditandatangani **Asli** oleh tim pembimbing dan tim penguji.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran di dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima **Sanksi Akademik** berupa pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh karena karya tulis/skripsi ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi

Padang, Maret 2022
Yang menyatakan



Selvi Apriliana Putri
NIM : 18036096

**Sintesis Dan Karakterisasi Katalis Karbon Daun Eceng Gondok
(*Eichhornia Crassipes*) Tersulfonasi Untuk Produksi Biodiesel Dari *Palm Fatty Acid Destilate* (PFAD)**

Selvi Apriliana Putri

ABSTRAK

Penelitian ini membahas terkait aktivitas katalitik dari dua seri katalis karbon daun eceng gondok tersulfonasi yang disintesis dengan variasi suhu kalsinasi dan waktu sulfonasi untuk diaplikasikan pada produksi biodiesel dari *Palm Fatty Acid Distilate*. Metoda yang digunakan dalam sintesis katalis yaitu kalsinasi dan sulfonasi. Untuk katalis seri pertama, sintesis karbon dilakukan dengan variasi suhu kalsinasi, kemudian dilanjutkan dengan proses sulfonasi menggunakan H_2SO_4 . Untuk katalis seri kedua sintesis karbon dilakukan dengan suhu kalsinasi dari kondisi optimum katalis pertama, kemudian dilanjutkan dengan proses sulfonasi menggunakan H_2SO_4 dengan variasi waktu sulfonasi. Analisa stabilitas termal dari daun eceng gondok digunakan instrumen TGA. Katalis yang diperoleh dikarakterisasi dengan instrumen XRD dan FTIR serta diuji situs asamnya. Selanjutnya, katalis diaplikasikan pada proses produksi biodiesel dengan metode reaksi esterifikasi. Untuk mengetahui aktivitas katalitik dari katalis, biodiesel yang dihasilkan dikarakterisasi dengan FTIR serta diuji sifat fisikokimia seperti, uji densitas, bilangan asam dan laju alir. Berdasarkan analisa FTIR pada katalis muncul puncak kembar pada bilangan gelombang 1400-1000 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan SO_2 dari gugus sulfonat. Pada spektrum FTIR biodiesel terdapat pita serapan utama pada bilangan gelombang 1300-1000 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan ikatan C-O-C atau O-CH₃ dari ester. Hasil karakterisasi mengidentifikasi bahwa aktivitas katalitik tertinggi ditunjukkan oleh KDEG-350S-4h yang memiliki situs asam tertinggi dan telah berhasil mengkonversi asam lemak bebas yang terdapat pada PFAD menjadi biodiesel.

Kata Kunci: Aktivitas katalitik, suhu kalsinasi, waktu sulfonasi, katalis karbon tersulfonasi, esterifikasi, PFAD

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberi kekuatan dan kesabaran kepada penulis dalam menyelesaikan Skripsi yang berjudul ***"SINTESIS DAN KARAKTERISASI KATALIS KARBON DAUN ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*) TERSULFONASI UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI PALM FATTY ACID DESTILATE (PFAD)"***. Shalawat beserta salam untuk nabi tauladan kita, Muhammad SAW yang telah memberikan tauladan dalam setiap aktivitas yang kita lalui.

Proposal ini diajukan untuk melengkapi dan memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Penulisan proposal ini tidak terlepas dari bantuan, petunjuk, arahan, dan masukan yang sangat berharga dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Umar Kalmar Nizar, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
2. Ibu Syamsi Aini, M.Si, Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembahas.
3. Bapak Budhi Oktavia, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai Dosen Pembahas dan ketua Program Studi Jurusan Kimia FMIPA UNP.
4. Ibu Fitri Amelia, S.Si, M.Si Ph.D sebagai ketua Jurusan Kimia dan Bapak Edi Nasra, S.Si, M.Si sebagai sekretaris urusan Kimia FMIPA UNP
5. Bapak dan Ibu staf pengajar serta seluruh staf akademik dan non akademik di Jurusan Kimia FMIPA UNP.

6. Orang tua penulis yang telah memberikan semangat serta dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Teman-teman kimia angkatan 2018 yang telah membantu dalam pembuatan proposal penelitian ini.
8. Semua pihak terkait yang telah ikut berkontribusi dalam proposal penelitian ini

Semoga rahmat dan kasih sayang Allah SWT selalu tercurah pada kita semua serta usaha dan kerja kita bernilai ibadah di hadapan Allah SWT, Amin Ya Rabbal 'Alamin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dari pembaca agar skripsi ini bermanfaat dikemudian harinya

Padang, Maret 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Batasan Masalah	5
D. Rumusan Masalah	5
E. Tujuan Penelitian	6
F. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Biodiesel dari PFAD	7
B. Katalis Karbon Tersulfonasi	10
C. Karbon Daun Eceng Gondok.....	14
D. Karakterisasi Katalis	15
E. Analisis Sifat Biodiesel	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	24
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
B. Variabel Penelitian.....	24
C. Alat dan Bahan.....	25
D. Prosedur Kerja	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
A. Katalis Karbon Daun Eceng Gondok Tersulfonasi Hasil Variasi Suhu Kalsinasi.....	32

B. Katalis Karbon Daun Eceng Gondok Tersulfonasi Hasil Variasi Waktu Sulfonasi	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik Umum dari PFAD	9
2. Perbandingan aplikasi PFAD menjadi biodiesel dengan metode dan katalis yang berbeda	9
3. pemanfaatan berbagai katalis tersuflonasi dalam reaksi esterifikasi.....	13
4. Kandungan dari eceng gondok pada bagian-bagian yang berbeda	15
5. Persyaratan Standard dan Mutu Biodiesel SNI dan ASM.....	20
6. Perbedaan densitas dari berbagai sumber minyak	21
7. Perbedaan viskositas dari berbagai sumber minyak.....	22
8. Kode sampel yang digunakan	26
9. Kode Sampel Biodiesel yang Dihasilkan	28

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Proses 2 tahap produksi biodiesel	8
2. Reaksi esterfikasi FFA dengan alkohol (Lokman et al., 2015).....	8
3. Mekanisme reaksi esterifikasi ((Hassan et al., 2017).....	8
4. Reaksi karbonisasi dan sulfonasi (Wanchai & Soyjit, 2016).....	12
5. Spektrum FTIR dari HTC dan Katalis HTC-S	16
6. Pola XRD dari katalis asam padat yang diturunkan dari karbon; (a) PKS (cangkang inti sawit), (b) Bambu (c) PKS-SO ₃ H, (d) Bambu-SO ₃ H.....	18
7. kurva TGA cangkang kerang	19
8. Spektra TGA Sampel Daun Eceng Gondok	32
9. Spektra DTA Sampel Daun Eceng Gondok	33
10. FTIR Karbon DEG 250°C, 300°C, dan 350°C.....	36
11. FTIR Katalis DEG 250°C, 300°C dan 350°C.....	38
12. XRD Karbon DEG 350C dan Katalis DEG 350C.....	40
13. Uji Situs Asam dari Karbon Eceng Gondok Sebelum dan Sesudah Sulfonasi.....	42
14. Spektrum FTIR PFAD vs Biodiesel.....	45
15. Densitas dari PFAD dan Biodiesel yang dihasilkan.....	46
16. Laju Alir dari PFAD dan Biodiesel yang dihasilkan.....	47
17. Bilangan asam dari PFAD dan Biodiesel yang dihasilkan	49
18. % Konversi dari Biodiesel yang dihasilkan	50
19. Spektrum FTIR Katalis daun eceng gondok tersulfonasi variasi waktu sulfonasi	52
20. Uji Situs Asam Katalis karbon tersulfonasi variasi waktu sulfonasi.....	54
21. FTIR PFAD vs Biodiesel varisi waktu sulfonasi katalis	55
22. Uji densitas biodiesel variasi waktu sulfonasi katalis	57
23. Uji laju Alir biodiesel variasi waktu sulfonasi katalis.....	58
24. (a) Uji bilangan asam biodiesel, (b)%konversi biodiesel	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Diagram Alir Penelitian.....	67
2. Perhitungan	74
3. Data Penelitian	82
4. Dokumentasi	91

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Biodisel merupakan alternatif sumber energi terbarukan yang dikembangkan Pemerintah Indonesia guna menekan defisit neraca perdagangan migas karena ketersediaan bahan bakunya yang melimpah di Indonesia. Program ini sukses menekan defisit perdagangan migas dari USD 953,6 juta pada tahun 2018 menjadi USD 454,8 juta pada tahun 2019, melalui penerapan B20. Kesuksesan B20 (20% biodiesel, 80% BBM) dilanjutkan dengan program B30 yang dimulai Januari 2020. Meski berlangsung dengan kondisi terbatas di masa pandemik Covid-19, uji coba program B30 tetap berjalan dengan hasil yang memuaskan. Keberhasilan program B30 akan dilanjutkan pemerintah Indonesia dengan B40 pada Juni 2021 (Halimatussadiyah et al., 2020). Meningkatnya penggunaan biodiesel akan turut meningkatkan jumlah produksi biodiesel sebagai sumber energy yang ramah lingkungan. Hal ini turut mendorong berkembangnya penelitian tentang produksi biodiesel yang difokuskan pada feedstock dan katalis yang digunakan (da Luz Corrêa et al., 2020).

Penggunaan katalis produksi biodiesel tergantung dengan *feedstock* atau bahan baku yang akan digunakan. Bahan baku biodiesel dan katalis yang digunakan di Indonesia dapat diperoleh dengan memanfaatkan limbah organik dari bahan alam. Salah satu katalis yang berpotensi dikembangkan dari limbah organik bahan alam adalah katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi.

Katalis karbon tersulfonasi adalah katalis yang disintesis dari proses kalsinasi dan dilanjutkan dengan proses sulfonasi. Katalis ini dianggap sebagai katalis ideal banyak reaksi karena stabilitas termal dan sifat mekanisnya. katalis ini

dapat disintesis dari limbah organik yang mengandung sukrosa, pati, selulosa dan lignin (Lokman et al., 2016). Sumber karbon untuk sintesis katalis karbon tersulfonasi yang pernah dilaporkan antara lain batang jagung (Liu et al., 2013), bambu (Ning & Niu, 2017), kulit kakao (Bureros et al., 2019), limbah teh (Farabi et al., 2019) dan kulit inti murumuru (da Luz Corrêa et al., 2020) melalui proses karbonisasi dengan aliran gas nitrogen.

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan tumbuhan air dengan kecepatan tumbuh yang tinggi sehingga sering dianggap sebagai tumbuhan pengganggu (gulma) . Saat ini, tanaman eceng gondok menjadi masalah bagi masyarakat Danau Maninjau Sumatera Barat karena menutupi sebagian danau yang biasa digunakan keramba ikan. Hal ini merugikan petani ikan dan pelaku pariwisata karena bau busuk yang disebabkan eceng gondok (Zulfia & Aisyah, 2013). Daun eceng gondok mengandung hemiselulosa $29,75 \pm 0,15\%$, selulosa $15,42 \pm 0,08\%$ dan lignin $9.79 \pm 0,06\%$, (Zhang et al., 2016) sehingga berpotensi untuk dikembangkan menjadi salah satu sumber karbon untuk sintesis katalis karbon tersulfonasi. (Laohapornchaiphan et al., 2017) dalam penelitiannya telah melaporkan penggunaan daun eceng gondok sebagai (adsorben) katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi dalam esterifikasi asam oleat dengan methanol dengan suhu reaksi 65°C selama 7 jam. Namun, belum ada penelitian yang mengkaji pemanfaatan katalis karbon eceng gondok tersulfonasi secara spesifik pada produksi biodiesel dari limbah *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD).

Palm Fatty Acid Distillate atau disebut juga PFAD merupakan produk sampingan yang tidak dapat dikonsumsi hasil dari proses *biorefinery* atau

pemurnian minyak sawit. PFAD memiliki harga yang murah dan banyak tersedia diberbagai industri kelapa sawit, memiliki potensi yang sangat besar digunakan sebagai bahan baku dalam biodiesel. Terutama, komposisi kimiawi PFAD adalah sekitar 85% berat asam lemak bebas (FFA), <10% trigliserida dan sejumlah kecil sterol, vitamin E dan squalene (Akinfalabi et al., 2020). Berdasarkan komposisinya PFAD berpotensi sebagai bahan baku produksi biodiesel melalui metoda esterifikasi dan PFAD diharapkan dapat dijadikan sebagai alternative menyiapkan *feedstock* biodiesel dimasa yang akan datang.

Berdasarkan permasalahan diatas penelitian ini dilakukan untuk mendukung program pemerintah dalam kebijakan mandatori BBM dan berkontribusi dalam pelaksanaan *Sustainable Development Goals* dalam program *Affordable and Clean Energy*, dengan mensintesis katalis karbon terulfonasi pada produksi biodiesel. Sumber karbon diperoleh dari hasil kalsinasi eceng gondok dan *feedstock* biodiesel dari PFAD. Suhu kalsinasi diperoleh berdasarkan daerah dekomposisi kandungan organik daun eceng gondok dari hasil analisis TGA. Katalis yang disintesis akan dikarakterisasi dengan FTIR, XRD dan situs asam serta akan di aplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD. Biodiesel yang terbentuk akan dilakukan uji densitas, viskositas, bilangan asam, dan dihitung persen konversi.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Permintaan energy global yang meningkat seiring laju pertumbuhan ekonomi mengakibatkan penyediaan energy fosil menipis, hal ini menimbulkan upaya untuk mencari sumber energy alternative yang terbarukan.
2. Salah satu sumber energi alternative yang sesuai dikembangkan di Indonesia adalah biodiesel karna bahan bakunya yang melimpah di Indonesia baik yang berasal dari minyak siap pakai maupun limbah industry kelapa sawit.
3. PFAD merupakan limbah organic bahan alam dari industry kelapa sawit yang memiliki kandungan FFA tinggi, sehingga memiliki potensi untuk dijadikan bahan baku untuk produksi biodiesel.
4. Konversi *Free Fatty Acid* (FFA) menjadi *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) atau biodiesel membutuhkan katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi yang dapat disintesis dari limbah organic yang mengandung selulosa dan hemiselulosa melalui proses kalsinasi dan sulfonasi.
5. Eceng gondok merupakan salah satu limbah organic yang berpotensi untuk diolah menjadi karbon dalam sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi pada produksi biodiesel karna mengandung selulosa dan hemiselulosa yang tinggi.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Katalis daun eceng gondok tersulfonasi disintesis melalui variasi suhu kalsinasi berdasarkan suhu dekomposisi kandungan organik daun eceng gondok melalui analisis data TGA (250°C, 300°C, 350°C), dilanjutkan proses sulfonasi pada suhu 160°C selama 4 jam.
2. Katalis yang sudah dihasilkan melalui variasi suhu kalsinasi yang memiliki aktivitas katalitik optimum dipreparasi lagi dengan variasi waktu sulfonasi (3 jam dan 5 jam) pada suhu 160°C.
3. Karakterisasi katalis daun eceng gondok dilakukan menggunakan instrument FTIR, XRD dan Penentuan Situs Asam
4. Aplikasi katalis daun eceng gondok tersulfonasi dalam produksi biodiesel melalui reaksi esterifikasi antara PFAD dan methanol dengan bantuan katalis.
5. Pengujian sifat fisika biodiesel dibatasi pada uji densitas, laju alir, bilangan asam, bilangan penyabunan, dan % konversi FFA.

D. Rumusan Masalah

1. Bagaimana sifat-sifat fisikokimia katalis daun eceng gondok tersulfonasi yang disintesis melalui proses kalsinasi dan disulfonasi dengan H_2SO_4 ?
2. Bagaimana aktivitas katalitik katalis daun eceng gondok tersulfonasi dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan diadakan penelitian ini adalah:

1. Mempelajari sifat-sifat fisikokimia katalis daun eceng gondok tersulfonasi yang disintesis melalui proses kalsinasi dan disulfonasi dengan H_2SO_4 .
2. Mempelajari aktivitas katalitik katalis daun eceng gondok tersulfonasi dengan mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang sifat-sifat fisikokimia katalis daun eceng gondok tersulfonasi yang disintesis melalui proses kalsinasi dan disulfonasi dengan H_2SO_4 .
2. Memberikan informasi tentang terhadap aktivitas katalitik katalis daun eceng gondok tersulfonasi dengan mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.

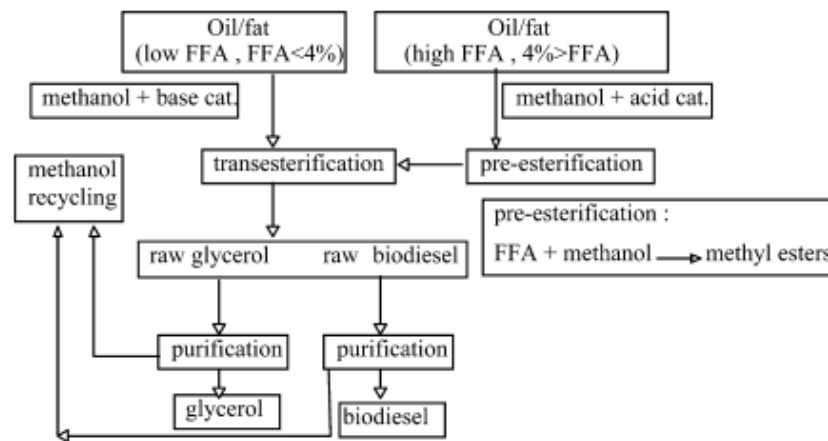
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Biodiesel dari PFAD

Biodiesel dengan nama kimia *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) didefinisikan sebagai bahan bakar yang terdiri dari monoalkil ester dari asam lemak rantai panjang yang berasal dari bahan baku lipid terbarukan, seperti minyak nabati atau lemak hewani, untuk digunakan dalam mesin *compression-ignition* (diesel) (Bart et al., 2010). Biodiesel adalah sumber energy terbarukan yang ramah lingkungan, biodegradable, dengan emisi gas rumah kaca yang rendah dibandingkan dengan solar konvensional (Leesing et al., 2021).

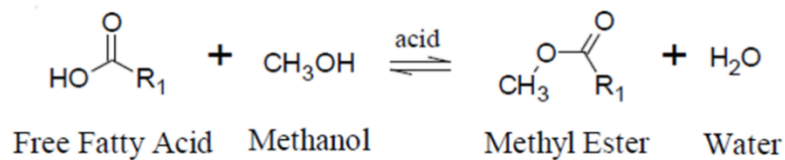
Biodiesel diproduksi dengan berbagai teknologi, seperti *direct/blend*, transesterifikasi, esterifikasi, pirolisis, dan mikroemulsi. Di antara metode ini, esterifikasi dan transesterifikasi merupakan metode yang biasanya digunakan untuk mengkonversi minyak dan lemak menjadi biodiesel. Proses reaksi esterifikasi dan transesterifikasi biasanya dikatalisis oleh katalis homogen atau heterogen (Ding et al., 2020).

Reaksi transesterifikasi dapat dilakukan bila kandungan FFA dalam bahan baku minyak kurang dari 4%. Sebagai alternatif, reaksi esterifikasi dapat dilakukan dengan penambahan katalis asam untuk mengubah FFA (>4%) menjadi FAME. Proses sintesis biodiesel ditunjukkan pada Gambar 1. (Lien et al., 2010).

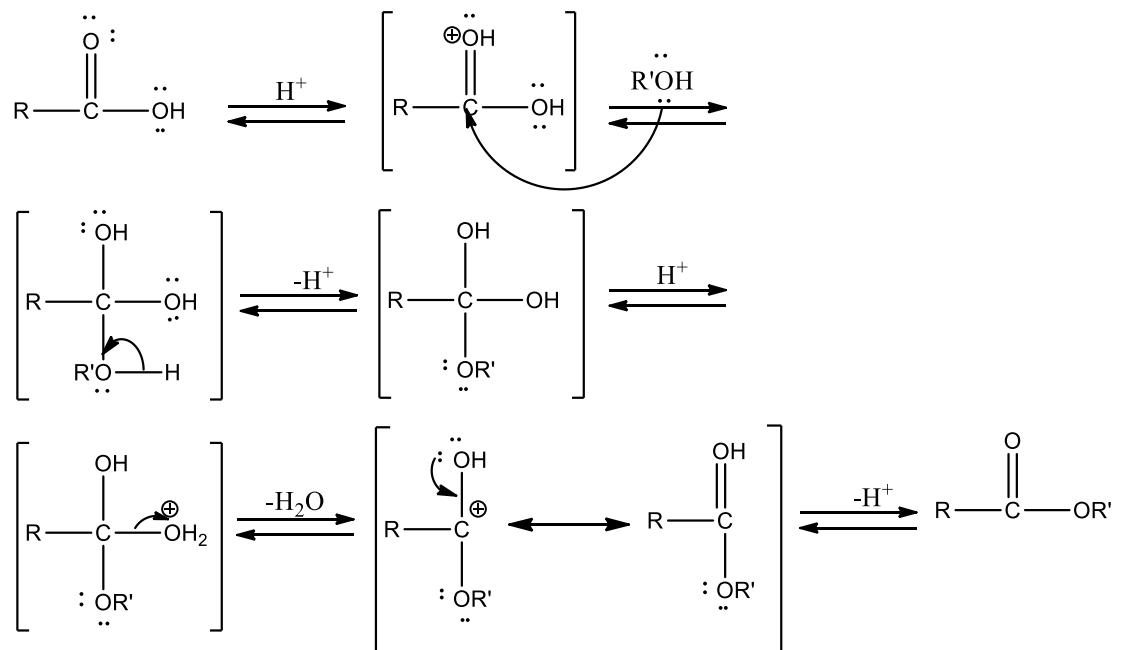


Gambar 1. Proses 2 tahap produksi biodiesel

Reaksi esterifikasi FFA dengan alkohol rantai pendek dapat diperhatikan pada reaksi berikut:



Gambar 2. Reaksi esterifikasi FFA dengan alkohol (Lokman et al., 2015).



Gambar 3. Mekanisme reaksi esterifikasi ((Hassan et al., 2017)

Salah satu bahan baku yang difokuskan untuk memproduksi biodiesel adalah *Palm Fatty Acid Destillate* (PFAD) karena ketersediaan bahan bakunya yang

melimpah dan mudah diperoleh dengan harga yang relative murah di Indonesia. Salah satu industri kelapa sawit di Indonesia adalah PT. Wilmar Nabati yang memproduksi hampir 1500 ton minyak kelapa sawit mentah perharinya. Setidaknya 66,707 ton PFAD telah dihasilkan setiap tahunnya sebagai produk sampingan dalam proses *refinery* minyak sawit mentah (Adam, 2021) PFAD telah digunakan dalam industri pakan ternak, industri kosmetik dan industri sabun. PFAD terdiri dari kandungan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi, sebesar 85%, dan mengandung hampir 10 % berat trigliserida dan sejumlah kecil squalene, sterol dan vitamin E. Dibandingkan dengan minyak sawit olahan yang terdiri dari hampir 100 % berat trigliserida (Lokman et al., 2015).

Tabel 1. Karakteristik Umum dari PFAD

	Rata-rata	Jarak
FFA (%)	86.4	72.7-92.6
Materi yang tidak dapat disabunkan (%)	1.61	1.0-2.5
Bilangan penyabunan (mg KOH/g)	209.5	200.3-215.4
Titer (°C)	46.7	46.0-48.3
Kandungan air (%)	0.104	0.03-0.24
nilai yodium (g/100g)	54.8	46.3- 57.6
	Rumus Molekul	Komposisi (%massa)
Asam miristat	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	1.08
Asam palmitat	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	58.92
Asam stearat	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	3.24
Asam oleat	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	30.34
Asam linoleat	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	6.42

(Sangar et al., 2019a)

Tabel 2. Perbandingan aplikasi PFAD menjadi biodiesel dengan metode dan katalis yang berbeda

No	Katalis	Kondisi esterifikasi : alkohol:PFAD molar ratio (mol:mol); massa katalis (wt%);	Yield	Referensi
.				

suhu (C); waktu (s)				
1.	Kotoran sapi	18,1 ; 4 ; 90 ; 1	96.5%	(Sangar et al., 2019b)
2.	Katalis ZnAl ₂ O ₄ mesopori tersulfonasi	15:1, 2 wt.%, 100 C ; 4 90 min.	94.65%.	(Soltani et al., 2016)
3.	Katalis SO ₃ H- GO ₂ TiO ₂ mesopori	9:1, 3 wt%, 70 C ; 40 min	96.73%.	(Soltani et al., 2021)
4.	Monolit sarang lebah yang didukung katalis gulat	15:1 ; 2.5 wt.%; 80 o C ; 240 min	89 %	(Hosseini et al., 2015)
5.	Biji pepaya	30: 1 ; 5 wt% ; 100 C ; 4 h	93.49%	(Z. E. Tang et al., 2020)

B. Katalis Karbon Tersulfonasi

Salah satu hal yang paling penting dalam kimia adalah katalis, yang mana katalis dapat mempercepat laju reaksi kimia bahkan dengan sedikit penambahan zat apapun, dan fenomena ini disebut sebagai katalisis. Secara termodinamika, katalis dapat menurunkan energi aktivasi dengan cara mengubah jalannya reaksi atau mekanisme reaksi sehingga meningkatkan laju reaksi tetapi tidak dapat mengubah posisi kesetimbangan termodinamika dan tanpa adanya perubahan kimiawi di akhir reaksi (Dumbre & Choudhary, 2020).

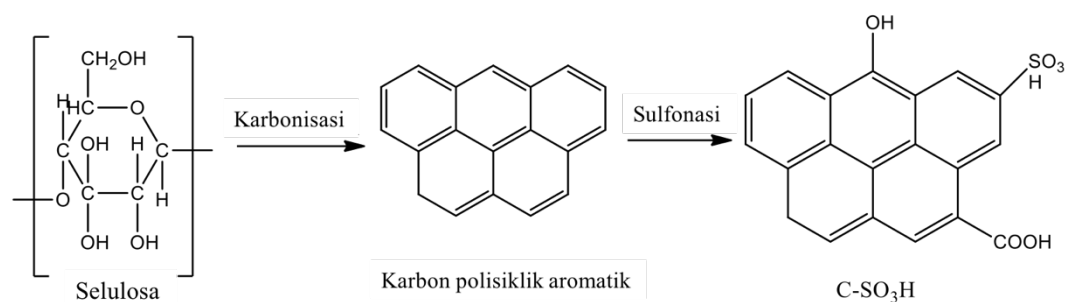
Dua jenis utama dari katalis adalah katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen ada dalam fase yang sama (gas atau cair) dengan reaktan .

Umumnya, katalis homogen adalah garam alkali, asam organik dan anorganik (misalnya, KOH, NaOH, CH₃ONa, H₂SO₄), serta enzim. Proses katalitik homogen menghasilkan bahan limbah yang sangat besar, korosi peralatan (terutama untuk H₂SO₄), kesulitan dalam pemulihan katalis dan pemurnian produk dan secara signifikan mengganggu stabilitas lingkungan, dan ekologi (Dhakshinamoorthy et al., 2011).

Katalisis heterogen adalah jenis katalisis di mana fase katalis berbeda dari fase reaktan atau produk. Hal ini berbeda dengan katalisis homogen di mana reaktan, produk, dan katalis berada dalam fase yang sama. Katalis heterogen yang khas adalah padatan anorganik seperti logam, oksida, sulfida, zeolit, dan garam logam (misalnya, CaCO₃, Amberlyst-15, CaO-Al₂O₃, CaO, MgO), tetapi juga dapat berupa bahan organik seperti karbon tersulfonasi, penukar ion, dan enzim. Katalisis heterogen memainkan peran penting karena memiliki beberapa keuntungan seperti hasil tinggi, biaya bahan menengah, tingkat reaksi tinggi, daur ulang, konversi FFA menjadi biodiesel dan dapat digunakan dalam proses lebih lanjut. Representasi dari aktivitas katalitik katalis heterogen dapat ditunjukkan oleh banyak pemanfaatan katalis ini di bidang industri, seperti, produksi gas sintesis hidrogenasi, reaksi dehidrogenasi, dan oksidasi katalitik dari banyak senyawa organik. Produksi 90% bahan kimia (berdasarkan volume) dibantu oleh katalis padat. Karena manfaat yang luar biasa ini, katalis heterogen telah dipelajari secara luas untuk konversi biomassa dalam beberapa tahun terakhir (Taipabu et al., 2021).

Katalis karbon tersulfonasi adalah katalis yang disintesis dari proses sulfonasi untuk mensubstitusi gugus sulfonat (-SO₃H) pada permukaan bahan organik yang

dikarbonisasi dengan tidak sempurna (*incompletely carbonized*) (Nakajima et al., 2012). Proses karbonisasi, juga dikenal sebagai pirolisis, proses ini dapat didefinisikan sebagai langkah di mana prekursor organik diubah menjadi bahan yang pada dasarnya semua karbon. karbonisasi biasanya merupakan proses yang lambat. Durasinya dapat sangat bervariasi, tergantung pada komposisi produk akhir, jenis prekursor, ketebalan bahan, dan faktor lainnya (Pierson, 1993).



Gambar 4. Reaksi karbonisasi dan sulfonasi (Wanchai & Soyjit, 2016)

Produksi biodiesel dengan katalis basa heterogen dari minyak yang mengandung asam lemak bebas (FFA) tinggi dikaitkan dengan masalah saponifikasi (Seo et al., 2015). Di sisi lain, katalis asam heterogen lebih disukai dalam sintesis biodiesel karena kemudahan pemisahan, reusability katalis, kemudahan penanganan, non-toksitas, sifat non-korosif dan kesesuaian untuk digunakan baik dalam reaksi esterifikasi dan transesterifikasi bahkan dalam kasus minyak yang memiliki FFA tinggi. Literatur yang luas tersedia tentang penggunaan katalis asam heterogen untuk produksi biodiesel seperti zeolit, zirkonia sulfat, asam heteropoli terdukung, karbon tersulfonasi (Thushari & Babel, 2018), oksida logam (Lee et al., 2014), dll. Baru-baru ini, katalis asam padat berbasis karbon aktif tersulfonasi dilaporkan sebagai katalis yang menjanjikan untuk produksi biodiesel (Konwar et al., 2014).

Tabel 3. pemanfaatan berbagai katalis tersulfonasi dalam reaksi esterifikasi

No	Sumber	Aplikasi pada esterifikasi biodiesel dengan sumber bahan baku	Kondisi esterifikasi : alkohol:minyak molar ratio (mol:mol); massa katalis (wt%); suhu (C); waktu (s)	%yeild	Referensi
1.	katalis asam turunan glukosa tersulfonasi	<i>Palm Fatty Acid Distillate</i> (PFAD)	10:1, 2.5 wt.%, 75 C, 2 h.	92.3 %	(Lokman et al., 2015)
2.	Batang jagung	Asam oleat	7:1 ,7 wt.%, 60 C, 4 h	98 %	(Liu et al., 2013)
3.	Sargassum horneri c	Asam oleat	15:1, 10 wt%, 70 C, 3 h	96.4%	(Cao et al., 2021)
4.	Batubara bitumen	Asam oleat	10:1; 10wt%, 65, 3h	98.70%	(X. Tang et al., 2019)
5.	Bambu	Asam oleat	1;8, 5wt%, 65C, 1h	97.31%	(Ning & Niu, 2017)
6.	Katalis padat yang berasal dari kulit kakao	Asam oleat	7:1, 5 %w/w, 45 C for 4 h	94%	(Bureros et al., 2019)
7.	Katalis Heterogen Limbah Teh tersulfonasi	<i>PalmFfatty Acid Distillate</i> (PFAD)	9:1, 4 wt %, 65C, 90 min	97%	(Farabi et al., 2019)
8.	Kulit inti murumuru	<i>Palm Fatty Acid Distillate</i> (PFAD)	10 : 1, 5%, 90 C, 1.5 h	97.2%	(da Luz Corrêa et al., 2020)

(Chin et al., 2012), telah melaporkan bahwa salah satu sumber katalis padat pada esterifikasi PFAD untuk sintesis metil ester adalah limbah ampas tebu tebu yang disintesis dengan metoda sulfonasi pada karbon yang terkarbonisasi

sebagian. Katalis yang dibuat menunjukkan aktivitas katalitik potensial dengan kandungan metil ester tertinggi adalah 80% pada suhu esterifikasi 170°C selama 30 menit dengan rasio berat methanol dan *catalyst loading* adalah 20 dan 11.5 wt% dari PFAD yang digunakan.

B. Karbon Daun Eceng Gondok

Eceng gondok (*Eichhorniacrassipes*), yang berasal dari lembah Amazon terdaftar sebagai salah satu gulma paling invasif di dunia karena ketersediaannya dalam jumlah besar, kemampuan adaptif yang luar biasa, dan tingkat pertumbuhan yang luar biasa (Hu et al., 2015). Tumbuh pada tingkat yang sangat cepat dan menghasilkan hampir 2 ton biomassa per hektar dan populasinya berlipat ganda setiap 5-15 hari, Eceng gondok biasanya disalahkan karena menipisnya nutrisi dan oksigen dari badan air, meningkatkan evapotranspirasi, dan mengurangi keanekaragaman hayati, yang dapat mempengaruhi penangkapan ikan, pengiriman, irigasi, dan merusak ekosistem perairan (Guerrero-Coronilla et al., 2015).

Pada penelitian sebelumnya eceng gondok sudah dimanfaatkan sebagai substrat untuk produksi bioetanol (Zhang et al., 2016), Bahan Bakar Biofuel yang berkelanjutan (Sukarni et al., 2019), sumber carbon nanohorns (CNHs) (Vanavanichkul et al., 2021), dehidrasi xilosa (Laohapornchaiphan et al., 2017) dan sebagai adsorben gas beracun karbon monoksida (CO) (Dewangga, 2013).

Pada studi yang dilakukan (Zhang et al., 2016), menunjukkan daun eceng gondok mengandung hemiselulosa $29,75 \pm 0,15\%$, selulosa $15,42 \pm 0,08\%$, lignin

9.79 $\pm$ 0,06%, dan lainnya seberat 45.04 $\pm$ 0,29%. Kandungan bagian dari eceng gondok lainnya dapat diperhatikan pada tabel berikut.

Tabel 4. Kandungan dari eceng gondok pada bagian-bagian yang berbeda

Bagian	Kandungan (%)			
	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	Lainnya
Daun	15,42 $\pm$ 0,08	29,75 $\pm$ 0,15	9.79 $\pm$ 0,06	45.04 $\pm$ 0,29
Batang	17.14 $\pm$ 0.12	21.82 $\pm$ 0.06	8.01 $\pm$ 0.07	53.03 $\pm$ 0.25
Keseluruhan	18.07 $\pm$ 0.20	28.21 $\pm$ 0.11	7.03 $\pm$ 0.09	46.69 $\pm$ 0.40

(Laohapornchaiphan et al., 2017) telah melaporkan penggunaan daun eceng gondok sebagai katalis asam padat berbasis karbon untuk esterifikasi asam oleat. Aktivitas katalitik optimum dicapai pada massa katalis 7 % dengan perbandingan molar metanol dan asam oleat sebesar 1:20 dan esterifikasi pada suhu 65°C berhasil mengkonversi asam oleat sebesar 96% selama 5 jam.

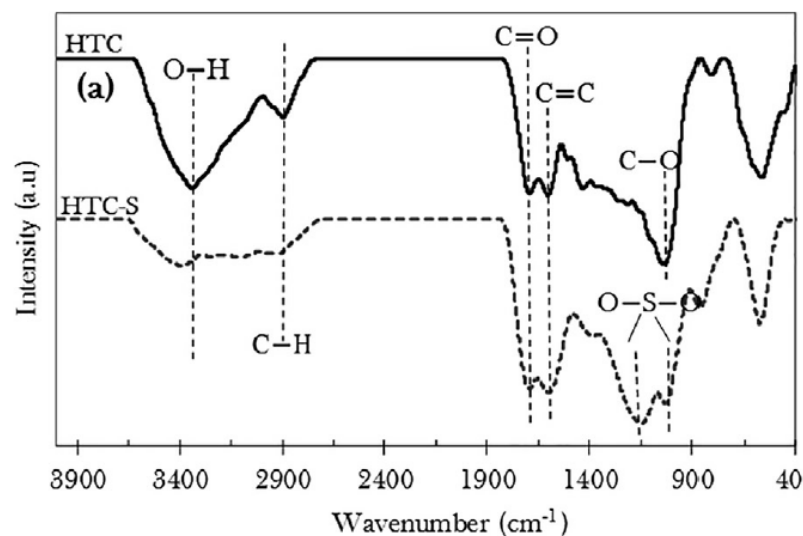
C. Karakterisasi Katalis

Karakterisasi yang umum digunakan untuk mengkarakterisasi katalis yang sudah disintesis terdiri atas dua yaitu *local structure* (struktur lokal) dengan menggunakan instrument FTIR serta UV-Vis dan *bulk structure* (struktur keseluruhan) dengan menggunakan instrument XRD, BET, SEM, TGA, TPD-NH₃ dan Situs asam. Pada penelitian ini karakterisasi untuk katalis karbon tersulfonasi hanya dibatasi pada 4 instrumen yaitu FTIR, XRD, TGA dan Situs asam. Hal ini dikarekan keterbatasan dana dan waktu penelitian.

1. FTIR

Spektroskopi FT-IR adalah spektroskopi vibrasi, dan didasarkan pada fenomena penyerapan radiasi inframerah oleh getaran molekul, yang

mengidentifikasi struktur molekul bahan. Bahan anorganik dan organik dapat dianalisis dengan spektroskopi ini. Ada dua jenis regangan yang ditemukan, (1) regangan simetris (tidak ada perubahan momen dipol dan IR aktif), (2) regangan asimetris (perubahan momen dipol dan IR aktif). Area katalisis heterogen memiliki aplikasi yang luar biasa dalam spektroskopi FTIR, seperti, identifikasi kelompok fungsional; mempelajari struktur molekul katalis (Nugrahani et al., 2019). Studi lain dalam literatur juga melaporkan penggunaan analisis FTIR untuk penentuan dan kuantifikasi senyawa (Rosset & Perez-Lopez, 2019).



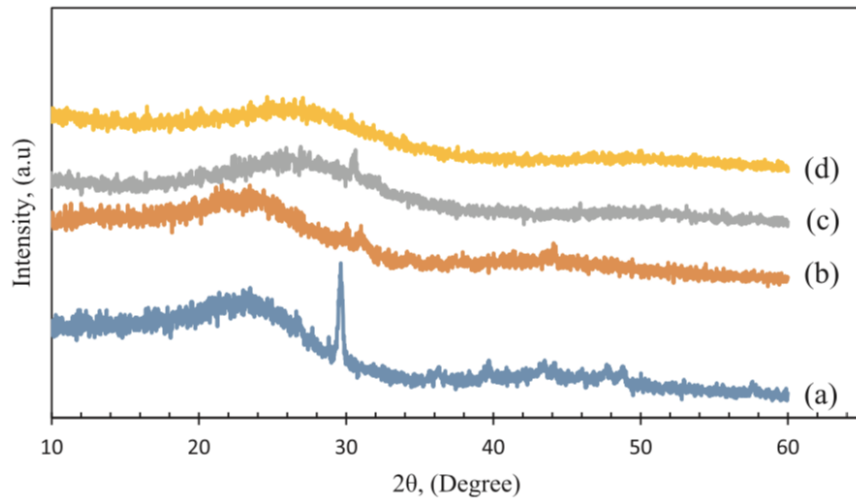
Gambar 5. Spektrum FTIR dari HTC dan Katalis HTC-S

Gambar 5 menggambarkan spektrum IR dari semua katalis. HTC dan HTC-S menunjukkan pita serapan pada 1588 dan 1602 cm^{-1} yang dikaitkan dengan variasi regangan cincin aromatik C=C poliaromatik karbon. Pita serapan pada 1693 dan 1695 cm^{-1} dapat ditetapkan untuk mode regangan C=O dari gugus -COOH, yang menunjukkan adanya gugus asam. HTC menunjukkan puncak C-O yang intens pada 1038 cm^{-1} terkait dengan karbonisasi polisakarida hemiselulosa dalam tongkol jagung. Adanya gugus -SO₃H secara kovalen terikat pada struktur

karbon poliaromatik HTC-S telah dikonfirmasi oleh pita getaran kuat pada 1028 dan 1149 cm^{-1} , yang masing-masing terkait dengan mode peregangan asimetris dan simetris dari C-O-SO₃H. Puncak intens yang luas pada 3400 cm^{-1} mencerminkan pengurangan getaran peregangan gugus hidroksil (-OH) dari bagian fenol dari katalis HTC setelah pengobatan sulfonasi. Penurunan intensitas puncak -OH menunjukkan bahwa H₂SO₄ bertindak sebagai agen dehidrasi. Demikian pula, pita intens yang luas di sekitar 2920 cm^{-1} dalam spektrum HTC-S disebabkan oleh pengurangan asimetris Peregangan C-H setelah sulfonasi. Kehadiran puncak ini menunjukkan bahwa aktivasi kimia menghilangkan sejumlah besar hidrogen dari katalis (Akinfalabi et al., 2020).

2. XRD

Difraksi sinar-X (XRD) adalah teknik yang sangat efektif dan penting untuk menentukan struktur kristal bahan di mana struktur kristal menyebabkan seberkas insiden Sinar-X dan difraksi ke banyak arah tertentu dengan radiasi elektromagnetik (jangkauan) 0,01–0,7 nm). Kemudian, mengukur sudut dan intensitas balok difraksi. Itu juga digunakan untuk karakterisasi struktur kristal curah dan komposisi fase kimia. Identifikasi fase dalam sampel yang tidak diketahui adalah aplikasi utama sinar-X klasik difraksi serbuk. Bahan dapat dibagi menjadi dua fase yang berbeda (1) kristal fase dan (2) fase amorf. Bahan kristal terdiri dari atom-atom yang tersusun dalam pola tiga dimensi yang teratur, yang disebut sebagai struktur kristal. Berbagai macam jenis struktur kristal adalah; kubik, tetragonal, ortorombik, belah ketupat, heksagonal, monoklinik dan triklinik. Dalam bahan amorf, atom tidak diatur secara teratur secara periodik dengan urutan jangka pendek (Kochaputi et al., 2021).



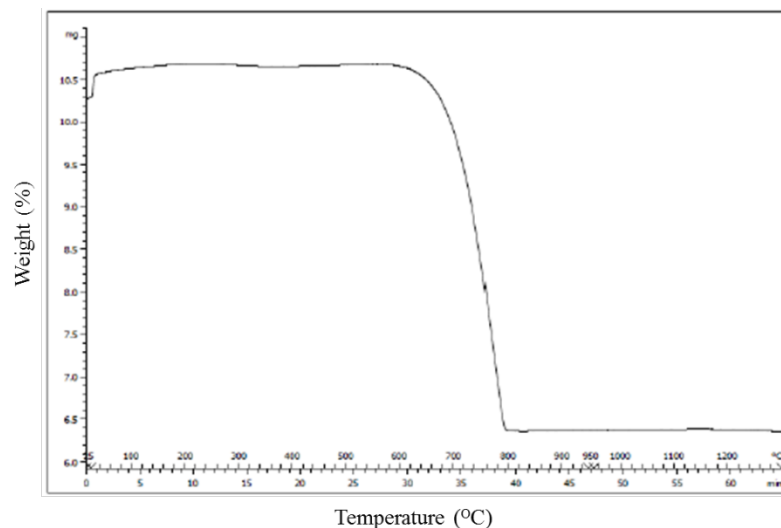
Gambar 6. Pola XRD dari katalis asam padat yang diturunkan dari karbon; (a) PKS (cangkang inti sawit), (b) Bambu (c) PKS-SO₃H, (d) Bambu-SO₃H.

Gambar 6 menunjukkan pola XRD dari katalis yang disiapkan, baik yang belum atau yang sudah tersulfonasi menggambarkan satu puncak lebar dan satu puncak lemah pada $2\theta = 10^{\circ}$ – 30° dan $2\theta = 40^{\circ}$ – 50° yang dikaitkan dengan C (0 0 2) dan C (1 0 1) masing-masing. Dinyatakan bahwa puncak lebar sekitar $2\theta = 10^{\circ}$ – 30° merupakan ciri khas karbon amorf yang mengandung lembaran karbon aromatik. Sementara itu, puncak tajam pada katalis karbon mentah ditetapkan pada domain kristal 3 dimensi dari grafit. Proses karbonisasi pada temperatur tinggi yang digabungkan dengan proses sulfonasi dengan asam kuat akan menyebabkan putusnya ikatan cleavage C-O-C pada prekursor karbon. Proses ini akan menyebabkan karbon tersulfonasi menjadi lebih kaku dan amorf karena meningkatnya ketidakteraturan pada lembaran karbon. Transformasi struktural katalis karbon tersulfonasi ini mungkin memainkan peran penting dalam aktivitas katalis selama reaksi esterifikasi (Farabi et al., 2019)

3. TGA

Analisis termogravimetri (TGA) adalah metode yang berguna untuk memberikan informasi tentang dekomposisi termal bahan terhadap perubahan suhu / waktu (mungkin dengan adanya nitrogen, oksigen, argon, dan udara, dll). Analisis termogravimetri (TGA) juga dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas termal bahan Hasil yang diperoleh dari analisis TGA dapat digunakan untuk mengatur suhu karbonisasi biomassa (Sayyed et al., 2022)

(Nordin et al., 2015) sudah melaporkan pembuatan katalis menggunakan kerang mentah, dimana untuk penetapan waktu kalsinasi ditetapkan dari dekomposisi termal sampel yang dapat dilihat dari spectrum TGA dibawah:



Gambar 7. kurva TGA cangkang kerang

Dalam gambar 7 menunjukkan bahwa kurva suhu mencapai puncaknya pada 780°C. Dekomposisi kalsium karbonat (CaCO_3) terdiri atas dua fase berbeda dalam pola dekomposisi CaCO_3 . Proses awal fase pertama dimulai dengan kehilangan berat yang sangat kecil yang disebabkan oleh penghilangan air dan gugus alkil. Fase kedua dimulai pada 580°C dan berakhir pada 815°C. Ketika suhu meningkat antara 700-900°C, perubahan berat yang cepat terjadi karena zat yang

mudah menguap dalam sampel dihilangkan, dan CaCO_3 , yang terkandung dalam kerang diubah menjadi CaO . Namun, berat sampel konstan hingga suhu mencapai 900 C. Hal ini menunjukkan bahwa proses telah selesai dan sampel tertinggal sebagai residu.

4. Situs Asam

Situs asam memiliki peran penting dalam aktivitas katalitik dari katalis. Dimana, efisiensi produksi biodiesel ditentukan berdasarkan sifat dan jumlah situs asam (asam lewis) (Parangi and Mishra, 2020). Katalis yang terindikasi memiliki kekuatan asam kuat dapat meningkatkan laju reaksi (Farabi, 2019).

D. Analisis Sifat Biodiesel

Pada analisis sifat-sifat dari biodiesel yang diproduksi memerlukan standar baku sebagai acuan penentuan kualitas dari biodiesel yang telah dihasilkan. Salah satu standar yang dapat digunakan yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI) 7182:2015. Dalam penelitian ini, peneliti hanya melakukan beberapa pengujian sederhana dalam menganalisa sifat biodiesel yang dihasilkan yaitu uji densitas, uji viskositas, bilangan asam dan bilangan penyabunan, dikarenakan keterbatasan instrument dan dana penelitian. Adapun persyaratan standar dan mutu biodiesel dapat diperhatikan pada tabel berikut;

Tabel 5. Persyaratan Standard dan Mutu Biodiesel SNI dan ASM

No	Parameter Uji	SNI	ASM D6751-02
1	Massa jenis pada 40°C	850 - 890 kg/m ³	870-900 kg/m ³
2	Viskositas kinematik pada 40°C	2,3 - 6,0 mm ² /s	1,9-6,0 mm ² /s
3	Angka setana	>51	Min. 47
4	Titik Kabut	Maks 18°C	-15 sampai 16°C
5	Titik nyala (mangkok tertutup)	100°C, min	Min. 130°C
6	Korosi lempeng tembaga (3 jam pada 50°C)	850 - 890 kg/m ³	-

7	Angka asam	0,5 mg-KOH/g, Maks. 0,8 mg-KOH/g,
8	Kadar ester metil	96,5 %-massa, min -

1. Densitas

Densitas adalah sifat bahan bakar yang penting, karena sistem injeksi, pompa, dan injektor harus mengirimkan sejumlah bahan bakar yang disesuaikan secara tepat untuk menghasilkan pembakaran yang tepat. Kepadatan adalah properti utama yang mempengaruhi jumlah massa yang disuntikkan. Data densitas juga penting dalam berbagai unit operasi dalam produksi biodiesel. Data densitas perlu diketahui untuk merancang reaktor, unit distilasi dan proses pemisahan dengan baik, tangki penyimpanan, dan proses perpipaan. Kepadatan tergantung pada bahan baku yang digunakan untuk produksi bahan bakar biodiesel dan profil metil ester biodiesel (Pratas et al., 2011).

Tabel 6. Perbedaan densitas dari berbagai sumber minyak

No	Sumber minyak	Density (kg m ⁻³)	Referensi
1	PFAD	821.6-875.9	(Baroutian et al., 2008)
2	Kedelai	849.41-893.23	(Huber et al., 2009)
3	Biji kapas	814,6-876.2	(Mesquita et al., 2012)
4	Jarak pagar	825.67-880.32	(Veny et al., 2009)
5	PFAD	870-900 kg/m ³	ASTM D6751-2
6	PFAD	850 - 890 kg/m ³	SNI 7182: 2015

Ada beberapa publikasi dalam literatur yang menyajikan data densitas biodiesel dalam rentang suhu yang luas, tetapi biasanya tidak ada informasi tentang komposisi biodiesel yang disediakan; dengan demikian, data ini tidak dapat digunakan untuk evaluasi model. Kelangkaan data densitas biodiesel yang informasi komposisinya tersedia membatasi penggunaan model ini untuk memprediksi properti ini untuk bahan bakar biodiesel.

2. Viskositas

Viskositas kinematik senyawa lemak sangat dipengaruhi oleh struktur kimianya. Panjang rantai, jumlah, posisi, dan kelompok kimia di mana ikatan rangkap berada serta sifat dari bagian teroksigenasi semuanya merupakan faktor yang mempengaruhi. Viskositas meningkat dengan panjang rantai karbon dan menurun dengan jumlah ikatan rangkap (Knothe & Steidley, 2005).

Sehubungan dengan operasi mesin, bahan bakar dengan viskositas tinggi cenderung membentuk tetesan yang lebih besar saat injeksi, yang dapat mengakibatkan atomisasi bahan bakar yang buruk selama penyemprotan, peningkatan deposit mesin, kebutuhan energi yang lebih besar untuk pompa bahan bakar, dan keausan elemen pompa bahan bakar dan injektor. Di sisi lain, bahan bakar dengan viskositas rendah mungkin tidak memberikan pelumasan yang cukup untuk kesesuaian presisi pompa injeksi bahan bakar, yang mengakibatkan kebocoran atau peningkatan keausan. Lebih lanjut telah ditunjukkan bahwa densitas bahan bakar adalah properti utama yang mempengaruhi jumlah massa yang diinjeksikan ke dalam mesin (Basso et al., 2013).

Tabel 7. Perbedaan viskositas dari berbagai sumber minyak

No	Sumber Feedstock yang menghasilkan biodiesel	Viskositas (mm ² /s)	Referensi
1	PFAD	4.27 mm ² /s	(Somnuk et al., 2019)
2	Asam oleat	4.53 mm ² /s	(Moradi et al., 2021)
3	minyak safflower	4.58 mm ² /s	(Nogales-Delgado et al., 2021)
4	PFAD	1,9 - 6,0 mm ² /s	ASTM D6751-2
5	PFAD	2,3 - 6,0 mm ² /s	SNI 7182: 2015

3. Bilangan Asam

Kondisi pakan (kandungan FFA dan kadar air) juga tersedia dalam penelitian mereka. Sebagian besar literatur menyajikan kandungan FFA dalam nilai asam (mg KOH/gram). Namun, nilai asam dapat diubah menjadi kandungan FFA dengan mengalikannya dengan faktor. Faktor tersebut sama dengan berat molekul (Mw) FFA yang bersangkutan (kebanyakan asam oleat, $M_w = 282,4 \text{ g.mol}^{-1}$) dibagi sepuluh kali Mw KOH ($56,1 \text{ g.mol}^{-1}$). Oleh karena itu, persentase FFA sama dengan nilai asam dibagi dua (Taipabu et al., 2021).

3. Bilangan penyabunan

Bilangan penyabunan dari setiap biodiesel yang dihasilkan diuji untuk mengidentifikasi komposisi ester asam lemaknya. Analisis korelasi antara nilai penyabunan dan FAMEs menunjukkan bahwa asam lemak stearat berkorelasi cukup positif dengan nilai penyabunan. Asam oleat berkorelasi sangat positif dan asam linoleat berkorelasi sangat negatif dengan nilai penyabunan. Untuk nilai penyabunan menunjukkan penurunan dengan meningkatnya persentase berat ester asam lemak tidak jenuh (Gopinath et al., 2009).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Daun eceng gondok dapat dijadikan sebagai sumber karbon dalam sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi. Sintesis diawali dengan proses kalsinasi pada suhu 250-350°C (berdasarkan hasil TGA) dan dilanjutkan dengan proses sulfonasi, sifat fisikokimia katalis menunjukkan bahwa gugus sulfonat yang tersubsitusi pada permukaan karbon pada panjang gelombang 1392,96 cm^{-1} dan 1177,87 cm^{-1} . Struktur katalis daun karbon eceng gondok tersulfonasi yang dihasilkan adalah amorf dengan situs asam tertinggi pada KDEG-350S-4h sebesar 0.1471 mmol/g.
2. Aplikasi katalis dengan variasi suhu kalsinasi dan variasi suhu sulfonasi pada esterifikasi PFAD menunjukkan aktifitas katalitik tertinggi pada katalis dengan suhu kalsinasi 350 °C dengan waktu sulfonasi 4 jam dengan % konversi sebesar 63,21%
3. Penurunan nilai densitas dan viskositas masing-masing biodiesel yang dihasilkan dari 2 set katalis memperlihatkan tren yang sama dengan kenaikan situs asam dan %konversi.

B. Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk melanjutkan penelitian terkait beberapa variasi kondisi kalsinasi ataupun kondisi sulfonasi, dan disarankan untuk melakukan karakterisasi sampel menggunakan TPD-NH₃.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, M. (2021). *MAINTENANCE BUTTERFLY VALVE NIAGARA FILTER*.
- Akinfalabi, S. I., Rashid, U., Ngamcharussrivichai, C., & Nehdi, I. A. (2020). Synthesis of reusable biobased nano-catalyst from waste sugarcane bagasse for biodiesel production. *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100788. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100788>
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 4, pp. 2070–2093). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- ASTM Standard D7371. (2014). Standard Test Method for Determination of Biodiesel (Fatty Acid Methyl Esters) Content in Diesel Fuel Oil Using Mid Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR-PLS Method). *West Conshohocken, PA: ASTM International*; 1991, <www.Astm.Org>., 1–10. <https://doi.org/10.1520/D7371-12.2>
- Barbieri Gonzaga, F., & Pereira Sobral, S. (2012). A new method for determining the acid number of biodiesel based on coulometric titration. *Talanta*, 97, 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.04.017>
- Baroutian, S., Aroua, M. K., Raman, A. A. A., & Sulaiman, N. M. N. (2008). Densities of ethyl esters produced from different vegetable oils. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 53(9), 2222–2225. <https://doi.org/10.1021/je8002783>
- Bart, J. C. J., Palmeri, N., & Cavallaro, S. (2010). Analytical methods and standards for quality assurance in biodiesel production. *Biodiesel Science and Technology*, 514–570. <https://doi.org/10.1533/9781845697761.514>
- Basso, R. C., De Almeida Meirelles, A. J., & Batista, E. A. C. (2013). Densities and viscosities of fatty acid ethyl esters and biodiesels produced by ethanolysis from palm, canola, and soybean oils: Experimental data and calculation methodologies. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(8), 2985–2994. <https://doi.org/10.1021/ie3026899>
- Bureros, G. M. A., Tanjay, A. A., Cuizon, D. E. S., Go, A. W., Cabatingan, L. K., Agapay, R. C., & Ju, Y. H. (2019). Cacao shell-derived solid acid catalyst for esterification of oleic acid with methanol. *Renewable Energy*, 138, 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.082>
- Cao, M., Peng, L., Xie, Q., Xing, K., Lu, M., & Ji, J. (2021). Sulfonated Sargassum horneri carbon as solid acid catalyst to produce biodiesel via esterification. *Bioresource Technology*, 324(December 2020), 124614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124614>
- Chin, L. H., Abdullah, A. Z., & Hameed, B. H. (2012). Sugar cane bagasse as solid catalyst for synthesis of methyl esters from palm fatty acid distillate. *Chemical Engineering Journal*, 183, 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.028>
- da Luz Corrêa, A. P., Bastos, R. R. C., Rocha Filho, G. N. da, Zamian, J. R., & Conceição, L. R. V. da. (2020). Preparation of sulfonated carbon-based catalysts from murumuru kernel shell and their performance in the esterification reaction. *RSC Advances*, 10(34), 20245–20256. <https://doi.org/10.1039/d0ra03217d>

- Dewangga, A. (2013). Potensi Gel Klorofil Dari Ekstrak Daun Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms.) Dengan Basis Gel Cincau Hijau (*Cyclea barbata* Miers) Sebagai Absorben Gas Beracun Karbon Monoksida (CO). In *Skripsi Universitas Negeri Semarang*.
- Dhakshinamoorthy, A., Alvaro, M., & Garcia, H. (2011). Metal-organic frameworks as heterogeneous catalysts for oxidation reactions. *Catalysis Science and Technology*, 1(6), 856–867. <https://doi.org/10.1039/c1cy00068c>
- Ding, J., Qu, S., Lv, E., Lu, J., & Yi, W. (2020). Mini review of biodiesel by integrated membrane separation technologies that enhanced esterification/transesterification. *Energy and Fuels*, 34(12), 15614–15633. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03307>
- Dumbre, D., & Choudhary, V. R. (2020). Properties of functional solid catalysts and their characterization using various analytical techniques. In *Advanced Functional Solid Catalysts for Biomass Valorization*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820236-4/00003-9>
- Farabi, M. S. A., Ibrahim, M. L., Rashid, U., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019). Esterification of palm fatty acid distillate using sulfonated carbon-based catalyst derived from palm kernel shell and bamboo. *Energy Conversion and Management*, 181(December 2018), 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.033>
- Gopinath, A., Puan, S., & Nagarajan, G. (2009). Theoretical modeling of iodine value and saponification value of biodiesel fuels from their fatty acid composition. *Renewable Energy*, 34(7), 1806–1811. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.11.023>
- Guerrero-Coronilla, I., Morales-Barrera, L., & Cristiani-Urbina, E. (2015). Kinetic, isotherm and thermodynamic studies of amaranth dye biosorption from aqueous solution onto water hyacinth leaves. *Journal of Environmental Management*, 152, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.026>
- Halimatussadiyah, A., Siregar, A. A., Moeis, F. R., & Maulia, R. F. (2020). *PENILAIAN PROGRAM PEREMAJAAN*.
- Hassan, N. A. s. A., Mohtar, N. A., Fauzi, S. H. M., Kian, Y. S., Hassan, H. A., & Idris, Z. (2017). Synthesis of dimerate esters by solvent-free method. *Journal of Oil Palm Research*, 29(1), 110–119. <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.2901.12>
- Hosseini, S., Janaun, J., & Choong, T. S. Y. (2015). Feasibility of honeycomb monolith supported sugar catalyst to produce biodiesel from palm fatty acid distillate (PFAD). *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.08.011>
- Hu, Z., Ma, X., & Li, L. (2015). Optimal conditions for the catalytic and non-catalytic pyrolysis of water hyacinth. *Energy Conversion and Management*, 94, 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.087>
- Huber, M. L., Lemmon, E. W., Kazakov, A., Ott, L. S., & Bruno, T. J. (2009). Model for the thermodynamic properties of a biodiesel fuel. *Energy and Fuels*, 23(7), 3790–3797. <https://doi.org/10.1021/ef900159g>
- Ibrahim, N. A., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., Yaw, T. C. S., & Ismail, I. (2019). Synthesis of carbonaceous solid acid magnetic catalyst from empty fruit bunch for esterification of palm fatty acid distillate (PFAD). *Energy*

- Conversion and Management*, 195(May), 480–491.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.022>
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2005). Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*, 84(9), 1059–1065.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.01.016>
- Kochaputi, N., Khemthong, P., Kasamechong, P., Butburee, T., Limphirat, W., Poo-arporn, Y., Kuboon, S., Faungnawakij, K., & Kongmark, C. (2021). Roles of supports on reducibility and activities of Cu₃P catalysts for deoxygenation of oleic acid: In situ XRD and XAS studies. *Molecular Catalysis*, September 2020, 111425.
<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111425>
- Konwar, L. J., Boro, J., & Deka, D. (2014). Review on latest developments in biodiesel production using carbon-based catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 546–564.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.003>
- Laohapornchaiphan, J., Smith, C. B., & Smith, S. M. (2017). One-step Preparation of Carbon-based Solid Acid Catalyst from Water Hyacinth Leaves for Esterification of Oleic Acid and Dehydration of Xylose. *Chemistry - An Asian Journal*, 12(24), 3178–3186. <https://doi.org/10.1002/asia.201701369>
- Lee, H. V., Juan, J. C., Binti Abdullah, N. F., Nizah MF, R., & Taufiq-Yap, Y. H. (2014). Heterogeneous base catalysts for edible palm and non-edible Jatropha-based biodiesel production. *Chemistry Central Journal*, 8(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1186/1752-153X-8-30>
- Leesing, R., Siwina, S., & Fiala, K. (2021). Yeast-based biodiesel production using sulfonated carbon-based solid acid catalyst by an integrated biorefinery of durian peel waste. *Renewable Energy*, 171, 647–657.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.146>
- Lien, Y. S., Hsieh, L. S., & Wu, J. C. S. (2010). Biodiesel synthesis by simultaneous esterification and transesterification using oleophilic acid catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(5), 2118–2121.
<https://doi.org/10.1021/ie901496h>
- Liu, T., Li, Z., Li, W., Shi, C., & Wang, Y. (2013). Preparation and characterization of biomass carbon-based solid acid catalyst for the esterification of oleic acid with methanol. *Bioresource Technology*, 133, 618–621. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.163>
- Lokman, I. M., Rashid, U., & Taufiq-Yap, Y. H. (2016). Meso- and macroporous sulfonated starch solid acid catalyst for esterification of palm fatty acid distillate. *Arabian Journal of Chemistry*, 9(2), 179–189.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.034>
- Lokman, I. M., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., & Yunus, R. (2015). Methyl ester production from palm fatty acid distillate using sulfonated glucose-derived acid catalyst. *Renewable Energy*, 81, 347–354.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.045>
- Mesquita, F. M. R., Feitosa, F. X., do Carmo, F. R., de Santiago-Aguiar, R. S., & de Sant'ana, H. B. (2012). Viscosities and viscosity deviations of binary mixtures of biodiesel + petrodiesel (or n-hexadecane) at different

- temperatures. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(3), 653–664. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000300021>
- Moradi, P., Saidi, M., & Najafabadi, A. T. (2021). Biodiesel production via esterification of oleic acid as a representative of free fatty acid using electrolysis technique as a novel approach: Non-catalytic and catalytic conversion. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 684–692. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.032>
- Morgan, N. K., & Choct, M. (2016). Cassava: Nutrient composition and nutritive value in poultry diets. *Animal Nutrition*, 2(4), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.08.010>
- Munjeri, K., Ziuku, S., Maganga, H., Siachingoma, B., & Ndlovu, S. (2016). On the potential of water hyacinth as a biomass briquette for heating applications. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 7(1), 37–43. <https://doi.org/10.1007/s40095-015-0195-8>
- Nakajima, K., Hara, M., Hu, B., Lu, Q., Wu, Y. ting, Zhang, Z. xi, Cui, M. shu, Liu, D. jia, Dong, C. qing, Yang, Y. ping, Aniya, V., Kumari, A., De, D., Vidya, D., Swapna, V., Thella, P. K., Satyavathi, B., Zhang, H., Meng, X., ... Xiao, R. (2012). Catalytic mechanism of sulfuric acid in cellulose pyrolysis: A combined experimental and computational investigation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2(April), 1296–1304.
- Ning, Y., & Niu, S. (2017). Preparation and catalytic performance in esterification of a bamboo-based heterogeneous acid catalyst with microwave assistance. *Energy Conversion and Management*, 153(September), 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.025>
- Nizar, U. K., Hidayatul, J., Sundari, R., Bahrizal, B., Amran, A., Putra, A., Latisma Dj, L., & Dewata, I. (2018). The Effect of Titanium Tetrahedral Coordination of Silica-Titania Catalyst on the Physical Properties of Biodiesel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 335(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/335/1/012036>
- Nogales-Delgado, S., Encinar, J. M., & González Cortés, Á. (2021). High oleic safflower oil as a feedstock for stable biodiesel and biolubricant production. *Industrial Crops and Products*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113701>
- Nordin, N., Hamzah, Z., Hashim, O., Kasim, F. H., & Abdullah, R. (2015). Kesan suhu dalam proses pengkalsinan kulit kerang. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 19(1), 65–70.
- Nugrahani, I., Manosa, E. Y., & Chintya, L. (2019). FTIR-derivative as a green method for simultaneous content determination of caffeine, paracetamol, and acetosal in a tablet compared to HPLC. *Vibrational Spectroscopy*, 104(July), 102941. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.102941>
- Pierson, H. O. (1993). Synthetic Carbon and Graphite: Carbonization and Graphitization. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes*, 70–86. <https://doi.org/10.1016/b978-0-8155-1339-1.50009-8>
- Pratas, M. J., Freitas, S. V.D., Oliveira, M. B., Monteiro, S. C., Lima, Á. S., & Coutinho, J. A. P. (2011). Biodiesel density: Experimental measurements and prediction models. *Energy and Fuels*, 25(5), 2333–2340. <https://doi.org/10.1021/ef2002124>
- Rahman, A., Putra, A., Sanjaya, H., Dewata, I., Dj, L., Sundari, R., Nizar, K.

- (2019). Catalytic Activity of Reused SiO₂-TiO₂ on Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in Various of Catalyst Loading. *International Journal of Research and Review*, 6(8), 86–93.
- Rasmulya, S. V. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Katalis Karbon Ampas Bengkuang Tersulfonasi untuk Produksi Biodiesel dari PFAD (Palm Fatty Acid Distillate) (Doctoral dissertation, Universitas Negeri Padang).
- Rosset, M., & Perez-Lopez, O. W. (2019). FTIR spectroscopy analysis for monitoring biodiesel production by heterogeneous catalyst. *Vibrational Spectroscopy*, 105(June), 102990. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.102990>
- Sangar, S. K., Lan, C. S., Razali, S. M., Farabi, M. S. A., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019a). Methyl ester production from palm fatty acid distillate (PFAD) using sulfonated cow dung-derived carbon-based solid acid catalyst. *Energy Conversion and Management*, 196, 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.073>
- Sangar, S. K., Lan, C. S., Razali, S. M., Farabi, M. S. A., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019b). Methyl ester production from palm fatty acid distillate (PFAD) using sulfonated cow dung-derived carbon-based solid acid catalyst. *Energy Conversion and Management*, 196, 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.073>
- Sayyed, S., Das, R. K., & Kulkarni, K. (2022). Experimental investigation for evaluating the performance and emission characteristics of DIC engine fueled with dual biodiesel-diesel blends of Jatropha, Karanja, Mahua, and Neem. *Energy*, 238, 121787. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121787>
- Seo, Y. H., Sung, M., Kim, B., Oh, Y. K., Kim, D. Y., & Han, J. I. (2015). Ferric chloride based downstream process for microalgae based biodiesel production. *Bioresource Technology*, 181, 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.004>
- Soltani, S., Khanian, N., Shean Yaw Choong, T., Asim, N., & Zhao, Y. (2021). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of sulfonated TiO₂-GO core-shell solid spheres as heterogeneous esterification mesoporous catalyst for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 238(April), 114165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114165>
- Soltani, S., Rashid, U., Yunus, R., & Taufiq-Yap, Y. H. (2016). Biodiesel production in the presence of sulfonated mesoporous ZnAl₂O₄ catalyst via esterification of palm fatty acid distillate (PFAD). *Fuel*, 178(March), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.059>
- Somnuk, K., Soysuwan, N., & Prateepchaikul, G. (2019). Continuous process for biodiesel production from palm fatty acid distillate (PFAD) using helical static mixers as reactors. *Renewable Energy*, 131, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.039>
- Sukarni, S., Zakaria, Y., Sumarli, S., Wulandari, R., Ayu Permanasari, A., & Suhermanto, M. (2019). Physical and Chemical Properties of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a Sustainable Biofuel Feedstock. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012070>
- Taipabu, M. I., Viswanathan, K., Wu, W., & Nagy, Z. K. (2021). Production of renewable fuels and chemicals from fats, oils, and grease (FOG) using

- homogeneous and heterogeneous catalysts: Design, validation, and optimization. *Chemical Engineering Journal*, 424(April), 130199. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130199>
- Tang, X., Niu, S., Zhao, S., Zhang, X., Li, X., Yu, H., Lu, C., & Han, K. (2019). Synthesis of sulfonated catalyst from bituminous coal to catalyze esterification for biodiesel production with promoted mechanism analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 77, 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.05.008>
- Tang, Z. E., Lim, S., Pang, Y. L., Shuit, S. H., & Ong, H. C. (2020). Utilisation of biomass wastes based activated carbon supported heterogeneous acid catalyst for biodiesel production. *Renewable Energy*, 158, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.119>
- Thushari, I., & Babel, S. (2018). Sustainable utilization of waste palm oil and sulfonated carbon catalyst derived from coconut meal residue for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 248, 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.106>
- Vanavanichkul, T., Le, G. T. T., Lawagon, C. P., Sano, N., Viriya-empikul, N., Faungnawakij, K., & Charinpanitkul, T. (2021). Step-by-step conversion of water hyacinth waste to carbon nanohorns by a combination of hydrothermal treatment, carbonization and arc in water processes. *Diamond and Related Materials*, 111(December 2020), 108222. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108222>
- Veny, H., Baroutian, S., Aroua, M. K., Hasan, M., Raman, A. A., & Sulaiman, N. M. N. (2009). Density of jatropha curcas seed oil and its methyl esters: Measurement and estimations. *International Journal of Thermophysics*, 30(2), 529–541. <https://doi.org/10.1007/s10765-009-0569-3>
- Vu, T. H. T., Nguyen, M. H., & Nguyen, M. D. (2019). Synthesis of acidic heterogeneous catalysts with high stability based on graphene oxide/activated carbon composites for the esterification of lactic acid. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7815697>
- Wanchai, K., & Soyjit, K. (2016). Esterification of Oleic Acid Using a Carbon-Based Solid Acid Catalyst. *The 5th Burapha University International Conference 2016*, 243–250.
- Wang, Y. T., Fang, Z., & Zhang, F. (2019). Esterification of oleic acid to biodiesel catalyzed by a highly acidic carbonaceous catalyst. *Catalysis Today*, 319, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.06.041>
- Zhang, Q., Weng, C., Huang, H., Achal, V., & Wang, D. (2016). Optimization of bioethanol production using whole plant of water hyacinth as substrate in simultaneous saccharification and fermentation process. *Frontiers in Microbiology*, 6(JAN), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01411>
- Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 456–480. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.063>
- Zulfia, N., & Aisyah. (2013). Status Trofik Perairan Rawa Pening Ditinjau Dari Kandungan unsur hara (No3 dan PO4) serta klorofil-a. *Bawal*, 5(3), 189–199.