

**PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM SINTESIS
KATALIS KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*)
UNTUK PRODUKSI BODIESEL DARI *PALM FATTY ACID*
*DISTILLATE***



WINI ANDRIANI
NIM/TM. 18036044/2018

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2022**

**PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM SINTESIS
KATALIS KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*)
UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID*
*DISTILLATE***

SKRIPSI

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



WINI ANDRIANI
NIM/TM. 18036044/2018

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

PERSETUJUAN SKRIPSI

PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM SINTESIS KATALIS KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*) UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID DISTILLATE*

Nama : Wini Andriani
NIM : 18036044
Program Studi : Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

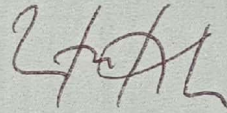
Padang, Juni 2022

Mengetahui:
Kepala Departemen



Budhi Oktavia, M.Si., Ph.D
NIP. 19721024 199803 1 001

Disetujui oleh:
Dosen Pembimbing



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

PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI

Nama : Wini Andriani
NIM : 18036044
Program Studi : Kimia (NK)
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM SINTESIS KATALIS KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*) UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID DISTILLATE*

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

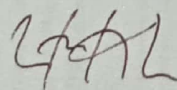
Padang, Juni 2022

Tim Penguji

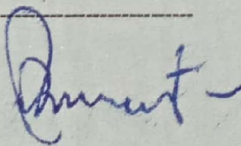
Nama

Tanda tangan

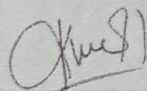
Ketua : Umar Kalmar Nizar, S.Si., M.Si., Ph.D



Anggota : Prof.Dr. Indang Dewata, M.Si



Anggota : Trisna Kumala Sari, M.Si., Ph.D



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini :

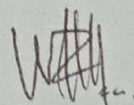
Nama : Wini Andriani
NIM : 18036044
Tempat/Tanggal lahir : Cumateh/ 04 Februari 2000
Program Studi : Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : **PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM
SINTESIS KATALIS KARBON KULIT UBI
KAYU (*Manihot Esculenta*) UNTUK PRODUKSI
BIODIESEL DARI *PALM FATTY ACID*
DISTILLATE**

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, Juni 2022
Yang menyatakan



Wini Andriani
NIM : 18036044

Pengaruh Waktu Sulfonasi Dalam Sintesis Katalis Karbon Kulit Ubi Kayu (*Manihot Esculenta*) Untuk Produksi Biodiesel Dari *Palm Fatty Acid Distillate*

Wini Andriani

ABSTRAK

Salah satu katalis yang dikembangkan untuk produksi biodiesel adalah katalis asam padat. Katalis ini disintesis dengan proses kalsinasi dengan memanfaatkan limbah alam yang berupa limbah organik kemudian dilanjutkan dengan proses sulfonasi pada variasi waktu yang ditentukan. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengetahui aktivitas katalitik katalis karbon tersulfonasi dalam produksi biodiesel dari PFAD melalui reaksi esterifikasi. Katalis dikarakterisasi dengan FTIR, XRD, dan penentuan situs asam, serta uji sifat fisikokimia biodiesel yang dihasilkan dengan uji densitas, viskositas, bilangan asam, dan persen konversi. Hasil analisis dari FTIR pada bilangan gelombang 1172 cm^{-1} dan 1037 cm^{-1} terdeteksi adanya pita vibrasi dari gugus sulfonat, disebabkan oleh peregangan dari gugus O-S-O. Hasil karakterisasi dengan XRD memberikan informasi adanya struktur amorf pada katalis disamping ada pula beberapa pita kristalin. Situs asam meningkat seiring dengan waktu sulfonasi karena senyawa organik yang terkandung dalam sampel berubah menjadi karbon polisiklik aromatik. Aktivitas katalitik katalis pada produksi biodiesel memperlihatkan bahwa katalis mampu menurunkan densitas, viskositas, bilangan asam dan % konversi PFAD menjadi biodiesel sebanding dengan situs asam.

Kata Kunci: Biodiesel, Waktu Sulfonasi, Katalis Karbon Tersulfonasi, Kulit Ubi Kayu, PFAD

Effect of Sulfonation Time in Synthesis of Cassava Peel (*Manihot Esculenta*) Carbon Catalyst for Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate

Wini Andriani

ABSTRACT

One of the catalysts developed for biodiesel production is solid acid catalyst. This catalyst is synthesized by a calcination process by utilizing natural waste in the form of organic waste, then followed by a sulfonation process at a specified time variation. This study aims to synthesize and determine the catalytic activity of sulfonated carbon catalysts in the production of biodiesel from PFAD through esterification reactions. The catalysts were characterized by FTIR, XRD, and acid site determination, and the physicochemical properties of biodiesel produced were tested by density, viscosity, acid number, and percent conversion tests. The results of the FTIR analysis at wave numbers 1172 cm⁻¹ and 1037 cm⁻¹ detected a vibrational band from the sulfonate group, caused by stretching of the O-S-O group. The results of characterization with XRD provide information on the presence of an amorphous structure on the catalyst in addition to several crystalline bands. The acid site increased with sulfonation time because the organic compounds contained in the sample turned into aromatic polycyclic carbon. The catalytic activity of the catalyst in biodiesel production showed that the catalyst was able to reduce the density, viscosity, acid number and % conversion of PFAD into biodiesel proportional to the acid site.

Keywords: Biodiesel, Sulfonation Time, Sulfonated Carbon Catalyst, cassava peel, PFAD

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan segenap kekuatan dan kesanggupan kepada penulis dalam menyelesaikan Skripsi yang berjudul ***“PENGARUH WAKTU SULFONASI DALAM SINTESIS KATALIS KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*) UNTUK PRODUKSI BIODIESEL DARI PALM FATTY ACID DISTILLATE”***. Shalawat beserta salam untuk nabi tauladan kita , Nabi Muhammad SAW yang telah memberi tauladan dalam setiap aktivitas yang kita lalui.

Proposal ini diajukan untuk memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Penulisan proposal penelitian ini tidak terlepas dari bantuan dan jasa baik informasi, penjelasan dorongan semangat, nasehat serta Do`a yang tidak ternilai harganya dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada:

1. Bapak Umar Kalmar Nizar, S.Si, M.Si, Ph.D selaku Penasehat Akademik dan Pembimbing Tugas Akhir.
2. Bapak Prof.Dr. Indang Dewata, M. Si dan Ibu Trisna Kumala Sari, M.Si., Ph.D sebagai Dosen Pembahas
3. Bapak Budhi Oktavia, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai Kepala Departemen Kimia dan ketua Program Studi Departemen Kimia FMIPA UNP.
4. 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 Departemen Kimia FMIPA UNP.
6. Orang tua penulis yang telah memberikan dorongan moral maupun materi serta Do`anya kepada penulis.
7. Teman-teman kimia angkatan 2018 yang telah membantu dalam pembuatan proposal penelitian ini.
8. Semua pihak terkait yang telah ikut berkontribusi dalam proposal ini.

Semoga rahmat dan kasih sayang Allah SWT selalu tercurah pada kita semua serta usaha dan kerja kita bernilai ibadah di hadapan Allah SWT, Aamiin Ya Rabbal `Alamin. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dari pembaca agar proposal ini bermanfaat dikemudian harinya.

Padang, Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Batasan Masalah.....	4
D. Rumusan Masalah	5
E. Tujuan Penelitian.....	5
F. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. <i>Palm Fatty Acid Destillate</i> (PFAD) sebagai Sumber Biodiesel.....	6
B. Katalis Karbon Tersulfonasi	9
C. Karbon Kulit Ubi Kayu Tersulfonasi.....	12
D. Karakterisasi Katalis Karbon Tersulfonasi	14
E. Analisis Sifat Biodiesel	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	19
A. Waktu dan Tempat Penelitian	19
B. Objek Penelitian	19
C. Variabel Penelitian	19
D. Alat dan Bahan.....	20
E. Prosedur Kerja.....	20
F. Analisis Data	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
A. Sifat Fisikokimia Katalis Karbon Kulit Ubi Kayu tersulfonasi	27
1. Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	27
2. Jumlah Situs Asam	29
3. Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	30

B. Uji Sifat Fisika Biodiesel	32
C. Aktivitas Katalitik <i>Recycle</i> Katalis Kulit Ubi Kayu Tersulfonasi	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	40
A. Kesimpulan	40
B. Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Penelitian tentang Biodiesel dari Esterifikasi PFAD	8
Tabel 2. Penelitian Penggunaan Limbah Organik sebagai Sumber Karbon Tersulfonasi.....	11
Tabel 3. Penelitian Karbon dari Kulit Ubi Kayu	13
Tabel 4. Persyaratan Standar dan Mutu Biodiesel SNI berbahan baku minyak nabati dan ASM D6751-02	17
Tabel 5. Penamaan Sampel	21
Tabel 6. Uji sifat biodiesel menggunakan katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Reaksi Umum Transesterifikasi	7
Gambar 2. Reaksi Umum Esterifikasi.....	8
Gambar 3. Kulit Ubi Kayu	12
Gambar 4. Spektra FTIR DP (a), DPSF (b), dan katalis DPSF-SO ₃ H	15
Gambar 5. Pola XRD DP (a), DPSF (b), dan katalis DPSF-SO ₃ H	16
Gambar 6. Spektra FTIR Karbon Sebelum dan Sesudah Sulfonasi.....	28
Gambar 7. Situs Aktif Karbon Kulit Ubi Kayu Tersulfonasi.....	29
Gambar 8. Pola XRD dari (a) K-KUK 450C dan (b) KT 4	31
Gambar 9. Densitas Biodiesel	33
Gambar 10. Laju Alir Biodiesel	33
Gambar 11. Bilangan Asam Biodiesel	34
Gambar 12. Persen Konversi Biodiesel	35
Gambar 13. Situs Asam <i>Recycle</i>	36
Gambar 14. (a) Densitas Biodiesel <i>Recycle</i> , (b) Laju Alir Biodiesel <i>Recycle</i> , Bilangan Asam Biodiesel <i>Recycle</i>	38
Gambar 15. % Konversi Biodiesel <i>Recycle</i>	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram Alir Penelitian.....	46
Lampiran 2. Perhitungan Bilangan Penyabunan dan Mr	52
Lampiran 3. Data dan Perhitungan Situs Asam Karbon Kulit Ubi Kayu Sebelum dan Sesudah Sulfonasi	52
Lampiran 4. Perhitungan Bahan Baku Produksi Biodiesel	53
Lampiran 5. Data Dan Perhitungan Hasi Uji Sifat Fisika Biodiesel.....	54
Lampiran 6. Persen Konversi.....	56
Lampiran 7. Data dan Penentuan Situs Asam Katalis Recycle.....	57
Lampiran 8. Data dan Perhitungan Hasil Uji Sifat Fisika Biodiesel Recycle.....	58
Lampiran 9. Persen Konversi Biodiesel Menggunakan Katalis Recycle.....	60
Lampiran 10. Data Penelitian.....	61
Lampiran 11. Dokumentasi Kegiatan	66

BAB 1 PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bahan bakar fosil merupakan sumber energi utama bagi masyarakat dunia saat ini. Namun, penggunaan bahan bakar fosil melepaskan sejumlah besar emisi karbon ke atmosfer, hal ini menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim yang tidak normal (Quah et al., 2019). Selain itu, tingginya penggunaan bahan bakar fosil menyebabkan ketersediannya menipis. Oleh karena itu, dibutuhkan sumber energi terbarukan yang dapat mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial dikembangkan untuk wilayah Indonesia adalah biodiesel (Sahar et al., 2018).

Biodiesel merupakan bahan bakar yang dapat diproduksi dari reaksi esterifikasi asam lemak bebas dan transesterifikasi trigliserida dengan alkohol rantai pendek (Roberto et al., 2020). Bahan bakar ini berpotensi menggantikan bahan bakar diesel dengan kemampuan terbarukan, ramah lingkungan dan emisi CO_2 , SO_2 dan hidrokarbon yang diminimalkan dibandingkan dengan diesel berbasis minyak bumi (Ali et al., 2018).

Bahan baku untuk pembuatan biodiesel dapat berupa minyak nabati yang dapat dikonsumsi seperti Minyak sawit, minyak kelapa, dan minyak jagung (Q. Zhang et al., 2017). Akan tetapi harga minyak nabati yang tinggi serta terdapat persaingan dalam penggunaan untuk makanan dan bahan bakar, merupakan kelemahan utama menggunakan minyak nabati. Sebagai alternatif minyak yang tidak dapat dikonsumsi seperti minyak jelantah, limbah minyak jarak dan *Palm*

Fatty Acid Destilate (PFAD) menjadi solusi untuk produksi biodiesel karena berasal dari limbah dan harganya yang relatif murah (Abdul Kapor et al., 2017).

Limbah PFAD merupakan produk sampingan dari proses pemurnian minyak sawit mentah (Yeong et al., 2021) yang mengandung fraksi asam lemak bebas yang tinggi sekitar 85% (Ibrahim et al., 2019). Selain itu PFAD juga mengandung trigliserida sekitar 14,4% dengan tambahan vitamin E, squalene, sterol dan zat volatil lainnya (Abdul Kapor et al., 2017). Konversi PFAD menjadi biodiesel berlangsung melalui reaksi esterifikasi karena tingginya kandungan asam lemak bebas (FFA). Reaksi esterifikasi merupakan reaksi kesetimbangan yang berlangsung lambat sehingga diperlukan katalis untuk mempercepat laju reaksi (Kumar et al., 2019). Katalis yang sesuai untuk bahan baku dengan FFA tinggi adalah katalis asam padat. Salah satu katalis asam padat yang relatif mudah disintesis adalah katalis karbon tersulfonasi.

Katalis karbon tersulfonasi dapat disintesis melalui proses kalsinasi bahan-bahan limbah organik yang mengandung selulosa, glukosa dan pati, kemudian dilanjutkan dengan proses sulfonasi. Berbagai limbah bahan alam telah digunakan diantaranya karbohidrat, kotoran sapi, kulit kakao, biji jarak dan bambu. Sulfonasi merupakan proses substitusi gugus sulfonat HSO_3 pada lembaran karbon polisiklik aromatik. Proses sulfonasi dapat dilakukan dengan merendam karbon dalam H_2SO_4 pekat, produksi biodiesel dengan kandungan FFA tinggi sangat efektif dilakukan dengan proses sulfonasi (M. Zhang et al., 2016).

Kulit ubi kayu (*Manihot Esculenta*) merupakan salah satu bahan pangan yang sangat penting di daerah tropis dan secara luas dibudidayakan di Indonesia sebagai salah satu tanaman agro-industri multiguna. Katalis dari biomassa seperti

kulit ubi kayu dapat mengurangi biaya produksi biodiesel dan dapat disintesis dengan murah. Selain itu, juga dapat memecahkan permasalahan lingkungan dan mengurangi biaya yang terkait dengan pembuangannya. Artinya juga menjadi nilai tambah bagi bahan terbarukan ini (Abdullah et al., 2017). Komposisi kimia dari kulit ubi kayu adalah karbohidrat sekitar 70%, 6% protein, 5% serat, 3% lemak, dan 7% abu dengan jumlah pati yang terdapat pada kulit ubi kayu sangat berpotensi dijadikan karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel (Adekunle et al., 2016).

Pada grup riset ini telah disintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi yang berasal dari kulit ubi kayu. Katalis yang disintesis dengan variasi suhu kalsinasi telah diaplikasikan transesterifikasi minyak jelantah (Naylen, 2018) dan esterifikasi PFAD (Iqbal, 2021). Katalis yang memiliki aktivitas katalitik optimum diaplikasikan pada parameter reaksi esterifikasi PFAD (Miranda, 2021). Pada saat COVID-19 (Naka, 2020) melakukan variasi waktu sulfonasi namun penelitian belum selesai dan diganti review artikel. Pada penelitian ini dilakukan pengaruh variasi waktu sulfonasi dalam sintesis katalis karbon kulit ubi kayu untuk produksi biodiesel dari PFAD. Waktu sulfonasi yang berbeda, digunakan untuk mempelajari hubungan antar waktu sulfonasi dan aktivitas katalitik katalis. Katalis dipreparasi dengan metode kalsinasi pada suhu 450°C untuk menghasilkan karbon dan disulfonasi dengan H_2SO_4 . Katalis dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR, XRD dan situs asam, serta diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD, biodiesel yang dihasilkan dilakukan uji densitas, viskositas, bilangan asam serta persen konversi.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Penggunaan bahan bakar fosil yang meningkat dan permasalahan yang terjadi menimbulkan upaya untuk mencari sumber energi alternatif yang terbarukan.
2. Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat diproduksi dari limbah organik yang mengandung trigliserida atau asam lemak bebas.
3. Kandungan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi dalam *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan baku dalam produksi biodiesel, dengan bantuan katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi.
4. Kulit ubi kayu mengandung selulosa dan lignin yang berpotensi digunakan sebagai katalis karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi disintesis berdasarkan penelitian sebelumnya dengan suhu kalsinasi 450°C selama 1 jam dilanjutkan proses sulfonasi dengan variasi waktu dengan merefluks karbon dengan H_2SO_4 pada suhu 160°C.
2. Karakterisasi karbon dan katalis kulit ubi kayu dilakukan dengan menggunakan instrumen FTIR, XRD, dan penentuan situs asam.
3. Aplikasi katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi melalui reaksi esterifikasi untuk produksi biodiesel dari PFAD dan metanol.

4. Pengujian sifat-sifat biodiesel dibatasi pada uji densitas, viskositas, bilangan asam dan persen konversi.

D. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada Penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana sifat fisikokimia dari katalis karbon kulit ubi kayu yang disintesis berdasarkan variasi waktu sulfonasi dengan metode kalsinasi dan sulfonasi menggunakan H_2SO_4 ?
2. Bagaimana aktivitas katalitik katalis kulit ubi kayu tersulfonasi dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dari Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari sifat fisikokimia dari katalis karbon kulit ubi kayu yang disintesis berdasarkan variasi waktu sulfonasi dengan metode kalsinasi dan sulfonasi menggunakan H_2SO_4 .
2. Mempelajari aktivitas katalitik katalis kulit ubi kayu tersulfonasi dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari Penelitian ini yaitu:

1. Memberikan informasi mengenai sifat fisikokimia dari katalis karbon kulit ubi kayu yang disintesis berdasarkan variasi waktu sulfonasi dengan metode kalsinasi dan sulfonasi menggunakan H_2SO_4 .
2. Memberikan informasi mengenai aktivitas katalitik katalis kulit ubi kayu tersulfonasi dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. *Palm Fatty Acid Destillate (PFAD)* sebagai Sumber Biodiesel

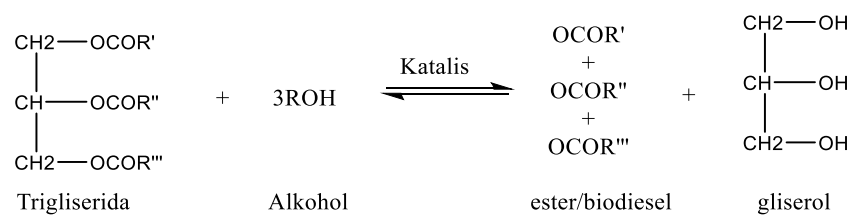
Metil Ester Asam Lemak (FAME) disebut juga dengan biodiesel yang dihasilkan dari sumber alami terbarukan seperti minyak nabati dan minyak hewani (Xu et al., 2020). Biodiesel dianggap sebagai “energi hijau” yang khas dan sumber energi alternatif dari sumber terbarukan dan ramah lingkungan dapat terurai secara hayati, tidak beracun, dan pembakaran yang cenderung bersih (Zhou et al., 2019)(Q. Zhang et al., 2020). Selama pembakaran, dibandingkan dengan solar jumlah CO_2 dan H_2O pada biodiesel dihasilkan lebih rendah, sehingga penggunaan biodiesel dapat mengendalikan pencemaran lingkungan (Quah et al., 2019)(Ballotin et al., 2020).

Minyak sawit, minyak kelapa, bunga matahari, lobak dan kanola adalah beberapa jenis minyak nabati yang digunakan sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel (Q. Zhang et al., 2017). Akan tetapi harga minyak nabati yang tinggi, terdapat persaingan dalam penggunaan untuk makanan dan bahan bakar, merupakan kelemahan utama menggunakan minyak nabati. Sebagai alternatif minyak yang tidak dapat dikonsumsi seperti lemak hewani, minyak jelantah dan *Palm Fatty Acid Destillate (PFAD)* menjadi solusi untuk produksi biodiesel karena harganya yang relatif murah. Diantara sumber minyak tersebut PFAD merupakan salah satu sumber minyak yang potensial digunakan untuk produksi biodiesel (Abdul Kapor et al., 2017).

Bahan baku PFAD merupakan produk sampingan dari proses pemurnian minyak sawit mentah (Yeong et al., 2021). Saat pemurnian minyak sawit mentah, produk sampingan yang pasti dihasilkan adalah PFAD dan tidak dapat dimakan

yang diperkirakan $2.5 \times 10^6 t$ dihasilkan produk global tahunan, dimana kontributor utama adalah Malaysia (29%) dan Indonesia (59%) (Xu et al., 2020). Limbah PFAD mengandung fraksi asam lemak bebas yang tinggi sekitar 85% (Ibrahim et al., 2019), trigliserida sekitar 14,4% dengan tambahan vitamin E, squalene, sterol dan zat volatil lainnya (Abdul Kapor et al., 2017) sehingga PFAD menjadi salah satu sumber minyak yang menjanjikan untuk produksi biodiesel.

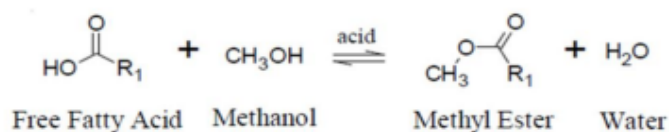
Biodiesel dapat diproduksi dari reaksi esterifikasi asam lemak bebas dan transesterifikasi trigliserida dengan alkohol rantai pendek seperti metanol (Roberto et al., 2020). Transesterifikasi menghasilkan monoester, dalam reaksi kimia antara trigliserida dan alkohol dengan adanya katalis, monoester dan gliserol dihasilkan dari molekul trigliserida rantai panjang dan bercabang (Zhao et al., 2019). Reaksi ini terdiri dari tiga reaksi reversibel berurutan, dimana trigliserida diubah menjadi digliserida dan drigliserida menjadi monogliserida. Gliserida dikonversi menjadi gliserol dan menghasilkan satu molekul ester pada setiap tahap reaksi (Folayan & Anawe, 2019).



Gambar 1. Reaksi Umum Transesterifikasi(Folayan & Anawe, 2019)

Reaksi esterifikasi menghasilkan biodiesel, dimana dalam reaksi kimia antara asam lemak bebas dengan bantuan alkohol rantai pendek serta katalis (Roman et al., 2019). Reaksi esterifikasi dapat mensintesis asam lemak bebas dengan bantuan katalis. Secara umum produksi biodiesel membutuhkan enzim

atau katalis baik katalis homogen ataupun katalis heterogen untuk mempercepat laju reaksi (Kumar et al., 2019).



Gambar 2. Reaksi Umum Esterifikasi (Kumar et al., 2019)

Konversi PFAD menjadi biodiesel berlangsung melalui reaksi esterifikasi karena tingginya kandungan asam lemak bebas (FFA). Berikut beberapa penelitian yang telah dilaporkan tentang biodiesel dari PFAD yang tertera pada tabel 1.

Tabel 1. Penelitian tentang Biodiesel dari Esterifikasi PFAD

No	Katalis yang digunakan	Metode esterifikasi	Hasil Penelitian	Reference
1.	Karbon Cangkang sawit dan bambu	5 gram PFAD, katalis 4%, rasio mol: PFAD 15: 1, suhu reaksi 65°C dan waktu reaksi 1 jam	Katalis karbon cangkang sawit berhasil menghasilkan rendemen FAME 95% dan konversi FFA 97%, sedangkan katalis karbon bambu menghasilkan rendemen FAME dan FFA yang sedikit lebih rendah, masing-masing 94,2% dan 95,8%.	(Farabi et al., 2019)
2.	Karbon kotoran sapi	10 gram PFAD, katalis 4%, rasio molar metanol 18: 1 terhadap PFAD, dan suhu reaksi 90°C dalam waktu 1 jam	Esterifikasi PFAD dengan menggunakan katalis karbon tersulfonasi dari kotoran sapi didapatkan hasil 96,5% konversi FFA dan 93,2% hasil FAME.	(Kumar et al., 2019)
3.	Katalis asam padat dari (NiSO_4) / SiO_2 dari abu sekam padi	3 gram PFAD katalis 15%, rasio mol:PFAD 5: 1, dan suhu reaksi 110°C waktu reaksi 7 jam.	Menghasilkan konversi metil ester tertinggi 93% .	(Hajar et al., 2021)

B. Katalis Karbon Tersulfonasi

Katalis merupakan senyawa yang mampu mempercepat reaksi dengan menurunkan energi aktivasi, dan tanpa mengalami perubahan diakhir reaksi (Dumbre & Choudhary, 2020). Ada tiga jenis katalis dalam pembuatan biodiesel yaitu, katalis asam, katalis basa dan katalis enzim. Katalis enzim dalam pembuatan biodiesel kurang diminati karena memerlukan waktu reaksi yang lama dan biaya relatif mahal (Talha & Sulaiman, 2016). Berdasarkan fasanya katalis terbagi atas dua yaitu katalis homogen dan katalis heterogen.

Katalis homogen

Katalis homogen terdiri dari katalis asam cair dan katalis basa cair (Talha & Sulaiman, 2017). Katalis basa homogen yang paling umum digunakan, seperti kalium hidroksida (KOH) dan natrium hidroksida (NaOH). Ketidak efisien dalam menangani bahan baku dengan kandungan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi adalah kelemahan dari katalis basa homogen sehingga menyebabkan pembentukan sabun yang tidak diinginkan. Oleh sebab itu, dapat dikerjakan dengan menggunakan katalis asam homogen seperti H_2SO_4 dan HCl yang tidak sensitif terhadap FFA. Akan tetapi, katalis homogen selalu dihubungkan dengan kesulitan teknis seperti pemisahan katalis dari biodiesel. Korosif terhadap peralatan, tidak dapat digunakan kembali dan biaya relatif mahal (Dehkhoda & Ellis, 2013)(H. Zhang et al., 2017). Oleh sebab itu, katalis heterogen diusulkan untuk mengatasi masalah yang terjadi.

Katalis Heterogen

Katalis heterogen terdiri dari katalis asam padat dan katalis basa padat (Talha & Sulaiman, 2017). Katalis heterogen berbeda fasa dengan produk yang

dihasilkan sehingga lebih mudah dipisahkan, bisa digunakan kembali dan relatif lebih murah (Sangar et al., 2019).

Penggunaan katalis heterogen asam atau basa tergantung dari bahan baku minyak yang digunakan dalam pembuatan biodiesel, jika minyak yang mengandung trigliserida seperti minyak nabati maka diperlukan katalis basa. Minyak yang menyimpan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi maka dibutuhkan katalis asam untuk produksi biodiesel (Sundari et al., 2019).

Katalis heterogen yang sedang berkembang saat ini adalah katalis karbon tersulfonasi, dapat disintesis dari material limbah organik. Para peneliti terinspirasi dari konsep kimia hijau, untuk mengembangkan katalis berbasis karbon dari limbah biomassa seperti tandan buah kosong kelapa sawit, biji jarak dan kotoran sapi (Dhawane et al., 2018).

Umumnya ada dua tahap untuk sintesis katalis asam padat dari biomassa yaitu, kalsinasi biomassa membentuk struktur karbon berpori yang dilanjutkan dengan sulfonasi untuk memperoleh hasil katalis asam padat. Kalsinasi adalah proses penguraian molekul organik atau suatu bahan pada suhu tinggi, proses ini membuat senyawa lain dan materi volatile terurai kemudian terbentuk senyawa aromatik siklik (Bureros et al., 2019) . Sulfonasi pada kerangka karbon senyawa aromatik siklik adalah proses substitusi gugus sulfonat (Lokman et al., 2015). Proses sulfonasi dengan H_2SO_4 dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti waktu sulfonasi yang berbeda, digunakan untuk mempelajari hubungan antar waktu sulfonasi dan aktivitas katalis (Kumar et al., 2019). Pada tabel 2 terdapat beberapa limbah organik yang telah dilaporkan sebagai sumber karbon tersulfonasi.

Tabel 2. Penelitian Penggunaan Limbah Organik sebagai Sumber Karbon

Tersulfonasi

No	Sumber Karbon	Metode Sintesis	Aplikasi	Hasil	Reference
1.	Karbon Kotoran Sapi	- Kalsinasi suhu 500°C selama 2 jam - Sulfonasi dengan H_2SO_4 suhu reaksi 90°C dengan waktu reaksi 1 jam,	Katalis tersulfonasi untuk produksi biodiesel antara PFAD dan metanol	Esterifikasi PFAD menghasilkan konversi FFA 96,5% dan FAME 93,2%.	(Kumar et al., 2019)
2.	Kulit kakao	- Kalsinasi suhu 350°C selama 1 jam - Sulfonasi dengan H_2SO_4 selama 4, 6, 8 jam pada suhu (80, 100, 120°C)	Katalis tersulfonasi untuk produksi biodiesel antara asam oleat dan metanol	Menghasilkan konversi FFA tertinggi ~94%.	(Bureros et al., 2019)
3.	<i>Undaria pinnatifida</i>	- Karbonisasi pirolisis pada suhu 1000°C selama 1 jam. - Karbonisasi hidrotermal selama 3 jam pada suhu 200°C - Sulfonasi dengan asam toluenasulfonat monohidrat pada suhu 85°C selama 24 jam	Katalis asam padat dalam reaksi esterifikasi asam asetat dan etanol	<i>Undaria pinnatifida</i> menunjukkan aktivitas katalitik paling tinggi 85% dalam reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol.	(Balasubramaniam et al., 2021)
4.	Karbon Biji jarak pagar	- Kalsinasi suhu 30°C hingga 360°C selama 4 jam - Sulfonasi dengan H_2SO_4 selama 5 jam pada suhu 90°C	Katalis asam padat pada produksi biodiesel	Menghasilkan FAME yang tinggi dengan konversi 99,13%.	(Mardhiah et al., 2017)

C. Karbon Kulit Ubi Kayu Tersulfonasi

Kulit ubi kayu (*Manihot Esculenta*) merupakan salah satu bahan pangan yang sangat penting di daerah tropis dan secara luas dibudidayakan di Indonesia sebagai salah satu tanaman agro-industri multiguna.



Gambar 3. Kulit Ubi Kayu

Kulit ubi kayu yang dijadikan karbon adalah kulit ubi kayu yang berwarna putih bagian dalam, memiliki komposisi karbohidrat sekitar 70%, 6% protein, 5% serat, 3% lemak, dan 7% abu dengan jumlah pati yang terdapat pada kulit ubi kayu sangat berpotensi dijadikan karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel (Adekunle et al., 2016). Selain dari kandungan senyawa kulit ubi kayu yang berpotensi sebagai katalis tersulfonasi, juga memiliki aktivitas dan seleksinya yang tinggi selama reaksi, katalis dari biomassa seperti kulit ubi kayu dapat mengurangi biaya produksi biodiesel dan dapat disintesis dengan murah. Selain itu, juga dapat memecahkan permasalahan lingkungan dan mengurangi biaya yang terkait dengan pembuangannya. Itu artinya juga menjadi nilai tambah bagi bahan terbarukan ini (Abdullah et al., 2017).

Beberapa penelitian yang telah dilaporkan mengenai sintesis karbon dari kulit ubi kayu yang terlihat pada tabel 3.

Tabel 3. Penelitian Karbon dari Kulit Ubi Kayu

No	Aktivator	Metode Sintesis	Aplikasi	Reference
1.	KOH, KHCO ₃ , KCl- Na ₂ S ₂ O ₃	• Metode kalsinasi selama 1 jam pada suhu 750°C dibawah aliran N₂ pada masing-masing aktivator • Dikarakterisasi dengan XRD, SEM dan BET	Digunakan sebagai aplikasi bahan elektroda untuk <i>supercapacitors</i>	(Amakoro mo et al., 2021)
2.	H ₂ O ₂	• Metode esterifikasi antara gugus hidroksil dari pati dengan gugus hidroksil dari bahan lignoselulosa. • Dikarakterisasi dengan FTIR, XRD dan NMR	Sebagai material komposit dari matriks polifenol yang terkopolimerisasi dengan perlakuan pati kulit singkong	(Warui et al., 2020)
3.	H ₂ SO ₄	• Metode kalsinasi selama 1 jam dengan variasi suhu kalsinasi 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, dan 450°C. • Selanjutnya sulfonasi karbon dengan H₂SO₄ pekat pada suhu 160°C selama 8 jam. • Dikarakterisasi dengan FTIR, XRD, dan XRF	Sebagai katalis karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel dari Minyak Jelantah	(Naylen, 2018)
4.	H ₂ SO ₄	• Metode kalsinasi selama 1 jam dengan variasi suhu kalsinasi 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, dan 450°C. • Selanjutnya sulfonasi karbon dengan H₂SO₄ pekat pada suhu 160°C	Sebagai katalis karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel dari PFAD	(Iqbal, 2021)

		selama 4 jam.		
		• Dikarakterisasi dengan FTIR dan XRD		
5.	H ₂ SO ₄	• Metode kalsinasi selama 1 jam dengan suhu kalsinasi 450°C. • Selanjutnya sulfonasi karbon dengan H₂SO₄ pekat pada suhu 150°C selama 4 jam. • Dikarakterisasi dengan FTIR dan XRD	Sebagai katalis karbon tersulfonasi untuk produksi biodiesel dari esterifikasi PFAD	(Miranda, 2021)

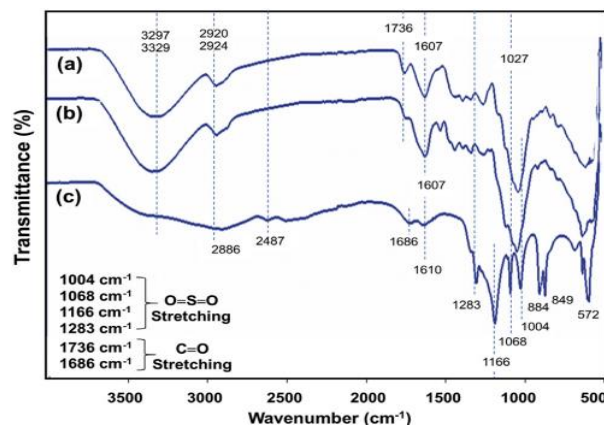
D. Karakterisasi Katalis Karbon Tersulfonasi

Karakterisasi katalis karbon tersulfonasi meliputi karakterisasi *local structure* (struktur lokal) dan *bulk structure* (strukture keseluruhan). Karakterisasi struktur lokal menggunakan instrumen Uv-Vis, FTIR, serta karakterisasi struktur keseluruhan menggunakan instrumen XRD, TEM, SEM dan situs asam. Dalam penelitian ini karakterisasi katalis karbon tersulfonasi hanya menggunakan FTIR, XRD dan situs asam, hal ini dikarenakan keterbatasan dana dan waktu dalam penelitian.

1. FTIR (*Fourier Transform InfraRed*)

FTIR digunakan untuk membedakan keasaman Bronsted dan Lewis menggunakan senyawa gas, seperti NH₃ dan piridin dengan memperoleh jumlah asam, dan merupakan suatu metode kuantitatif (Fan et al., 2019). Spektroskopi IR pada suatu molekul didasarkan pada getaran atom-atom, yang dihasilkan spektrum IR dengan mengirimkan sinar IR melalui sampel dan menentukan gugus-gugus

yang diserap dari berkas ini pada energi tertentu. Untuk mengeluarkan elektron, cahaya IR biasanya tidak memiliki energi yang cukup tetapi memang dapat menyebabkan eksitasi getaran dari atom dan gugus yang terikat secara kovalen (Yurdakal et al., 2019).

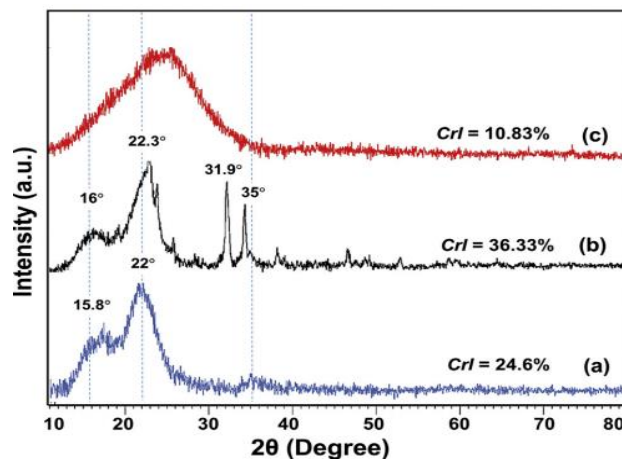


Gambar 4. Spektra FTIR DP (a), DPSF (b), dan katalis DPSF-SO₃H (c) (Leesing et al., 2021)

Gambar 4 merupakan spektrum FTIR dari karbon kulit durian (DP), hidrolisis kulit durian (DPSF) dan katalis karbon tersulfonasi kulit durian (DPSF-SO₃H). Puncak pada 1607 – 1610 cm⁻¹, 1369 cm⁻¹ dan 1420 cm⁻¹ yang dikaitkan dengan regangan $C = C$ dari struktur poliaromatik. Puncak pada katalis DPSF-SO₃H 1068 cm⁻¹ dan 1004 cm⁻¹ dikaitkan dengan regangan asimetris $O = S = O$, menunjukkan bahwa -SO₃H berhasil melekat pada permukaan katalis. Puncak pada katalis DPSF-SO₃H 849 – 884 cm⁻¹ merupakan indikasi adanya gugus -OH yang berikatan hidrogen dengan -SO₃H. Puncak regangan $-C = O$ dari gugus -COOH diamati masing-masing pada 1736 cm⁻¹, 1720 cm⁻¹ dan 1686 cm⁻¹ pada katalis DP, DPSF, dan katalis DPSF-SO₃H (Leesing et al., 2021).

2. XRD (X-Ray Diffraction)

Kristalin sampel ditentukan dengan bantuan analisis XRD. XRD digunakan untuk analisis struktur kristal dan ukuran partikel dari karbon kulit ubi kayu tersulfonasi. Interaksi antara berkas sinar-X dan bidang atom menghasilkan transmisi sebagian berkas, sisanya diserap, dibiaskan, dihamburkan, dan didifraksikan oleh sampel.



Gambar 5. Pola XRD DP (a), DPSF (b), dan katalis DPSF-SO₃H (Leesing et al., 2021)

Gambar 5 menunjukkan pola XRD untuk struktur kristal katalis DP, DPSF dan DPSF-SO₃H. Indeks kristalin DP meningkat dari 24,60% menjadi 36,33%, untuk DPSF setelah hidrolisis H₂SO₄ encer, menurun dari 36,33% (DPSF) menjadi 10,83% (DPSF-SO₃H) setelah proses sulfonasi dengan H₂SO₄ pekat. Indeks kristalin katalis DPSF-SO₃H lebih rendah dibandingkan dengan DPSF yang menunjukkan adanya peningkatan struktur karbon amorf. DP menunjukkan indeks kristalin yang rendah karena memiliki kandungan hemiselulosa dan lignin yang tinggi yang bersifat amorf. Puncak XRD DP dan DPSF memperlihatkan puncak kuat pada sekitar $2\theta = 22^\circ$ dan $2\theta = 15 - 17^\circ$ dikaitkan dengan struktur kristal bahan karbon, sedangkan pada sekitar $2\theta = 35^\circ$ dikaitkan dengan refleksi

bidang kristal dari selulosa. Setelah sulfonasi DPSF ditemukan tidak adanya puncak pada $2\theta = 15 - 17^\circ$ dan $2\theta = 35^\circ$ diamati pada katalis DPSF-SO₃H, hal ini kemungkinan karena DSF mengandung hemiselulosa dan selulosa yang terdegradasi selama proses sulfonasi (Leesing et al., 2021) .

3. Penentuan Jumlah Situs Asam

Berdasarkan kandungan sulfur pada katalis dihasilkan gugus sulfonat ($-SO_3H$) . Banyaknya gugus sulfonat yang melekat pada katalis menentukan aktivitas katalitik dari katalis, kandungan gugus sulfonat diperkirakan dari pertukaran H^+ pada katalis dan Na^+ dalam larutan NaCl dan NaOH (Wang, 2016).

E. Analisis Sifat Biodiesel

Menentukan kualitas dari biodiesel yang dihasilkan diperlukan standar untuk menganalisa sifat biodiesel. Standar Nasional Indonesia (SNI) 7182:2015 adalah salah satu standar yang digunakan. Dalam menganalisa sifat biodiesel pada penelitian ini, hanya melakukan beberapa pengujian sederhana yaitu uji densitas, viskositas, dan bilangan asam.

Tabel 4. Persyaratan Standar dan Mutu Biodiesel SNI berbahan baku minyak nabati dan ASM D6751-02

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 – 0,6 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	Maks. 0,8 mg-KOH/g
8	Kadar ester metil	96,5 % - massa, min	-

1. Densitas

Sifat biodiesel yang digunakan untuk mengetahui perkiraan jumlah bahan bakar yang disalurkan oleh sistem injeksi salah satunya adalah densitas, fungsinya untuk pembakaran bahan bakar yang tepat. Densitas merupakan rasio massa per satuan volume dalam liter. Apabila densitas biodiesel kualitasnya dibawah ketentuan sebaiknya tidak digunakan untuk mesin diesel karena akan menyebabkan kerusakan pada mesin dan meningkatkan emisi, sedangkan densitas biodiesel kualitasnya di atas ketentuan maka akan terjadi reaksi tidak sempurna pada konversi minyak nabati.

2. Viskositas

Pengukuran hambatan aliran suatu cairan disebut dengan viskositas. Pada suhu tertentu perilaku aliran suatu bahan baku dan sampel biodiesel diselidiki dan diukur dengan viskositas (Ishola et al., 2020)

3. Bilangan Asam

Jumlah asam lemak bebas yang ada dalam biodiesel dinyatakan oleh bilangan asam. Satuan bilangan asam dinyatakan oleh mg KOH/g. Masalah korosi dalam penggunaan bahan bakar pada mesin disebabkan tingginya bilangan asam pada mesin. Tingginya bilangan asam ditentukan oleh tingginya jumlah asam lemak dan dari bilangan asam dapat ditentukan persen konversi biodiesel yang dihasilkan dalam produksi biodiesel.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Katalis karbon tersulfonasi dapat disintesis dari kulit ubi kayu dengan menggunakan H_2SO_4 p.a melalui variasi waktu sulfonasi 1-5 jam. Sifat fisikokimia dari katalis karbon kulit ubi kayu dikarakterisasi dengan FTIR, XRD dan penentuan situs asam. Hasil analisis FTIR menunjukkan pita serapan pada bilangan gelombang 1172 cm^{-1} dan 1037 cm^{-1} yang merupakan gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ pada karbon tersulfonasi. Pola difraktogram yang dihasilkan melalui uji XRD terdapat puncak melebar pada $2\theta = 20^\circ - 30^\circ$ yang menunjukkan struktur amorf pada katalis yang dihasilkan. Sampel KT 4 menunjukkan katalis dengan jumlah situs asam paling tinggi.
2. Katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi digunakan dalam produksi biodiesel, dimana sifat-sifat biodiesel yang dihasilkan dari katalis karbon tersulfonasi menunjukkan aktivitas katalitik katalis. Hal tersebut didapatkan dari hasil persentase konversi katalis yang lebih tinggi yaitu mampu mengkonversi PFAD menjadi 72.23%. Dimana densitas, viskositas dan bilangan asam dari biodiesel mengalami penurunan dibandingkan PFAD. Selain itu konversi PFAD menjadi biodiesel menggunakan katalis *recycle* didapatkan persen konversi tertinggi yaitu pada (R) KT 4 sebesar 68.48 %.

B. Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan aliran nitrogen agar menghasilkan katalis lebih baik. Selain itu, pada karakterisasi karbon dan katalis dapat menggunakan instrumen SEM, dan TPD- NH_3 , sedangkan pada karakterisasi pada biodiesel menggunakan GC-MS

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Kapor, N. Z., Maniam, G. P., Rahim, M. H. A., & Yusoff, M. M. (2017). Palm fatty acid distillate as a potential source for biodiesel production-a review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.163>
- Abdullah, S. H. Y. S., Hanapi, N. H. M., Azid, A., Umar, R., Juahir, H., Khatoon, H., & Endut, A. (2017). A review of biomass-derived heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 70). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.008>
- Adekunle, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2016). Lignocellulosic bioethanol: A review and design conceptualization study of production from cassava peels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 518–530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.064>
- Ali, B., Yusup, S., Quitain, A. T., Alnarabiji, M. S., Kamil, R. N. M., & Kida, T. (2018). Synthesis of novel graphene oxide/bentonite bi-functional heterogeneous catalyst for one-pot esterification and transesterification reactions. *Energy Conversion and Management*, 171(June), 1801–1812. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.082>
- Amakoromo, T. E., Abumere, O. E., Amusan, J. A., Anye, V., & Bello, A. (2021). Porous carbon from Manihot Esculenta (cassava) peels waste for charge storage applications. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(February), 100098. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100098>
- Balasubramaniam, S., Ninomiya, S., Sasaki, M., Quitain, A., Kida, T., & Saldaña, M. D. A. (2021). Carbon-based solid acid catalyst derived from Undaria pinnatifida and its application in esterification. *Algal Research*, 55(March). <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102272>
- Ballotin, F. C., Da Silva, M. J., Lago, R. M., & De Carvalho Teixeira, A. P. (2020). Solid acid catalysts based on sulfonated carbon nanostructures embedded in an amorphous matrix produced from bio-oil: Esterification of oleic acid with methanol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103674. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103674>
- 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(January), 124614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124614>
- Dehkhoda, A. M., & Ellis, N. (2013). Biochar-based catalyst for simultaneous reactions of esterification and transesterification. *Catalysis Today*, 207, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.05.034>

- Dhawane, S. H., Kumar, T., & Halder, G. (2018). Recent advancement and prospective of heterogeneous carbonaceous catalysts in chemical and enzymatic transformation of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 167(March), 176–202. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.073>
- 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>
- Fan, M., Si, Z., Sun, W., & Zhang, P. (2019). Sulfonated ZrO₂-TiO₂ nanorods as efficient solid acid catalysts for heterogeneous esterification of palmitic acid. *Fuel*, 252(April), 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.121>
- 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>
- Folayan, A. J., & Anawe, P. A. L. (2019). Synthesis and characterization of Argania spinosa (Argan oil) biodiesel by sodium hydroxide catalyzed transesterification reaction as alternative for petro-diesel in direct injection, compression ignition engines. *Heliyon*, 5(9), e02427. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02427>
- Gemasih, M. I. S., Gustia, N., Umar, N., Nizar, K., Dewata, I., Nasra, E., Kasuma, S., Ningsih, W., & Sundari, R. (2021). *Calcination for Future Application*. 2, 202–208.
- Gustia Ningsih, Naylend. 2014. "Sulfonasi Karbon dari Hasil Variasi Suhu Kalsinasi Kulit Ubi Kayu sebagai Katalis Asam Padat dalam Pembuatan Biodiesel". *Skripsi*, 76Hal., Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia, Juli 2018.
- Gultom, Miranda D. P. 2021. "Esterifikasi PFAD (*Palm Fatty Acid*) dengan Katalis Karbon Kulit Ubi Kayu (*Manihot Esculenta*) Tersulfonasi". *Skripsi*, 85 Hal., Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia, September 2021.
- Hajar, N., Noor, E., Prakash, H., & Natanamurugaraj, B. (2021). Enhanced biodiesel production via esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) using rice husk ash - (NiSO₄)/ SiO₂ catalyst. *Applied Nanoscience*, 2020(0123456789). <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01922-4>
- Ibrahim, N. A., Rashid, U., Hin, Y., Choong, T., & Yaw, S. (2019). *Synthesis of carbonaceous solid acid magnetic catalyst from empty fruit bunch for esterification of palm fatty acid distillate (PFAD)*. 195(February), 480–491. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.022>
- Ishola, F., Adelekan, D., Mamudu, A., Abodunrin, T., Aworinde, A., Olatunji, O., & Akinlabi, S. (2020). Heliyon Biodiesel production from palm olein : A sustainable bioresource for Nigeria. *Heliyon*, 6(September 2019), e03725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03725>
- Kumar, S., Sook, C., Razali, S. M., & Farabi, M. S. A. (2019). *Methyl ester production from palm fatty acid distillate (PFAD) using sulfonated cow dung-derived carbon-based solid acid catalyst*. 196(February), 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.073>
- 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>
- Lokman, I. M., Rashid, U., & Taufiq-Yap, Y. H. (2015). Production of biodiesel from palm fatty acid distillate using sulfonated-glucose solid acid catalyst: Characterization and optimization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(11), 1857–1864. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.07.028>
- Mardhiah, H. H., Chyuan, H., Masjuki, H. H., Lim, S., & Ling, Y. (2017). Investigation of carbon-based solid acid catalyst from *Jatropha curcas* biomass in biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 144, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.038>
- Mardina, P., Irawana, C., & Dharma, M. (2021). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Bioethanol Production from Cassava Peel Treated with Sulfonated Carbon Catalyzed Hydrolysis H*). 24, 1–8.
- Mavakumba, H., Yunus, R., Rashid, U., & Hin, Y. (2018). *Modified sulfonation method for converting carbonized glucose into solid acid catalyst for the esterification of palm fatty acid distillate*. 229(May), 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.014>
- Ngaosuwan, K., Goodwin, J. G., & Prasertdham, P. (2016). A green sulfonated carbon-based catalyst derived from coffee residue for esterification. *Renewable Energy*, 86, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.010>
- Nur Syazwani, O., Rashid, U., & Taufiq Yap, Y. H. (2015). Low-cost solid catalyst derived from waste *Cyrtopleura costata* (Angel Wing Shell) for biodiesel production using microalgae oil. *Energy Conversion and Management*, 101, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.075>
- Quah, R. V., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Khalid, M., Abdullah, E. C., & Nolasco-Hipolito, C. (2019). An overview of biodiesel production using recyclable biomass and non-biomass derived magnetic catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103219. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103219>
- Roberto, R., Bastos, C., Paula, A., & Teresa, P. (2020). Optimization of biodiesel production using sulfonated carbon-based catalyst from an amazon agro-industrial waste. *Energy Conversion and Management*, 205(October 2019), 112457. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112457>
- Roman, F. F., Ribeiro, A. E., Queiroz, A., Lenzi, G. G., Chaves, E. S., & Brito, P. (2019). Optimization and kinetic study of biodiesel production through esterification of oleic acid applying ionic liquids as catalysts. *Fuel*, 239(November 2018), 1231–1239. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.087>
- Sahar, Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H. N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J., & Iqbal, M. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>
- Sangar, S. K., Syazwani, O. N., Farabi, M. S. A., Razali, S. M., Shobhana, G., Teo, S. H., & Taufiq-Yap, Y. H. (2019). Effective biodiesel synthesis from palm fatty acid distillate (PFAD) using carbon-based solid acid catalyst derived glycerol. *Renewable Energy*, 142, 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.118>

- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Singh, C., & Sharma, S. (2021). Review article A comprehensive review of physicochemical properties , production process , performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock : *Jatropha curcas*. *Fuel*, 285(July 2020), 119110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119110>
- Sundari, R., Putra, A., Nasra, E., Kurniawati, D., & Kalmar Nizar, U. (2019). The Effect of Silica-Titania Catalyst Loading on the Production of Biodiesel from Palm and Waste Cooking Oil. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 3(3), 96–101. www.ijrsred.com
- Talha, N. S., & Sulaiman, S. (2016). Overview of catalysts in biodiesel production. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1), 439–442.
- Talha, N. S., & Sulaiman, S. (2017). *Overview Of Catalysts In Biodiesel Production*. January 2016.
- 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>
- Warui, S., Wachira, J., Kawira, M., Murithi, G., & Mwit, J. (2020). Heliyon Characterization of composite material from the copolymerized polyphenolic matrix with treated cassava peels starch. *Heliyon*, 6(July), e04574. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04574>
- Xu, H., Lee, U., & Wang, M. (2020). *Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel*. 134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110144>
- Yeong, S. P., Chan, Y. S., Law, M. C., Kim, J., & Ling, U. (2021). biodiesel through vacuum distillation ☆. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, June. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.09.002>
- Yu, H., Cao, Y., Li, H., Zhao, G., Zhang, X., & Cheng, S. (2021). An efficient heterogeneous acid catalyst derived from waste ginger straw for biodiesel production. *Renewable Energy*, 176, 533–542. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.098>
- Yura, Naka. 2020. "Sulfonasi Karbon Kulit Ubi Kayu (*Manihot Esculenta*) sebagai Katalis dalam Esterifikasi PFAD (*Palm Fatty Acid Distillate*) ". *Skripsi*, 64 Hal., Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia, Mei 2020.
- Yurdakal, S., Garlisi, C., Özcan, L., Bellardita, M., & Palmisano, G. (2019). (Photo)catalyst characterization techniques: Adsorption isotherms and BET, SEM, FTIR, UV-Vis, photoluminescence, and electrochemical characterizations. In *Heterogeneous Photocatalysis: Relationships with Heterogeneous Catalysis and Perspectives* (Vol. 331307484, Issue April). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64015-4.00004-3>
- Zhang, H., Li, H., Pan, H., Liu, X., Yang, K., Huang, S., & Yang, S. (2017). *Efficient production of biodiesel with promising fuel properties from Koelreuteria integrifoliola oil using a magnetically recyclable acidic ionic liquid*. 138, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.060>
- Zhang, M., Xie, L., Yin, Z., Khanal, S. K., & Zhou, Q. (2016). Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: Current status and opportunities. *Bioresource Technology*, 215, 50–62.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.026>

- Zhang, Q., Wei, F., Zhang, Y., Wei, F., Ma, P., Zheng, W., Zhao, Y., & Chen, H. (2017). Biodiesel production by catalytic esterification of oleic acid over copper (II)–alginate complexes. *Journal of Oleo Science*, 66(5), 491–497. <https://doi.org/10.5650/jos.ess16211>
- Zhang, Q., Zhang, Y., Deng, T., Wei, F., Jin, J., & Ma, P. (2020). Sustainable production of biodiesel over heterogeneous acid catalysts. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64307-0.00016-0>
- Zhao, S., Niu, S., Yu, H., Ning, Y., Zhang, X., Li, X., Zhang, Y., Lu, C., & Han, K. (2019). Experimental investigation on biodiesel production through transesterification promoted by the La-dolomite catalyst. *Fuel*, 257(July), 116092. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116092>
- Zhou, Z., Zhang, X., Yang, F., & Zhang, S. (2019). Polymeric carbon material from waste sulfuric acid of alkylation and its application in biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 215, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.279>