

KINETIKA REAKSI TRANSESTERIFIKASI MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI METIL ESTER DENGAN KATALIS CaO/ ABU TERBANG BATUBARA

KINETIC REACTION TRANSESTERIFICATION OF PALM OIL INTO METHYL ESTER WITH CATALYST CaO / FLY ASH

Toni Okta Fiyansah^{*1}, Fadarina¹, Martha Aznury¹

¹Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jalan Sriwijaya Negara, Bukit Lama, Bukit Besar, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30139, Telp 0711353414
e-mail : tonioktafiyansah1555@gmail.com

ABSTRACT

Catalyst CaO from snakehead fishbone with supported by fly ash has advantages for the transesterification reaction process, which include active heterogeneous base properties, low solubility, good mechanical strength, and reusability. This study aims to determine the best catalyst that has the optimum impregnation time and mass of CaO in terms of the transesterification reaction of palm oil into methyl esters. The study includes: prediction of the mechanism according to the experimental data, through the effect of impregnation time and the added mass of CaO on changes in the reaction rate that occur, and the formulation of the final equation for the optimum reaction rate of the catalyst. Prediction of the mechanism that occurs follows the Eley-Rideal mechanism, where the reactant adsorbed on the surface of the catalyst is methanol and reacts with triglycerides (palm oil) to produce methyl esters and glycerol. The results of the study indicate that the greater the impregnation temperature and the added mass of CaO, the greater the rate value. The results showed that the optimum catalyst had an impregnation temperature of 80°C and a mass of CaO 100 grams, with a reaction time of 120 minutes to produce a yield of 98.55%, and a reaction rate of 4.44×10^{-6} mol/gramcat.

Keywords: Methyl Ester, Heterogeneous catalyst, CaO/ fly ash

1. PENDAHULUAN

Permasalahan limbah merupakan permasalahan penting bagi lingkungan. Beberapa contoh limbah yang masih memiliki nilai guna adalah tulang ikan gabus dan abu terbang batubara. Tulang ikan gabus merupakan hasil samping dari produksi rumah tangga seperti industri pempek sedangkan, abu terbang (fly ash) merupakan limbah yang dihasilkan oleh PLTU yang dapat berkontribusi pencemaran lingkungan. Menghadapi situasi akan menipisnya cadangan sumber energi fosil maka diharuskan adanya penelitian untuk mencari dan mengoptimalkan sebaik-baiknya limbah dari bahan bakar fosil menjadi bahan yang dapat bermanfaat untuk proses lainnya. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa abu terbang batubara sangat berguna untuk reaksi transesterifikasi dikarenakan memiliki luas permukaan serta memiliki ukuran pori yang luas (Enggawati dan Ediati, 2013).

Permasalahan tersebut perlu di atasi dengan solusi pemanfaatan beberapa limbah menjadi produk yang bernilai. Salah satu solusinya adalah dengan membuat katalis. Beberapa penelitian menggunakan katalis heterogen sebagai pengganti katalis homogen dalam reaksi transesterifikasi untuk mendapatkan biodiesel.

Katalis heterogen memang memberikan keuntungan lebih jika dibandingkan dengan katalis homogen. Misalnya, ramah lingkungan, tidak korosif dan mampu mencapai hasil biodiesel yang lebih tinggi. Katalis heterogen dapat berasal dari berbagai sumber limbah seperti limbah cangkang telur, kerang laut, tulang hewan, limbah konstruksi dan gipsum (Wang dkk, 2018).

Salah satu katalis heterogen adalah kalsium oksida (CaO) menjadi katalis basa paling menarik dalam kelompok oksida logam alkali tanah karena memiliki kekuatan basa yang tinggi, yang dapat ditemukan pada limbah tulang ikan gabus. Karena transesterifikasi yang dikatalis oleh CaO mengalami laju reaksi yang rendah, banyak peneliti telah berusaha untuk meningkatkan laju reaksi CaO (Zabeti dkk, 2009).

Penelitian tentang proses transesterifikasi dengan katalis CaO telah lama berkembang, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Enggawati dan Ediati, pada tahun 2013, melakukan penelitian pembuatan katalis CaO dari telur ayam yang diimpregnasi pada abu layang batubara dengan perbandingan 1:1, pH 12, pada suhu 70°C, selama 4 jam dan kecepatan pengadukan 700rpm, Untuk transesterifikasi minyak nyamplung dengan penambahan katalis 12% dari berat minyak, suhu reaksi 60°C selama 3,5 jam dengan perbandingan volume minyak dan metanol 1:3, dan kecepatan

pengadukan 700 rpm menghasilkan yield sebesar 69%. Pada tahun 2015, Asri dkk melakukan modifikasi katalis CaO dengan grade komersial dari merk yang diimpregnasi pada aluminium oksida (Al_2O_3) dengan perbandingan 1:1, pada suhu $80^\circ C$ selama 4 jam dengan kecepatan pengadukan 700 rpm. Untuk transesterifikasi minyak kelapa sawit dengan penambahan katalis 10 % dari berat minyak, suhu reaksi $65^\circ C$, selama 5 jam dengan perbandingan volume minyak dan metanol 1:3 menghasilkan yield sebesar 97%.

Pada tahun 2019, Aribowo dkk melakukan modifikasi katalis CaO dari $Ca(NO_3)_2$ yang diimpregnasi pada ZnO dengan perbandingan 1:1, pH 10, pada suhu $65^\circ C$ selama 3 jam dan kecepatan pengadukan 500 rpm. Diaplikasikan untuk transesterifikasi minyak kedelai menjadi biodiesel dengan penambahan katalis 7% dari berat minyak, suhu reaksi $60^\circ C$, selama 3 jam, menghasilkan yield sebesar 75 %. Pada tahun yang sama, Pratigto dan Istadi melakukan pembuatan katalis CaO dari $CaCO_3$ yang diimpregnasi pada abu terbang batubara dengan perbandingan 1:1, pH 12, pada suhu $70^\circ C$ selama 3 jam dan kecepatan pengadukan 350 rpm. Diaplikasikan untuk transesterifikasi minyak kedelai menjadi biodiesel dengan penambahan katalis 9% dari berat minyak, suhu reaksi $60^\circ C$, selama 3 jam, menghasilkan yield sebesar 77 %.

penelitian pembuatan katalis CaO dari tulang ikan gabus diimpregnasi ke abu terbang batubara bertujuan untuk mempercepat laju reaksi, meningkatkan *yield* yang dihasilkan dan mempersingkat waktu reaksi dengan memperbesar luas permukaan kontak reaktan yang bereaksi dan mempersempit jarak antar partikel yang bereaksi dengan penambahan abu terbang batubara sebagai *support*. Penambahan Abu terbang batubara juga dapat bermanfaat agar memudahkan memisahkan katalis CaO dari gliserol dan metanol yang tersisa, karena ion oksigen (O^{2-}) pada permukaannya mudah membentuk ikatan hidrogen dengan metanol atau gliserol yang akan meningkatkan viskositas gliserol dan membentuk suspensi dengan CaO. Sehingga CaO maupun gliserol akan sulit dipisahkan (Liu dkk, 2010).

2. METODE

2.1. Pembuatan Katalis

2.1.1. Kalsinasi Tulang Ikan Gabus

Proses diawali dengan mencuci tulang ikan gabus dengan air, dan dibersihkan dari daging dan selaput membran yang masih menempel. Pencucian diulang hingga 4-5 kali. Kemudian mengeringkan tulang ikan gabus dalam oven selama 8 jam pada suhu $105^\circ C$. Langkah selanjutnya memperkecil ukuran tulang ikan gabus, hingga di dapatkan serbuk halus. Mengayak tepung

tulang ikan gabus dengan menggunakan ayakan 100 - 200 mesh. Kemudian melakukan kalsinasi serbuk tulang ikan gabus pada suhu $950^\circ C$ selama 4 jam di dalam furnace. Bubuk CaO hasil kalsinasi dihaluskan menggunakan High Energy of Milling (HEM), selama 1 jam dengan rasio berat CaO: bola adalah 1: 5. CaO yang telah halus di simpan di dalam desikator atau wadah tertutup.

2.1.2. Leaching Abu terbang batubara

Proses leaching dimulai dengan pencucian abu terbang terlebih dahulu, air panas ditambahkan ke dalam gelas beaker berisi abu layang, kemudian diaduk menggunakan pengaduk mekanik selama 30 menit. Selanjutnya, campuran didekantasi dan saring dengan corong Buchner sampai endapan padat terpisah dari air dan dikeringkan dalam oven selama 8 jam pada suhu $100^\circ C$.

Abu terbang yang telah dicuci diambil sebagian, dan dicuci dengan larutan HCl 10% dengan perbandingan berat abu layang dan volume HCl sebesar 1:25 (gr/ml). Setiap 1 gram abu layang harus dicuci dalam 25 ml HCl 10%. Pencucian dilakukan menggunakan pengaduk mekanik dengan kecepatan 700 rpm selama satu jam pada suhu $80^\circ C$. Selanjutnya, campuran didekantasi dan disaring hingga di dapatkan endapan abu yang terpisah. Kemudian, endapan yang tertinggal dicuci dengan aquades panas untuk menghilangkan sisa HCl yang masih ada, dan kemudian menyaringnya dengan saringan vakum. Setelah itu, endapan yang didapatkan dikeringkan dalam oven selama 8 jam pada suhu $105^\circ C$.

2.1.3. Impregnasi CaO pada Abu Terbang Batubara

Menimbang CaO dengan variasi massa (80, 90, 100) gram. Melarutkan CaO yang telah ditimbang dalam 700 ml aquades. Memasukkan ke dalam gelas beaker dan memanaskan pada suhu $60^\circ C$ selama 2 jam. {Begitupun sebaliknya untuk variasi suhu, dengan melarutkan CaO 90 gram pada suhu (70, 80) $^\circ C$ }. Kemudian menimbang 90 gram abu terbang batubara yang telah di leaching, dan memasukkan secara perlahan ke dalam campuran, dan pastikan pH terjaga 12. Campuran di aduk selama 4 jam dengan kecepatan pengadukan 700 rpm. Setelah itu campuran di diamkan selama 24 jam, dan di dekantasi. Endapan kemudian di keringkan dalam oven selama 8 jam, pada suhu $110^\circ C$. 8. Lalu di kalsinasi pada suhu $500^\circ C$ selama 4 jam.

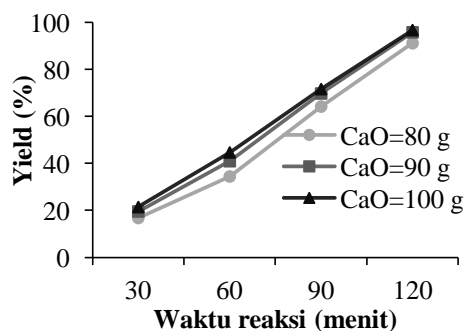
2.2. Uji Kinerja Katalis pada Reaksi Transesterifikasi

Menyiapkan minyak kelapa sawit dan metanol dengan rasio volume 2:3 dan dengan menyiapkan katalis dengan berat 10% b/b minyak. Memasukkan minyak kelapa sawit ke dalam gelas beaker dan di panaskan hingga temperatur 60°C. Apabila suhu reaksi telah tercapai, masukkan metanol dan katalis dengan waktu reaksi transesterifikasi (30, 60, 90, 120) menit. Campuran diaduk dengan kecepatan 700 rpm dengan waktu yang telah ditentukan. Kemudian campuran didinginkan dan didekantasi selama 3 jam.

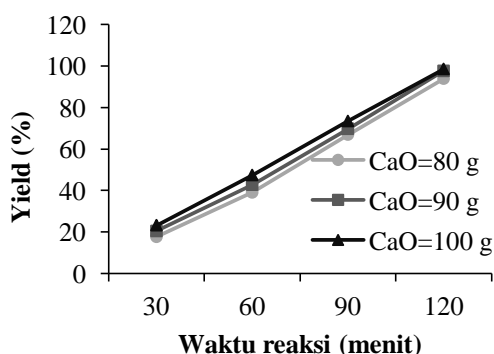
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Temperatur Impregnasi dan Massa CaO pada Katalis Terhadap Yield Metil Ester

Pengujian katalis dalam proses pembuatan metil ester dilakukan dengan penambahan katalis 10% dari berat minyak. Reaksi yang terjadi adalah reaksi transesterifikasi. Hasil dari pengujian katalis pada temperatur impregnasi 70°C dan 80°C, dengan variasi massa CaO (80,90,100) gram dan waktu reaksi (30, 60, 90, 120) menit, dapat dilihat pada gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Pengaruh waktu reaksi dan massa CaO pada suhu impregnasi 70°C terhadap % yield



Gambar 2. Pengaruh waktu reaksi dan massa CaO pada suhu impregnasi 80°C terhadap % yield

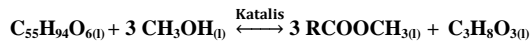
Pada gambar 1 yaitu saat temperatur impregnasi 70°C dengan massa CaO (80, 90, 100) gram, menunjukkan bahwa semakin lama waktu reaksi, maka semakin besar yield yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena lamanya waktu reaksi memberikan kesempatan yang besar dan lebih lama bagi molekul-molekul reaktan untuk saling bertumbukan dan bereaksi (Aziz, 2007). Yield yang paling besar dihasilkan pada waktu reaksi 120 menit. Pengaruh massa CaO terhadap yield juga dapat dilihat bahwa semakin besar massa CaO maka semakin besar yield yang dihasilkan, hal ini dikarenakan semakin besar massa CaO yang ditambahkan maka semakin tinggi konsentrasi CaO yang terimpregnasi ke dalam abu terbang batubara. Sehingga kondisi yang optimal untuk temperatur impregnasi katalis 70°C adalah dengan penambahan CaO sebanyak 100 gram, dengan waktu reaksi selama 120 menit yang menghasilkan yield metil ester sebesar 96,69%.

Pada gambar 2 yaitu saat temperatur impregnasi 80°C dengan massa CaO (80, 90, 100) gram menunjukkan bahwa semakin lama waktu reaksi, maka semakin besar yield yang dihasilkan. Yield yang paling besar dihasilkan pada waktu reaksi 120 menit. Pengaruh massa CaO terhadap yield juga dapat dilihat bahwa semakin besar massa CaO maka semakin besar yield yang dihasilkan. Sehingga kondisi yang optimal untuk temperatur impregnasi katalis 80°C adalah dengan penambahan CaO sebanyak 100 gram dalam abu terbang 90 gram, dengan waktu reaksi selama 120 menit yang dapat menghasilkan yield sebesar 98,55%.

Pengaruh temperatur impregnasi katalis dapat dilihat dengan membandingkan yield yang dihasilkan pada kondisi optimal antara temperatur impregnasi 70°C dan 80°C. Dari gambar 4.2 dan 4.3 terlihat bahwa semakin tinggi temperatur impregnasi katalis maka semakin besar yield yang dihasilkan. Temperatur impregnasi yang tinggi menyebabkan semakin cepat gerak molekul dan semakin banyak partikel CaO yang bertumbukan dengan abu terbang batubara. Hal ini menyebabkan semakin banyak CaO yang menempel pada pori abu terbang (Suarsa, 2017). Sehingga kondisi yang optimal dalam pembuatan katalis CaO/ abu terbang batubara adalah pada temperatur impregnasi 80°C, dengan penambahan CaO sebanyak 100 gram pada 90 gram abu terbang batubara, dengan waktu reaksi selama 120 menit yang menghasilkan metil ester sebesar 98,55%.

3.2. Prediksi Model Kinetika yang Terjadi

Reaksi yang terjadi pada pengujian katalis dalam memproduksi metil ester dengan katalis CaO/ abu terbang batubara adalah reaksi transesterifikasi, dengan reaksi sebagai berikut :



Untuk menghasilkan 3 mol metil ester memerlukan 1 mol minyak dan 3 mol metanol. Reaksi transesterifikasi antara minyak kelapa sawit dan metanol dengan katalis heterogen merupakan reaksi orde 2, dimana Manurung (2007), telah melakukan penelitian tersebut dengan pendekatan dalam tiga tahap reaksi, dan hasilnya ketiga tahapan itu merupakan reaksi orde dua. Pada pengaplikasian katalis dalam menghasilkan metil ester katalis yang ditambahkan adalah sebesar 10%. Untuk menentukan persamaan laju reaksi permukaan terlebih dahulu harus mengetahui apakah kedua reaktan teradsorpsi pada permukaan katalis (model kinetika Langmuir-Hinshelwood) atau hanya salah satu reaktan saja yang teradsorpsi (model kinetika Eley-Rideal).

Berdasarkan penelitian Aribowo dkk, (2019) yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi trigliserida menyebabkan kecepatan reaksi menurun dan peningkatan konsentrasi metanol menyebabkan kecepatan reaksi meningkat. Menurut Fogler (1999), apabila kecepatan reaksi berbanding terbalik dengan peningkatan konsentrasi reaktan maka reaktan tersebut tidak teradsorpsi pada permukaan katalis. Maka dari itu dapat disimpulkan bahwa reaktan yang teradsorpsi pada permukaan katalis merupakan metanol. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme reaksi katalitik yang terjadi mengikuti model kinetika Eley-Rideal. Prediksi mekanisme reaksi permukaan yang mungkin terjadi :



Dari 2 tipe mekanisme ini reaksi transesterifikasi pembentukan metil ester termasuk ke dalam reaksi tipe 1 dengan metil ester yang mengalami desorpsi (C) dan gliserol (D) sebagai fase cair/ bulk (Ariwibowo dkk, 2019; Fogler, 1999). Misalkan trigliserida (A), metanol (B), Metil ester (C) dan gliserol (D), maka mekanisme yang terjadi :

Reaksi tipe 1 : $A + B.S \leftrightarrow C.S + D$

a. Adsorpsi B

$$r_A = 0 = k_1 \left[C_B \cdot C_v - \frac{C_{BS} \cdot k_1}{K_B} \right] \dots \dots (1)$$

b. Reaksi permukaan

$$r_A = k_2 \left[\frac{C_A \cdot K_B \cdot C_B - \frac{K_C \cdot C_C \cdot C_D}{K_S}}{1 + K_B C_B + K_C C_C} \right] \dots \dots (2)$$

c. Desorpsi C

$$r_A = 0 = k_3 \left[C_{CS} - \frac{C_C \cdot C_v}{K_d} \right] \dots \dots (3)$$

Dimana r_A adalah laju adsorpsi ke permukaan katalis (mol/gram.s) C_A Konsentrasi reaktan A (mol/L), C_v Konsentrasi pusat aktif yang kosong (mol/gram katalis), $C_{B,S}$ Konsentrasi reaktan B yang teradsorpsi di katalis (mol/gram katalis) $C_{C,S}$ Konsentrasi produk C yang teradsorpsi di katalis (mol/gram katalis), dan K_S , K_B , K_C , dan k_2 Secara berurutan adalah konstanta kesetimbangan reaksi di permukaan, konstanta Adsorpsi B dari permukaan, konstanta Desorpsi C dari permukaan, dan konstanta laju ke kanan reaksi permukaan

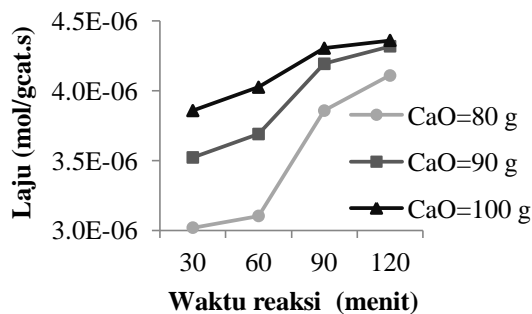
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dari data penelitian untuk menentukan nilai konstanta dari persamaan laju reaksi permukaan, yang menggunakan metode penyelesaian persamaan linier empat variabel dengan menganalisis menggunakan Matlab dengan penyelesaian menggunakan matriks didapatkan persamaan laju reaksi :

$$r_A = 4,94 \times 10^{-7} \left[\frac{C_A \cdot 0,1351 \cdot C_B - \frac{0,089 \cdot C_C \cdot C_D}{4,835}}{1 + 0,1351 C_B + 0,089 C_C} \right] \dots (4)$$

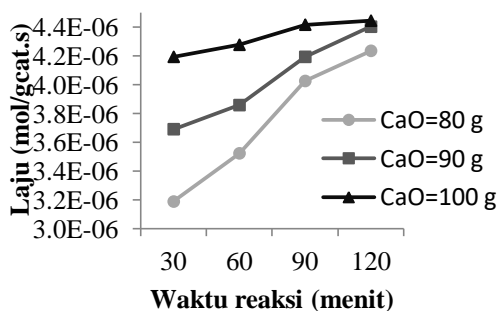
3.3. Pengaruh Temperatur Impregnasi dan Massa CaO katalis terhadap Laju Reaksi

Katalis yang telah dibuat di aplikasikan pada proses transesterifikasi pembuatan metil ester, dengan temperatur impregnasi dan konsentrasi reaktan yang tetap. Variasi dari setiap katalis

Hasil pengujian katalis dengan variasi massa CaO dan waktu reaksi terhadap laju reaksi pada temperatur impregnasi 70°C dan 80°C dapat di lihat pada gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Pengaruh waktu reaksi dan massa CaO pada suhu impregnasi 70°C terhadap Laju reaksi



Gambar 4. Pengaruh waktu reaksi dan massa CaO pada suhu impregnasi 80°C terhadap Laju reaksi

Pada gambar 3 terlihat bahwa semakin lama waktu reaksi maka nilai laju reaksi semakin besar, karena semakin lama waktu reaksi memberikan kesempatan yang lebih besar bagi molekul-molekul reaktan untuk saling bertumbukan dan bereaksi di permukaan katalis (Aziz, 2007). Dari gambar 4.4 terlihat bahwa waktu reaksi yg optimal untuk menghasilkan nilai laju yang besar adalah 120 menit. Pengaruh penambahan massa CaO terhadap laju reaksi yaitu semakin besar massa CaO, maka semakin besar laju reaksi. Hal ini dikarenakan semakin banyak massa CaO, maka semakin tinggi konsentrasi situs aktif yang diimpregnasi pada katalis, semakin sempit jarak antar partikel dan semakin banyak CaO yang bertumbukan dengan abu terbang batubara sehingga persentase CaO menempel pada permukaan katalis juga semakin besar. Peningkatan situs aktif pada permukaan support menyebabkan semakin banyak peluang metanol untuk teradsorpsi pada permukaan katalis, dan mempersempit jarak antar molekul reaktan, sehingga yield yang dihasilkan lebih besar (Aziz, 2007). Sehingga kondisi yang optimal untuk

menghasilkan laju reaksi yang besar pada temperatur impregnasi 70°C adalah dengan waktu reaksi 120 menit dan penambahan CaO sebesar 100 gram yang menghasilkan laju sebesar $4,36 \times 10^{-6}$ mol/gramkatalis.s.

Pada gambar 4 terlihat bahwa laju reaksi yang paling besar di hasilkan dengan waktu reaksi 120 menit. Sedangkan untuk penambahan CaO semakin besar CaO yang ditambahkan nilai laju reaksi semakin besar. Kondisi yang optimal untuk menghasilkan laju reaksi yang besar pada temperatur impregnasi 80°C adalah dengan waktu reaksi 120 menit dan penambahan CaO sebesar 100 gram yang menghasilkan laju sebesar $4,44 \times 10^{-6}$ mol/gramkatalis.s

Pengaruh temperatur impregnasi dapat dilihat dengan membandingkan kondisi yang optimal pada temperatur impregnasi 70°C dan 80°C. Dari gambar 3 dan 4 terlihat bahwa semakin tinggi suhu impregnasi, maka semakin besar laju reaksi yang dihasilkan. Peningkatan suhu impregnasi menyebabkan gerakan partikel CaO dan abu terbang semakin cepat. Gerakan ini menyebabkan energi kinetik partikel bertambah sehingga semakin banyak kemungkinan terjadinya tumbukan yang efektif, dengan demikian semakin situs aktif (CaO) yang menempel pada permukaan support. Peningkatan jumlah support yang menempel berbanding lurus terhadap laju reaksi dan yield yang dihasilkan. Sehingga kondisi yang optimal dalam pembuatan katalis untuk menghasilkan laju yang besar adalah pada temperatur impregnasi 80°C, penambahan CaO 100 gram dan waktu reaksi 120 menit dengan laju reaksi yang dihasilkan sebesar $4,44 \times 10^{-6}$ mol/gramkatalis.s.

3.3. Perbandingan penelitian

Hasil penelitian Aribowo dkk, (2019) yang melakukan pembuatan katalis CaO dari $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ merk 99% dengan ZnO, pada kondisi optimal menghasilkan yield 75 %, waktu reaksi 3 jam dan laju reaksi permukaan katalis sebesar $3,48 \times 10^{-6}$ mol/gcat.s. Sedangkan penelitian sekarang 2021, menghasilkan yield yang lebih besar yakni 98,55 % dengan waktu reaksi yang lebih singkat. Hal ini didukung dengan laju reaksi yang telah dihitung, menunjukkan penelitian sekarang 2021, memiliki laju yang lebih besar dari penelitian Aribowo dkk, (2019), yakni sebesar $4,44 \times 10^{-6}$ mol/gcat.s. Pratigto dan Istadi, (2019) yang melakukan pembuatan katalis CaO dari CaCO_3 merk dengan

support abu terbang batubara, menghasilkan yield 77 % dengan waktu reaksi 3 jam, dimana hasilnya lebih kecil dibandingkan dengan penelitian sekarang 2021, hal ini dikarenakan penelitian Pratigo dan Istadi, 2019, memiliki laju reaksi sebesar $3,62 \times 10^{-6}$ mol/gcat.s dimana laju ini lebih kecil dibandingkan dengan penelitian sekarang 2021, yang memiliki laju reaksi sebesar $4,44 \times 10^{-6}$ mol/gcat.s.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut: Temperatur impregnasi yang optimal pada pembuatan katalis adalah 80°C , dengan massa CaO yang optimum 100 gram yang menghasilkan yield metil ester sebesar 98,55 % dengan waktu reaksi 120 menit. Peningkatan temperatur impregnasi dan massa CaO menyebabkan yield yang dihasilkan semakin besar dan waktu reaksi semakin cepat. Laju reaksi heterogen di permukaan katalis yang optimum memiliki laju $4,44 \times 10^{-6}$ mol/gramcat.s,

DAFTAR PUSTAKA

- Aribowo. W., Nugroho. A. Istadi. (2019). Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak Kedelai Menjadi Biodiesel Menggunakan Katalis Padat Ramah Lingkungan $\text{K}_2/\text{CaO-ZnO}$. *Teknik*, 40(3), 136-141.
- Asri.N.P., Budikarjono. K., Suprpto., Roesyadi. (2015). Kinetics of Palm Oil Transesterification Using Double Promoted Catalyst $\text{CaO/KI/y-Al}_2\text{O}_3$. *J.Eng. Technol. Sci*, 47(4), 353-363.
- Aziz. I., (2007). Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas. *Jurnal Kimia Valensi*, 1(1),1-6
- Enggawati, E. R dan Ediati, R. (2013). Pemanfaatan Kulit Telur Ayam dan Abu Layang Batubara sebagai Katalis Heterogen untuk Reaksi Transesterifikasi Minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum* Linn). *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, 2(1), 2337-3520.
- Fogler.H.S. 1999. *Elements of Chemical Reaction Engineering Third Edition*. New Jersey: Prntice Hall
- Istadi, I., Pratigo, S. (2019). Kinetika reaksi Transesterifikasi Minyak Kedelai Menjadi Biodiesel dengan Katalis CaO. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 22(5), 213-129.
- Manurung.R. 2007. Kinetika Transesterifikasi Minyak Sawit Menjadi Etil Ester Biodiesel). *Jurnal Teknologi Proses*, 6(1), 39-44
- Suarsa.I.W., (2017). *Teori Tumbukan pada Laju Reaksi Kimia*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Wang JX, Kung TC, Bi ZW, Ben YHL, Chiing CC. (2012). Transesterification of soybean oil to biodiesel using cement as a solid base catalyst. *J Taiwan Inst Chem Eng*, 43(2), 215–219.
- Zabeti, M., Daud, W.M.A.W, dan Aroua, M.K. (2009). Activity of Solid Catalysts for Biodiesel Production: A Review. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 770–777.