

STUDI LAJU REAKSI PROSES NITRASI GLISEROL MENGGUNAKAN MICROCHANNEL HYDRODINAMIKA TERFOKUS

Sugeng Hadi Susilo¹, Sudjito Suparman², Nurkholis Hamidi², Diah Mardiana³

¹ Program Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia.

² Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

³ Fakultas MIPA Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

Telp: (0341) 571260

shadis172.gh@gmail.com

Abstract

The study discusses of the flow velocity to reaction rate nitration of the glycerol. The purpose of this study was to predict the reaction rate nitration of the glycerol. This research uses experimental method. The study used a flow velocity variation of 50 $\mu\text{m/s}$, 100 $\mu\text{m/s}$, 150 $\mu\text{m/s}$ with a focus ratio of 1: 2. The design of the 1: 2 focus ratio microchannel ($D_{\text{Sheath}} = 300 \mu\text{m}$) The results of this study indicate that the reactant flow rate influences the reaction rate nitration of glycerol. The faster the flow rate the greater the reaction rate, This is because with the faster the flow rate will increase the collision. The more collisions, the faster the reaction rate. The reaction rate at a flow rate of 150 $\mu\text{m/s}$ is formulated $r = -0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,668276} [HNO_3]^{1,391724}$, at a speed of 100 $\mu\text{m/s}$, $r = -0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,6998} [HNO_3]^{1,3501}$ and at a speed of 50 $\mu\text{m/s}$, $r = -0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,65142} [HNO_3]^{1,32858}$.

Keywords: Nitration, glycerol, Flow rate, reaction rate

PENDAHULUAN

Reaksi nitration merupakan reaksi terbentuknya senyawa nitro atau masuknya gugus nitro (NO_2) pada senyawa. Reaksi nitration dapat dilakukan pada beberapa jenis senyawa kimia, salah satunya adalah senyawa aromatik. Reaksi nitration pada senyawa aromatik terjadi dalam fase cair, pada umumnya berupa senyawa benzena beserta turunannya, senyawa naftalen beserta turunannya. Salah satunya senyawa aromatik adalah toluena, atau disebut metilbenzena ataupun fenilmetana, adalah senyawa yang bersifat yang tidak larut dalam air, tidak berwarna.

Berkaitan dengan nitration gliserol dan laju reaksi, Kazakov et al., (1990a, 1990b), Yunda et al., (1991) memperkenalkan sistem keseimbangan nitration dalam gliserol-aqueous. Sedangkan Highsmith et al. (2002), Sanderson & Martins (2004), dan Sanderson et al. (2005) mengusulkan beberapa contoh sintesis glisiditritil dari gliserin. Kemudian Highsmith dan Johnston (2005) menemukan produksi proses glisiditritil nitrat secara terus-menerus dari gliserol dengan 1,3 dinitrogliserin sebagai produk

antara. Lu et al. (2008) menemukan parameter kinetika nitrogliserin didalam proses Continues stirred tank reactor. Efek suhu pada nitration gliserol dipelajari oleh Astuti et al. (2014). Orde reaksi diperlukan untuk mengatur persamaan laju reaksi. Nitration beberapa senyawa telah berhasil dimodelkan sebagai orde pertama masing-masing reaktan. Coombes et al., (1968) melakukan nitration benzen dan beberapa senyawa reaktif lainnya di dalam asam sulfat, sedangkan Moodie et al., (1977) melakukan nitration benzena, clorobenzena, toluena, dan di/trimetilbenzena didalam asam trifluoroasetat. Moodie et al., (1978) melakukan nitration reaktan yang sama didalam asam perklorat merupakan reaksi orde pertama satu sama lain. Lu et al., (2008) menyatakan bahwa laju reaksi pembentukan trinitrogliserin dari gliserol dan asam nitrat didalam proses CSTR dari Biazzi sebagai berikut:

$$-r_G = k C_G^m C_N^n = A e^{-E/RT} C_G^n C_N^m \quad (1)$$

Dimana nilai n dan m dihitung sebesar 0,9350 dan 1,117.

Halder et al. (2007) melakukan penelitian mengenai nitration toluena di dalam microreactor

dan batch reactor, penelitian dilakukan menggunakan asam nitrat sebagai agent nitration pada temperatur reaktor konstan. Sedangkan variabel yang diukur antara lain: waktu reaksi, temperatur reaksi dan konsentrasi asam. Hal ini digunakan untuk mengetahui kinerja microreactor. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan mikroreaktor menghasilkan lebih banyak produk reaksi dibandingkan dengan menggunakan sistem batch reaktor.

Zaldivar et al. (1995) melakukan penelitian dan membuat pemodelan matematika proses nitration senyawa benzena. Eksperimen dilakukan pada kondisi adiabatik dan aliran kalor diukur menggunakan kalorimeter. Penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur, kecepatan aliran fluida dan konsentrasi asam sulfat (H_2SO_4). Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa reaksi nitration senyawa aromatik dipengaruhi oleh komposisi reaktan, kecepatan reaksi, difusivitas reaktan, koefisien transfer massa, tingkat keasaman, tegangan permukaan kontak reaktan dan perubahan sifat fluida selama reaksi nitration. Cox et al. (1972) melakukan penelitian mengenai nitration toluena menggunakan batch reaktor. Hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa terjadi reaksi transisi pada konsentrasi tinggi dari kecepatan rendah ke kecepatan tinggi, terjadi kenaikan produk per satuan volume asam, dan total koefisien transfer massa meningkat secara lambat pada temperatur tetap.

METODE PENELITIAN

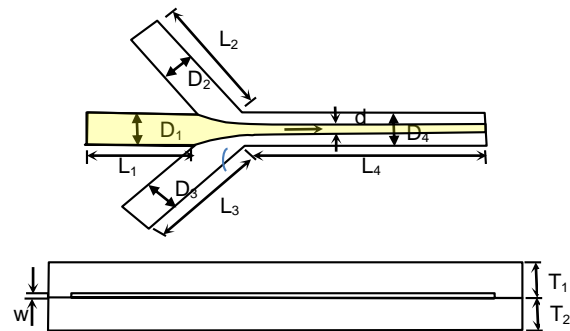
Studi ini digunakan untuk mengetahui perilaku laju reaksi nitration gliserol pada microchannel.

Metode dan Bahan

Pada studi ini menggunakan geometri microchannel seperti pada gambar 2, Sedangkan spesifikasi reaktan terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi reaktan used for testing

No	Reaktan	Massa Molar (gr/mol)	Density (gr/cm ³)	Volume Reaktan (ml)
1	Glycerol	92,09	1,26	73
2	Asam Nitrat	63,01	1,51	186

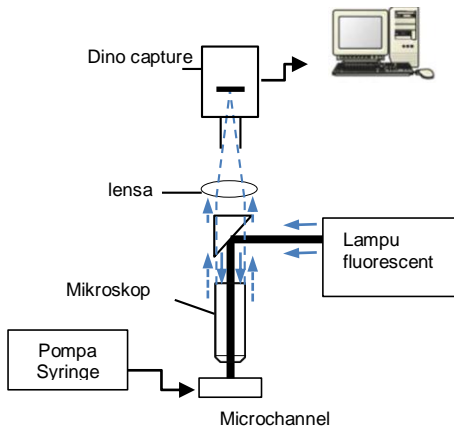


Gambar 2. Skema dua dimensi microchannel hidrodinamika terfokus

Dimana, lebar saluran inlet dan outlet (D_1, D_2, D_3, D_4) sebesar $300 \mu m$, w sebesar $200 \mu m$, α sebesar 45° , L_1, L_2, L_3 sebesar $20000 \mu m$, dan L_4 sebesar $40000 \mu m$. Microchannel terbuat dari acrylic dengan tebal (T_1, T_2) $5 mm$. Menggunakan tambahan pewarna untuk membedakan reaktan, warna kuning untuk gliserol dan warna merah untuk asam nitrat. Pengambilan data warna reaktan pada posisi $\alpha = 1$ ($\alpha = L_4/L_1$) terhadap perubahan waktu.

Set up Penelitian

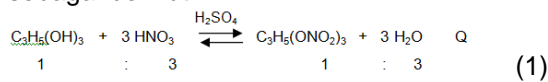
Gambar 3 menunjukkan skema peralatan penelitian, terdiri dari empat bagian: pencahayaan, optik, camera dan control. Pencahayaannya menggunakan lampu type Fluorescent Bulb, Daylight MA305-05, berfungsi memperjelas warna gambar. Optic menggunakan microscope type olympus BH2 BH-P. Mikroskop ini dilengkapi kontrol gerakan 2 arah linear sepanjang $60 mm$. Microscope ini terintegrasi dengan kamera dino capture type dino-lite AM7023B. Ini berfungsi untuk merekam reaksi reaktan pada saluran output. Data video/gambar di simpan dalam bentuk file video di komputer. Sedangkan untuk mengalirkan reaktan menggunakan pompa spryng type TS-1B/W0109-1B. Type ini terdiri dari four-channel. The four drive units could operate independently. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan aliran $50 \mu m/s$, $100 \mu m/s$, $150 \mu m/s$ pada rasio fokus 1:2. Rasio fokus merupakan perbandingan antara debit aliran yang difokuskan dengan debit aliran yang memfokuskan. Hasilnya berupa data warna reaktan dan produk reaksi. Kemudian dilakukan perhitungan laju reaksi dengan cara menentukan persamaan empiris laju reaksi n Order.



Gambar 3. Set up Penelitian

Reaksi Nitirasi Gliserol

Proses nitirasi gliserol menggunakan gliserol dan asam nitrat sebagai reaktan dengan asam sulfat sebagai katalis. Adapun persamaan reaksi proses nitirasi gliserol adalah sebagai berikut:



Gambar 4 Reaksi pembentukan Nitrogliserin

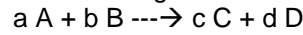
Dari persamaan reaksi terlihat bahwa setiap 1 mol $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ membutuhkan 3 mol HNO_3 dan akan menghasilkan 1 mol $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ dan 3 mol H_2O . Han et al. (1988) mengemukakan terdapat empat parameter yang berkaitan dengan memproduksi nitrogliserin menggunakan tubular flow reaktor. Empat parameter tersebut meliputi komposisi masuk, komposisi keluar, laju reaksi dan waktu reaksi.

Laju Reaksi

Teori Tabrakan dan laju Reaksi terjadi dengan adanya tumbukan antar molekul reaktan. Agar terjadi tabrakan, maka harus memiliki energi yang cukup untuk mengatasi hambatan energi aktivasi dan molekul harus memiliki geometri yang tepat untuk membentuk ikatan kembali. Kecepatan reaksi disebut laju reaksi. Semakin banyak tabrakan, semakin cepat laju reaksi. Tingkat reaksi diukur dengan jumlah reaktan yang menjadi produk dari waktu ke waktu. Laju reaksi merupakan perubahan konsentrasi reaktan atau produk dari waktu ke waktu. Studi tentang laju reaksi disebut kinetika reaksi.

$$\text{Laju reaksi} = \frac{\Delta[A]}{\Delta t} \quad (2)$$

Reaksi kimia dengan persamaan stoikiometri sebagai berikut:



Laju reaksi r didefinisikan sebagai

$$r = -\frac{1}{a} \frac{dA}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{dB}{dt} = -\frac{1}{c} \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

satuan r adalah konsentrasi/waktu.

Cara Menentukan Persamaan Empiris Laju Reaksi n Order.

Bila mekanisme reaksi tidak diketahui, persamaan laju reaksi n order menyesuaikan data dengan bentuk persamaan:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k C_A^n \quad (4)$$

Dimana hasil integrasi diperoleh:

$$C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n} = (n-1)kt, \text{ dimana } n \neq 1 \quad (5)$$

Order n tidak dapat ditemukan secara eksplisit pada persamaan 5, jadi harus dilakukan trial and error. Ini tidak terlalu sulit, namun. Cukup pilih nilai untuk n dan hitung k. Nilai n yang meminimalkan variasi nilai k.

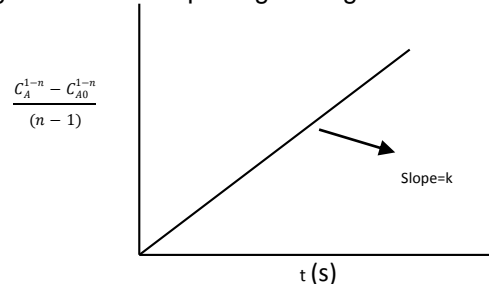
Laju untuk order $n > 1$ tidak bisa diselesaikan pada waktu yang terbatas. Sedangkan untuk order $n < 1$, laju ini dapat memprediksi konsentrasi reaktan turun sampai nol dan menjadi negatif pada waktu yang terbatas, sesuai dengan persamaan 5.

Prosedur dalam menentukan order n, a dan b sebagai berikut:

1. Persamaan diselesaikan dengan menebak nilai "n".
2. Hitung semua variable dalam persamaan.
3. Plot sesuai dengan persamaan garis "y = ax".

Dimana "a = k"

Karena nilai k belum diketahui maka, bisa menggunakan fitur "variance" untuk nilai "k" dari nilai $t=0$ sampai $t=t$. Dalam menentukan orde juga dilihat nilai R pada garis regresi linier.

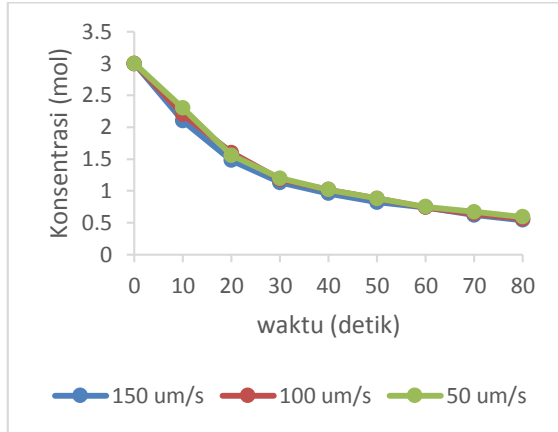


Gambar 4. Hubungan konsentrasi reaktan terhadap waktu.

Sumber: Octave Levenspiel (1999)

HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan data gambar pada beberapa variasi kecepatan aliran seperti terlihat pada gambar 7, 8, 9, dapat dibuat grafik seperti terlihat pada gambar 5.



Gambar 5. Hubungan perubahan konsentrasi (mol) asam nitrat terhadap waktu (s) pada variasi kecepatan 50 µm/s, 100 µm/s dan 150 µm/s.

Kecepatan aliran 150 µm/s

Berdasarkan gambar 5 dapat dilakukan perhitungan laju reaksi menggunakan metode Guessing untuk menentukan orde n. Kemudian data perubahan konsentrasi reaktan di masukan ke dalam persamaan 5. Hasil perhitungan reaktan asam nitrat pada kecepatan 150 µm/s diperoleh data seperti tabel 2.

Tabel 2. perhitungan perubahan konsentrasi asam nitrat terhadap waktu menggunakan metode Guessing Orde n-th.

n = 2,06

	CA	CA ⁽¹⁻ⁿ⁾ -CA0 ⁽¹⁻ⁿ⁾	A/(n-1)	B/t = k
		A	B	
0	3,0	0	0	0
10	2,12	0,138788	0,132179	0,013217893
20	1,48	0,347043	0,330517	0,016525859
30	1,13	0,564047	0,537188	0,017906268
40	0,98	0,705922	0,672307	0,016807678
50	0,82	0,916156	0,87253	0,017450593
60	0,74	1,056333	1,006032	0,016767195

70	0,67	1,207208	1,149722	0,016424598
80	0,58	1,456226	1,386881	0,017336019
			Variance	1,81263E-06

Dimana,

t = Waktu reaksi

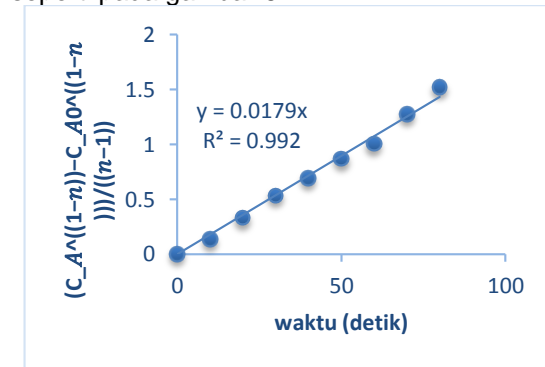
CA0 = Konsentrasi awal reaktan Asam nitrat (mol)

CA = Konsentrasi reaktan Asam nitrat setelah t (mol)

n = Orde

k = Konstanta laju reaksi

Dari hasil perhitungan dapat dibuat grafik konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu seperti pada gambar 6.



Gambar 6 Hubungan konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu pada kecepatan aliran 150 µm/s.

Setelah diperoleh nilai n orde, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai orde a dan orde b. Hal ini dilakukan dengan memasukan nilainya persamaan grafik sebesar y = 0,0179 pada nilai k fitting. Dan memasukan nilai koefisien jumlah mol gliserol pada α, serta koefisien jumlah mol asam nitrat pada β. Setelah itu melakukan metode trial and error pada nilai b yang mendapatkan selisih k = 0. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan orde n, a dan b.

Tabel 3. Hasil perhitungan orde n, a dan b.

n	2,06	k fitting	0,0179
α	1	k perhitungan	0,0179
β	3	selisih k	9,1E-12
b	1,391724		
a	0,668276		

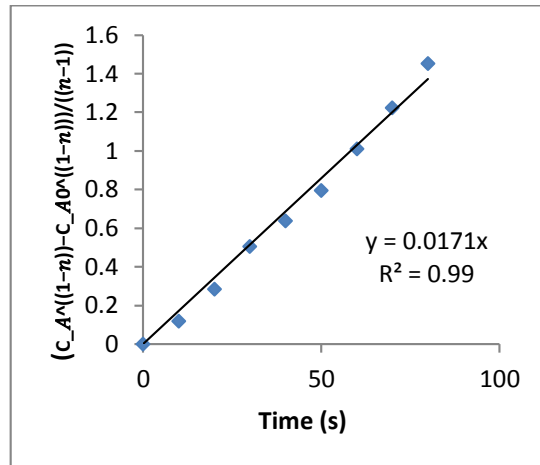
k	0,00388
---	---------

Dari hasil perhitungan diperoleh data a order = 0,668276 sedangkan b order = 1,391724 dengan nilai k = 0,00388. Oleh karena perhitungan laju reaksi ini berdasarkan konsentrasi reaktan, dan dengan bertambahnya waktu terjadi pengurangan konsentrasi sehingga nilai konstanta bernilai negatif (-). Sehingga persamaan laju reaksi untuk nitration gliserol dapat dituliskan sebagai berikut: $r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,668276} [HNO_3]^{1,391724}$

Kecepatan aliran 100 μm/s

t	CA	n= 2,02		B/t = k
		CA ⁽¹⁻ⁿ⁾ -CA0 ⁽¹⁻ⁿ⁾	A/(n-1)	
		A	B	
0	3	0	0	#DIV/0!
10	2,2	0,121394	0,117858	0,011786
20	1,6	0,293723	0,285168	0,014258
30	1,18	0,520734	0,505567	0,016852
40	1,02	0,657284	0,638139	0,015953
50	0,88	0,818204	0,794373	0,015887
60	0,74	1,041087	1,010764	0,016846
70	0,64	1,261034	1,224305	0,01749
80	0,56	1,494521	1,450992	0,018137
			Variance	3,62E-06

Dimana,
 t = Waktu reaksi
 CA0 = Konsentrasi awal reaktan Asam nitrat (mol)
 CA = Konsentrasi reaktan Asam nitrat setelah t (mol)
 n = Orde
 k = Konstanta laju reaksi Dari hasil perhitungan dapat dibuat grafik konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Hubungan konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu pada kecepatan aliran 100 μm/s,

Setelah diperoleh nilai n orde, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai orde a dan orde b. Hal ini dilakukan dengan memasukan nilainya persamaan grafik sebesar $y = 0,0173$ pada nilai k fitting. Dan memasukan nilai koefisien jumlah mol reaktan gliserol pada α, serta koefisien jumlah mol reaktan asam nitrat pada β. Setelah itu melakukan metode trial and error pada nilai b yang mendapatkan selisih k = 0. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan orde n, a dan b.

Tabel 5. Hasil perhitungan orde n, a dan b.

n	2,02	k fitting	0,0173
α	1	k perhitungan	0,0173
β	3	selisih k	9,82E-12
b	1,36071		
a	0,65929		
k	0,00388		

Dari hasil perhitungan diperoleh data a order = 0,65929 sedangkan b order = 1,36071 dengan nilai k = 0,00388. Sehingga persamaan laju reaksi untuk nitration gliserol dapat dituliskan sebagai berikut: $r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,65929} [HNO_3]^{1,36071}$

Kecepatan aliran 50 μm/s

Sedangkan untuk kecepatan aliran 150 μm/s, Perhitungan reaktan asam nitrat diperoleh data seperti tabel 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan perubahan konsentrasi asam nitrat terhadap waktu menggunakan metode Guessing Orde n-th.

n = 1,98

t	CA	CA ⁿ⁽¹⁻ⁿ⁾ - CA ⁰ⁿ⁽¹⁻ⁿ⁾	A/(n-1)	B/t = k
		A	B	
0	3	0	0	#DIV/0!
10	2,3	0,101347	0,103416	0,010342
20	1,56	0,306014	0,312259	0,015613
30	1,2	0,495639	0,505754	0,016858
40	1,02	0,640042	0,653104	0,016328
50	0,88	0,792724	0,808902	0,016178
60	0,75	0,984945	1,005046	0,016751
70	0,67	1,139892	1,163155	0,016617
80	0,59	1,336385	1,363658	0,017046
			Variance	4,3E-06

Dimana,

t = Waktu reaksi

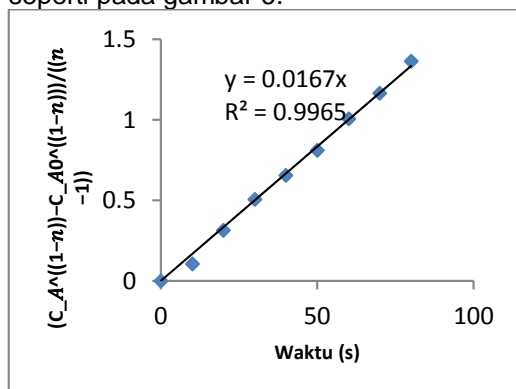
CA₀ = Konsentrasi awal reaktan Asam nitrat (mol)

CA = Konsentrasi reaktan Asam nitrat setelah t (mol)

n = Orde

k = Konstanta laju reaksi

Dari hasil perhitungan dapat dibuat grafik konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu seperti pada gambar 6.



Gambar 6 Hubungan konsentrasi ($\frac{C_A^{(1-n)} - C_{A0}^{(1-n)}}{(n-1)}$) terhadap waktu pada kecepatan aliran 50 $\mu\text{m/s}$,

Setelah diperoleh nilai n orde, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai orde a dan orde b. Hal ini dilakukan dengan memasukan nilainya

persamaan grafik sebesar $y = 0,0167$ pada nilai k fitting. Dan memasukan nilai koefisien jumlah mol reaktan gliserol pada α , serta koefisien jumlah mol reaktan asam nitrat pada β . Setelah itu melakukan metode trial and error pada nilai b yang mendapatkan selisih $k = 0$. Tabel 7 menunjukkan hasil perhitungan orde n, a dan b.

Tabel 7. Hasil perhitungan orde n, a dan b.

n	1,98	k fitting	0,0167
α	1	k perhitungan	0,0167
β	3	selisih k	-7,3E-13
b	1,32858		
a	0,65142		
k	0,00388		

Dari hasil perhitungan diperoleh data a order = 0,65142 sedangkan b order = 1,32858 dengan nilai $k = 0,00388$. Sehingga persamaan laju reaksi untuk nitration gliserol dapat dituliskan sebagai berikut: $r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,65142} [HNO_3]^{1,32858}$

Dari hasil penelitian ketiga kecepatan aliran yang digunakan ternyata bahwa semakin cepat aliran semakin besar orde reaksi, Hal ini dikarenakan dengan semakin cepat aliran akan memperbesar tabrakan. Semakin banyak tabrakan, semakin cepat laju reaksi.

KESIMPULAN

Hasil studi penelitian menyimpulkan bahwa persamaan laju reaksi untuk nitration gliserol dipengaruhi oleh kecepatan aliran reaktan. semakin besar kecepatan aliran akan memperbesar tabrakan reaktan sehingga memperbesar orde reaksi. Hal ini terlihat bahwa pada kecepatan aliran 150 $\mu\text{m/s}$, laju reaksi dirumuskan $r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,668276} [HNO_3]^{1,391724}$,

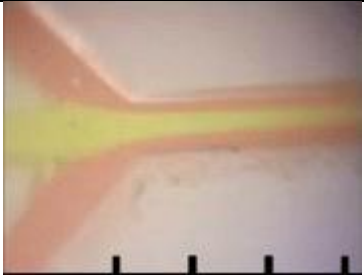

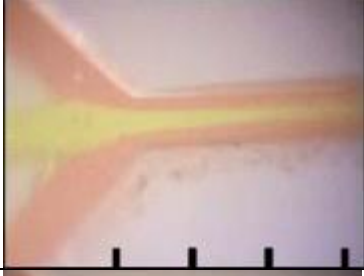
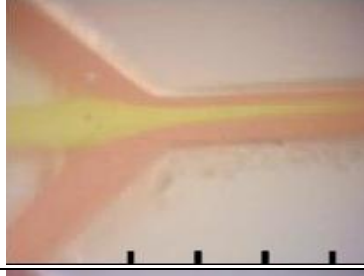
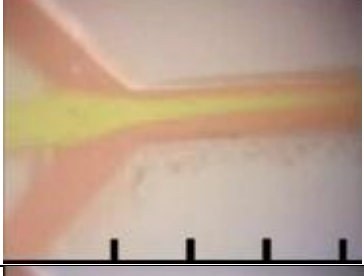
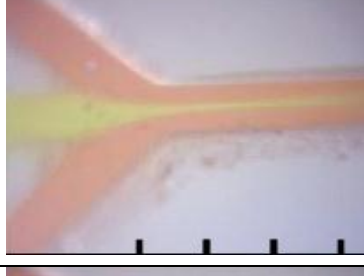
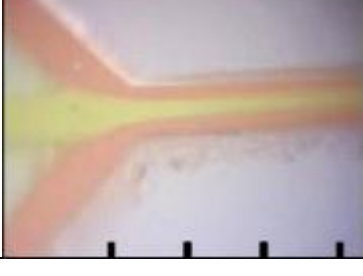

Dan secara berturut-turut laju reaksi yang terbentuk pada kecepatan 100 $\mu\text{m/s}$ dan 50 $\mu\text{m/s}$ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,6998} [HNO_3]^{1,3501} \text{ dan } r = - 0,00388 [C_3H_5(OH)_3]^{0,65142} [HNO_3]^{1,32858}$$

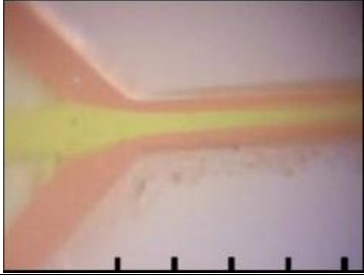
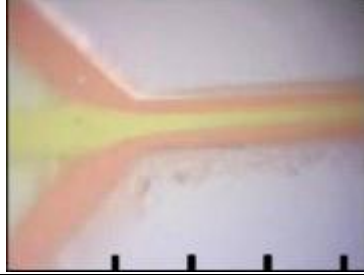
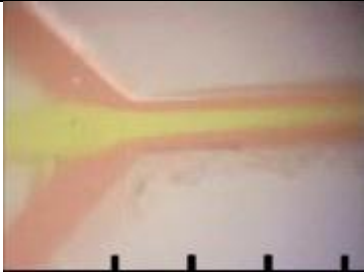
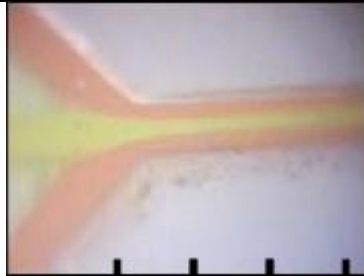
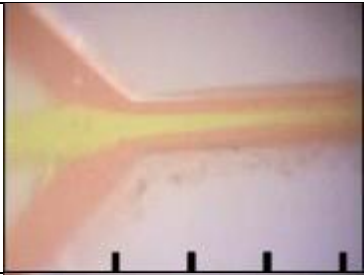
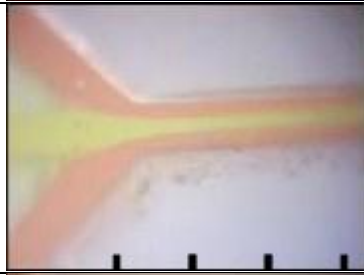
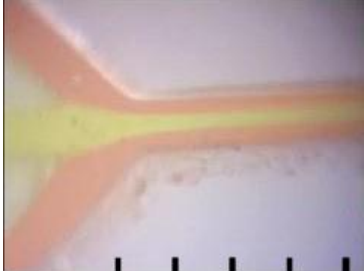
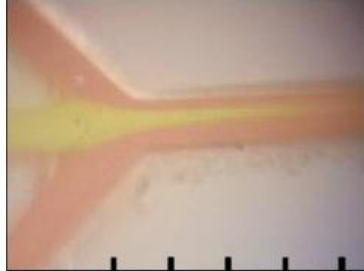
DAFTAR PUSTAKA

1. Astuti Erna, Supranto, Rochmadi, Prasetya Agus, Ström Krister & Andersson Bengt, 2014. Kinetic Modeling of Nitration of Glycerol,

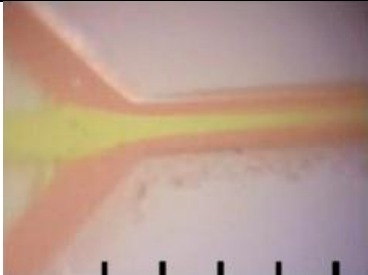




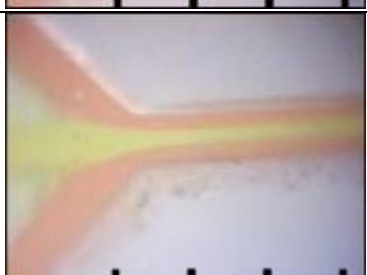


- Modern Applied Science; Vol. 8, No. 2; ISSN 1913-1844 E-ISSN 1913-1852, Published by Canadian Center of Science and Education.
2. Coombes, R. G., Moodie, R. B., & Schofield, K., 1968. Electrophilic aromatic substitution. Part I. The nitration of some reactive aromatic compounds in concentrated sulphuric and perchloric acids. *J. Chem. Soc. B*, 800-804.
 3. Cox P.R., Strachan A.N. 1972, Two phase nitration of toluene — I, *Chemical Engineering Science*, Volume 27, Issue 3, 457-463
 4. Halder R., lawal A. And Damavarapu, 2007. Nitration of Toluene in microreactor, *Catalysis today* 125 (74-80) New Jersey center for microchemical systems, Department of Chemical, Biomedical and Material Engineering, United States.
 5. Han, G.L., Li, L.X., Zhao, Z.Y., Qi, Z.D., 1988. The Technology and Management of Industrial Safety for Nitroglycerine. National Defense Industry Press (in Chinese), Beijing; pp. 72–100.
 6. Highsmith, T. K., & Johnston, H. E., 2005. Continuous Process and System for Production of glycidyl nitrate from glycerin, nitric acid and caustic and conversion of glycidyl nitrate to poly (glycidyl nitrate). US Patent No. 6, 870061.
 7. Highsmith, T. K., Sanderson, A. J., Cannizzo, L. F., & Hajik, R. M., 2002. Polymerization of Poly(glycidyl Nitrate) from High Purity Glycidyl Nitrate Synthesized from Glycerol. US Patent No. 6, 362, 311.
 8. Kazakov, A. I., Kirpichev, E. P., Lagodzinskaya, G. V., Andrienku, L. P., Yunda, N. G., Korolev, A. M., Rubtsov, Y. I., Eremenko, L. T., 1990b. Study of nitration equilibrium in the glycerin—aqueous nitric acid system. 2. Change in ΔH and ΔS in the nitration reactions. *Russian Chemical Bulletin*, 39(8), 1565-1570.
 9. Kazakov, A. I., Lagodzinskaya, G. V., Andrienku, L. P., Yunda, N. G., Korolev, A. M., Rubtsov, Y. I., Eremenko, L. T., 1990a. Study of nitration equilibrium in the glycerin—aqueous nitric acid system. 1. dependence of the equilibrium constants of nitration reactions on the temperature, acidity of the medium, and structure of the nitrated compound. *Russian Chemical Bulletin*, 39(8), 1560-1565.
 10. Lu, K. T., Luo, K. M., Yeh, T. F., & Lin, P. C. 2008. The Kinetic Parameters and Safe Operating Conditions of Nitroglycerine Manufacture in The CSTR of Biazzi Process. *Process Saf. Environ. Prot.*, 86(1), 37-47.
 11. Moodie, R. B., Schofield, K., & Tobin, G. D., 1977. Electrophilic Aromatic Substitution. Part 17. Products, Kinetics, and Mechanism of Nitration in Trifluoroacetic Acid. *J. Chem. Soc. Perkin Trans.*, 2, 1688-1693.
 12. Moodie, R. B., Schofield, K., & Tobin, G. D., 1978. Electrophilic Aromatic Substitution. Part 19. The Nitration of Some Aromatic Compounds in Perchloric Acid. *J. Chem. Soc. Perkin Trans.*, 2, 318-323.
 13. Sanderson, A. J., Martins, L. J., & Dewey, M. A. 2005. Process for Making Stable cured poly(glycidyl nitrate) and energetic compositions comprising same. US Patent No. 6, 861, 501.
 14. Sanderson, A. J., & Martins, L. J. 2004. Process for Making Stable cured poly (glycidyl nitrate). US Patent No. 6, 730, 181.
 15. Yunda, N. G., Lagodzinskaya, G. V., Kazakov, A. I., Korolev, A. M., Rubtsov, Y., Anelis, G. B., & Eremenko, L. T., 1991. Nitration equilibrium in the glycerol-aqueous-nitric-acid system 3. PMR parameters, conformational structure, and main properties of glycerol and its nitrates. *Russian Chemical Bulletin*, 40(2), 325-332.
 16. Octave Levenspiel (1999), *Chemical Reaction Engineering*, 3rd edition no. ISBN 0-471-25424-x.
 17. Zaldivar J. M., Molga E., Alos M.A., Aromatic nitrations by mixed acid. Slow liquid-liquid reaction regime, *Chem. Eng. & Proc.* – 1995. – V. 34. – P. 543 – 559.

Waktu (detik)	Gambar	Waktu (detik)	Gambar
10		50	
20		60	
30		70	
40		80	

Gambar 7. Hubungan perubahan konsentrasi (mol) terhadap waktu pada kecepatan aliran 150 $\mu\text{m/s}$

Waktu (detik)	Gambar	Waktu (detik)	Gambar
10		50	
20		60	
30		70	
40		80	

Gambar 8 Hubungan perubahan konsentrasi (mol) terhadap waktu pada kecepatan aliran $100 \mu\text{m/s}$

Waktu (detik)	Gambar	Waktu (detik)	Gambar
10		50	
20		60	
30		70	
40		80	

Gambar 9 Hubungan perubahan konsentrasi (mol) terhadap waktu pada kecepatan aliran $50 \mu\text{m}$