

PENGARUH SUHU REAKSI DAN KONSENTRASI KATALISATOR ZEOLIT ALAM BAYAH TERMODIFIKASI PADA REAKSI ESTERIFIKASI

Nuryoto^{1*}, Wijoyono Setionegoro¹, dan Muhammad Ridwan Mubarok¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Banten, Indonesia

*Email: nuryoto@untirta.ac.id

Abstrak

Suhu reaksi dan konsentrasi katalisator merupakan faktor yang mempengaruhi kecepatan suatu laju reaksi kimia. Peningkatan suhu reaksi akan berdampak pada peningkatan tumbukan pada molekul zat yang bereaksi, sementara peningkatan konsentrasi katalisator padat akan meningkatkan jumlah sisi aktif yang akan berinteraksi dengan reaktan yang terlibat di dalam sistem bereaksi tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana dan seberapa efektif pengaruh suhu dan konsentrasi katalisator padat berupa zeolit alam bayah termodifikasi pada reaksi esterifikasi etanol dan asam asetat. Observasi dilakukan dengan menggunakan reaktor batch dengan waktu reaksi selama 60 menit. Hasil observasi menunjukkan bahwa konversi reaktan berbasis asam asetat tertinggi diperoleh sebesar 23,41 %, yang dicapai pada suhu reaksi 70°C dan konsentrasi zeolit alam bayah 10 % massa asam asetat.

Kata kunci: Esterifikasi, Suhu, Reaktor, Asam Asetat, Zeolit

Abstract

The reaction temperature and catalyst are the factors affect the speed of a chemical reaction rate. Increasing the reaction temperature will have an impact on increasing collisions on reacting molecules, while increasing the concentration of solid catalysts will increase the number of active sites that will interact with the reactants involved in the reacting system. The purpose of this research was knowing the extent and how effective the effect of temperature and solid catalyst concentration in the form of modified bayah natural zeolite in the esterification reaction of ethanol and acetic acid. Observations were made using a batch reactor for 60 minutes reaction times. The results showed that the highest conversion of acetic acid-based reactants was 23.41 %, which was achieved at reaction temperature of 70°C and bayah natural zeolite concentration of 10 % by mass of acetid acid.

Keywords: Esterification, Temperature, Reactor, Acetic Acid, Zeolite

1. PENDAHULUAN

Esterifikasi adalah reaksi antara asam karboksilat dengan alkohol dengan produk utama berupa ester, dan seringkali berjalan lambat. Sintesis etil asetat tanpa kehadiran katalis pada pembuatan etil asetat hanya menghasilkan konversi reaktan sebesar 12,15 % selama 60 menit (Nuryoto dkk., 2020). Untuk meningkatkan kecepatan reaksi esterifikasi diperlukan kolaborasi antara faktor-faktor yang berpengaruh pada reaksi kimia seperti suhu reaksi dan konsentrasi

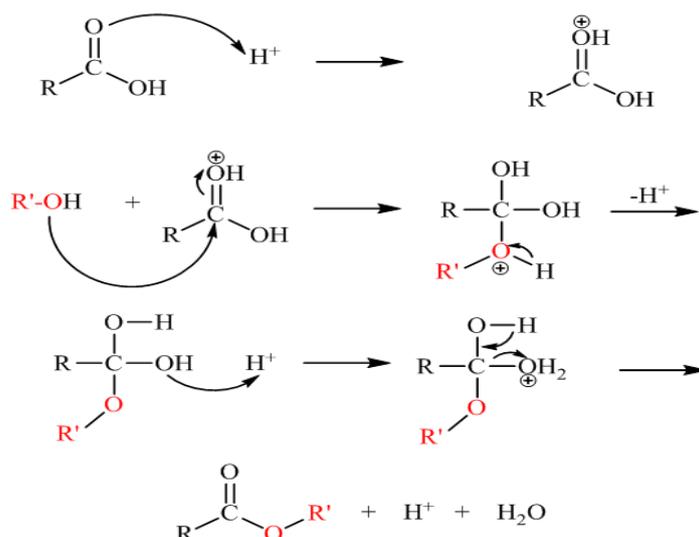
katalisator. Suhu reaksi akan mempengaruhi laju reaksi esterifikasi yang terjadi, yang mana jika mengacu pada persamaan Arrhenius, besarnya peningkatan laju reaksi esterifikasi yang dihasilkan akan berbanding secara eksponensial satu per satuan suhu reaksi. Sementara itu, konsentrasi katalisator yang diberikan pada sistem reaksi pada jumlah tertentu, akan memaksimalkan interaksi antara reaktan-sisi aktif katalisator, sehingga reaksi akan berjalan lebih cepat serta hasil reaksi yang dihasilkan akan lebih maksimal.

Percobaan yang dilakukan oleh Khayoon & Hameed (2013), Reddy dkk. (2011), dan Malleshham dkk. (2014) menunjukkan fenomena tersebut. Pada percobaan Kayoon & Hameed (2013), yang dilakukan pada suhu reaksi pada rentang suhu 25 sampai 65°C, mampu menghasilkan konversi reaktan sebesar 100% yang diperoleh pada rentang suhu 45 sampai 65°C. Sementara itu pada percobaan uji konsentrasi katalisator, peningkatan konsentrasi katalisator pada kajian reaksi ketalisasi gliserol yang dilakukan dengan katalisator zirconia pada konsentrasi katalisator 1 sampai 5 % massa gliserol (Reddy dkk., 2011) dan konsentrasi katalisator 1 sampai 7 % massa gliserol (Malleshham dkk., 2014), menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi katalisator yang diberikan ke sistem reaksi diikuti dengan peningkatan konversi gliserol yang dihasilkan.

Penelitian terkait reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol sebenarnya telah banyak dilakukan observasi dengan capaian yang bervariasi, dengan konversi reaktan berkisar antara 50 sampai 90 %-an (Guzman Barrera dkk., 2018; Inui dkk., 2002). Katalisator yang digunakan juga bermacam-macam ada yang menggunakan katalis padat seperti berbasis tembaga (Santacesria dkk., 2012; Inui dkk., 2002), dan resin penukar ion (Guzman Barrera dkk., 2018; Bhandare, 2018), sedangkan untuk katalis cair seperti asam sulfat (Ahmed Zeki dkk., 2010) dan asam klorida (Nst & Sutri (2015)). Penggunaan zeolit alam bayah sebagai katalis pada reaksi antara asam asetat dan etanol sebenarnya juga sudah pernah dilakukan oleh Nuryoto dkk. (2016) dengan perbandingan pereaksi 8 mol asam asetat/mol etanol dan Nuryoto dkk. (2020) dengan perbandingan pereaksi 3 mol etanol/mol asam asetat. Perbedaan dengan penelitian ini dengan sebelumnya yaitu pada Nuryoto dkk. (2016) terletak pada perbandingan pereaksinya yaitu 3 mol etanol/mol asam asetat, sedangkan pada Nuryoto dkk. (2020) berbeda variasi pengamatan. Pada penelitian ini berfokus pada pengamatan terhadap dampak suhu reaksi dan konsentrasi katalisator, sementara pada Nuryoto dkk. (2020) berfokus kepada ukuran katalis

dan kecepatan pengadukan. Dengan dilakukan kajian lebih jauh terhadap faktor-faktor yang berpengaruh pada reaksi kimia (ukuran katalis, kecepatan pengadukan, suhu reaksi dan konsentrasi katalisator), maka diharapkan akan mendapatkan informasi yang lebih detail terkait layak atau tidaknya zeolit alam bayah untuk dikembangkan lebih lanjut jika digunakan sebagai katalisator pada reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol guna menggantikan katalisator komersial yang sering digunakan, seperti resin penukar ion. Zeolit alam bayah sendiri tergolong zeolit jenis mordenit, walaupun tidak murni karena didalamnya juga mengandung jenis klinoptilolit (Suminta & Las, 2006), dengan komposisi mordenit 59,26 % dan klinoptilolit 40,74 %. Zeolit alam pada umumnya, termasuk zeolit alam bayah mempunyai harga yang murah, tetapi perlu dilakukan aktivasi sebelum digunakan (Nuryoto & Hartono, 2018), karena banyak mengandung pengotor dan ukuran pori yang relatif kecil, sehingga ketika langsung digunakan sebagai katalisator tidak akan berdampak pada laju reaksi pada sistem reaksi.

Secara teoritik mekanisme reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1, asam karboksilat berupa asam asetat diprotonasi oleh katalis asam lalu terbentuk karbonil, selanjutnya karbonil diserang oleh alkohol berupa etanol, dan terbentuk ester berupa etil asetat sebagai produk utama serta air sebagai produk sampingnya. Etil asetat sendiri merupakan suatu pelarut yang banyak digunakan dalam suatu reaksi kimia (Vergaelen dkk., 2020) dan pelarut makanan, obat-obatan dan lainnya (Newseed, 2015). Tujuan penelitian ini dilakukan adalah untuk mengetahui sejauh mana dan seberapa efektif pengaruh suhu dan konsentrasi katalisator padat berupa zeolit alam bayah pada reaksi esterifikasi etanol dan asam asetat. Pada penelitian ini dilakukan uji validasi model matematika menggunakan model Pseudohomogen orde 2 searah yang telah digunakan sebelumnya oleh Nuryoto dkk. (2020), dengan hasil *curve fitting* yang baik antara data dan hitungan. Pengujian model tersebut bermaksud



Gambar 1. Mekanisme reaksi esterifikasi antara etanol dan asam asetat

ingin membuktikan apakah secara umum model tersebut cocok untuk menggambarkan reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol atau tidak. Persamaan Pseudohomogen orde 2 searah yang akan digunakan adalah sbagai berikut:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A C_B \quad (1)$$

Jika diintegrasikan dan dilakukan penyusunan ulang diperoleh persamaan berikut:

$$\ln \frac{C_B}{C_A} = (C_B - C_{A0})k t + \ln M \quad (2)$$

dengan,

C_A = konsentrasi asam asetat, N

C_B = konsentrasi etanol, N

M = rasio mol C_A/C_B

k = $\text{mol}^{-1}\text{min}^{-1}$

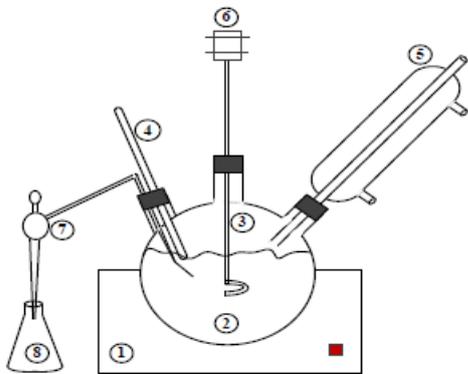
t = waktu, menit

C_{A0} = konsentrasi asam asetat, N

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Bahan utama yang diperlukan pada percobaan ini adalah zeolit alam modernit bayah (ZAB)-Banten, asam asetat teknis yang diperoleh PT Rofa Laboratorium Center dengan kadar 98 %, dan etanol teknis dengan kadar 96 % yang diperoleh dari Toko Indojoya Sehat. Reaktor yang digunakan pada reaksi ini terdiri dari pemanas, labu leher tiga 500 ml sebagai reaktor, pengaduk merkuri, termometer, kondenser, motor pengaduk, pengambil sampel, dan penampung sampel. Detail dari perangkat reaktor tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Peralatan esterifikasi asam asetat dan etanol

2.2. Prosedur Percobaan

2.2.1. Preparasi zeolit alam bayah

Peparasi ZAB, mengacu pada penelitian Nuryoto dkk. (2020) yang mana zeolit alam bayah dihaluskan dan diayak dengan ayakan 60 mesh. Selanjutnya dimasukan ke dalam larutan H_2SO_4 6N selama 2 jam sambil dipanaskan pada suhu 110°C . Langkah selanjutnya *hot plate* dimatikan. Zeolit lalu dibilas dengan aquades sampai 4 kali. Tahap terakhir zeolit dipanaskan pada suhu 200°C selama 2 jam di dalam oven. Ketika oven telah dimatikan dan zeolit telah dingin, maka zeolit alam bayah siap digunakan sebagai katalis.

2.2.2. Prosedur percobaan

Etanol dan asam asetat dimasukkan ke dalam gelas beker yang berbeda sesuai dengan perbandingan reaktannya (3 mol etanol/mol asam asetat), lalu dipanaskan masing-masing sampai mencapai suhu reaksi ($50, 60, \text{ dan } 70^\circ\text{C}$). Ketika suhu telah tercapai sesuai target, etanol dan asam asetat dimasukan ke dalam reaktor, sambil pengaduk dijalankan 600 rpm. Pemanas dihidupkan untuk menjaga suhu agar tetap sesuai dengan suhu reaksi yang diinginkan. Ketika campuran yang diaduk telah dianggap homogen, diambil sampel sebanyak 5 ml guna dilakukan analisis asam bebas awal (A_0) dengan metode titrasi menggunakan NaOH 1 N. Selanjutnya katalis zeolit alam bayah yang telah dimodifikasi dimasukan dengan konsentrasi tertentu (6, 8, dan 10% volume asam asetat). Setiap 15 menit sampel sambil sebanyak 5 ml selama waktu reaksi 60 menit, untuk dilakukan analisis asam bebas sisa (A_t) dengan metode yang sama dengan asam bebas awal. Konversi asam asetat dihitung dengan persamaan berikut:

$$X_A = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \% \quad (3)$$

dengan,

X_A = konversi asam asetat, %

A_0 = konsentrasi asam asetat awal (sebelum katalis dimasukan), mgek/ml

A_t = konsentrasi asam asetat pada waktu tertentu (setelah katalis dimasukan), mgek/ml

2.2.3. Pengujian model matematis

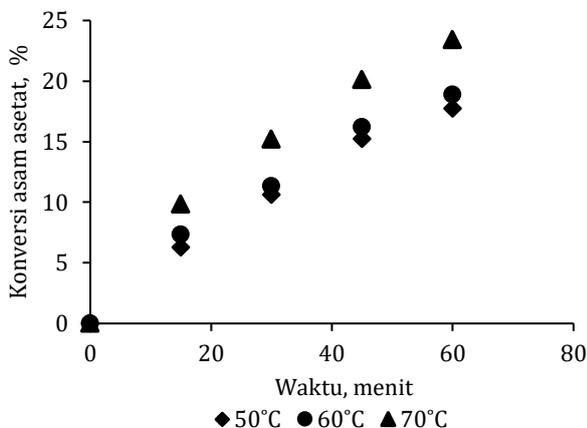
Pada dasarnya nilai R^2 (koefisien determinasi) dan k (konstanta kecepatan reaksi) pada Persamaan 2 diperoleh dengan melakukan *trendline* pada excel terhadap hubungan antara $\ln \frac{C_B}{C_A}$ dan $\ln M$. Pengujian disini hanya bersifat memastikan saja, apakah model matematika yang digunakan sebelumnya oleh Nuryoto dkk. (2020) untuk menggambarkan fenomena yang terjadi pada reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol pada variasi kecepatan pengadukan dan ukuran katalisator yaitu menggunakan persamaan 2 menghasilkan *curve fitting* yang sama baik antara data-hitungan yaitu dengan nilai R^2 di atas 0,95 atau tidak. Jika hasilnya baik dengan nilai R^2 di atas 0,95, maka artinya bahwa untuk reaksi esterifikasi antara etanol dan asam asetat dengan katalisator ZAB dengan aktivasi H_2SO_4 6N dan perbandingan reaksi 3 mol etanol/mol asam asetat dapat dikatakan mengikuti model pada Persamaan 2 tersebut. Tetapi ketika hasilnya sebaliknya, maka memberikan informasi bahwa pada sistem yang berbeda (variasi yang berbeda) akan menghasilkan fenomena yang berbeda pula. Untuk itu diperlukan pendekatan model matematika yang lainnya, agar mendapatkan model matematika yang sesuai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Suhu Reaksi

Seiring meningkatnya suhu reaksi, diikuti dengan meningkatnya konversi asam asetat yang dihasilkan (lihat Gambar 3). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu reaksi mempengaruhi laju reaksi

yang terjadi, yaitu dengan meningkatkan intensitas tumbukan antar asam asetat dan etanol. Terlihat bahwa konversi asam asetat pada suhu operasi 50, 60, dan 70°C berturut-turut yaitu sebesar 17,70; 18,88; dan 23,41 %.



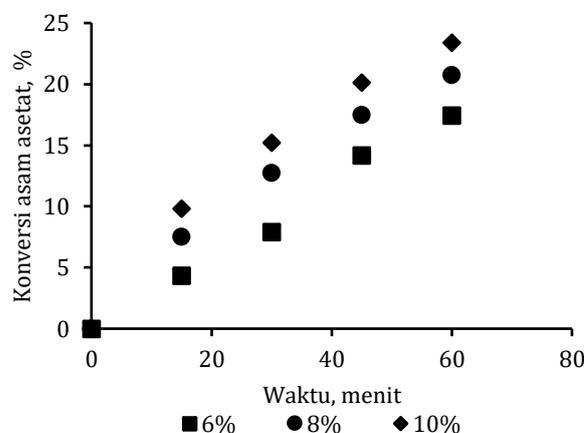
Gambar 3. Pengaruh suhu reaksi esterifikasi terhadap waktu reaksi yang dilakukan dengan konsentrasi katalis zeolit alam bayah 10 % massa asam asetat

Secara teori, memang terjadi kecenderungan ketika meningkatkan suhu reaksi akan meningkatkan konversi asam asetat, tetapi peningkatan suhu reaksi terdapat titik optimumnya. Pada saat suhu reaksi melebihi titik didih suatu reaktan tertentu khususnya untuk reaksi fase cair, maka konversi reaktan yang dihasilkan justru akan mengalami penurunan. Hasil kajian yang dilakukan oleh Nuryoto dkk. (2016) dan Clarkson dkk. (2001) menunjukkan fenomena tersebut, yang mana ketika suhu reaksi dinaikan terus mencapai titik didih salah satu reaktan, maka konversi reaktan yang dihasilkan akan mengalami penurunan. Penurunan konversi terjadi karena dengan berubahnya fase dari salah satu reaktan, maka kontak antara reaktan di sisi aktif katalis semakin kecil. Hal ini terjadi karena reaktan cenderung untuk menguap ke atas dibandingkan mendifusi ke sisi aktif katalis.

Jika dibandingkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Nuryoto dkk. (2016) dengan penelitian ini dengan menggunakan katalis yang sama yaitu zeolit alam bayah, konversi yang dihasilkan oleh Nuryoto dkk. (2016) mampu mencapai 98,64 % (berbasis etanol), sedang penelitian ini jauh dibawahnya yaitu maksimal 23,41 % berbasis asam asetat, maka ini artinya bahwa kinerja zeolit alam bayah pada penelitian ini tidak dapat bekerja maksimal sebagai katalis. Hal ini terjadi kemungkinan karena perbedaan rasio reaktan yang digunakan. Pada penelitian ini dilakukan pada rasio pereaksi 3 mol etanol/mol asam asetat, sedangkan pada penelitian Nuryoto dkk. (2016) rasio pereaksi yang digunakan 8 mol asam setat/mol etanol. Jika mengacu pada Gambar 1 kejadian ini logis karena yang diprotonasi pertama oleh katalis adalah asam asetat bukan etanol. Jadi dengan memperbanyak jumlah asam asetat, karbonil yang diserang reaktan etanol jumlahnya semakin besar, dan dampaknya laju reaksi dan konversi yang dihasilkan otomatis lebih besar.

3.2 Pengaruh Konsentrasi Katalis Terhadap Konversi

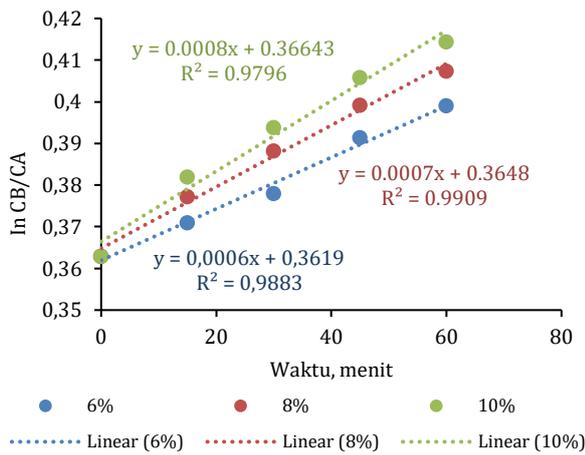
Gambar 4 menunjukkan fenomena serupa dengan pengaruh suhu, semakin konsentrasi katalis ditingkatkan, diikuti dengan peningkatan konversi asam asetat yang dihasilkan. Konversi asam asetat yang dihasilkan pada menit ke 60 berturut-turut adalah 17,43, 20,75, dan 23,41 % (untuk konsentrasi katalis 6, 8, dan 10 % berbasis massa asam setat). Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi katalis berdampak positif terhadap laju reaksi pada sistem reaksi, karena kontak reaktan asam asetat dan sisi aktif katalis semakin besar, sehingga jumlah asam asetat yang terprotonasi oleh katalis membentuk karbokation semakin besar pula (lihat mekanisme pada Gambar 1). Akibatnya, karbokation yang terserang oleh etanol semakin banyak, dan berimbans pada peningkatan laju bereaksi, dan konversi reaktan yang dihasilkan.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap waktu reaksi yang dilakukan dengan suhu reaksi 70°C

3.3 Uji Model matematika Pseudohomogen

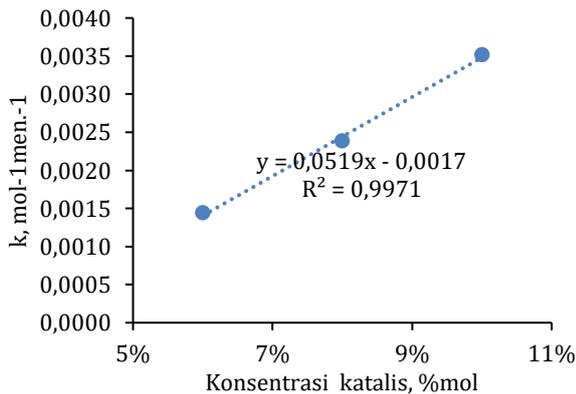
Uji model Pseudohomogen orde 2 sebagai bentuk validasi model dilakukan pada variasi konsentrasi katalis 6-10 % saja. Dari hasil linierisasi (lihat Gambar 5), *curve fitting* antara data dan hitungan mempunyai nilai R² di atas 0,95. Hasil ini menunjukkan bahwa model Pseudohomogen orde 2 searah sangat cocok untuk menggambarkan fenomena yang terjadi pada reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol. Untuk hasil linierisasi berupa nilai k untuk masing-masing suhu tersaji pada Tabel 1.



Gambar 5. Grafik hubungan antara ln (CB/CA) terhadap waktu reaksi dengan pada variasi konsentrasi katalis

Tabel 1. Nilai konstanta kecepatan reaksi (k) pada reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol

konsentrasi katalis (% masa asam asetat)	K (mol ⁻¹ min ⁻¹)
6	0,0014
8	0,0024
10	0,0035



Gambar 6. Diagram Hubungan antara nilai k terhadap konsentrasi katalis dengan menggunakan katalis zeolit pada suhu 70°C

Peningkatan konsentrasi katalis zeolit alam bayah berdampak pada peningkatan nilai k yang sangat signifikan (lihat Tabel 1 dan Gambar 6). Artinya bahwa penambahan katalis cukup efektif jika ingin meningkatkan laju reaksi kimia antara asam asetat dan etanol. Hubungan antara harga k terhadap konsentrasi katalis zeolit alam bayah termodifikasi dapat dinyatakan dengan persamaan matematika pada Persamaan (4)

$$k = 0,0519 C_z - 0,0017 \quad (4)$$

dengan,

C_z = konsentrasi katalis, %

k = konstanta kecepatan reaksi, mol⁻¹men.⁻¹

Persamaan (4) yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk memprediksi dampak konsentrasi terhadap laju reaksi dan konversi yang dihasilkan pada kondisi operasi yang berbeda.

Walaupun tentunya diperlukan divalidasi dengan data di lapangan, guna mengetahui besarnya penyimpangan yang dihasilkan. Besarnya penyimpangan yang dihasilkan nantinya dapat dijadikan sebagai faktor koreksi untuk menentukan hasil yang sesungguhnya.

4. KESIMPULAN

Peningkatan suhu reaksi dan konsentrasi katalis cukup efektif untuk meningkatkan laju reaksi esterifikasi antara etanol dan etanol, dengan konversi asam asetat tertinggi diperoleh sebesar 23,41 %. Tetapi perubahan perbandingan pereaksi yang dilakukan berdampak pada penurunan besarnya konversi yang dihasilkan. Model matematika Pseudohomogen orde 2 dapat digunakan untuk menggambarkan fenomena yang terjadi dalam sistem reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol dengan validasi yang sangat baik dengan harga R² di atas 0,95.

5. DAFTAR PUSTAKA

Amhed Zeki N.S., Al Hasan M.H., & Al Jendeel H.A. (2010). Kinetic Study of Esterification Reaction. Al-Khwarizmi Journal, (6)2, PP 33-42.

Bhandare, R. B. (2018). Ion Exchangers as Catalyst in Esterification Reaction: A Review. International Journal of Chemical Engineering Research,10 (2), pp. 105-118

Clarkson, J. S., Walker, A. J., & Wood, M. A. (2001). Continuous reactor technology for ketal formation: an improved synthesis of solketal. Organic process research & development, 5(6), 630-635.

Guzman Barrera, N. I., Bories, C., Peydecastaing, J., Sablayrolles, C., Vedrenne, E., Vaca-Garcia, C., & Thiebaud-Roux, S. (2018). A novel process using ion exchange resins for the coproduction of ethyl and butyl acetates. Green and Sustainable Chemistry, 8(03), 221-246.

Inui, K., Kurabayashi, T., & Sato, S. (2002). Direct synthesis of ethyl acetate from ethanol carried out under pressure. Journal of Catalysis, 212(2), 207-215.

Khayoon, M. S., & Hameed, B. H. (2013). Solventless acetalization of glycerol with acetone to fuel oxygenates over Ni-Zr supported on mesoporous activated carbon catalyst. Applied Catalysis A: General, 464, 191-199.

Melero, J. A., Vicente, G., Morales, G., Paniagua, M., & Bustamante, J. (2010). Oxygenated compounds derived from glycerol for biodiesel formulation: Influence on EN 14214 quality parameters. Fuel, 89(8), 2011-2018.

Mallesham, B., Sudarsanam, P., & Reddy, B. M. (2014). Eco-friendly synthesis of bio-additive fuels from renewable glycerol using nanocrystalline SnO 2-based solid acids. Catalysis Science & Technology, 4(3), 803-813.

NewSeed (2015). Applications and used Ethyl Acetate. <https://www.foodsweeteners.com/applications-and-uses-of-ethyl-acetate/>

Nst, S. L. A., & Sutri, R. (2015). Pembuatan Etil Asetat Dari Hasil Hidrolisis, Fermentasi Dan Esterifikasi

- Kulit Pisang Raja (*Musa paradisiaca* L.). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(1), 1-6.
- Nuryoto, N., Sulisty, H., Sediawan, W. B., & Perdana, I. (2016). Modifikasizeolit Alam Mordenit Sebagai Katalisator Ketalisasi Dan Esterifikasi. *Reaktor*, 16(2), 72-80.
- Nuryoto, Alin Rizka Amalia, Anita Puspitasari, & Anggara Diaz Ramadhan. (2020). Study of Esterification Reaction Between Ethanol and Acetic Acid Using Homogeneous and Heterogeneous Catalyst. *World Chemical Engeerinerung*.
- Nuryoto, N., & Hartono, R. (2018). Uji coba zeolit alam Bayah Sebagai katalisator Pada Reaksi Esterifikasi antara gliserol dan asam Asetat. *Jurnal Integrasi Proses*, 7(2), 67-73.
- Reddy, P. S., Sudarsanam, P., Mallesham, B., Raju, G., & Reddy, B. M. (2011). Acetalisation of glycerol with acetone over zirconia and promoted zirconia catalysts under mild reaction conditions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17(3), 377-381.
- Santacesaria, E., Carotenuto, G., Tesser, R., & Di Serio, M. (2012). Ethanol dehydrogenation to ethyl acetate by using copper and copper chromite catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 179, 209-220.
- Suminta, S., & Las, T. (2006). Penghalusan Struktur Sangkar Kristal Mordenit dan Klinoptilolit Alam dengan Metode Rietveld. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 7(2), 73-78.
- Vergaelen, M., Verbraeken, B., Van Guyse, J. F., Podevyn, A., Tigrine, A., Victor, R., ... & Hoogenboom, R. (2020). Ethyl acetate as solvent for the synthesis of poly (2-ethyl-2-oxazoline). *Green Chemistry*, 22(5), 1747-1753.