

ARTIKEL REVIEW: PEMANFAATAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERAKTIVASI DALAM SINTESIS BIODIESEL DENGAN METODE ESTERIFIKASI DAN TRANSESTERIFIKASI

*Siti Novita Sari Ulfa dan Samik Samik**

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Universitas Negeri Surabaya

Jl. Ketintang, Surabaya (60231), Telp. 031-8298761

** Corresponding author, tel/fax :089656245560, email: siti19037@mhs.unesa.ac.id*

Abstrak. Menipisnya bahan bakar minyak bumi dapat menjadi masalah jika tidak ditanggulangi dengan cepat. Hal ini dapat mengakibatkan kelangkaan dan meningkatnya harga bahan bakar minyak. Energi alternatif mulai dikembangkan sebagai solusi atas masalah tersebut, salah satunya adalah biodiesel. Sintesis biodiesel memiliki bahan utama berupa minyak seperti minyak kelapa sawit, minyak jelantah, minyak biji karet, minyak sawit mentah, dan lain-lain. Reaksi sintesis biodiesel umumnya adalah reaksi transesterifikasi yang cenderung lambat dan lama sehingga diperlukan katalis agar reaksi dapat berjalan dengan cepat. Terdapat dua katalis yang dapat digunakan yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Penggunaan katalis heterogen lebih mudah dipisahkan dikarenakan fasa katalis berbeda dengan reaktan maupun produk. Salah satu katalis heterogen biodiesel yang dapat digunakan adalah katalis zeolit alam. Penggunaan katalis zeolit alam memiliki banyak keuntungan seperti harganya yang relatif murah, kelimpahan di alam yang cukup banyak, dan ramah lingkungan. Pemanfaatan zeolit alam sebagai katalis biodiesel diperlukan aktivasi zeolit alam yang dapat dilakukan dengan larutan asam maupun basa. Oleh karena itu, pada artikel review ini membahas mengenai % yield biodiesel dengan bantuan katalis zeolit alam yang teraktivasi asam atau basa dari sepuluh artikel. Didapatkan % yield biodiesel tertinggi sebesar 100% pada produksi biodiesel dari minyak jelantah dengan katalis zeolit alam Wonosari teraktivasi asam berupa HCl 6M pada reaksi esterifikasi sebanyak 2% dari berat minyak. Kemudian dilanjutkan reaksi transesterifikasi dengan katalis basa KOH dengan kondisi suhu 60°C dengan rasio molar minyak dan metanol 1:6 selama 1 jam, dan kecepatan pengadukan 1200 rpm. Berdasarkan hasil artikel review ini zeolit alam yang telah teraktivasi asam atau basa dapat dijadikan sebagai katalis dalam sintesis biodiesel menggunakan metode transesterifikasi dan esterifikasi.

Kata kunci : Biodiesel, Katalis biodiesel, Zeolit Alam

Abstract. The depletion of petroleum fuels can become a problem if not addressed quickly. This can lead to scarcity and an increase in the price of fuel oil. Alternative energy has begun to be developed as a solution to this problem, one of which is biodiesel. Biodiesel synthesis has the main ingredient in the form of oils such as palm oil, used cooking oil, rubber seed oil, crude palm oil, and others. The biodiesel synthesis reaction is a transesterification reaction that tends to be slow and long, so a catalyst is needed so that the reaction can run quickly. There are two catalysts that can be used, namely homogeneous catalysts and heterogeneous catalysts. The use of heterogeneous catalysts is easier because at the end of the reaction they can be separated easily. One of the heterogeneous biodiesel catalysts that can be used is natural zeolite catalyst. The use of natural zeolite catalysts has many advantages such as its relatively cheap price, abundant abundance in nature, and environmental friendliness. Utilization of natural zeolite as a biodiesel catalyst requires the activation of natural zeolite which can be carried out with acid or alkaline solutions. Therefore, in this review article, we discuss the % yield of biodiesel with the help of natural zeolite catalysts which are activated by acid or base from ten articles. The highest % biodiesel yield was obtained at 100% in the production of biodiesel from used cooking oil with an acid-activated Wonosari natural zeolite catalyst in the form of 6M HCl in an esterification reaction of 2% by weight of oil. Then proceed with the

transesterification reaction with KOH as a base catalyst at a temperature of 60°C with a molar ratio of oil and methanol 1:6 for 1 hour, and stirring speed of 1200 rpm. Based on the results of this review article, natural zeolite that has been activated by acid or base can be used as a catalyst in biodiesel synthesis using the transesterification and esterification method.

Key words: Biodiesel, Biodiesel Catalyst, Natural Zeolite

PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu kebutuhan manusia yang sangat penting. Sebagian besar energi yang digunakan manusia untuk bahan bakar tidak dapat diperbarui. Salah satunya yaitu minyak bumi. Sehingga jika digunakan secara terus menerus dikhawatirkan akan habis dan dapat menyebabkan kelangkaan energi [1]. Menurut data cadangan minyak bumi di Indonesia (*proved reserves* dan *probable reserves*) pada tahun 2019 adalah sebesar 3,8 miliar barel dengan *rasio reserves to production* (R/P) sebesar 9 tahun [2]. Pada saat ini cadangan minyak bumi di Indonesia semakin sedikit. Hal ini dikarenakan jumlah penduduk di Indonesia yang semakin bertambah sehingga pengguna kendaraan bermotor meningkat. Maka kebutuhan akan bahan bakar minyak juga semakin meningkat. Tentu saja hal ini perlu diatasi untuk mencegah kelangkaan bahan bakar minyak di Indonesia [3].

Kelangkaan bahan bakar minyak (BBM) dapat diatasi dengan energi alternatif. Beberapa negara sudah mulai mengembangkan energi alternatif untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu solusinya adalah biodiesel. Pembuatan biodiesel mulai dikembangkan karena dalam pembuatannya yang cukup mudah, murah dan terbarukan [4]. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil, biodiesel memiliki emisi dan dampak yang lebih rendah terhadap lingkungan. [5, 6]. Jika dilihat dari kadar emisi pembakaran, biodiesel menghasilkan emisi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil seperti yang ditunjukkan pada tabel 1. Biodiesel menghasilkan emisi CO₂ yang dapat digunakan oleh tanaman dan tidak adanya senyawa SO₂ yang merupakan penyebab keausan pada mesin, karat pada logam, hujan asam bahkan pemicu kanker [7].

Tabel 1. Perbandingan Biodiesel dan Solar Diesel [7]

Kriteria	Biodiesel	Solar Diesel
Sifat	Ramah lingkungan	Karsinogen
Bahan baku	Minyak nabati atau hewani	Minyak bumi
Ideks setana	<50	
SO ₂ (ppm)	0	78
CO (ppm)	10	40
NO (ppm)	37	64
NO ₂ (ppm)	1	1
O ₂ (%-b)	6	6,6
Total partikulat (mg/Nm ³)	0,25	5,6
Benzen (mg/Nm ³)	0,3	5,01
Toluen (mg/Nm ³)	0,57	2,31
Xylen (mg/Nm ³)	0,73	1,57
Etil benzene (mg/Nm ³)	0,3	0,73

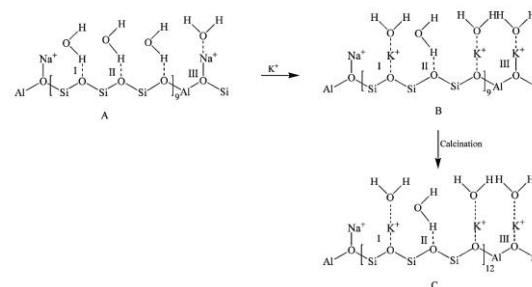
Biodiesel adalah ester monoalkil dari asam lemak rantai panjang yang berasal minyak nabati atau lemak hewani yang dihasilkan dari reaksi esterifikasi (asam lemak bebas) maupun transesterifikasi minyak nabati atau hewani (trigliserida) dengan alkohol rantai pendek dan dengan bantuan katalis homogen maupun heterogen [5, 6]. Biodiesel dipakai sebagai alternatif bagi bahan bakar dari mesin diesel dan dapat dibuat dari sumber yang dapat diperbarui seperti minyak sayur atau lemak hewan [8].

Pembuatan biodiesel dibutuhkan katalis dikarenakan reaksinya yang cenderung lama. Terdapat dua katalis yang dapat digunakan untuk pembuatan biodiesel yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Salah satu contoh katalis homogen yang sering digunakan dalam sintesis biodiesel yaitu KOH, NaOH, dan H_2SO_4 . Namun, dalam penggunaannya katalis homogen memiliki kekurangan yaitu tidak ramah lingkungan, tidak dapat digunakan kembali, dan banyak mengeluarkan air buangan dari pencucian residu katalis [9]. Oleh karena itu dibutuhkan katalis heterogen yang lebih ramah lingkungan dan dapat digunakan kembali [10].

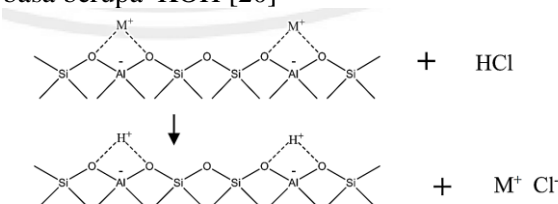
Penggunaan katalis heterogen lebih mudah daripada katalis homogen. Hal ini dikarenakan katalis heterogen memiliki kelebihan yaitu mudah dipisahkan pada akhir reaksi, dapat digunakan kembali, dan ramah lingkungan [11]. Salah satu katalis heterogen yaitu zeolit alam [12]. Zeolit adalah suatu kristal alumina silikat hidrat yang memiliki kerangka struktur tiga dimensi yang tersusun atas tetrahedral $(\text{SiO}_4)^{4-}$ dan $(\text{AlO}_4)^{5-}$ dengan atom oksigen sebagai penghubung keduanya [13]. Menurut data endapan zeolit alam di Indonesia yang tersebar di 20 lokasi sebesar 447.490.160 ton [14]. Kelimpahan zeolit alam di Indonesia mendorong para peneliti untuk memanfaatkan zeolit alam secara maksimal [15]. Penggunaan zeolit alam sebagai katalis biodiesel dikarenakan harganya yang relatif murah, disusun oleh kerangka silika alumina, tidak beracun atau ramah lingkungan, memiliki kemampuan absorpsi yang tinggi, selektif dan memiliki banyak struktur pori yang aktif sehingga memiliki luas permukaan yang tinggi [16].

Sebelum diaplikasikan sebagai katalis zeolit alam diperlukan modifikasi atau aktivasi zeolit alam agar diperoleh zeolit alam dengan

kualitas yang baik [17]. Hal ini dikarenakan zeolit alam memiliki cukup banyak pori sekitar 30% lebih dari volumenya sehingga perlu dilakukan modifikasi untuk menghilangkan unsur pengotor dan merubah rasio Si/Al [18]. Aktivasi dapat dilakukan secara fisika dan kimia. Aktivasi secara fisika dapat dilakukan dengan cara kalsinasi zeolit alam pada suhu 600°C . Sedangkan aktivasi secara kimia dapat dilakukan dengan menggunakan larutan asam seperti HCl dan larutan basa seperti NaOH/KOH pada berbagai konsentrasi [19]. Pada umumnya zeolit alam aktivasi asam disingkat dengan Z-AH, sedangkan zeolit alam aktivasi basa disingkat dengan Z-OH. Berikut ini merupakan reaksi aktivasi zeolit alam teraktivasi asam dan basa.



Gambar 1. Reaksi aktivasi zeolit alam dengan basa berupa KOH [20]



Gambar 2. Reaksi aktivasi zeolit alam dengan asam berupa HCl [21]

Pada artikel review ini membahas mengenai aktivasi zeolit alam secara kimia sehingga dapat dimanfaatkan sebagai katalis untuk reaksi transesterifikasi pada produksi biodiesel.

METODE

Metode yang digunakan dalam artikel review ini yaitu studi literatur. Studi literatur merupakan kajian yang dilakukan dengan cara mengumpulkan data dan informasi dari berbagai sumber seperti jurnal dan buku yang diawali dengan mengidentifikasi masalah hingga analisis dan pembahasan yang berkaitan dengan sintesis

biodiesel dengan bantuan katalis zeolit alam teraktivasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Biodiesel

Biodiesel merupakan salah satu energi alternatif yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan [1]. Biodiesel adalah ester monoalkil dari asam lemak rantai panjang yang berasal

dari minyak nabati atau lemak hewani yang dihasilkan dari proses proses esterifikasi (asam lemak bebas) maupun transesterifikasi minyak nabati atau hewani (trigliserida) dengan alkohol rantai pendek dan dengan bantuan katalis homogen maupun heterogen [5, 6]. Tabel 2 berikut ini merupakan senyawa hasil reaksi transesterifikasi.

Tabel 2. Senyawa Yang Dihasilkan Pada Reaksi Transesterifikasi

Katalis	Rumus Molekul	Nama Senyawa	Referensi
NaOH (Homogen)	$C_{15}H_{30}O_2$	Metil Miristat	[22]
	$C_{17}H_{34}O_2$	Metil Palmitat	
	$C_{19}H_{36}O_2$	Metil Oleat	
	$C_{19}H_{38}O_2$	Metil Stearat	
Zeolit alam teraktivasi NaOH 1M (heterogen)	$C_{19}H_{38}O_2$	Metil Stearat	[23]
	$C_{15}H_{30}O_2$	Metil Miristat	
	$C_{17}H_{34}O_2$	Metil Palmitat	
	$C_{19}H_{32}O_2$	Metil Linoleat	
	$C_{19}H_{36}O_2$	Metil Oleat	

Reaksi transesterifikasi dapat dilakukan menggunakan metode katalitik atau non-katalitik. Proses produksi biodiesel secara katalitik membutuhkan bantuan katalis untuk mempercepat terjadinya reaksi antara trigliserida dan metanol, dengan cara menurunkan energi aktivasi tanpa mengubah energi reaksi (ΔE) tersebut sehingga molekul yang jumlah energinya tidak tinggi dapat bereaksi membentuk zat yang diinginkan [24]. Menurut Islam & Ravindra (2017) biodiesel memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut :

- Dapat diperbarui atau bersifat *biodegradable*
- Memiliki emisi karbon yang lebih rendah dari bahan bakar fosil
- Memiliki tingkat kadar sulfur dan aromatik yang lebih rendah dari bahan bakar fosil
- Bahan yang digunakan merupakan bahan yang siap pakai, terbarukan, dan memiliki ketersediaan yang cukup banyak.

2. Minyak

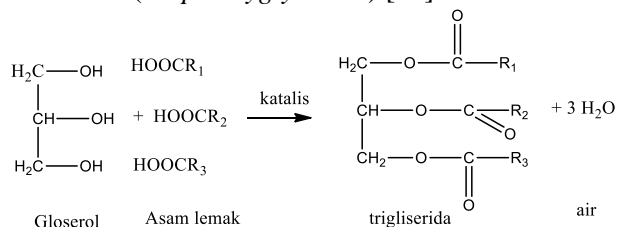
Biodiesel dapat terbuat dari sumber daya alam yang dapat diperbarui, meliputi minyak tumbuhan dan hewan, baik di darat maupun di laut. Total sumber penghasil minyak biodiesel lebih dari 50 jenis, meliputi kelapa

sawit, jarak pagar, minyak jelantah, kelapa, kapuk/randu, nyamplung, alga, dan lain sebagainya. Biodiesel dapat dijadikan sebagai bahan bakar pengganti solar, sebab komposisi fisika-kimia antara biodiesel dan solar tidak jauh berbeda [26]

Minyak merupakan salah satu bahan utama dalam pembuatan biodiesel. Minyak yang dapat digunakan sebagai bahan baku biodiesel secara langsung melalui reaksi transesterifikasi jika memiliki kadar asam lemak bebas sebesar 0,5-3% [27]. Minyak merupakan salah satu jenis lipida netral. Minyak dibagi menjadi dua kelompok yaitu minyak nabati dan minyak hewani. Selain minyak, bahan utama dalam pembuatan biodiesel yang lain yaitu lemak. Perbedaan minyak dan lemak terletak pada wujudnya. Minyak berwujud cair pada suhu kamar sedangkan lemak berwujud padat pada suhu kamar [28].

Minyak terdiri atas ester dari molekul gliserol dan 3 molekul asam lemak sehingga disebut sebagai triasil gliserol atau pada umumnya trigliserida [29]. Asam-asam lemak yang terbentuk akan terikat dengan trigliserida sehingga mempunyai 16-24 atom permolekul. Dimana molekul trigliserida merupakan hasil dari kondensasi tiga molekul asam lemak dan satu molekul gliserol dengan melepaskan 3 molekul air [30]. Reaksi pembentukan

trigliserida dapat dilihat di gambar 1. Trigliserida dalam minyak merupakan campuran dari berbagai macam asam lemak dan kemungkinan kecil sejenis. Apabila pada molekul trigliserida terdapat tiga asam lemak yang sama maka disebut sebagai lemak sederhana (*simple tryglyceride*) [29].



Gambar 3. Reaksi Pembentukan Trigliserida [30]

Minyak berdasarkan kejenuhannya dibagi menjadi dua yaitu asam lemak jenuh dan asam lemak tidak jenuh. Perbedaan terletak pada ikatan kimia yang dimiliki [31]. Asam lemak jenuh tersusun atas ikatan karbon-karbon tunggal dan tidak dapat menerima hidrogen tambahan. Sedangkan asam lemak tak jenuh tersusun atas satu atau lebih ikatan rangkap dalam rantai hidrokarbon [32]. Minyak dapat diubah menjadi biodiesel dengan reaksi transesterifikasi, dimana reaksi transesterifikasi tergantung pada kandungan asam lemak bebas pada minyak [33].

Menurut Origenes (2013) [34] minyak memiliki ciri-ciri kandungan asam oleat yang tinggi dan kandungan asam linoleat yang lebih rendah. Tabel 3 merupakan kandungan asam lemak dari beberapa jenis minyak.

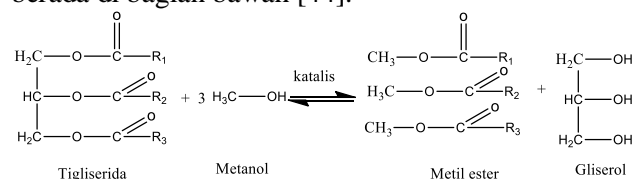
Tabel 3. Kandungan Asam Lemak dari Berbagai Jenis Minyak

No	Minyak	Kandungan							Referensi
		Asam Oleat	Asam linoleat	Asam palmitat	Asam stearat	Asam Arachidat	Asam behenat	Asam laurat	
1.	Minyak Jarak	51,22%	28,75%	12,71%	6,69%	0,63%	-	-	[35]
2.	Minyak Karet	39,45%	33,12%	13,11%	12,66%	0,54%	-	-	[36]
3.	Minyak Jelantah	35,31%	9,35%	35,52%	3,32%	-	-	-	[37]
4.	Minyak Goreng Sawit	48,56%	-	43,83%	5,92%	-	-	-	[38]
5.	Minyak Biji Kelor	65,7%	-	9,3 %	7,4%	-	8,6%	-	[30]
6.	Minyak Biji Kenari	44-47%	11-13%	24-26%	13-15%	-	-	-	[39]
7.	Minyak Kelapa Murni (VCO)	14,09%	-	17,16%	5,68%	-	-	32,73%	[40]
8.	Minyak Biji Jarak Pagar	48,64%	43,64%	7,01%	1,49%	-	-	1,02%	[41]

3. Metode Sintesis Biodiesel

Secara umum pembuatan biodiesel menggunakan metode transesterifikasi. Pada metode transesterifikasi bahan baku yang digunakan berupa lemak hewani atau minyak nabati dan metanol atau etanol [42]. Reaksi transesterifikasi adalah reaksi antara minyak (trigliserida) dan alkohol seperti metanol atau etanol. Sehingga dihasilkan ester dari salah satu pereaksinya yang juga merupakan ester. Sehingga akan terjadi pemecahan senyawa trigliserida [43]. Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi

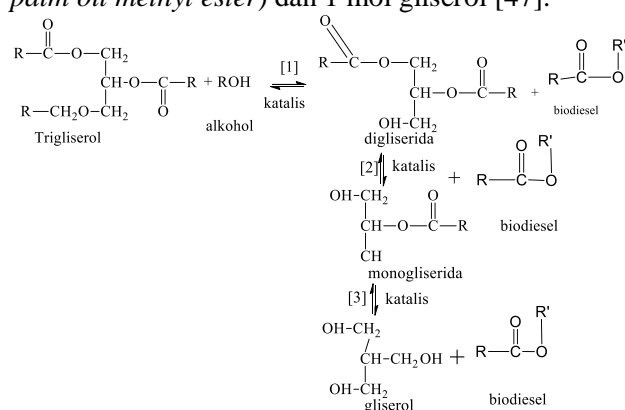
reversible atau reaksi bolak balik dimana dapat mengubah trigliserida menjadi digliserida, monosakarida dan biodiesel yang pada akhir reaksi berada di bagian atas sedangkan gliserol berada di bagian bawah [44].



Gambar 4. Reaksi Transesterifikasi [45]

Gambar 2 menunjukkan trigliserida bereaksi dengan metanol membentuk metil ester dan gliserin. Dimana kedua produk dari reaksi transesterifikasi akan membentuk dua fasa yang bertingkat sehingga mudah dipisahkan. Fasa gliserin terletak dibawah dan fasa ester alkil di atas. Kemudian ester dapat dimurnikan lebih lanjut untuk memperoleh biodiesel yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, sedangkan gliserin dimurnikan sebagai produk samping pembuatan biodiesel [46].

Reaksi transesterifikasi sebenarnya terjadi dalam tiga tahapan yaitu tahap pembentukan produk digliserida kemudian monogliserida dan yang terakhir terbentuk 3 mol metil ester (*POME/palm oil methyl ester*) dan 1 mol gliserol [47].

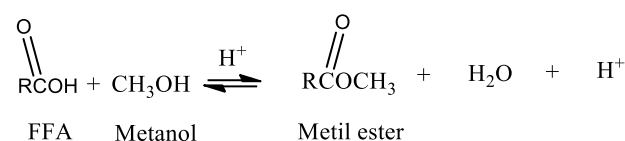


Gambar 5. Reaksi Transesterifikasi dalam tiga tahap [48]

Pada umumnya alkohol yang digunakan yaitu metanol dan etanol [49]. Hal ini dikarenakan metanol dan etanol harganya lebih murah. Metanol mempunyai kelebihan jika dilihat dari sifat fisika dan kimianya, yaitu metanol lebih polar dan rantai karbonnya lebih pendek dibandingkan etanol [50]. Reaksi transesterifikasi relatif lambat. Sehingga dibutuhkan katalis untuk mempercepat reaksi dan meningkatkan hasil produk [51]. Tujuan pada reaksi transesterifikasi adalah menurunkan viskositas pada minyak dan meningkatkan daya pembakaran sehingga dapat sesuai dengan standar diesel [52].

Selain menggunakan metode transesterifikasi beberapa sintesis biodiesel juga menggunakan metode esterifikasi. Metode esterifikasi digunakan jika minyak memiliki kandungan asam lemak bebas > 2% [53]. Esterifikasi adalah reaksi antara asam karboksilat dan alkohol yang menghasilkan metil ester dan air [54]. Penggunaan reaksi esterifikasi bertujuan untuk menurunkan kadar asam lemak bebas kemudian dilanjutkan transesterifikasi [53].

Apabila kandungan asam lemak bebas lebih dari 2% dikhawatirkan dapat terbentuk reaksi sabun (*saponification*) yang dapat mengganggu terbentuknya metil ester [55].



Gambar 6. Reaksi Esterifikasi [54]

4. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Reaksi Transesterifikasi

Pada umumnya faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi transesterifikasi pada sintesis biodiesel yaitu waktu reaksi, temperatur reaksi, perbandingan rasio molar, konsentrasi pereaksi, parameter pengadukan, dan katalisator [56].

4.1 Waktu reaksi

Waktu reaksi berbanding lurus dengan produk biodiesel yang dihasilkan. Artinya bahwa semakin lama waktu reaksi maka semakin banyak produk biodiesel yang dihasilkan [57]. Hal ini memberikan kesempatan lebih besar bagi molekul-molekul reaktan untuk saling bertumbukan. Namun setelah kesetimbangan tercapai maka tambahan waktu reaksi tidak mempengaruhi reaksi, melainkan dapat menyebabkan produk berkurang karena adanya reaksi balik, yaitu metil ester kembali menjadi trigliserida [46].

4.2 Suhu reaksi

Menurut Sinaga [58] bahwa semakin tinggi suhu dalam suatu reaksi maka kesempatan untuk molekul-molekul saling bertumbukan juga semakin besar sehingga dapat menghasilkan konversi yang besar. Berbagai penelitian dilakukan untuk mengetahui suhu optimum dimana dihasilkan konversi yang terbesar, seperti penelitian yang dilakukan oleh Nasution dkk (2019) [59] tentang sintesis biodiesel dari minyak biji karet dengan katalis zeolit alam teraktivasi asam (Z-AH) dan basa (Z-OH) menggunakan metode esterifikasi dan transesterifikasi. Variabel suhu yang digunakan yaitu 30°C, 60°C, dan 90°C. Didapatkan bahwa semakin besar suhu yang digunakan maka hasil % *yield* yang dihasilkan

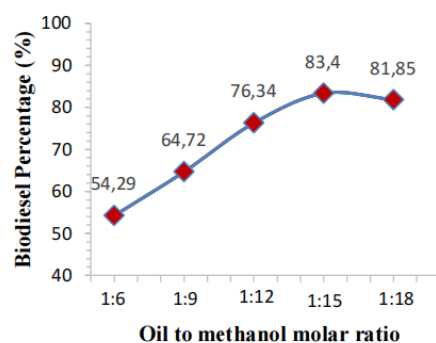
semakin kecil. Hal ini disebabkan karena kenaikan suhu mengakibatkan adanya gerakan yang sangat aktif pada reaktan sehingga dapat mengakibatkan adanya halangan bertemunya sisi aktif molekul reaktan dengan sisi aktif katalis. Dimana diketahui bahwa katalis heterogen memiliki fasa yang berbeda dengan reaktan. Oleh karena itu, reaksi hanya berlangsung pada bidang antar muka sehingga sangat dipengaruhi oleh jumlah reaktan yang bereaksi dengan situs aktif katalis. Selain itu, kenaikan suhu juga menyebabkan sebagian metanol menguap sehingga rasio molar metanol menjadi berkurang.

Tabel 4. Data pengaruh suhu terhadap % *yield* biodiesel [59]

Katalis	Rasio Minyak : Metanol	Suhu (°C)	% <i>yield</i> (% b/b)
Z-OH	1:6	30	54,41
	1:6	60	51,67
	1:6	90	47,89
Z-AH	1:6	30	69,76
	1:6	60	65,58
	1:6	90	57,14

4.3 Perbandingan rasio molar minyak dan alkohol

Perbandingan rasio molar dapat berpengaruh terhadap kualitas produk dan rendemen biodiesel yang dihasilkan, semakin tinggi rasio molar minyak dan alkohol yang digunakan maka semakin besar rendemen biodiesel yang dihasilkan [60]. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Made (2017) [61] tentang sintesis biodiesel menggunakan katalis CaO/zeolit alam pada suhu 60°C selama 7 jam dengan kecepatan pengadukan 300 rpm. Variasi rasio minyak dan metanol yang digunakan yaitu 1:6, 1:9, 1:12, 1:15, dan 1:18. Dihasilkan % konversi biodiesel tertinggi dengan rasio molar 1:15 sebesar 83,4%. Pada rasio molar 1:18, % konversi yang dihasilkan menurun dikarenakan kelarutan gliserol sebagai produk samping meningkat. Kandungan gliserol yang tinggi dalam campuran dapat menggeser kembali reaksi kesetimbangan ke bagian reaktan.



Gambar 7. Diagram pengaruh rasio molar terhadap % konversi biodiesel [61]

4.4 Konsentrasi pereaksi

Penambahan konsentrasi pereaksi pada sisi kiri akan menggeser reaksi pembentukan produk ke arah kanan. Pengurangan konsentrasi produk di sisi kanan akan menggeser reaksi ke arah kanan juga, untuk membentuk kesetimbangan baru. Pembentukan metil ester pada reaksi transesterifikasi, disebabkan pergeseran kesetimbangan akibat adanya gangguan ini [62].

4.5 Parameter pengadukan

Proses pengadukan bertujuan untuk meningkatkan pergerakan partikel materi. Jika terjadi peningkatan pergerakan partikel materi, maka tumbukan antarpartikel materi juga semakin sering. Sehingga, reaksi kimia akan berjalan semakin cepat [46].

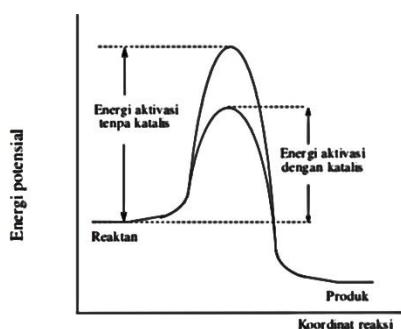
4.6 Katalisator

Terdapat dua katalis yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Namun, katalis heterogen yang dianggap lebih ekonomis dan lebih mudah dalam pemisahan produk biodiesel [46]. Katalis homogen asam seperti H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , dan HF , sedangkan katalis homogen basa seperti KOH dan $NaOH$ sedangkan katalis heterogen yang sering digunakan dalam reaksi transesterifikasi misalnya MgO , Zeolit, ZnO , SrO , TiO_2 , CaO , Al_2O_3 , dan $CaCO_3$ [63], [64].

5. Katalis Biodiesel

Katalis adalah suatu zat yang dapat mempercepat laju reaksi dan pada akhir reaksi akan terbentuk kembali [65]. Katalis bereaksi dengan reaktan sehingga dapat membentuk suatu zat antara yang aktif. Kemudian zat antara yang aktif dapat bereaksi dengan molekul reaktan yang lain sehingga dapat menghasilkan produk. Pada

akhir reaksi, produk akan terlepas dari permukaan katalis [49]. Katalis berfungsi untuk menurunkan energi aktivasi dengan terlibat dalam reaksi sehingga reaksi dapat berjalan secara cepat [66].



Gambar 8. Diagram koordinat reaksi terhadap energi potensial tanpa dan dengan katalis [67]

Pada umumnya sintesis biodiesel dapat menggunakan katalis homogen atau heterogen. Katalis homogen adalah katalis yang memiliki fasa yang sama dengan biodiesel yaitu fasa cair. Sedangkan katalis heterogen adalah katalis yang memiliki fasa berbeda dengan biodiesel seperti campuran pada fasa gas, padat, dan cair. Pada katalis heterogen maupun homogen dibagi menjadi katalis asam dan basa [68].

Katalis homogen asam seperti H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , dan HF sedangkan katalis homogen basa seperti KOH dan NaOH [6]. Katalis homogen memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi sehingga tidak mudah terkontaminasi oleh adanya pengotor, mudah dioperasikan, mudah dipelajari dan dimodifikasi [69]. Namun, penggunaan katalis homogen memiliki beberapa kelemahan seperti rumitnya pemisahan produk biodiesel dengan katalis dan adanya produk samping berupa sabun [64].

Katalis heterogen yang sering digunakan dalam reaksi transesterifikasi misalnya MgO , Zeolit, ZnO , SrO , TiO_2 , CaO , Al_2O_3 , dan CaCO_3 [64]. Penggunaan katalis heterogen banyak memberikan keuntungan seperti mudah dipisahkan dari hasil produknya melalui metode filtrasi karena memiliki fasa yang berbeda dengan produknya, mudah diregenerasi serta dapat digunakan kembali, tidak menghasilkan sabun ketika bereaksi dengan FFA (*Free Fatty Acid*), tidak beracun dan lebih ramah lingkungan, lebih murah, dan tidak bersifat korosif [70]. Penggunaan katalis heterogen yang lebih mudah untuk digunakan sehingga penggunaan katalis heterogen sangat perlu dikembangkan kembali. Salah satunya yaitu menggunakan zeolit alam

dimana zeolit alam memiliki kerangka struktur tiga dimensi yang merupakan kristal alumina silika. Zeolit alam dapat ditambang langsung dari alam, sehingga harganya lebih murah dibandingkan dengan zeolit sintesis [12].

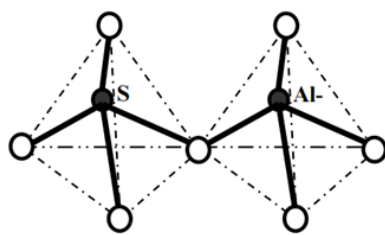
6. Zeolit Alam

Zeolit alam banyak terdapat pada daerah gunung berapi yang berasal dari sedimentasi abu vulkanik [54]. Menurut data deposit alam zeolit tersebar di beberapa wilayah di Indonesia seperti Jawa Barat, antara lain di daerah Bayah Kabupaten Lebak, daerah Geger Bitung, Cisarua, Cikembar dan Limusnunggal Kabupaten Sukabumi. Di Jawa Tengah zeolit alam terdapat di daerah Wadaslintang Wonosobo, Nanggulan Kulon Progo, Bayat Klaten dan Kabupaten Gunung Kidul. Selain di Pulau Jawa, bahan alam ini juga dapat ditemukan di Nusa Tenggara Timur [55].

Zeolit alam adalah salah satu padatan anorganik yang bisa dimanfaatkan sebagai katalis pada produksi biodiesel [70]. Pemanfaatan zeolit alam sebagai katalis biodiesel memiliki beberapa keuntungan, sebagai berikut :

- Harga yang relatif murah karena ditambang langsung dari alam [71]
- Kelimpahan di alam yang cukup banyak [15]
- Pada akhir reaksi mudah dipisahkan [59]
- Dapat dilakukan regenerasi sehingga ramah lingkungan [59]

Zeolit merupakan mineral yang memiliki struktur kristal alumina silikat yang mempunyai bentuk *framework* (struktur tiga dimensi) dan mempunyai rongga yang diisi oleh alkali tanah atau logam alkali dan juga molekul air. Logam alkali dan molekul air dapat digantikan oleh molekul atau ion yang lain secara *reversible* tanpa merusak struktur zeolit yaitu alumina silikat, sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai *ion exchange*, adsorben, dan katalis [72]. Bentuk tetrahedral silika dan alumina pada zeolit alam dapat dilihat pada gambar 6. Zeolit dengan struktur khas yang dimilikinya, memperlihatkan sifat-sifat fisika dan kimia yang sangat menarik. Beberapa sifat kimia zeolit yang banyak dipelajari dan dimanfaatkan secara luas adalah sifat selektivitas adsorpsi, penukar ion dan katalis aktif [24].

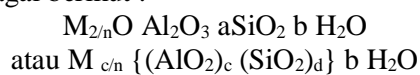


Gambar 9. Bentuk Tetrahedra Silika dan Alumina Pada Zeolit [73]

Tabel 5. Komposisi SiO_2 dan Al_2O_3 pada zeolit alam dari berbagai daerah

No	Asal Zeolit Alam	Kadar SiO_2	Kadar Al_2O_3	Referensi
1.	Zeolit alam Wonosari Gunung Kidul	65,56%	11,04%	[17]
2.	Zeolit alam Klaten	64,55%	12,83%	[65]
3.	Zeolit alam Tasik Malaya	61,40-70,60 %	11,49 - 3,84 %	[74]
4.	Zeolit alam Cikembar, Sukabumi	68,0 - 69,8 %	11,85 - 13,16%	[74]
5.	Zeolit alam Nanggung, Bogor	61,39 - 66,16 %	12,04 - 14,12%	[74]
7.	Zeolit alam Sumbawa	54.6%	21.1%	[75]
8.	Zeolit alam Lampung	69,11%	10,41%	[76]

Zeolit alam pada umumnya memiliki rumus kimia oksida berdasarkan satuan sel kristal sebagai berikut :



dimana n merupakan valensi logam, a dan b merupakan molekul silikat air, c dan d merupakan jumlah tetrahedral alumina dan silika [73]. Rasio d/c atau silika/alumina bervariasi yaitu antara 1-5. Kerangka dasar struktur zeolit tersusun atas molekul-molekul tetrahedra $(\text{AlO}_4)^{3-}$ dan $(\text{SiO}_4)^{4-}$ yang dihubungkan oleh atom oksigen [77].

Pemanfaatan zeolit alam sebagai katalis memiliki beberapa karakteristik yang perlu diperhatikan, salah satunya adalah tingkat kemurnian komposisi silika dan atau perbandingan antara Si/Al [74]. Perbandingan Si/Al akan menentukan komposisi dan struktur yang akan disintesis. Semakin tinggi perbandingan Si/Al maka kristalinitas pada produk juga akan meningkat [78].

Telah ditemukan sekitar 50 spesies mineral yang berbeda dari zeolit alam. Namun, hanya 9 mineral yang sering dijumpai seperti klinoptilolit, modernit, erionit, laumontit, ferrierit, phillipsit, analcim, heulandit, dan chabazit [14]. Hampir seluruh zeolit alam yang ditemukan di Indonesia tersusun oleh mineral modernit dan klinoptilolit atau campuran keduanya, dan sedikit mineral heulandit [79].

7. Aktivasi Katalis Zeolit Alam

Sebelum digunakan sebagai katalis, zeolit alam diaktivasi terlebih dahulu [80]. Aktivasi perlu dilakukan karena zeolit alam pada umumnya mempunyai stabilitas termal yang tidak terlalu tinggi dengan ukuran pori yang tidak seragam, mengandung banyak pengotor dan aktivitas katalitik yang rendah [17]. Selain itu, zeolit alam memiliki jumlah yang banyak tapi distribusinya belum merata dan kristalisasinya yang kurang baik, maka untuk memperbaikinya dengan cara aktivasi atau modifikasi untuk memperbesar luas permukaan kontak dan tingkat keasaman yang meningkat dapat menyebabkan aktivasi katalis dari zeolit meningkat [12]. Zeolit alam yang teraktivasi dimungkinkan dapat digunakan sebagai katalis asam dalam reaksi esterifikasi pada pembuatan biodiesel [81].

Terdapat dua cara dalam aktivasi zeolit alam yaitu dengan cara fisika dan kimia [82]. Aktivasi zeolit alam secara fisika dapat dilakukan dengan cara kalsinasi pada suhu 200-400°C selama beberapa jam [83]. Proses kalsinasi bertujuan untuk menghilangkan molekul air dan zat organik pada pori dan kerangka zeolit alam. Perlakuan kalsinasi juga dapat menyebabkan perpindahan kation sehingga akan mempengaruhi ukuran pori, letak kation, dan kesetimbangan serta kinetika adsorpsi [84]. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Lailiy dan Khamidal (2019) [85] mengenai pengaruh suhu kalsinasi pada zeolit alam terhadap kemampuan adsorpsi limbah fenol didapatkan bahwa kemampuan adsorpsi tertinggi zeolit alam temperatur kalsinasi 400 °C

dan 450 °C pada konsentrasi awal fenol 6 ppm, dan kemampuan adsorpsi tertinggi zeolit alam temperatur kalsinasi 500 °C pada konsentrasi awal fenol 8 ppm. Adsorpsi zeolit alam terhadap fenol mengikuti model isoterm Langmuir dan mengikuti kinetika reaksi orde satu, serta tidak merubah struktur zeolit alam.

Aktivasi zeolit alam secara kimia dapat dilakukan dengan menggunakan larutan asam kuat berupa asam klorida (HCl) dan asam sulfat (H₂SO₄) maupun menggunakan basa kuat seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) yang bertujuan untuk menghilangkan pengotor (seperti Fe, Ca, Mg), membersihkan permukaan pori-pori zeolit alam, dan menata kembali letak atom yang dapat dipertukarkan sehingga dapat bekerja dengan maksimal [18], [86]. Proses aktivasi zeolit alam secara kimia diperoleh bahwa aktivasi secara basa

dapat menghasilkan zeolit alam yang polar dibandingkan aktivasi secara asam [83]. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Al Muttaqii (2019) [18] tentang pengaruh aktivasi zeolit alam secara asam (Z-AH) dan basa (Z-OH) dengan cara 13 gr zeolit alam ditambahkan 100 mL larutan asam/basa sesuai variable konsentrasi yang ditentukan yaitu 0,5, 1, 1,5, 2, dan 2,5 M. Lalu dinyalakan stirrer selama 2 jam. Zeolit alam kemudian dibilas dengan aquades, disaring dan dioven pada suhu 110°C hingga kering. Zeolit alam kemudian dikalsinasi selama 3 jam pada suhu 500 °C. Sehingga dihasilkan bahwa perlakuan aktivasi secara asam menghasilkan senyawa SiO₂ sebesar 75-76% sedangkan perlakuan basa menghasilkan SiO₂ sebesar 72-73%.

Tabel 6. Komposisi zeolit alam teraktivasi asam dan basa [18]

Zeolit alam setelah aktivasi	Konsentrasi (M)	Jenis Mineral (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
HCl	0,5	75.297	10.959	0.337	0.875	3.770	4.130	0.524	3.762
HCl	1	75.475	11.029	0.270	0.874	3.486	4.336	0.460	3.397
HCl	1,5	74.737	11.010	0.323	0.871	4.124	4.181	0.521	3.892
HCl	2	75.917	11.327	0.411	0.775	3.475	3.743	0.502	3.568
HCl	2,5	75.628	11.124	0.336	0.827	3.520	3.975	0.503	3.590
NaOH	0,5	72.410	10.884	0.392	0.919	4.364	5.423	0.570	4.633
NaOH	1	72.682	11.079	0.385	0.914	4.112	5.274	0.571	4.554
NaOH	1,5	72.334	11.229	0.406	0.927	4.118	5.294	0.589	4.660
NaOH	2	72.523	11.324	0.384	0.910	4.226	5.186	0.557	4.498
NaOH	2,5	72.159	11.416	0.366	0.952	4.021	5.451	0.590	4.618

Proses aktivasi zeolit alam secara asam (Z-AH) dapat menyebabkan penurunan kandungan Ca dan Mg pada zeolit. selain itu aktivasi zeolit alam secara asam terbukti dapat menyebabkan zeolit menjadi lebih hidrofob sehingga daya adsorpsinya terhadap air akan berkurang [87]. Sedangkan aktivasi secara basa dapat menyebabkan penurunan rasio Si/Al jika dilakukan aktivasi dengan pH

tinggi. Proses aktivasi zeolit alam secara asam maupun basa, diperoleh hasil bahwa zeolit yang diaktivasi dengan basa akan menjadi lebih polar dibandingkan dengan zeolit yang diaktivasi dengan basa [88]. Semakin tinggi konsentrasi asam yang digunakan maka daya adsorpsi zeolit terhadap uap air menjadi semakin kecil [89].

8. Sintesis Biodiesel dengan Katalis Zeolit Alam

Biodiesel dapat dibuat dari bahan baku berupa minyak nabati maupun hewani dengan memanfaatkan senyawa asam lemak berupa trigliserida yang kemudian direaksikan dengan alkohol dengan bantuan katalis [90]. Kualitas

biodiesel ditentukan dari kemurnian senyawa metil ester. Selain senyawa metil ester disebut sebagai kontaminan. Senyawa kontaminan dapat menyebabkan kerak pada mesin dan penyumbatan pada saluran injeksi. Senyawa

kontaminan yang terdapat pada biodiesel dapat berupa asam lemak bebas, air, gliserol, dan mono-, di-, dan trigliserida [41]. Tabel 7 dan 8 secara berurutan merupakan data hasil konversi

atau *yield* dari sintesis biodiesel dengan bantuan katalis zeolit alam teraktivasi asam dan basa.

Tabel 7. Kondisi Reaksi dan *Yield* sintesis biodiesel katalis zeolit alam teraktivasi asam

No	Katalis	Katalis Esterifikasi	Katalis Transesterifikasi	Minyak	Waktu reaksi	Rasio Molar Minyak : Metanol	Kondisi reaksi	Konversi	Referensi
1.	Zeolit alam Wonosari, Indonesia	Z-AH teraktivasi HCl 6 M	KOH	Minyak Jelantah	1 jam	1 : 6	Konsentrasi katalis 2% , 60°C	Y = 100%	[81]
2.	Zeolit alam	-	Z-AH teraktivasi HCl 6 N	Minyak Jelantah	1 jam	1:4	Konsentrasi katalis 1% , 60°C	Y= 76,844%	[8]
3.	Zeolit alam Bayah Banten, Indonesia	1 M HCl dan 10 % H ₂ SO ₄	KOH	Crude Palm Oil (Minyak Sawit Mentah)	2 jam 50 menit	1:23,4 1	Konsentrasi katalis 1,59% , 30°C	Y = 71,97 %	[91]
4	Zeolit alam, Desa Sarulla Kec. Pahe Jae	-	Z-AH teraktivasi HCl 3M	Minyak biji karet	1 jam	1:6	Konsentrasi katalis 1% , 30°C	Y= 69,76%	[59]

Tabel 8. Kondisi Reaksi dan *Yield* sintesis biodiesel katalis zeolit alam teraktivasi basa

No	Katalis	Zeolit Alam Teraktivasi Basa	Minyak	Waktu reaksi	Rasio Molar Minyak : Metanol	Kondisi reaksi	Konversi	Referensi
1.	Zeolit alam Pacitan	KOH	Minyak Kelapa Swit	2 jam	1 : 7	Konsentrasi katalis 5% , 60°C	Y = 95,09 %	[92]
2,	Zeolit alam Pacitan	KOH	Minyak Kelapa Sawit	2 jam	1:7	Konsentrasi katalis 3% , 60°C	Y = 96,44 %	[93]
2.	Zeolit alam	KOH 75%	Minyak Sawit <i>Off Grade</i>	2 jam	1:8	Konsentrasi katalis 3% , 60°C	Y = 92.04%	[94]
3.	Zeolit alam	NaOH 2 M	Minyak Biji Karet	4 jam	1:6	Konsentrasi katalis 1% ,	Y = 54,41 %	[59]

4.	Zeolit alam Bayah Banten	KOH	Minyak goreng	2 jam	1:7	30°C Konsentrasi katalis 3% , 60°C	Y= 87,8%	[12]
5.	Zeolit alam	KOH 75%	Minyak sawit off grade	2 jam	1:8	Konsentrasi katalis 3% , 60°C	Y = 92,04%	[95]
6.	Zeolit alam	KOH	Minyak kelapa sawit	3 jam	1:15	Konsentrasi katalis 3% , 60°C	Y= 96,7%	[20]

Dari data tabel di atas didapatkan bahwa sintesis biodiesel yang berasal dari berbagai macam minyak dengan metode transesterifikasi dan esterifikasi dengan bantuan katalis zeolit alam dengan *yield* tertinggi pada katalis zeolit alam teraktivasi asam berupa HCl 6M dengan *yield* sebesar 100% dengan bahan minyak jelantah. Sementara katalis zeolit alam teraktivasi basa dengan *yield* tertinggi sebesar 96,7% yang merupakan katalis zeolit alam teraktivasi KOH dengan bahan baku minyak kelapa sawit.

Pengaruh waktu reaksi ketika reaksi transesterifikasi sangat berpengaruh terhadap *yield* yang dihasilkan. Waktu reaksi meningkat terjadi penurunan *yield* karena reaksi telah melewati kondisi batas waktu optimum. Kenaikan *yield* seiring dengan peningkatan waktu reaksi karena reaksi metanolisis akan semakin sempurna. Namun, peningkatan waktu reaksi juga menyebabkan suhu meningkat sehingga gliserin ikut terlarut dalam produk dan menurunkan *yield* secara keseluruhan. Waktu reaksi juga mempengaruhi kontak yang terjadi antara situs aktif katalis, metanol dan minyak alga dalam meningkatkan konversi [96].

KESIMPULAN

Produksi biodiesel dengan katalis zeolit alam yang teraktivasi secara kimia menunjukkan hasil biodiesel yang cukup baik. Dilihat dari % konversi atau *yield* dengan metode transesterifikasi terhadap beberapa jenis minyak didapatkan data penelitian paling baik pada sintesis biodiesel dari minyak jelantah dengan bantuan katalis zeolit alam Wonosari teraktivasi asam HCl 6M dihasilkan % *yield* sebesar 100%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Setiowati dan A. Linggawati, "PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK GORENG BEKAS MENGGUNAKAN KATALIS CaO CANGKANG KERANG

DARAH KALSINASI 900 °C," vol. 1, hlm. 6, 2014.

- [2] A. E. Setyono dan B. F. T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050," *J. Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, hlm. 154–162, Okt 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [3] F. I. Darmawan dan I. W. Susila, "PROSES PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK JELANTAH DENGAN METODE PENCUCIAN DRY-WASH SISTEM," vol. 02, hlm. 8, 2013.
- [4] S. S. Riandy Putra dan Suheli, "ANALISA PEMBUATAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH DENGAN KATALIS BASA," vol. 03, 2021.
- [5] S. Baroutian, M. K. Aroua, A. A. A. Raman, dan N. M. N. Sulaiman, "Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 11, hlm. 1378–1385, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.05.009.
- [6] S. Oko, A. Kurniawan, dan D. Willain, "SINTESIS BIODIESEL DARI MINYAK KEDELAI MELALUI REAKSI TRANSESTERIFIKASI DENGAN KATALIS CaO/NaOH," *J. Teknol.*, vol. 13, no. 1, hlm. 6, 2021.
- [7] R. Prihandana, R. Hendroko, dan M. Nuramin, *Menghasilkan Biodiesel Murah Mengatasi Polusidan Kelangkaan BBM*. Jakarta: Agromedia Pustaka, 2006.
- [8] A. T. Saputra, M. A. Wicaksono, dan I. Irsan, "Pemanfaatan Minyak Goreng Bekas untuk Pembuatan Biodiesel Menggunakan Katalis Zeolit Alat Teraktivasi," *J. Chemurgy*, vol. 1, no. 2, hlm. 1, Apr 2018, doi: 10.30872/cmg.v1i2.1138.
- [9] Z. Zuhra, H. Husin, F. Hasfita, dan W. Rinaldi, "PREPARASI KATALIS ABU

- KULIT KERANG UNTUK TRANSESTERIFIKASI MINYAK NYAMPLUNG MENJADI BIODIESEL (Preparation of Cockle Shell Powder Catalyst for Transesterification of Calophyllum inophyllum L. Oil to Biodiesel),” *J. Agritech*, vol. 35, no. 01, hlm. 69, Mei 2015, doi: 10.22146/agritech.9421.
- [10] N. Kaur dan A. Ali, “Kinetics and reusability of Zr/CaO as heterogeneous catalyst for the ethanolysis and methanolysis of *Jatropha crucas* oil,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 119, hlm. 173–184, Mar 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2013.11.002.
- [11] M. O. Faruque, S. A. Razzak, dan M. M. Hossain, “Application of Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production from Microalgal Oil—A Review,” *Catalysts*, vol. 10, no. 9, hlm. 1025, Sep 2020, doi: 10.3390/catal10091025.
- [12] R. Hartono, A. Wijanarko, dan H. Hermansyah, “Synthesis of biodiesel using local natural zeolite as heterogeneous anion exchange catalyst,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 345, hlm. 012002, Apr 2018, doi: 10.1088/1757-899X/345/1/012002.
- [13] M. Adriati dan A. Suseno, “Modifikasi Zeolit Alam Menggunakan Besi (Fe) dan Kobalt (Co) untuk Katalis Degradasi Fenol,” hlm. 5, 2013.
- [14] K. Kusdarto, “POTENSI ZEOLIT DI INDONESIA,” vol. 7, no. 2, hlm. 79–87, Nov 2008.
- [15] S. Ulfayana, S. Bahri, dan Z. Helwani, “PEMANFAATAN ZEOLIT ALAM SEBAGAI KATALIS PADA TAHAP TRANSESTERIFIKASI PEMBUATAN BIODIESEL DARI SAWIT OFF GRADE,” vol. 1, hlm. 12, 2014.
- [16] A. Naluri, H. Rionaldo, dan Z. Helwani, “SAWIT OFF GRADE SEBAGAI BAHAN BAKU ALTERNATIF PEMBUATAN BIODIESEL MELALUI PROSES DUA TAHAP MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM YANG DIMODIFIKASI,” vol. 2, no. 2, hlm. 6, 2015.
- [17] W. S. Atikah, “POTENSI ZEOLIT ALAM GUNUNG KIDUL TERAKTIVASI SEBAGAI MEDIA ADSORBEN PEWARNA TEKSTIL,” vol. 32, no. 1, hlm. 8, 2017.
- [18] M. Al Muttaqii dkk., “Pengaruh Aktivasi secara Kimia menggunakan Larutan Asam dan Basa terhadap Karakteristik Zeolit Alam,” *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 13, no. 2, hlm. 266, Des 2019, doi: 10.26578/jrti.v13i2.5577.
- [19] Y. D. Ngapa, “KAJIAN PENGARUH ASAM-BASA PADA AKTIVASI ZEOLIT DAN KARAKTERISASINYA SEBAGAI ADSORBEN PEWARNA BIRU METILENA,” hlm. 7.
- [20] P. Intarapong, S. Iangthanarat, P. Phanthong, A. Luengnaruemitchai, dan S. Jai-In, “Activity and basic properties of KOH/mordenite for transesterification of palm oil,” *J. Energy Chem.*, vol. 22, no. 5, hlm. 690–700, Sep 2013, doi: 10.1016/S2095-4956(13)60092-3.
- [21] C. Banon dan T. E. Suharto, “Adsorpsi Amoniak Oleh Adsorben Zeolit Alam Yang Diaktivasi Dengan Larutan Amonium Nitrat,” vol. 4, no. 2, hlm. 7, 2008.
- [22] A. Mukminin, E. Megawati, I. K. Warsa, Y. Yuniarti, W. A. Umoro, dan D. Islamiati, “Analisis Kandungan Biodiesel Hasil Reaksi Transesterifikasi Minyak Jelantah Berdasarkan Perbedaan Konsentrasi Katalis NaOH Menggunakan GC-MS,” *Sang Pencerah J. Ilm. Univ. Muhammadiyah Buton*, vol. 8, no. 1, hlm. 146–158, Feb 2022, doi: 10.35326/pencerah.v8i1.1897.
- [23] arifin dan Latifa, “SINTESIS BIODIESEL DARI MINYAK GORENG BEKAS DENGAN MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERMODIFIKASI,” *Indonesian Journal of Chemical Science*, vol. 2, 2015.
- [24] S. Purnama, A. H Tambunan, dan L. P. Eko Nugroho, “APPLICATION OF STATIC MIXER TOWARDS THE REDUCTION OF REQUIRED CATALYST IN BIODIESEL PRODUCTION,” *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 26, no. 3, hlm. 236–245, Des 2016, doi: 10.24961/J.Tek.Ind.Pert.2016.26.3.236.
- [25] A. Islam dan P. Ravindra, *Biodiesel Production with Green Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-45273-9.
- [26] P. Kuncahyo, A. Z. M. Fathallah, dan J. A. R. Hakim, “ANALISA PREDIKSI POTENSI BAHAN BAKU BIODIESEL SEBAGAI SUPLEMEN BAHAN BAKAR

- MOTOR DIESEL DI INDONESIA,” vol. 2, no. 1, hlm. 5, 2013.
- [27] H. Mt, S. Solihudin, E. Ernawati, dan S. Pramana, “Limbah Cair Industri Minyak Goreng Sawit sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel,” *EduChemia J. Kim. Dan Pendidik.*, vol. 4, no. 1, hlm. 34, Jan 2019, doi: 10.30870/educhemia.v4i1.5030.
- [28] Ketaren S, *Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak*, Edisi 1. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia, 1986.
- [29] D. Pranowo dan M. Muchalal, “ANALYSIS OF FREE FATTY ACID ON SOYBEAN OIL USING GAS CHROMATOGRAPHY – MASS SPECTROSCOPY,” *Indones. J. Chem.*, vol. 4, no. 1, hlm. 62–67, Jun 2010, doi: 10.22146/ijc.21875.
- [30] Y. K. Salimi, N. I. Ischak, dan Y. Ibrahim, “KARAKTERISASI ASAM LEMAK HASIL HIDROLISIS PADA MINYAK BIJI KELOR (*Moringa oleifera*) DENGAN METODE KROMATOGRAFI GAS-SPEKTROSKOPI MASSA,” *Jambura J. Chem.*, vol. 1, no. 1, hlm. 6–14, Mar 2019, doi: 10.34312/jambchem.v1i1.2101.
- [31] D. R. Sukarsa, “STUDI AKTIVITAS ASAM LEMAK OMEGA-3 IKAN LAUT PADA MENCIT SEBAGAI MODEL HEWAN PERCOBAAN (A Study of Activity of Omega -3 Fatty Acid of Some Marine Fish in Mice as the,” hlm. 12, 2004.
- [32] I. A. Ibadurrohman, N. Hamidi, dan L. Yuliati, “Pengaruh Panjang Rantai Karbon dan Derajat Ketidakjenuhan terhadap Karakteristik Pembakaran Droplet Asam Lemak Tunggal,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 2, hlm. 331–347, Agu 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.02.11.
- [33] P. Goyal, M. P. Sharma, dan S. Jain, “Optimization of Conversion of High Free Fatty Acid *Jatropha curcas* Oil to Biodiesel Using Response Surface Methodology,” *ISRN Chem. Eng.*, hlm. 9, 2012.
- [34] K. Origenes B, “ANALISIS KANDUNGAN ASAM LEMAK TRANS (TRANS FAT) DALAM MINYAK BEKAS PENGGORENGAN JAJANAN DI PINGGIR JALAN KOTA KUPANG,” vol. 1, hlm. 17–31, 2013.
- [35] H. Husin, “STUDI PENGGUNAAN KATALIS ABU SABUT KELAPA, ABU TANDAN SAWIT DAN K_2CO_3 UNTUK KONVERSI MINYAK JARAK MENJADI BIODIESEL,” vol. 13, no. 4, hlm. 8, 2011.
- [36] D. A. Setyawardhani, S. Distantina, H. Henfiana, dan A. S. Dewi, “PEMBUATAN BIODIESEL DARI ASAM LEMAK JENUH MINYAK BIJI KARET,” hlm. 7, 2010.
- [37] W. T. Wahyuni dan M. Srimati, “PEMANFAATAN AMPAS TEBU UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS (SIFAT ORGANOLEPTIK, PARAMETER OKSIDASI, DAN PROFIL ASAM LEMAK) PADA MINYAK JELANTAH,” *Nutri-Sains J. Gizi Pangan Dan Apl.*, vol. 1, no. 2, hlm. 19, Mei 2018, doi: 10.21580/ns.2017.1.2.2453.
- [38] H. Mt, S. Solihudin, E. Ernawati, dan S. Pramana, “Limbah Cair Industri Minyak Goreng Sawit sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel,” *EduChemia J. Kim. Dan Pendidik.*, vol. 4, no. 1, hlm. 34, Jan 2019, doi: 10.30870/educhemia.v4i1.5030.
- [39] G. S. S. Djarkasi, S. Raharjo, dan Z. Noor, “SIFAT FISIK DAN KIMIA MINYAK KENARI,” vol. 27, no. 4, hlm. 6, 2007.
- [40] A. Novilla, P. Nursidika, dan W. Mahargyani, “Komposisi Asam Lemak Minyak Kelapa Murni (Virgin Coconut Oil) yang Berpotensi sebagai Anti Kandidiasis,” *EduChemia J. Kim. Dan Pendidik.*, vol. 2, no. 2, hlm. 161, Jul 2017, doi: 10.30870/educhemia.v2i2.1447.
- [41] I. A. Kartika, M. Yani, dan D. Hermawan, “TRANSESTERIFIKASI IN SITU BIJI JARAK PAGAR: PENGARUH JENIS PEREAKSI, KECEPATAN PENGADUKAN DAN SUHU REAKSI TERHADAP RENDEMEN DAN KUALITAS BIODIESEL,” vol. 21, hlm. 11, 2014.
- [42] L. Gao, G. Teng, G. Xiao, dan R. Wei, “Biodiesel from palm oil via loading KF/Ca-Al hydrotalcite catalyst,” *Biomass Bioenergy*, vol. 34, no. 9, hlm. 1283–1288, 2010, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.03.023.
- [43] I. Aziz, “Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas,” *J. Kim. Val.*, vol. 1, no. 1, Nov 2007, doi: 10.15408/jkv.v1i1.209.
- [44] M. E. Borges dan L. Díaz, “Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review,”

- Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, hlm. 2839–2849, Jun 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.071.
- [45] M. E. Borges dan L. Díaz, “Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, hlm. 2839–2849, Jun 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.071.
- [46] S. Miskah, R. Apriani, dan D. Miranda, “PENGARUH WAKTU REAKSI DAN KECEPATAN PENGADUKAN TERHADAP KONVERSI BODIESEL DARI LEMAK AYAM DENGAN PROSES TRANSESTERIFIKASI,” vol. 23, no. 1, hlm. 10, 2017.
- [47] T. S. Utami, R. Arbianti, dan D. Nurhasman, “Kinetika Reaksi Transesterifikasi CPO terhadap Produk Metil Palmitat dalam Reaktor Tumpak,” hlm. 6, 2007.
- [48] A. Ahmed, S. Elkatatny, dan S. Al-Afnan, “Applications of Biodiesel in Drilling Fluids,” *Geofluids*, vol. 2021, hlm. 1–11, Mar 2021, doi: 10.1155/2021/5565897.
- [49] S. Arita, M. B. Dara, dan J. Irawan, “PEMBUATAN METIL ESTER ASAM LEMAK DARI CPO OFF GRADE DENGAN METODE ESTERIFIKASI-TRANSESTERIFIKASI,” vol. 15, no. 2, hlm. 10, 2008.
- [50] R. Ediaty, “Review: Pengaruh Kebasaan dan Luas Permukaan Katalis Terhadap Aktivitas Katalis Basa Heterogen untuk Produksi Biodiesel,” hlm. 6, 2011.
- [51] D. G. Ramadhani, A. W. Sarjono, H. Setyoko, N. F. Fatimah, dan N. D. Nurhayati, “Synthesis of Natural Ni/Zeolite Activated by Acid as Catalyst for Synthesis Biodiesel from Ketapang Seeds Oil,” *JKPK J. Kim. Dan Pendidik. Kim.*, vol. 2, no. 1, hlm. 72, Mei 2017, doi: 10.20961/jkpk.v2i1.8530.
- [52] P. D. Sukmawati, “Optimization Of Used Cooking Oil Into Biodiesel With Sulfated Zirconia Zeolit Catalyst,” hlm. 6, 2016.
- [53] F. Hadijah, O. Alfernando, dan Y. Sumbarin, “PENGARUH JUMLAH KATALIS DAN TEMPERATUR TERHADAP KUANTITAS DAN KUALITAS BODIESEL DARI BIJI JARAK PAGAR DENGAN METODE ESTER-TRANSESTERIFIKASI INSITU,” vol. 17, no. 6, hlm. 8, 2011.
- [54] I. Aziz, S. Nurbayti, dan B. Ulum, “Esterifikasi Asam Lemak Bebas Dari Minyak Goreng Bekas,” vol. 2, no. 2, hlm. 5, 1978.
- [55] M. K. Lam, K. T. Lee, dan A. R. Mohamed, “Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 4, hlm. 500–518, Jul 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.03.002.
- [56] R. I. Pramitha, A. Haryanto, dan S. Triyono, “PENGARUH PERBANDINGAN MOLAR DAN DURASI REAKSI TERHADAP RENDEMEN BODIESEL DARI MINYAK KELAPA (Coconut Oil) EFFECT OF MOLAR AND COMPARATIVE duration Reaction To,” no. 3, hlm. 10.
- [57] Ranggita Dwi Nindya Affandi, Toni Rizki Aruan, Taslim, dan Iriany, “PRODUKSI BODIESEL DARI LEMAK SAPI DENGAN PROSES TRANSESTERIFIKASI DENGAN KATALIS BASA NaOH,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 2, no. 1, hlm. 1–6, Mar 2013, doi: 10.32734/jtk.v2i1.1419.
- [58] S. V. Sinaga, A. Haryanto, dan S. Triyono, “[EFFECTS OF TEMPERATURE AND REACTION TIME ON THE BODIESEL PRODUCTION USING WASTE COOKING OIL],” no. 1, hlm. 8, 2014.
- [59] T. Nasution, A. M. Pulungan, Y. A. Wiliranti, J. L. Sihombing, dan A. N. Pulungan, “Synthesis of Biodiesel From Rubber Seed Oil with Acid and Base Activated Natural Zeolite Catalyst,” *Indones. J. Chem. Sci. Technol. IJCST*, vol. 2, no. 2, hlm. 125, Jul 2019, doi: 10.24114/ijcst.v2i2.14001.
- [60] R. I. Pramitha, A. Haryanto, dan S. Triyono, “PENGARUH PERBANDINGAN MOLAR DAN DURASI REAKSI TERHADAP RENDEMEN BODIESEL DARI MINYAK KELAPA (Coconut Oil) EFFECT OF MOLAR AND COMPARATIVE duration Reaction To,” no. 3, hlm. 10, 2016.
- [61] I Made Wisnu Adi Putra, “PRODUCTION OF BODIESEL FROM WASTE COOKING OIL BY

- TRANSESTERIFICATION REACTION USING CaO/NATURAL ZEOLITE CATALYSTS,” *J. Appl. Chem.*, vol. 5, hlm. 7, 2017.
- [62] N. Hidayati dan T. S. Ariyanto, “TRANSESTERIFIKASI MINYAK GORENG BEKAS MENJADI BIODIESEL DENGAN KATALIS KALSIUM OKSIDA,” vol. 1, no. 1, hlm. 5, 2017.
- [63] S. Oko dan M. Feri, “PENGEMBANGAN KATALIS CaO DARI CANGKANG TELUR AYAM DENGAN IMPREGNASI KOH DAN APLIKASINYA TERHADAP PEMBUATAN BIODIESEL DARI MINYAK JARAK,” *J. Teknol.*, vol. 11, no. 2, hlm. 8, 2019.
- [64] E. Kurniasih, “PENGUNAAN KATALIS HETEROGEN UNTUK PRODUKSI BIODIESEL,” *J. Sains Dan Teknol. Reaksi*, vol. 15, no. 1, Jan 2018, doi: 10.30811/jstr.v15i1.522.
- [65] S. Supriyanto, I. Ismanto, dan N. Suwito, “Zeolit Alam Sebagai Katalis Pyrolysis Limbah Ban Bekas Menjadi Bahan Bakar Cair,” *Automot. Exp.*, vol. 2, no. 1, hlm. 15–21, Apr 2019, doi: 10.31603/ae.v2i1.2377.
- [66] S. M. S. Fitriani, N. Fadiawati, dan L. Tania, “PENGEMBANGAN PROSEDUR PRAKTIKUM PENGARUH KATALIS TERHADAP LAJU REAKSI BERBASIS GREEN CHEMISTRY,” hlm. 13.
- [67] E. W. L. M. Pranjoto Utomo, “TINJAUAN UMUM TENTANG DEAKTIVASI KATALIS PADA REAKSI KATALISIS HETEROGEN,” *Pros. Semin. Nas. Penelit. Pendidik. Dan Penerapan MIPA*, Agustus 2007.
- [68] R. SyahPutra, R. U. Permata, M. Hilmiati, N. Arif, dan A. E. Fitriati, “Efek Konsentrasi Katalis OH--zeolit pada Produksi Biodiesel dengan Metode Elektrolisis,” hlm. 8, 2017.
- [69] E. Kusniawati, I. F. Anggraini, dan R. Saputra, “ANALISIS KARAKTERISTIK KATALIS PERTAMINA UNTUK PROSES HYDROTREATING KEROSIN MENJADI AVTUR,” vol. 12, no. 01, hlm. 9, 2021.
- [70] V. Sisca, “APLIKASI KATALIS PADAT DALAM PRODUKSI BIODIESEL,” *J. Zarah*, vol. 6, no. 1, hlm. 30–38, Apr 2018, doi: 10.31629/zarah.v6i1.294.
- [71] R. Hartono, A. Wijanarko, dan H. Hermansyah, “POTENSI ZEOLIT ALAM BAYAH BANTEN SEBAGAI KATALIS HETEROGEN PADA PEMBUATAN BIODIESEL SECARA TRANSESTERIFIKASI,” hlm. 6.
- [72] I. Aziz, S. Nurbayti, dan A. R. Hakim, “Uji Karakteristik Biodiesel yang dihasilkan dari Minyak Goreng Bekas Menggunakan Katalis Zeolit Alam (H-Zeolit) dan KOH,” *J. Kim. Val.*, vol. 2, no. 5, Nov 2012, doi: 10.15408/jkv.v2i5.296.
- [73] H. Martono, “PENGOLAHAN LIMBAH URANIUM MENGGUNAKAN ALUMINO SILIKO FOSFAT,” *November*, vol. 7, no. 2, hlm. 9, 2008.
- [74] H. Satriadi dan A. Roesyadi, “STUDI PENGARUH METODE PEMBUATAN DAN SUMBER BAHAN BAKU PADA PROSES PRODUKSI KATALIS DARI ZEOLIT ALAM,” hlm. 10, 2013.
- [75] E. P. Ramdhani, E. Yanuar, Z. Zulkifli, dan W. Sarwana, “SINTESIS γ -AL₂O₃ DARI ZEOLIT ALAM SUMBAWA,” *J. Zarah*, vol. 6, no. 2, hlm. 59–62, Okt 2018, doi: 10.31629/zarah.v6i2.691.
- [76] R. Ermawati, B. N. Jati, I. Rumondang, E. Oktarina, dan S. Naimah, “Pengaruh Residue Catalytic Cracking (RCC) dan Zeolit terhadap Kualitas Crude Oil Hasil Pirolisis Limbah Plastik Polietilena,” *J. Kim. Dan Kemasan*, vol. 38, no. 1, hlm. 47, Mei 2016, doi: 10.24817/jkk.v38i1.1978.
- [77] I. Nurhayati, “INASI MEDIA FILTRASI UNTUK PENURUNAN KESADAHAN DAN BESI,” vol. 08, hlm. 9, 2010.
- [78] S. B. Ginting, D. P. Sari, D. A. Iryani, M. Hanif, dan H. Wardono, “Sintesis Zeolit Lynde Type-A (LTA) Dari Zeolit Alam Lampung (Zal) Menggunakan Metode Step Change Temperature Of Hydrothermal Dengan Variasi SiO₂/Al₂O₃ Diaplikasikan Untuk Dehidrasi Etanol,” no. 2655, hlm. 14.
- [79] Dur Sajaratud, “UTILIZATION OF ZEOLITS FOR WATER FILING,” *ZERO – J. Mat. DAN Terap.*, vol. 4, no. 2, hlm. 11, 2018.
- [80] Y. D. Ngapa, “Study of The Acid-Base Effect on Zeolite Activation and Its Characterization as Adsorbent of Methylene Blue Dye,” *JKPK J. Kim. Dan Pendidik. Kim.*, vol. 2, no. 2, hlm. 90, 2017, doi: 10.20961/jkpk.v2i2.11904.

- [81] D. Kartika dan S. Widyaningsih, "Konsentrasi Katalis dan Suhu Optimum pada Reaksi Esterifikasi menggunakan Katalis Zeolit Alam Aktif (ZAH) dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah," *J. Nat. Indones.*, vol. 14, no. 3, hlm. 219, Jan 2013, doi: 10.31258/jnat.14.3.219-226.
- [82] A. Grancaric, A. Tarbuk, dan I. Kovacek, "Nanoparticles of activated natural zeolite on textiles for protection and therapy," *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 15, no. 4, hlm. 203–210, 2009, doi: 10.2298/CICEQ0904203G.
- [83] L. Kurniasari, M. Djaeni, dan A. Purbasari, "AKTIVASI ZEOLIT ALAM SEBAGAI ADSORBEN PADA ALAT PENERING BERSUHU RENDAH," *Reaktor*, vol. 13, no. 3, hlm. 178, Apr 2011, doi: 10.14710/reaktor.13.3.178-184.
- [84] M. Ackley, "Application of natural zeolites in the purification and separation of gases," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 61, no. 1–3, hlm. 25–42, Jul 2003, doi: 10.1016/S1387-1811(03)00353-6.
- [85] L. T. Afidah dan Khamidinal, "PENGARUH VARIASI TEMPERATUR KALSINASI ZEOLIT ALAM TERHADAP KEMAMPUAN ADSORPSI LIMBAH FENOL," *Indones. J. Mater. Chem.*, vol. 2, no. 2, hlm. 35–42, 2019.
- [86] L. Emelda, S. M. Putri, dan S. Ginting, "Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi untuk Adsorpsi Logam Krom (Cr³⁺)," *J. Rekayasa Kim. Lingkung.*, vol. 9, no. 4, hlm. 166, Des 2013, doi: 10.23955/rkl.v9i4.1229.
- [87] S. Lu, Y. Ma, C. Zhu, S. Shen, dan Q. He, "The Effect of Hydrophobic Modification of Zeolites on CO₂ Absorption Enhancement," *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 17, no. 1, hlm. 36–41, Feb 2009, doi: 10.1016/S1004-9541(09)60029-X.
- [88] L. Kurniasari, M. Djaeni, dan A. Purbasari, "AKTIVASI ZEOLIT ALAM SEBAGAI ADSORBEN PADA ALAT PENERING BERSUHU RENDAH," *Reaktor*, vol. 13, no. 3, hlm. 178, Apr 2011, doi: 10.14710/reaktor.13.3.178-184.
- [89] F. Çakıcığlu-Ozkan dan S. Ülkü, "Diffusion mechanism of water vapour in a zeolitic tuff rich in clinoptilolite," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 94, no. 3, hlm. 699–702, Des 2008, doi: 10.1007/s10973-008-9357-8.
- [90] A. Aktawan dan Z. Mufrodi, "Pembuatan Bioaditif Triasetin dengan Katalis Padat Silica Alumina," hlm. 9, 2016.
- [91] R. Kasim dan D. Setyaningsih, "ESTERIFIKASI CRUDE PALM OIL (CPO) MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERAKTIFASI ASAM PADA PROSES PEMBUATAN BIODIESEL MELALUI METODE DUA TAHAP (ESTERIFIKASI-TRANSESTERIFIKASI)," vol. 5, no. 1, hlm. 8, 2011.
- [92] R. I. Kusuma, J. P. Hadinoto, A. Ayucitra, F. E. Soetaredjo, dan S. Ismadji, "Natural zeolite from Pacitan Indonesia, as catalyst support for transesterification of palm oil," *Appl. Clay Sci.*, vol. 74, hlm. 121–126, Apr 2013, doi: 10.1016/j.clay.2012.04.021.
- [93] R. I. Kusuma, J. P. Hadinoto, dan A. Ayucitra, "Pemanfaatan Zeolit Alam sebagai Katalis Murah dalam Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit," hlm. 8.
- [94] H. Saputri, Z. Helwani, dan H. Rionaldo, "OPTIMASI PROSES PRODUKSI BIODIESEL DARI SAWIT OFF GRADE MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERAKTIVASI PADA TAHAP TRANSESTERIFIKASI," vol. 2, no. 2, hlm. 5, 2015.
- [95] H. S. Zuchra Helwani, Hari Rionaldo, "OPTIMASI PROSES PRODUKSI BIODIESEL DARI SAWIT OFF GRADE MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERAKTIVASI PADA TAHAP TRANSESTERIFIKASI," *JOM FTEKNIK*, vol. 2, no. 2, hlm. 5, Oktober 2015.
- [96] M. Nugraha, M. A. Santosa, dan Y. W. Mirzayanti, "Studi Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap Yield dan Free Fatty Acid (FFA) Pada Pembuatan Biodiesel dari Mikroalga *Nannochloropsis* sp. Menggunakan Metode Transesterifikasi Insitu Microwave-Assisted Dengan Katalis CaO/Hydrotalcite," hlm. 6, 2022.