

**SULFONASI KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*)
SEBAGAI KATALIS DALAM ESTERIFIKASI PFAD (*Palm
Fatty Acid Distillate*)**

SKRIPSI

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



NAKA YURA

NIM/BP. 16036045/2016

**PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2020**

PERSETUJUAN SKRIPSI

SULFONASI KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*) SEBAGAI KATALIS DALAM ESTERIFIKASI PFAD (*Palm Fatty Acid Distillate*)

Nama : Naka Yura
NIM : 16036045
Program Studi : Kimia
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, Mei 2020

Mengetahui :

Disetujui oleh :

Ketua Jurusan

Dosen Pembimbing



Alizar, S.Pd, M.Sc, Ph.D
NIP. 19700902 1998011 002



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

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Naka Yura
NIM : 16036045
Program Studi : Kimia
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

SULFONASI KARBON KULIT UBI KAYU (*Manihot Esculenta*) SEBAGAI KATALIS DALAM ESTERIFIKASI PFAD (*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, Mei 2020

Tim Penguji

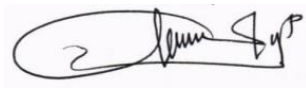
Nama

Tanda Tangan

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



Anggota : Ananda Putra, M.Si, P.hD



Anggota : Dra. Suryelita, M.Si



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Naka Yura
NIM : 16036045
Tempat/Tanggal Lahir : Padang/28 Juli 1997
Program Studi : Kimia
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Sulfonasi Karbon Kulit Ubi Kayu (*Manihot Esculenta*) Sebagai Katalis Dalam Esterifikasi PFAD (*Palm Fatty Acid Distillate*)”** adalah benar merupakan hasil karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang lazim. Apabila suatu saat nanti saya terbukti melakukan plagiat maka saya bersedia diproses dan menerima sanksi akademis maupun hukum sesuai dengan hukum negara yang berlaku, baik di Universitas Negeri Padang maupun masyarakat dan negara. Demikianlah Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab sebagai anggota masyarakat ilmiah.

Padang, Mei 2020

Yang Menyatakan,



Naka Yura
NIM.16036045

ABSTRAK

Naka Yura : Sulfonasi Karbon Kulit Ubi Kayu (*Manihot Esculenta*) sebagai Katalis Dalam Esterifikasi PFAD (*Palm Fatty Acid Distillate*)

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis katalis asam padat berbasis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi, mengkarakterisasi sifat fisikokimia katalis, menguji aktivitas katalitik katalis dalam produksi biodiesel dan menentukan densitas, bilangan asam serta persen konversi yang dihasilkan dari PFAD, methanol dan katalis. Katalis disintesis melalui proses kalsinasi dengan variasi waktu kalsinasi 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam. Kemudian dilanjutkan dengan proses sulfonasi menggunakan H_2SO_4 . Karaterisasi katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi menggunakan FTIR. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, hanya biodiesel dengan variasi waktu kalsinasi 3 jam yang baru selesai dikerjakan. Sifat fisikokimia dari katalis dengan varias waktu kalsinasi 3 jam yang dikarakterisasi menggunakan FTIR mempunyai pita serapan kuat pada bilangan gelombang 1117 cm^{-1} dan 1013 cm^{-1} menunjukan adanya vibrasi simetris dan asimetris dari gugus O-S-O. Hasil uji biodiesel dengan adanya katalis menunjukan terjadinya penurunan densitas dan bilangan asam yang diakibatkan oleh adanya reaksi asam lemak bebas dan methanol. Persen konversi FFA yang di peroleh untuk biodiesel dengan variasi waktu kalsinasi 3 jam yaitu 44,7901%.

Kata Kunci : Biodiesel, PFAD, Aktivitas Katalitik, Katalis Karbon kulit ubi kayu tersulfonasi.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, nikmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **Sulfonasi Karbon Kulit Ubi Kayu Sebagai Katalis Dalam Esterifikasi PFAD**. Skripsi ini diajukan untuk memenuhi mata kuliah Tugas Akhir 2 di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih atas bimbingan, dorongan dan semangat kepada :

1. Bapak Umar Kalmar Nizar, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
2. Bapak Ananda Putra, M.Si, Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Akademik sekaligus Dosen Pembahas.
3. Ibu Dra. Suryelita, M.Si sebagai Dosen Pembahas
4. Bapak dan Ibu staf pengajar serta seluruh staf akademik dan non akademik di Jurusan Kimia FMIPA UNP.
5. Orang tua penulis yang telah memberikan semangat serta dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Teman-teman kimia angkatan 2016 yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini.
7. Semua pihak terkait yang telah ikut berkontribusi dalam skripsi 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 sara dari pembaca agar skripsi ini bermanfaat dikemudian harinya

Padang, Mei 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	5
C. Batasan Masalah	5
D. Rumusan Masalah	6
E. Tujuan Penelitian	6
F. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Biodiesel	8
1. Pengertian Biodiesel	8
2. Raw Material	8
3. Mekanisme Biodiesel	8
B. Biodiesel dari PFAD	10
1. Rasio Mol Metanol ke PFAD	12
2. Jumlah Katalis	12
3. Suhu Reaksi	13
4. Waktu Reaksi	13
C. Katalis untuk Produksi Biodiesel	13
D. Katalis Karbon Tersulfonasi	15
E. Kulit Ubi Kayu	16
F. Karakterisasi Katalis	17
1. FTIR (Fourier Transform InfraRed)	17
2. Penentuan Jumlah Situs Asam	18
G. Sifat-Sifat Fisika Biodiesel	18

1. Densitas	18
2. Bilangan Asam	19
BAB III METODE PENELITIAN.....	20
A. Waktu dan Tempat Penelitian	20
B. Variabel Penelitian.....	20
C. Alat dan Bahan.....	21
1. Alat.....	21
2. Bahan	21
D. Prosedur Penelitian.....	22
1. Preparasi Katalis Asam Padat.....	22
2. Aplikasi Katalis Asam Padat pada Biodiesel.....	22
3. Karakterisasi dan Uji Sifat Fisik Biodiesel	23
E. Analisis Data	23
F. Desain Penelitian Keseluruhan	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
A. Karakterisasi Sifat Fisikokimia	27
1. Karakterisasi Fourier Transform Infra Red (FTIR)	27
2. Jumlah Situs Asam	29
B. Uji Sifat Fisika Biodiesel	29
1. Densitas	29
2. Bilangan Asam dan Persetase konversi	30
C. Review Artikel	31
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	41
A. Kesimpulan	41
D. Saran.....	41
REFERENSI	42
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1: Sifat fisikokimia dari PFAD	11
2. Variabel untuk Sintesis Katalis	21
3. Variabel Aplikasi Katalis pada Produksi Biodiesel	21

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Persamaan umum reaksi transesterifikasi trigliserida	10
2. Persamaan umum reaksi esterifikasi (Sangar et al. 2019).....	10
3. Diagram skematik lembar karbon polisiklik amorf dengan –COOH, HSO ₃ dan OH terikat pada prekursor karbon (Lokman et al. 2014).....	15
4. Kulit Ubi Kayu	16
5. Spektrum IR dari (a) Katalis ICS dan (b) Katalis ICS-SO ₃ H	17
6. Spektra FTIR karbon kulit ubi kayu sebelum sulfonasi.....	28
7. Spectra FTIR karbon kulit ubi kayu sesudah sulfonasi.....	29

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Kalsinasi Kulit Ubi Kayu	48
2. Sulfonasi Karbon sebagai Katalis	49
3. Aplikasi Katalis dalam Pembuatan Biodiesel	50
4. Penentuan Densitas	51
5. Penentuan Viskositas	51
6. Penentuan Bilangan Penyabunan	52
7. Penentuan Bilangan Asam	53

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Penipisan bahan bakar fosil dan peningkatan permintaan produksi bahan bakar menjadi masalah utama sumber energi saat ini. Selain itu, bahan bakar fosil konvensional dikaitkan dengan isu lingkungan seperti pemanasan global dan efek rumah kaca dapat mengganggu kesehatan manusia serta merusak ekosistem (Sahar et al. 2018). Oleh karena itu, diperlukannya bahan bakar alternatif yang dapat diperbarui sebagai pengganti bahan bakar fosil untuk mengatasi permasalahan tersebut (Lokman et al. 2015). Beberapa sumber energi terbarukan yang dikembangkan adalah biofuels, selsurya, tenaga angin, air dan lainnya.

Biofuels adalah bahan bakar cair atau gas yang berasal dari biomassa. Bahan bakar ini digunakan pada mesin pembakaran internal seperti mobil, generator, kapal dan pesawat terbang. Salah satu biofuels yang menjanjikan untuk dikembangkan di Indonesia adalah biodiesel (Mansir et al. 2017).

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dapat diproduksi melalui reaksi transesterifikasi atau esterifikasi dengan alkohol. Reaksi transesterifikasi adalah reaksi antara trigliserida dari minyak nabati dan metanol, sedangkan reaksi esterifikasi adalah reaksi antara asam lemak dari minyak atau lemak dengan metanol (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016). Penggunaan biodiesel dengan beberapa keuntungan seperti ramah lingkungan, ketersediaan bahan baku, biodegradabel, dan sifat fisikokimia yang mirip dengan bahan bakar konvensional (Abdul Kapor et al. 2017).

Minyak nabati yang potensial dijadikan sebagai produksi biodiesel dapat berasal dari minyak yang dikonsumsi dan tidak dapat dikonsumsi. Minyak yang dapat dikonsumsi adalah minyak jagung, minyak sawit dan minyak kelapa (Monteiro et al. 2018). Namun, penggunaan minyak yang dapat dikonsumsi menimbulkan kontroversi dengan alasan terjadi persaingan antara produksi untuk bahan pangan dan biodiesel. Oleh karena itu, digunakan minyak yang tidak dapat dikonsumsi untuk masalah tersebut seperti minyak jelantah, limbah minyak jarak dan lemak PFAD dalam produksi biodiesel (Thanh et al. 2012).

PFAD (*Palm Fatty Acid Destillate*) merupakan produk sampingan yang dihasilkan dari proses penyulingan limbah sawit mentah. Kandungan PFAD seperti FFA sekitar 85%, trigliserida 10%, sterol, vitamin E dan squalene (Ibrahim et al. 2019). Tingginya kandungan FFA pada PFAD berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan baku produksi biodiesel. Katalis yang sesuai untuk produksi biodiesel dari bahan baku PFAD yang memiliki kandungan FFA tinggi adalah katalis asam (Kefas et al. 2019).

Katalis asam tidak dipengaruhi jumlah FFA, sehingga tidak memperoleh produk sabun dengan asam lemak. Katalis ini terdiri dari katalis asam homogen dan asam heterogen. Katalis asam homogen sulit dipisahkan karena memiliki fasa cair sama dengan reaktan dan produk. Sedangkan katalis asam heterogen memiliki fasa padat sehingga mudah dipisahkan dan biaya produksi relatif murah. Beberapa contoh katalis asam pada adat adalah zeolit, oksida logam tersulfonasi dan karbon tersulfonasi (Talha and Sulaiman 2016).

Katalis karbon tersulfonasi potensial digunakan dalam reaksi esterifikasi PFAD menjadi biodiesel. Katalis ini dapat disintesis dari proses karbonisasi dan

sulfonasi berbagai bahan limbah organik dari sumber karbon yang mengandung glukosa, pati, lignin dan selulosa (Wang et al. 2013).

Karbonisasi dapat dilakukan dengan proses kalsinasi. Kalsinasi merupakan proses penguraian atau pemanasan suatu bahan pada suhu tinggi dengan adanya udara maupun tanpa udara atau dengan aliran gas N_2 dan tanpa adanya gas N_2 (Low et al. 2015). Proses kalsinasi dengan adanya aliran gas N_2 tidak perlu dengan laju aliran yang tinggi karena akan menyebabkan jumlah zat terbang, sedangkan tanpa gas N_2 tidak bisa pada suhu tinggi karena dapat menutupi pori-pori oleh produk volatil yang dihasilkan (Julius, 2015).

Sulfonasi merupakan proses substitusi gugus sulfonat (HSO_3) pada lembaran karbon polisiklik aromatik. Sulfonasi karbon dari bahan pati dengan membentuk kepadatan yang tinggi dan situs aktif. Semakin banyaknya jumlah gugus sulfonat yang menempel pada permukaan karbon maka aktivitas katalis akan semakin tinggi (Lokman et al. 2014).

Pati telah dilaporkan dalam sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi. Katalis disintesis melalui proses karbonisasi pada suhu 400°C dilanjutkan dengan proses sulfonasi menggunakan H_2SO_4 pada suhu 160°C selama 12 jam. Pada proses sulfonasi gugus sulfonat dapat terikat pada lembaran karbon aromatic polisiklik yang meningkatkan sifat keasaman katalis. Katalis ini dapat diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD. Kondisi optimum reaksi dicapai pada suhu 75°C , waktu 3 jam, rasio mol methanol terhadap PFAD 10:1 dan massa katalis 2%. Pada kondisi ini dihasilkan konversi FFA 94,6% dan FAME 90,4% (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

Biji kelapa sawit juga telah dilaporkan dalam sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi. Katalis ini disintesis melalui proses kalsinasi dengan menggunakan gas N_2 pada suhu $400^\circ C$ selama 2 jam dilanjutkan proses sulfonasi dengan H_2SO_4 pada suhu $150^\circ C$ selama 12 jam. Pada proses sulfonasi gugus sulfonat dapat terikat pada lembaran karbon aromatik polisiklik yang meningkatkan sifat keasaman katalis. Katalis ini dapat diaplikasikan dalam produksi biodiesel dari PFAD. Kondisi optimum untuk reaksi didapat pada waktu 2 jam, suhu $60^\circ C$, rasio mol methanol terhadap PFAD 9:1, massa katalis 2,5%, konversi FFA 98,2% dan FAME 97,8% (Akinfalabi et al. 2017).

Kulit ubi kayu adalah limbah padat dari berbagai olahan industri rumah tangga yang memiliki nilai ekonomis. Limbah ini mengandung pati yang cukup tinggi sehingga diaplikasikan dalam sebagai sumber kompos, pakan ternak, bio energi, olahan kuliner, dan absorben (Sudaryanto et al. 2006). Namun belum ditemukan informasi tentang sintesis katalis dari pati kulit ubi kayu sebagai sumber karbon. Oleh karena tingginya kandungan pati pada kulit ubi kayu maka potensial sebagai sumber karbon untuk sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi.

Berdasarkan uraian diatas, maka akan dilakukan sintesis katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi dengan kalsinasi tanpa menggunakan gas N_2 dengan lemak PFAD sebagai bahan baku produksi biodiesel. Dilanjutkan dengan sulfonasi menggunakan H_2SO_4 . Katalis dikarakterisasi menggunakan FTIR dan metode titrasi asam basa serta dilakukan uji sifat-sifat fisikokimia dari biodiesel seperti densitas, viskositas dan bilangan asam.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian diatas dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut :

1. Bahan bakar yang berasal dari fosil semakin langka dan tidak dapat diperbarui sehingga ketersediaan semakin berkurang, maka dibutuhkan bahan bakar yang berasal dari sumber terbarukan.
2. Biodiesel merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat mengatasi kelangkaan bahan bakar fosil.
3. PFAD adalah limbah sawit yang berpotensi digunakan sebagai sumber biodiesel karena memiliki kandungan FFA tinggi.
4. Katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi adalah katalis yang potensial untuk produksi biodiesel yang memiliki FFA tinggi.
5. Kulit ubi kayu dijadikan sebagai sumber karbon untuk sintesis katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi karena memiliki kandungan pati yang cukup tinggi sekitar 70%.
6. Katalis kulit ubi kayu tersulfonasi dapat disintesis melalui proses kalsinasi dengan variasi waktu dan dilanjutkan dengan proses sulfonasi dengan merendam karbon pada H_2SO_4 .

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Katalis asam padat tersulfonasi disintesis melalui proses sulfonasi dengan merendam karbon pada H_2SO_4 selama 6 jam $160^{\circ}C$.
2. Variasi waktu kalsinasi dilakukan selama (2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam) pada suhu $250^{\circ}C$.

3. Massa katalis optimum yang digunakan pada produksi biodiesel dari lemak PFAD adalah 4%.
4. Karakterisasi sifat fisikokimia katalis asam padat dilakukan dengan FTIR dan metode titrasi asam basa.
5. Uji biodiesel dilakukan dengan menentukan sifat-sifat fisika densitas, viskositas dan bilangan asam.

D. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana sifat fisikokimia dari katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi yang disintesis dari kulit ubi kayu dan disulfonasi dengan H_2SO_4 ?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu kalsinasi katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel ?
3. Bagaimana sifat-sifat biodiesel (densitas, viskositas dan bilangan asam) yang dihasilkan dari katalis karbon tersulfonasi ?

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi sifat fisikokimia dari katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi yang disintesis dari karbon kulit ubi kayu dan disulfonasi dengan H_2SO_4 .
2. Menentukan pengaruh waktu kalsinasi katalis karbon kulit ubi kayu dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.
3. Menentukan sifat-sifat biodiesel yang dihasilkan dari katalis karbon tersulfonasi dengan H_2SO_4 .

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui informasi tentang sifat-sifat fisikokimia katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi yang disintesis dari karbon kulit ubi kayu dan disulfonasi dengan H_2SO_4 .
2. Mengetahui pengaruh waktu kalsinasi katalis karbon kulit ubi kayu dalam mengkonversi PFAD menjadi biodiesel.
3. Mengetahui sifat-sifat biodiesel yang dihasilkan dari katalis karbon tersulfonasi dengan H_2SO_4 .

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Biodiesel

1. Pengertian Biodiesel

Biodiesel merupakan sumber energi alternatif untuk menggantikan bahan bakar minyak konvensional, yang terdiri dari mono alkil ester rantai panjang bersumber dari lemak hewani atau minyak nabati (Mardhiah et al. 2017). Biodiesel memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan bakar konvensional lainnya, seperti toksisitas rendah, kandungan oksigen tinggi (10-11%) yang akan memberikan efisiensi pada pembakaran dan biodegradable (Tan et al. 2019). Sedangkan kelemahan dari bahan bakar konvensional, seperti sumber energi tidak terbarukan dan menyebabkan pemanasan global akibat emisi dari gas karbon dioksida (Chung et al. 2019).

2. Raw Material

Biodiesel dapat diproduksi menggunakan bahan baku seperti lemak hewani dan minyak nabati. Minyak nabati ada yang dapat dikonsumsi dan ada yang tidak dapat dikonsumsi. Minyak nabati yang dapat dikonsumsi seperti minyak jagung, minyak canola, minyak bunga matahari dan minyak mikroalga. Sedangkan minyak nabati yang tidak dapat dikonsumsi yaitu minyak jelantah, limbah minyak kedelai, minyak jarak dan PFAD (Monteiro et al. 2018).

3. Mekanisme Biodiesel

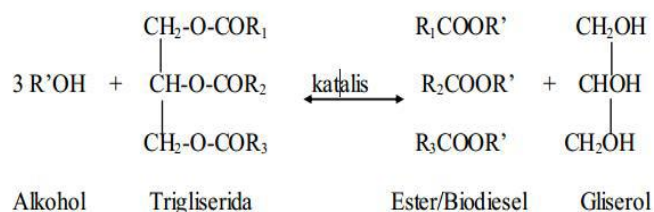
Biodiesel secara umum dikenal sebagai Metil Ester Asam Lemak (FAME) yang dapat diproduksi melalui reaksi transesterifikasi dan reaksi esterifikasi dari

sumber terbarukan seperti lemak hewani atau minyak nabati (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

Lemak hewani dan minyak nabati merupakan suatu trigliserida yang terbentuk dari hasil reaksi esterifikasi antara tiga molekul asam lemak bebas (FFA) dan satu molekul gliserol. Trigliserida memiliki beberapa FFA yang dihubungkan dengan gliserol. Karena FFA berbeda, maka trigliserida memiliki sifat fisika dan kimia yang berbeda pula (Thanh et al. 2012).

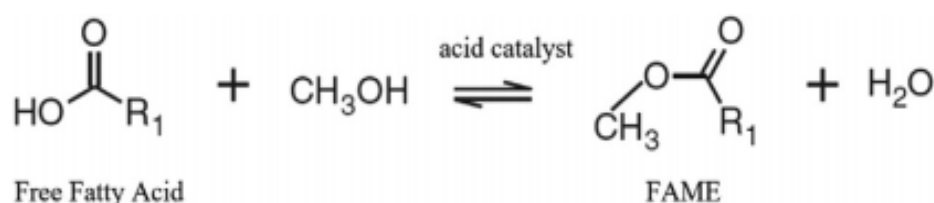
Biodiesel dapat diproduksi melalui reaksi esterifikasi dan transesterifikasi dari lemak hewani atau minyak nabati dengan penambahan alkohol seperti metanol, etanol dan propanol. Secara umum, produksi biodiesel memerlukan katalis atau enzim untuk mempercepat reaksi (Sangar et al. 2019).

Reaksi transesterifikasi adalah reaksi kimia antara trigliserida dan alkohol dengan adanya katalis untuk menghasilkan monoester. Dalam proses transesterifikasi ada beberapa senyawa yang berperan yaitu alkohol rantai pendek seperti metanol, etanol dan katalis serta enzim (Zhao et al. 2019). Reaksi ini terdiri dari tiga reaksi reversibel berurutan dimana trigliserida dikonversi menjadi digliserida, dan digliserida menjadi monogliserida. Gliserida diubah menjadi gliserol serta menghasilkan satu molekul ester pada setiap tahap reaksi (Folayan and Anawe 2019).



Gambar 1 Persamaan umum reaksi transesterifikasi trigliserida (Folayan and Anawe 2019).

Reaksi esterifikasi merupakan transformasi asam lemak bebas menjadi biodiesel dengan bantuan alkohol rantai pendek serta katalis (Roman et al. 2019). Reaksi transesterifikasi dan esterifikasi adalah reaksi reversibel yang relatif lambat. Maka, diperlukan proses pengadukan yang baik untuk meningkatkan hasil reaksi atau mempercepat jalannya reaksi, serta perlu adanya penambahan katalis dan reaktan agar reaksi bergeser ke kanan. Secara umum, faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi adalah suhu, waktu reaksi, katalis serta pengadukan (Roman et al. 2019).



Gambar 2 Persamaan umum reaksi esterifikasi (Sangar et al. 2019).

B. Biodiesel dari PFAD

PFAD merupakan produk sampingan dari hasil produksi penyuligan minyak sawit mentah. Limbah ini biasanya digunakan sebagai sumber asam lemak pada bidang industri. PFAD berwujud setengah padat pada suhu kamar, berwarna coklat muda, dan meleleh jika dipanaskan pada suhu tinggi (Ibrahim et al. 2019b).

PFAD memiliki asam lemak bebas yang tinggi lebih dari 90 % yang dimana komponen utamanya asam oleat dan asam palmitat, sisanya adalah trigliserida 5-15%, gliserida parsial, vitamin E dan sterol. Oleh karena itu, dengan nilai asam lemak bebas yang tinggi membuat PFAD cocok digunakan pada esterifikasi yang disintesis dengan katalis asam kuat untuk produksi biodiesel (Kefas et al. 2019b).

Tabel 1: Sifat fisikokimia dari PFAD

Parameter	Nilai	Metode yang digunakan
Asam lemak bebas (%)	90.24	AOCS Ca 5a-40
Berat molekul (g/mol)	270.11	AOCS Cd 3-25
Nilai saponifikasi (mg KOH)/(g sample)	207.69	
Asam lemak	Komposisi (wt.%)	
Asam miristat, C _{14:0}	1.03	
Asam palmitat, C _{16:0}	48.02	
Asam stearat, C _{18:0}	3.42	
Asam oleat, C _{18:1}	41.01	
Asam lenoleat, C _{18:2}	6.52	

Untuk uji aktivitas katalitik katalis asam padat berbasis karbon tersulfonasi dapat digunakan untuk esterifikasi PFAD dengan memvariasikan rasio mol metanol ke PFAD, jumlah katalis, suhu dan waktu reaksi (Lokman et al. 2015).

1. Rasio Mol Metanol ke PFAD

Pengaruh optimasi rasio mol metanol terhadap PFAD dalam mengkonversi FFA (*Free Fatty Acid*) dan parameter reaksi lainnya berjalan konstan. Dapat diamati bahwa % konversi FFA meningkat dari perbandingan 1:1 sampai 10:1 setara dengan 77,8% konversi FFA. Namun, tidak ada kenaikan yang signifikan saat perbandingan 12:1 sampai 18:1. Hal ini dikarenakan semakin tinggi mol metanol yang digunakan akan semakin banyak FFA yang terkonversi menjadi biodiesel. Namun, jika mol metanol yang digunakan terlalu tinggi juga dapat meningkatkan produk sampingan berupa H_2O . Karena, adanya air yang dihasilkan ini, maka dapat mengakibatkan biodiesel yang dihasilkan dapat terhidrolisis kembali menjadi produk semula. Peristiwa ini terjadi karena reaksi dapat berlangsung timbal balik. Air akan menggeser kesetimbangan ke arah reaktan sehingga reaktan kembali terbentuk. Oleh karena itu, produk yang dihasilkan akan berkurang. Penelitian dilanjutkan dengan menggunakan kondisi optimum dari rasio metanol terhadap katalis yang telah didapatkan yaitu 10:1.

2. Jumlah Katalis

Pengaruh optimasi massa katalis terhadap PFAD dalam mengkonversi FFA dan parameter lainnya konstan. Dapat diamati bahwa % konversi meningkat dari 35,7% menjadi 86,1 dengan massa katalis 0,5% sampai 2,5%. Kenaikan yang terjadi cukup signifikan yaitu sebesar 50,4%. Namun, penambahan lebih lanjut dari massa katalis tidak meningkatkan % konversi dari FFA secara signifikan. Sehingga, kurang efisien untuk digunakan dalam produksi biodiesel. Oleh karena itu, ditetapkan massa katalis 2,5% sebagai kondisi optimum dari parameter massa katalis terhadap PFAD.

3. Suhu Reaksi

Pengaruh optimasi suhu reaksi terhadap % konversi FFA, dan parameter lainnya konstan. Dapat diamati bahwa % konversi meningkat dari 75,2% sampai 95,4% dengan suhu 65°C sampai 75°C. Namun, pada suhu reaksi diatas 75%, % konversi justru mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena energi aktivasi tidak cukup untuk memprotonasi gugus karbonil dari FFA sehingga akan menghasilkan % konversi lebih sedikit. Artinya, suhu mempengaruhi jumlah energi aktivasi yang dibutuhkan untuk memprotonasi gugus karbonil dari FFA. Pada suhu reaksi 75°C, energi aktivasi cukup untuk memprotonasi gugus karbonil dari FFA dan menghasilkan laju reaksi maksimum. Suhu reaksi 75°C digunakan untuk optimasi lebih lanjut.

4. Waktu Reaksi

Pengaruh optimasi waktu reaksi terhadap % konversi meningkat dengan meningkatnya waktu reaksi. Namun, setelah 2 jam % konversi tidak terlalu meningkat secara signifikan sehingga kurang efisien untuk digunakan dalam produksi biodiesel karena waktu yang dibutuhkan lebih lama. Sehingga, ditetapkan waktu reaksi 2 jam sebagai kondisi reaksi optimum.

C. Katalis untuk Produksi Biodiesel

Katalis adalah suatu senyawa kimia yang berfungsi mempercepat reaksi pada suhu, waktu tertentu untuk mencapai kesetimbangan dan akan kembali ke bentuk semula pada akhir reaksi (Yusuff and Owolabi 2019). Pada hakikatnya katalis bercampur dengan pereaksi selama reaksi terjadi. Akan tetapi, akhirnya akan terpisah kembali sehingga jumlah katalis sebelum dan sesudah reaksi tetap (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

Dalam produksi biodiesel katalis dapat dibedakan berdasarkan fasanya yaitu katalis homogen, katalis heterogen dan katalis enzimatik. Katalis homogen dibagi menjadi katalis asam cair dan katalis basa cair, sedangkan katalis heterogen dibagi menjadi katalis asam padat dan katalis basa padat. Katalis enzim kurang diminati dalam produksi karena biaya yang mahal dan waktu reaksi yang lama (Talha and Sulaiman 2016).

Katalis asam dan basa homogen dalam produksi biodiesel memiliki kelemahan yaitu pada katalis asam cair seperti H_2SO_4 berifat korosif yang dimana sulit dipisahkan ada reaksi homogen karena memiliki fasa yang sama dengan campuran reaksi. Sedangkan katalis basa cair ketika direaksikan dengan minyak yang mengandung air dan asam lemak bebas seperti minyak sawit, minyak kedelai yang dapat menghasilkan sabun (Chiang et al. 2019).

Sedangkan, katalis asam dan basa heterogen memiliki kelebihan yang dimana biayanya tidak mahal, tidak beracun, tidak korosif dan bisa digunakan kembali untuk proses berkelanjutan serta mengurangi biaya pemurnian. Katalis asam padat memiliki fasa yang berbeda dengan reaktan dan produk sehingga mudah dipisahkan (J. Li and Liang 2017).

Katalis asam padat seperti kalsium oksida (CaO) dimana memiliki keunggulan aktivitas lebih tinggi, waktu hidup lebih lama, katalis relatif mudah dipisahkan, dan dapat digunakan kembali (Chung et al. 2019).

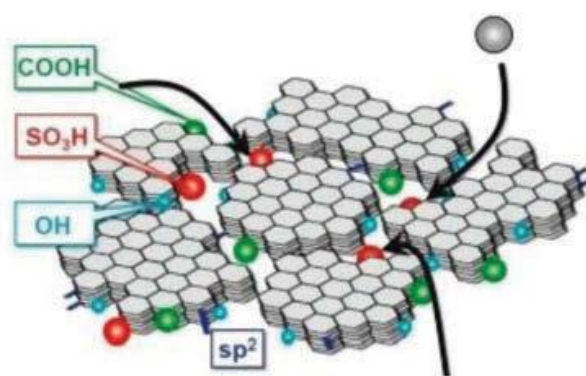
Katalis asam padat mampu mengkatalisasi reaksi esterifikasi dan reaksi transesterifikasi secara bersamaan, sehingga cocok digunakan pada minyak yang memiliki kandungan asam lemak bebas tinggi (L. Li et al. 2020). Penggunaan katalis asam padat lebih efektif karena mudah dipisahkan dengan cara

sentrifugasi. Oleh karena itu, katalis asam padat dengan kinerja katalitik yang tinggi sehingga berpotensi besar dalam reaksi yang dikatalisis oleh asam (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

D. Katalis Karbon Tersulfonasi

Kalsinasi merupakan proses penguraian suatu bahan pada suhu tinggi menggunakan udara maupun dengan adanya sedikit udara. Pada senyawa organik yang telah dikalsinasi perlu diamati variasi waktu dan suhu terhadap luas permukaan, diameter pori, volume pori keseluruhan serta sifat karakteristik kimia (Julius 2015). Adapun yang faktor mempengaruhi kalsinasi adalah laju aliran udara, tingkat kenaikan suhu dan waktu kalsinasi. Suhu merupakan parameter paling kritis dari pada laju aliran udara dan waktu kalsinasi (Wang et al. 2013).

Sulfonasi adalah proses substitusi gugus sulfonat (HSO_3) pada lembaran karbon polisiklik aromatik. Cincin aromatik polisiklik memberikan struktur yang kuat dan stabil terikat secara kovalen dengan gugus HSO_3 sebagai bahan asam yang tidak larut (Lokman et al. 2014).



Gambar 3 Diagram skematik lembaran karbon polisiklik amorf dengan COOH , HSO_3 dan OH terikat pada prekursor karbon (Lokman et al. 2014).

Beberapa asam padat tersulfonasi, seperti oksida logam tersulfonasi, karbon tersulfonasi, zeolit tersulfonasi menjadi salah satu bahan pusat untuk diteliti.

Oksida logam memberikan sifat asam yang sangat tinggi karena memiliki gugus fungsi sulfat (Syazwani et al. 2019).

Katalis asam padat berbasis karbon merupakan material yang didasari oleh karbon amorf yang terdiri dari lembaran karbon aromatik polisiklik berukuran kecil yang terdapat pusat aktif asam pada permukaan karbon. Dengan metode sulfonasi mampu mengaktifkan pusat asam pada permukaan karbon sehingga sangat efektif digunakan untuk produksi biodiesel dengan kandungan FFA yang tinggi (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

E. Kulit Ubi Kayu

Ubi kayu (*Manihot Esculenta*) merupakan salah satu tanaman pangan yang sangat penting di daerah tropis. Tanaman ini sumber kalori yang sangat baik, negara-negara didunia seperti Nigeria, Brasil dan Thailand merupakan produsen terbesar di dunia dengan produksi 20-50 ton per tahun. Sedangkan di Indonesia, ubi kayu termasuk tanaman tradisional yang cukup penting. Produksi ubi kayu di Indonesia sekitar 19-21 ton per tahun.



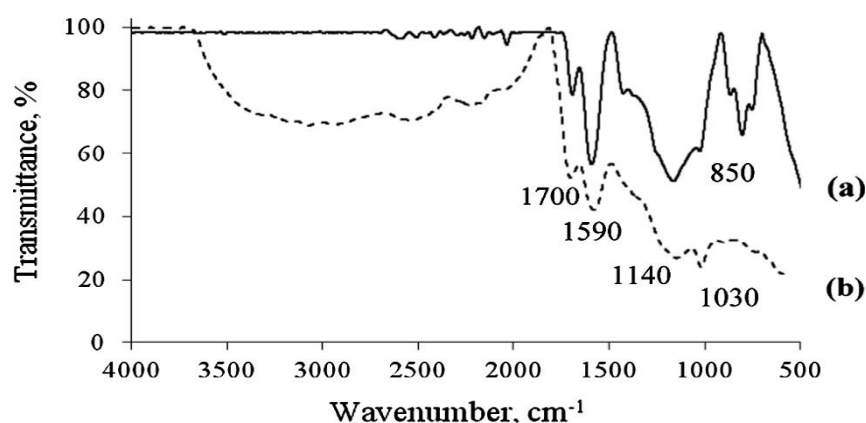
Gambar 4 Kulit Ubi Kayu

Kulit ubi kayu merupakan hasil olahan industri rumah tangga ini yang dijadikan karbon adalah kulit bagian dalam yang berwarna putih, memiliki komposisi karbohidrat sekitar 70%, protein 6%, lemak 3%, serat 5%, dan abu 7%. Dengan jumlah pati yang terdapat pada kulit ubi kayu maka sangat potensial dijadikan karbon yang tersulfonasi untuk produksi biodiesel (Adekunle, Orsat, and Raghavan 2016).

F. Karakterisasi Katalis

1. FTIR (Fourier Transform InfraRed)

FTIR merupakan suatu metode analisis semi kuantitatif dan digunakan untuk membedakan keasaman Bronsted dan Lewis menggunakan senyawa gas, seperti NH_3 dan piridin dengan memperoleh jumlah asam (Fan et al. 2019). FTIR (Agilent Technologies FTIR-4700) dengan kisaran panjang gelombang yaitu 400-4000 cm^{-1} digunakan untuk menentukan keberadaan gugus fungsional permukaan dalam sampel (Chellappan et al. 2018).



Gambar 5 Spektrum IR dari (a) Katalis ICS dan (b) Katalis ICS- SO_3H (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

Spektrum inframerah dan katalis ICS tersulfonasi ditunjukkan pada gambar 4. Dimana serapan pita terkuat diamati sekitar 1700 cm^{-1} dan 1590 cm^{-1} untuk katalis

ICS dan katalis ICS-SO₃H, menunjukkan penyerapan karbonil C=O dan struktur karbon C=C aromatik. Kehadiran gugus C-O-SO₃H simetris dan asimetris untuk katalis ICS-SO₃H terdeteksi oleh pita serapan yang kuat terjadi pada getaran regang 1030 cm⁻¹ dan 1140 cm⁻¹. Sementara itu, pita serapan lemah identik yang S=O simetris juga teramati untuk sampel katalis ICS, disebabkan oleh kemampuan penyerapan IR dari kerangka karbon (C=C) katalis (Lokman, Rashid, and Taufiq-Yap 2016).

2. Penentuan Jumlah Situs Asam

Kandungan gugus sulfonat (-SO₃H) berdasarkan pada kandungan sulfur yang terdapat pada katalis. Aktivitas katalitik dari katalis ditentukan dari seberapa banyak kandungan gugus sulfonat yang melekat pada katalis. Kandungan gugus sulfonat diperkirakan dari pertukaran ion H⁺ pada katalis dan Na⁺ dalam larutan NaCl dan NaOH (Wang, 2016).

G. Sifat-Sifat Fisika Biodiesel

1. Densitas

Densitas adalah salah satu sifat biodiesel yang digunakan untuk mengetahui perkiraan jumlah bahan bakar yang disalurkan oleh sistem injeksi untuk pembakaran bahan bakar yang tepat. Kepadatan bahan atau cairan didefinisikan sebagai massanya per unit volume. Minyak nabati memiliki kepadatan lebih tinggi dari pada bahan bakar diesel konvensional. Bahan bakar dengan densitas tinggi mengandung massa lebih banyak dari pada bahan bakar densitas rendah. Oleh karena itu, jumlah energi dan rasio udara bahan bakar dipengaruhi oleh densitas. Densitas bahan bakar biodiesel dapat dipengaruhi oleh karakteristik metil ester, jenis bahan baku, dan produksi biodiesel (Giakoumis and Sarakatsanis 2018).

2. Bilangan Asam

Bilangan asam merupakan jumlah asam lemak bebas yang terkandung pada biodiesel. Asam lemak bebas adalah suatu asam mono karboksilat jenuh atau tak jenuh yang terbentuk secara alami dalam suatu lemak atau minyak. Jumlah asam lemak yang tinggi mengakibatkan tingginya bilangan asam. Bilangan asam memiliki satuan KOH/g. Nilai bilangan asam sesuai standar yaitu sekitar 0,5 KOH/g. Jika bilangan asam tinggi maka akan menyebabkan korosi dalam penggunaan bahan bakar pada mesin.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Sifat-sifat fisikokimia dianalisis dari karakterisasi menggunakan instrument FTIR dan metode titrasi asam basa. Pada karakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan adanya gugus SO_2 pada daerah 1017 cm^{-1} dan 1117 cm^{-1} yang berikatan secara kovalen dengan karbon polisiklik aomatik. Peningkatan jumlah situs asam dari karbon menjadi karbon tersulfonasi menunjukkan gugus sulfonat berhasil disubstitusikan kedalam karbon.
2. Katalis karbon kulit ubi kayu tersulfonasi dapat digunakan untuk produksi biodiesel. Katalis mengkonversi PFAD menjadi biodiesel sebesar 44,79%
3. Densitas dan Bilangan Asam dari biodiesel mengalami penurunan dibandingkan dari lemak PFAD yang digunakan.

D. Saran

Diharapkan penelitian ini dapat dilanjutkan untuk mencari kondisi optimum suhu kalsinasi untuk karbon kulit ubi kayu pada katalis karbon tersulfonasi.

REFERENSI

- Abdul Kapor, Nazratul Zaheera, Gaanty Pragas Maniam, Mohd Hasbi Ab Rahim, and Mashitah M. Yusoff. 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>.
- Adekunle, Ademola, Valerie Orsat, and Vijaya Raghavan. 2016. "Lignocellulosic Bioethanol: A Review and Design Conceptualization Study of Production from Cassava Peels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64: 518–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.064>.
- Akinfalabi, Shehu Ibrahim, Umer Rashid, Robiah Yunus, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2017. "Synthesis of Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate Using Sulfonated Palm Seed Cake Catalyst." *Renewable Energy* 111: 611–19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.056>.
- Chellappan, Suchith, Vaishakh Nair, Sajith V, and Aparna K. 2018. "Experimental Validation of Biochar Based Green Bronsted Acid Catalysts for Simultaneous Esterification and Transesterification in Biodiesel Production." *Bioresource Technology Reports* 2 (2017): 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.04.002>.
- Chiang, Chao Lung, Kuen Song Lin, Chia Wei Shu, Jeffrey Chi Sheng Wu, Kevin Chia Wen Wu, and Yu Tzu Huang. 2019. "Enhancement of Biodiesel Production via Sequential Esterification/Transesterification over Solid Superacidic and Superbasic Catalysts." *Catalysis Today*, no. September. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.09.037>.
- Chung, Zheng Lit, Yie Hua Tan, Yen San Chan, Jibrail Kansedo, N. M. Mubarak, Mostafa Ghasemi, and Mohammad Omar Abdullah. 2019. "Life Cycle Assessment of Waste Cooking Oil for Biodiesel Production Using Waste Chicken Eggshell Derived CaO as Catalyst via Transesterification." *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 21 (September): 101317. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101317>.

- Fan, Mingming, Zhikun Si, Wenjuan Sun, and Pingbo Zhang. 2019. "Sulfonated ZrO₂-TiO₂ Nanorods as Efficient Solid Acid Catalysts for Heterogeneous Esterification of Palmitic Acid." *Fuel* 252 (February): 254–61. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.121>.
- Farabi, M. S.Ahmad, M. Lokman Ibrahim, Umer Rashid, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2019. "Esterification of Palm Fatty Acid Distillate Using Sulfonated Carbon-Based Catalyst Derived from Palm Kernel Shell and Bamboo." *Energy Conversion and Management* 181 (September 2018): 562–70. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.033>.
- Folayan, Adewale Johnson, and Paul Apeye Lucky Anawe. 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>.
- Giakoumis, Evangelos G., and Christos K. Sarakatsanis. 2018. "Estimation of Biodiesel Cetane Number, Density, Kinematic Viscosity and Heating Values from Its Fatty Acid Weight Composition." *Fuel* 222 (January): 574–85. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.187>.
- Ibrahim, Naeemah A., Umer Rashid, Yun Hin Taufiq-Yap, Thomas Choong Shean Yaw, and Ismayadi Ismail. 2019a. "Synthesis of Carbonaceous Solid Acid Magnetic Catalyst from Empty Fruit Bunch for Esterification of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)." *Energy Conversion and Management* 195 (February): 480–91. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.022>.
- Julius, Michuki mungai. 2015. "Optimizing Conditions for Preparing Activated Carbon From," no. November.
- Kefas, Haruna Mavakumba, Robiah Yunus, Umer Rashid, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2019a. "Enhanced Biodiesel Synthesis from Palm Fatty Acid Distillate and Modified Sulfonated Glucose Catalyst via an Oscillation Flow Reactor System." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7 (2).

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102993>.

- Li, Junqiao, and Xuezheng Liang. 2017. "Magnetic Solid Acid Catalyst for Biodiesel Synthesis from Waste Oil." *Energy Conversion and Management* 141: 126–32. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.072>.
- Li, Lu, Bin Yan, Huaxiao Li, Shitao Yu, and Xiaoping Ge. 2020. "Decreasing the Acid Value of Pyrolysis Oil via Esterification Using ZrO₂/SBA-15 as a Solid Acid Catalyst." *Renewable Energy* 146: 643–50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.015>.
- Lokman, Ibrahim M., Umer Rashid, Bryan R. Moser, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2019. "Appraisal of Biodiesel Prepared Via Acid Catalysis from Palm Fatty Acid Distillate." *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science* 43 (5): 2205–10. <https://doi.org/10.1007/s40995-018-0642-5>.
- Lokman, Ibrahim M., Umer Rashid, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2016. "Meso- and Macroporous Sulfonated Starch Solid Acid Catalyst for Esterification of Palm Fatty Acid Distillate." *Arabian Journal of Chemistry* 9 (2): 179–89. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.034>.
- Lokman, Ibrahim M., Umer Rashid, Yun Hin Taufiq-Yap, and Robiah Yunus. 2015. "Methyl Ester Production from Palm Fatty Acid Distillate Using Sulfonated Glucose-Derived Acid Catalyst." *Renewable Energy* 81: 347–54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.045>.
- Lokman, Ibrahim M., Umer Rashid, Robiah Yunus, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2014. "Carbohydrate-Derived Solid Acid Catalysts for Biodiesel Production from Low-Cost Feedstocks: A Review." *Catalysis Reviews - Science and Engineering* 56 (2): 187–219. <https://doi.org/10.1080/01614940.2014.891842>.
- Low, Ling Wei, Tjoon Tow Teng, Abbas F.M. Alkarkhi, Norhashimah Morad, and Baharin Azahari. 2015. "Carbonization of Elaeis Guineensis Frond Fiber: Effect of Heating Rate and Nitrogen Gas Flow Rate for Adsorbent Properties Enhancement." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*

28: 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.01.020>.

- Mansir, Nasar, Siow Hwa Teo, M. Lokman Ibrahim, and Taufiq Yap Yun Hin. 2017. “Synthesis and Application of Waste Egg Shell Derived CaO Supported W-Mo Mixed Oxide Catalysts for FAME Production from Waste Cooking Oil: Effect of Stoichiometry.” *Energy Conversion and Management* 151: 216–26. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.069>.
- Mardhiah, H. Haziratul, Hwai Chyuan Ong, H. H. Masjuki, Steven Lim, and H. V. Lee. 2017. “A Review on Latest Developments and Future Prospects of Heterogeneous Catalyst in Biodiesel Production from Non-Edible Oils.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 1225–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.036>.
- Monteiro, Marcos Roberto, Cristie Luis Kugelmeier, Rafael Sanaiotte Pinheiro, Mario Otávio Batalha, and Aldara da Silva César. 2018. “Glycerol from Biodiesel Production: Technological Paths for Sustainability.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88 (February): 109–22. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>.
- Roman, Fernanda F., António E. Ribeiro, Ana Queiroz, Giane G. Lenzi, Eduardo S. Chaves, and Paulo Brito. 2019. “Optimization and Kinetic Study of Biodiesel Production through Esterification of Oleic Acid Applying Ionic Liquids as Catalysts.” *Fuel* 239 (September 2018): 1231–39. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.087>.
- Sahar, Sana Sadaf, Javed Iqbal, Inam Ullah, Haq Nawaz Bhatti, Shazia Nouren, Habib-ur-Rehman, Jan Nisar, and Munawar Iqbal. 2018. “Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: An Efficient Technique to Convert Waste into Biodiesel.” *Sustainable Cities and Society* 41 (May): 220–26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>.
- Sangar, Shatesh Kumar, Osman Nur Syazwani, M. S. Ahmad Farabi, S. M. Razali, Gnanasekhar Shobhana, Siow Hwa Teo, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2019. *Effective Biodiesel Synthesis from Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) Using*

- Carbon-Based Solid Acid Catalyst Derived Glycerol. Renewable Energy*. Vol. 142. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.118>.
- Sudaryanto, Y., S. B. Hartono, W. Irawaty, H. Hindarso, and S. Ismadji. 2006. "High Surface Area Activated Carbon Prepared from Cassava Peel by Chemical Activation." *Bioresource Technology* 97 (5): 734–39. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.029>.
- Syazwani, Osman Nur, Umer Rashid, Mohd Sufri Mastuli, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2019. "Esterification of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) to Biodiesel Using Bi-Functional Catalyst Synthesized from Waste Angel Wing Shell (*Cyrtopleura Costata*)." *Renewable Energy* 131: 187–96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.031>.
- Talha, Nur Syakirah, and Sarina Sulaiman. 2016. "Overview of Catalysts in Biodiesel Production." *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 11 (1): 439–42.
- Tan, Yie Hua, Mohammad Omar Abdullah, Jibrail Kansedo, Nabisab Mujawar Mubarak, Yen San Chan, and Cirilo Nolasco-Hipolito. 2019. "Biodiesel Production from Used Cooking Oil Using Green Solid Catalyst Derived from Calcined Fusion Waste Chicken and Fish Bones." *Renewable Energy* 139 (June 2011): 696–706. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.110>.
- Tesfa, B., R. Mishra, F. Gu, and N. Powles. 2010. "Prediction Models for Density and Viscosity of Biodiesel and Their Effects on Fuel Supply System in CI Engines." *Renewable Energy* 35 (12): 2752–60. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.026>.
- Thanh, Le Tu, Kenji Okitsu, Luu Van Boi, and Yasuaki Maeda. 2012. "Catalytic Technologies for Biodiesel Fuel Production and Utilization of Glycerol: A Review." *Catalysts* 2 (1): 191–222. <https://doi.org/10.3390/catal2010191>.
- Theam, Kok Leong, Aminul Islam, Hwei Voon Lee, and Yun Hin Taufiq-Yap. 2015. "Sucrose-Derived Catalytic Biodiesel Synthesis from Low Cost Palm Fatty Acid Distillate." *Process Safety and Environmental Protection* 95:

126–35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.02.017>.

Wang, Hong, Fang Ren, Changchang Liu, Rongmei Si, Dingshan Yu, Lisa D. Pfefferle, Gary L. Haller, and Yuan Chen. 2013. “CoSO₄/SiO₂ Catalyst for Selective Synthesis of (9, 8) Single-Walled Carbon Nanotubes: Effect of Catalyst Calcination.” *Journal of Catalysis* 300: 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.12.032>.

Yusuff, Adeyinka Sikiru, and John Olusoji Owolabi. 2019. “Synthesis and Characterization of Alumina Supported Coconut Chaff Catalyst for Biodiesel Production from Waste Frying Oil.” *South African Journal of Chemical Engineering* 30: 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.09.001>.

Zhao, Shuang, Shengli Niu, Hewei Yu, Yilin Ning, Xiangyu Zhang, Ximing Li, Yujiao Zhang, Chunmei Lu, and Kuihua Han. 2019. “Experimental Investigation on Biodiesel Production through Transesterification Promoted by the La-Dolomite Catalyst.” *Fuel* 257 (March): 116092. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116092>.