

Desain PI Controller menggunakan Ziegler Nichols Tuning pada Proses Nonlinier Multivariabel

Poppy Dewi Lestari¹, Abdul Hadi²

Jurusan Teknik Elektro UIN Sultan Syarif Kasim Riau

JL.HR Soebrantas km 15 no.155 Pekanbaru

¹pdlestarimt@gmail.com, ²flaminghd@gmail.com

Abstrak

Pengendalian pada proses kimia industri umumnya berbentuk nonlinear (berubah terhadap waktu), sehingga membutuhkan performansi yang baik dari pengendalian. Desain pengendali merupakan rangkaian cara untuk mendapatkan sistem kendali yang dimulai dengan model matematis sistem yang dikendalikan, tuning parameter pengendali dan mensimulasikan hasil desain. Pengendali yang memiliki performansi yang baik diperoleh dengan memberikan parameter tuning pengendali yang akurat. Tuning parameter pengendali adalah proses mengatur parameter-parameter pengendali untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan. Jurnal ini membahas desain PI controller menggunakan Ziegler Nichols Tuning pada proses Nonlinier Multivariabel. Sistem yang dikendalikan disimulasikan menggunakan Matlab-Simulink sehingga mendapatkan respon sistem yang dikendalikan. Respon sistem yang digunakan untuk menentukan parameter metode Ziegler Nichols. Dari parameter metode, kita dapatkan nilai tuning parameter kendali berupa nilai K_p dan K_i . Setelah itu sistem disimulasikan dengan pengendali yang telah didesain dan hasilnya dibandingkan dengan metode trial and error. Dari hasil penelitian, desain PI controller menggunakan Ziegler Nichols Tuning dapat mereduksi waktu tuning parameter kendali. Parameter kendali menggunakan Ziegler Nichols Tuning untuk pengendalian lup terbuka (metode kurva reaksi) pada laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ diperoleh nilai $K_p = 0,36$ dan $K_i = 1.666,7$ sedangkan untuk pengendalian lup tertutup (metode osilasi) pada laju aliran keluaran $F(t)$ diperoleh nilai $K_p = 0,45$ dan $K_i = 0,65$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ nilai $K_p = 0,45$ dan $K_i = 0,935$.

Kata Kunci : PI Controller, Ziegler Nichols Tuning, trial and error, Nonlinier Multivariabel

Abstract

Control on chemical process industries are generally nonlinear time variant, so that it needs a good performance. Controller Design is a series of how to get started with system control mathematical model system tuning parameters are controlled, controllers and simulate the design results. The controller has a good performance is obtained by providing accurate controller tuning parameters. This research discusses the design of PI controller using the Tuning in process Ziegler Nichols Nonlinear Multivariable. The system is controlled using Matlab-Simulink simulated so get a response-controlled system. Response system that is used to determine the parameters of the method Ziegler Nichols. The result shows, PI controller design using Ziegler Nichols Tuning can reduce the time duration of tuning parameter control. By using the control Parameter Tuning for control of Ziegler Nichols open loop (method of reaction curves) on the output flow rate $F(t)$ and the concentration of c -output (t) obtained the value of $K_p = 0.36$ and $K_i = 1.666 .7$ as for controlling close loop (oscillation method) on the output flow rate $F(t)$ obtained the value of $K_p = 0.45$ and $K_i = 0.69$ and concentration of c -output (t) value = $0.45 K_p$ and $K_i = \blacktriangle 0.935$.

Keywords : PI Controller, Ziegler Nichols Tuning, Nonlinear Multivariable

1. Pendahuluan

1.1. Pendahuluan

Pengendalian pada proses kimia industri umumnya berbentuk nonlinear (berubah terhadap waktu), sehingga membutuhkan performansi yang baik dari pengendalian. Desain pengendali merupakan rangkaian cara untuk mendapatkan sistem kendali yang dimulai dengan model matematis sistem yang dikendalikan, tuning parameter pengendali dan mensimulasikan hasil desain. Pengendali yang memiliki performansi yang baik diperoleh dengan memberikan parameter tuning pengendali yang akurat. Tuning parameter pengendali adalah proses mengatur parameter-parameter pengendali untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan.

Salah satu metode tuning parameter pengendali yaitu metode Ziegler Nichols Tuning. Metode Ziegler Nichols Tuning terdiri dari metode kurva reaksi (kendali lup terbuka) dan metode osilasi (kendali lup tertutup). Metode Ziegler Nichols tuning lebih cepat dibandingkan dengan metode trial and error karena mempunyai formula khusus dalam pencarian tuning pengendali.

1.2. Tujuan

Penelitian ini bertujuan dapat melakukan *tuning* parameter kendali dengan metode Ziegler Nichols Tuning pada pengendali Proporsional Integral.

1.3. Perumusan Masalah

Bagaimana melakukan *tuning* parameter kendali dengan metode Ziegler Nichols sehingga dapat mereduksi waktu *tuning* pengendali dan didapatkan respon sistem yang lebih baik.

1.4. Ruang Lingkup

Pada penelitian ini, ruang lingkup permasalahan yaitu:

1. Pengendali yang digunakan yaitu pengendali Proporsional Integral (PI)
2. Sistem yang dikendalikan bukan sistem yang sebenarnya, melainkan sistem yang dimodelkan menggunakan simulink Matlab Versi 7.8
3. Tidak membahas mengenai *hardware* sistem.
4. Metode *tuning* yang digunakan yaitu metode Ziegler-Nichols

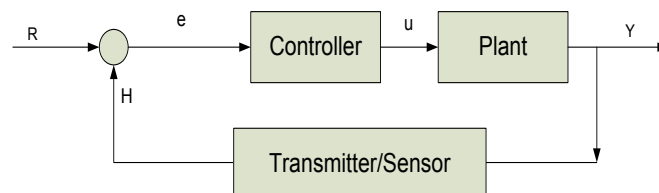
1.5. Manfaat

Dengan penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan pada industri dalam melakukan *tuning* pengendali pada perancangan sistem kendali proses khususnya pada proses *Nonlinier Multivariabel*.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Sistem Kendali

Sistem kendali (*control system*) merupakan sistem yang memerintah, mengatur dan mengendalikan proses pada industri. Sistem kendali yang baik adalah sistem kendali yang mempunyai respon cepat, peka terhadap perubahan sistem, mempunyai kesalahan pengendali yang kecil dan dapat mencapai *set point* walaupun terdapat banyak gangguan (*disturbance*). Berikut merupakan gambar prinsip kerja dari sistem kendali lup tertutup pada suatu proses.

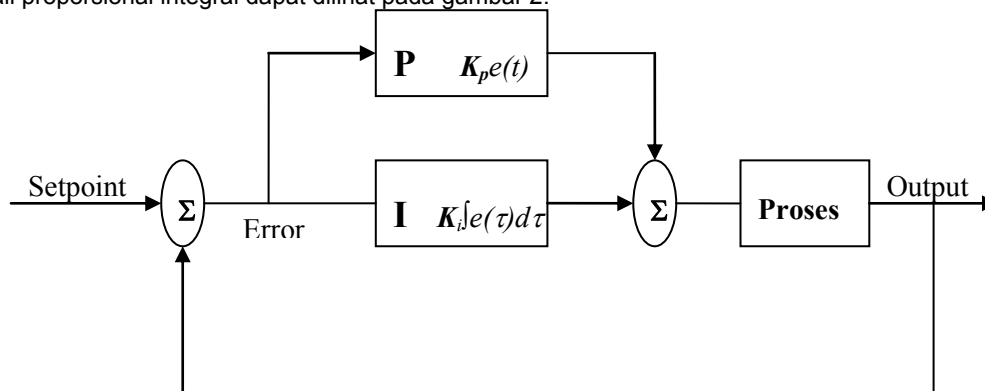


Gambar 1 : Sistem kendali lup tertutup

Kestabilan sistem kendali dapat diukur berdasarkan parameter sistem kendali berdasarkan respon sistem yang dikendalikan.

2.2. Pengendali PI

Pengendali *proportional-integral* (PI) merupakan suatu mekanisme untuk kendali lup tertutup yang banyak digunakan pada proses di industri. Algoritma pengendali PI ini merupakan gabungan dari dua jenis parameter yang terpisah yaitu konstanta proporsional dan konstanta integral. Bentuk blok diagram kendali proporsional integral dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 : Blok Diagram pengendali PI (Sumber: Lestari (2008))

2.3. Model Dinamika

Untuk memahami sistem pengendalian yang rumit, harus didapatkan dahulu model matematis, guna mengetahui perilaku sistem yang akan dikendalikan. Persamaan matematis dapat disederhanakan penyelesaiannya menggunakan transformasi *Laplace*. Metode transformasi *Laplace* adalah suatu metode

operasional yang dapat digunakan secara mudah untuk menyelesaikan persamaan diferensial linier. Dengan menggunakan transformasi *Laplace*, kita dapat mengubah beberapa fungsi umum seperti sinusoida, fungsi eksponensial menjadi fungsi-fungsi aljabar variabel kompleks. (Ogata, 2002).

Model dinamika yang digunakan pada penelitian ini yaitu dinamika *Continuous Stirred Tank Reaktor* (CSTR), yang merupakan salah satu proses *Nonlinear Multivariable*. Model matematis dinamika CSTR tersebut untuk mengendalikan laju aliran yaitu :

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - k \sqrt{\frac{V(t)}{A}} \dots(1)$$

dan, model matematis untuk mengendalikan konsentrasi yaitu :

$$\frac{d}{dt} [c(t)V(t)] = c_1F_1(t) + c_2F_2(t) + c(t)k \sqrt{\frac{V(t)}{A}} \dots(2)$$

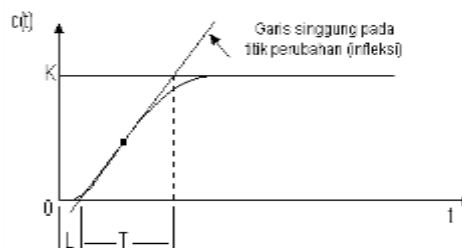
Model matematis tersebut merupakan sistem *nonlinear* dimana peneliti tidak melakukan linearisasi terhadap model tersebut. Sistem tersebut terdiri dari 2 *input* dan 1 *output*, sebagai *input* 1 yaitu laju aliran (F_1) dan *input* 2 yaitu laju aliran (F_2) yang mana setiap laju aliran tersebut mempunyai konsentrasi masing-masing dan sebagai *output* yaitu laju aliran keluaran ($F(t)$).

2.4. Tuning Parameter Kendali

Tuning parameter pengendali adalah proses pemberian parameter-parameter pengendali untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan. Metode *tuning* pengendali ini ada beberapa jenis yaitu metode *trial and error*, metode Ziegler Nichols dan metode Cohen-coon. Metode yang digunakan untuk penelitian ini yaitu metode Ziegler-Nichols. Metode *tuning* Ziegler-Nichols adalah metode *tuning* pengendali PID yang dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols. Ziegler-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. Metode Ziegler Nichols melakukan *tuning* pengendali dengan dua cara yang digunakan masing-masing untuk kendali *plant* lup terbuka dan kendali *plant* lup tertutup. Untuk kendali *plant* lup terbuka menggunakan metode kurva reaksi dan untuk kendali *plant* lup tertutup menggunakan metode osilasi.

2.4.1. Metode Kurva Reaksi

Metode kurva reaksi merupakan metode yang digunakan untuk *tuning* pada pengendali lup terbuka. *Plant* lup terbuka ini merupakan *plant* tanpa ada pengendali umpan balik (*feedback controller*). Metode kurva reaksi ini mempunyai kelemahan yaitu ketidakmampuannya melakukan *tuning* pada sistem yang mempunyai *plant* integrator dan *plant* yang mempunyai pole-pole (akar-akar persamaan) yang kompleks (Finn Haugen, 2010).



Gambar 3 : Kurva respon sistem berbentuk S

Dari gambar 3 kurva S terdapat dua konstanta yang terdiri dari L (dead time) dan T (waktu tunda). Dari gambar diatas terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik setelah selang waktu mati L. Sedangkan waktu tunda T menggambarkan perubahan kurva setelah 66% dari keadaan mantapnya (set point). Berikut tabel 1 merupakan ketetapan *tuning* parameter pengendali PID yang berdasarkan metode kurva reaksi.

Tabel 1 : Ketetapan *tuning* parameter pengendali PID menggunakan metode kurva reaksi

Tipe Pengendali	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	0	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	2L	0,5 L

2.4.2. Metode Osilasi

Metode osilasi merupakan metode *tuning* untuk respon sistem lup tertutup. Metode osilasi ini mempunyai beberapa tahapan dalam melakukan *tuning* pengendali yaitu sebagai berikut (Gunterus, 1994) :

1. *Plant* disusun serial dengan pengendali PID
2. Selanjutnya parameter Integrator diatur tak berhingga ($T_i = \infty$) dan parameter Derivatif diatur nol ($T_d = 0$).
3. Parameter Proporsional dinaikkan secara bertahap, mulai dari nol sampai mengakibatkan respon sistem berosilasi. Respon sistem harus berosilasi dengan magnitude tetap (*sustain osilation*).

Tuning pengendali PID menggunakan metode osilasi menurut metode Ziegler-Nichols yaitu berdasarkan K_u dan P_u tersebut. Jadi, untuk pemberian parameternya ditetapkan rumus berdasarkan tabel 2

Tabel 2 : Ketetapan parameter tuning pengendali berdasarkan metode osilasi

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_u$		
PI	$0,45 K_u$	$\frac{1}{2} P_u$	
PID	$0,6 K_u$	$0,5 P_u$	$0,125 P_u$

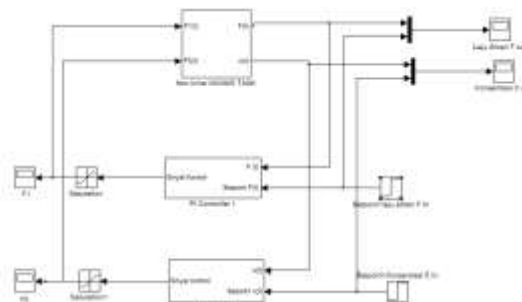
2.5. Matlab

Matlab adalah bahasa pemrograman level tinggi yang khusus untuk komputasi teknis. Matlab berasal dari kata *Matrix Laboratory*. Matlab ditemukan pada tahun 1970 dan digunakan untuk penyelesaian dalam teori matrik, aljabar linier, dan analisa numerik. Simulink merupakan *tool* interaktif yang terintegrasi dengan MATLAB untuk pemodelan, simulasi dan analisa sistem dinamik. Simulink memudahkan kita untuk membangun diagram blok secara grafis, mengevaluasi performansi sistem dan memperbaiki perancangan pengendalian.

3. Hasil Penelitian

3.1. Model Sistem Hasil Desain

Hasil desain sistem kendali pada Gambar 4 merupakan hasil desain pengendalian CSTR *Nonlinear Multivariable* dengan pengendali PI 1 dan pengendali PI 2. Parameter pengendali PI dituning menggunakan *trial and error* oleh peneliti sebelumnya, sehingga didapat nilai $K_p = 8$, $K_i = 1$ dan $K_p = 1$, $K_i = 0,1$ dengan cara uji coba parameter kendali hingga diperoleh respon sistem yang paling baik.



Gambar 4 : Non linier CSTR pada saat diberi pengendali PI

3.2. Tuning Parameter Kendali dengan Metode Ziegler Nichols

Penelitian ini menggunakan beberapa kondisi yang mengacu pada tabel 3 yaitu :

- a. Laju aliran pertama (F_1) konstan dan laju aliran kedua (F_2) berubah
- b. Laju aliran pertama (F_1) berubah dan laju aliran kedua (F_2) konstan

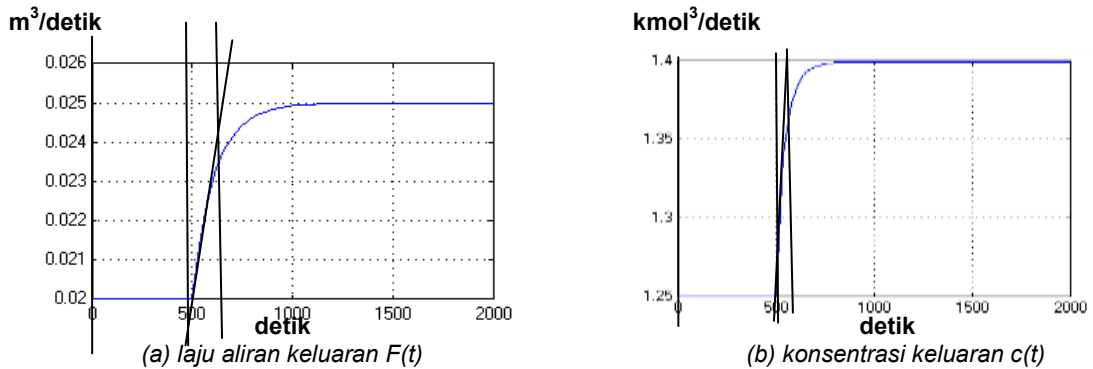
Hal ini dilakukan karena *mixing tank* merupakan salah satu proses kimia industri yang bersifat MIMO (*Multi Input Multi Output*). Dengan adanya multivariable proses tersebut, menyebabkan adanya interaksi antara masukan yang satu dengan yang lainnya dan segala kemungkinan kondisi proses yang terjadi.

Tabel 3 : Data proses

Daerah Operasi 1	Daerah Operasi 2
$F_{11} = 0,015 \text{ m}^3/\text{detik}$ $F_{12} = 0,005 \text{ m}^3/\text{detik}$ $F(t) = 0,02 \text{ m}^3/\text{detik}$	$F_{21} = 0,02 \text{ m}^3/\text{detik}$ $F_{22} = 0,01 \text{ m}^3/\text{detik}$ $F(t) = 0,025 \text{ m}^3/\text{detik}$
$c_{11} = 1 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ $c_{12} = 2 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ $c(t) = 1,25 \text{ kmol}^3/\text{detik}$	$c_{21} = 1 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ $c_{22} = 2 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ $c(t) = 1,25 \text{ kmol}^3/\text{detik}$

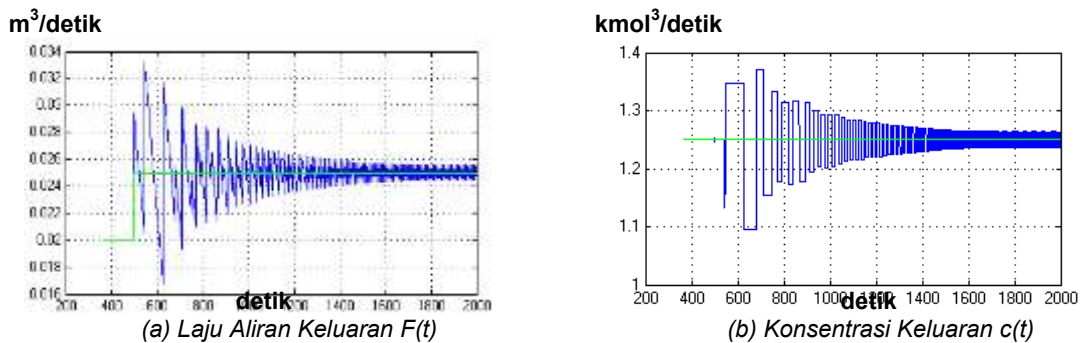
3.2.1. Metode Kurva Reaksi

Masukan $F_1 = 0,015 \text{ m}^3/\text{detik}$ konstan dan masukan F_2 berubah dari $0,005 \text{ m}^3/\text{detik}$ menuju $0,01 \text{ m}^3/\text{detik}$ (F_1 tetap dan F_2 berubah) dengan konsentrasi masukan yang konstan yaitu $c_1 = 1 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ dan $c_2 = 2 \text{ kmol}^3/\text{detik}$, parameter pengendali PI pada laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ yaitu terdapat pada deskripsi gambar berikut.



Gambar 5 : Parameter Kendali dengan F_{11} dan F_{12} ke F_{22}

Sehingga, untuk laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ diketahui nilai $L = 500$ dan $T = 700 - 500 = 200$. Nilai *tuning* untuk laju aliran keluaran $F(t)$ $K_p = 0,36$, $K_i = 1.666,7$ dan untuk konsentrasi keluaran $c(t)$ $K_p = 0,36$, $K_i = 1.666,7$. maka respon sistem laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ sebagai berikut:



Gambar 6 : Hasil Tuning Parameter Ziegler Nichols

Parameter kendali dari respon sistem, laju aliran keluaran $F(t)$ pada tabel 4 dan konsentrasi keluaran $c(t)$ pada tabel 5

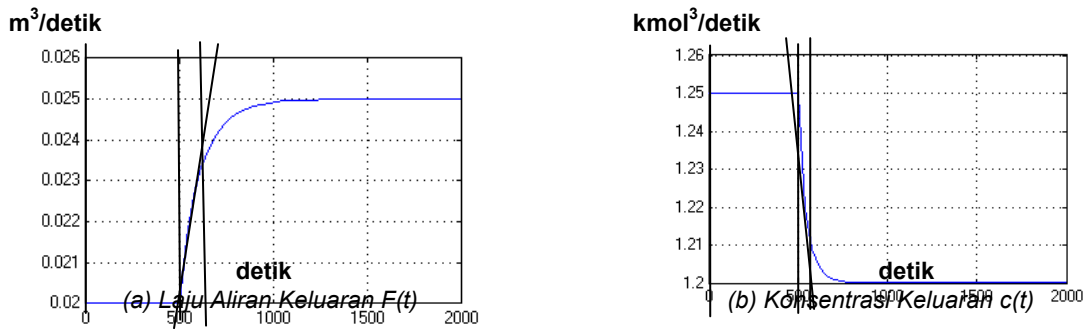
Tabel 4 : Parameter kendali laju aliran keluaran $F(t)$ pada F_1 Konstan

t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
500	500	545	1600	32

Tabel 5 : Parameter kendali konsentrasi keluaran $c(t)$ pada F_1 Konstan

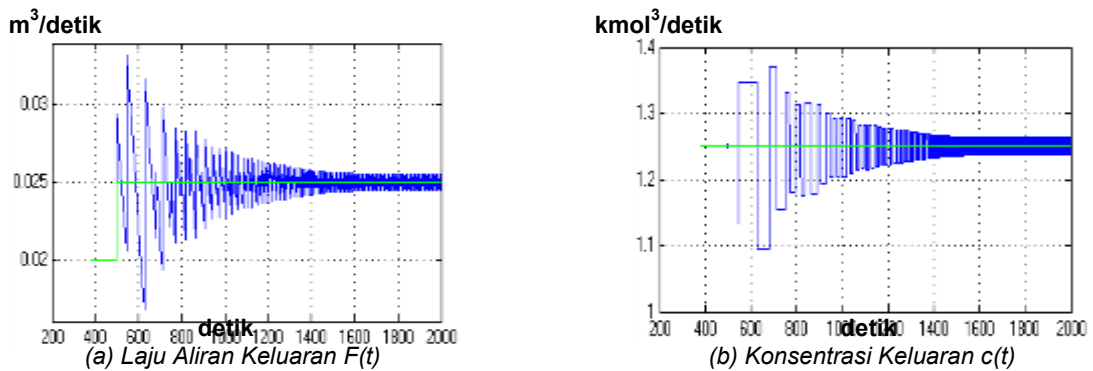
t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
500	500	545	1600	9,6

Masukan F_1 berubah dari $0,015 \text{ m}^3/\text{detik}$ menuju $0,02 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan masukan $F_2 = 0,005 \text{ m}^3/\text{detik}$ konstan (F_{11} ke F_{21} dan F_{12}), dengan konsentrasi masukan yang konstan yaitu $c_1 = 1 \text{ kmol}^3/\text{detik}$ dan $c_2 = 2 \text{ kmol}^3/\text{detik}$, parameter pengendali PI pada laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ yaitu terdapat pada deskripsi gambar 7



Gambar 7 : Parameter Kendali dengan F_{11} ke F_{21} dan F_{12}

Sehingga, untuk laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ diketahui nilai $L = 500$ dan $T = 700 - 500 = 200$. Nilai *tuning* untuk laju aliran keluaran $F(t)$ $K_p = 0,36$, $K_i = 1.666,7$ dan untuk konsentrasi keluaran $c(t)$ $K_p = 0,36$, $K_i = 1.666,7$. maka respon sistem laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ seperti ditunjukkan oleh gambar 8



Gambar 8 : Hasil Tuning Parameter Ziegler Nichols

Parameter kendali dari respon sistem, laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ ditunjukkan oleh tabel 6 dan tabel 7

Tabel 6 : Parameter kendali laju aliran keluaran $F(t)$ pada F_2 Konstan

t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
500	500	545	1600	32

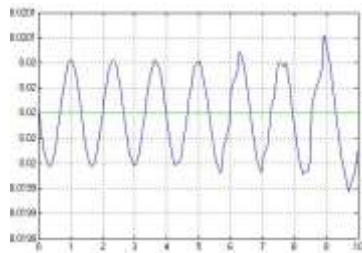
Tabel 7 : Parameter kendali konsentrasi keluaran $c(t)$ pada F_2 Konstan

t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
500	500	550	1600	32

3.2.2. Metode Osilasi

Untuk kendali laju aliran dengan masukan berubah dari $0,02 \text{ m}^3/\text{detik}$ menuju $0,025 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan konsentrasi yang konstan yaitu $1,25 \text{ kmol}^3/\text{detik}$, parameter *tuning* kendali didapat dari gambar 9.

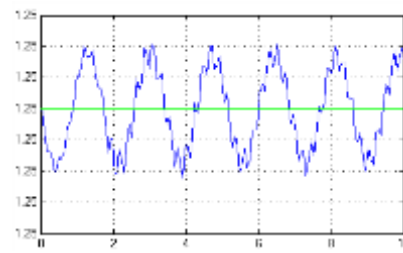
$m^3/detik$



detik

(a) Laju Aliran Keluaran $F(t)$

$kmol^3/detik$



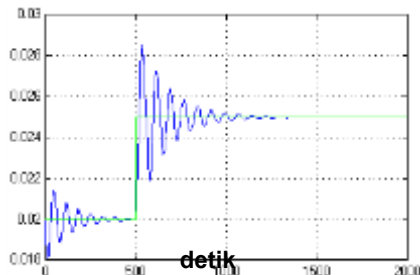
detik

(b) Konsentrasi Keluaran $c(t)$

Gambar 9 : Respon step dengan sustain oscillation

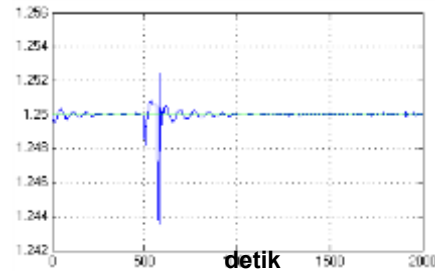
Untuk laju aliran keluaran $F(t)$ nilai $K_u = 1$, $P_u = 2,3 - 1 = 1,3$ dan *tuning* untuk laju aliran keluaran $F(t)$ $K_p = 0,45$, $K_i = 0,65$. Sedangkan konsentrasi keluaran $c(t)$ nilai $K_u = 1$, $P_u = 2,3 - 0,43 = 1,87$ dan *tuning* untuk konsentrasi keluaran $c(t)$ $K_p = 0,36$, $K_i = 1.666,7$. maka respon sistem laju aliran keluaran $F(t)$ dan konsentrasi keluaran $c(t)$ seperti terlihat pada gambar 10.

$m^3/detik$



(a) Laju Aliran Keluaran $F(t)$

$kmol^3/detik$



(b) Konsentrasi Keluaran $c(t)$

Gambar 10 : Hasil Tuning Parameter Ziegler Nichols

Parameter kendali dari respon sistem, laju aliran keluaran $F(t)$ pada tabel 8 dan konsentrasi keluaran $c(t)$ dapat dilihat pada tabel 9

Tabel 8 : Parameter kendali laju aliran keluaran $F(t)$ metode osilasi

t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
518	511	536	1100	32

Tabel 9 : Parameter kendali laju aliran keluaran $c(t)$ metode osilasi

t_r (detik)	t_d (detik)	t_p (detik)	t_{st} (detik)	M_p (%)
518	506	580,8	900	0,192

3.3. Perbandingan Metode Ziegler Nichols Dengan Metode Trial And Error

Berdasarkan *tuning* kendali metode Ziegler Nichols yang telah dilakukan sebelumnya, pada tabel 10 dapat diamati hasil perbandingan dengan metode *trial and error*.

Tabel 10 : Perbandingan metode Ziegler Nichols dengan metode Trial and error

		ZIEGLER NICHOLS		TRIAL AND ERROR	
		LAJU ALIRAN	KONSENTRASI	LAJU ALIRAN	KONSENTRASI
TUNING KENDALI	K_p	0.45	0.45	8	1
	K_i	0.65	0.935	1	0.1
PARAMETER	t_r	518	518	512.4	515

KENDALI	t_d	511	506	(0.0225) 505	(1.245) 509.5
	t_p	536	580.8	(0.0264) 525.5	(1.2546) 525.5
	t_{st}	1100	900	580	582
	M_p	32	0.192	5.6	0.4

Dari tabel 10 dapat diketahui bahwa *tuning* kendali metode Ziegler Nichols lebih kecil daripada metode *trial and error*. Dari parameter kendali pada kedua metode tersebut metode *trial and error* lebih baik dan lebih stabil dibandingkan dengan metode Ziegler Nichols. Hal ini membuktikan bahwa metode *trial and error* lebih akurat jika dibandingkan dengan metode Ziegler Nichols. Sehingga di industri yang sebenarnya metode *trial and error* masih sering digunakan pada saat *tuning* parameter kendali, meskipun waktu *tuning* yang dilakukan relatif lama.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Dengan metode kurva reaksi (lup terbuka) untuk kendali laju aliran keluaran $F(t)$ dan kendali konsentrasi keluaran $c(t)$ diperoleh nilai parameter kendali $K_p = 0,36$ dan $K_i = 1.666,7$.
2. Dengan metode osilasi (lup tertutup) untuk kendali laju aliran keluaran $F(t)$ nilai $K_p = 0,45$ dan $K_i = 0,65$ dan untuk kendali konsentrasi keluaran $c(t)$ diperoleh nilai parameter kendali $K_p = 0,45$ dan $K_i = 0,935$.
3. Parameter kendali untuk metode *trial and error* menghasilkan performansi sistem lebih baik dibandingkan dengan metode Ziegler Nichols.

Daftar Pustaka

- [1] Anonymous, *Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler PID*. Available <http://www.elektroindonesia.com/elektro/tutor12.html> (diakses 27 Februari 2012)
- [2] Gunterus, Frans. *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*. Jakarta: PT. Elex Media Komputindo, Jakarta. 1997.
- [3] Haugen, Finn. "Ziegler-Nichols' Close-Loop Method". Artikel. Tech Teach: 2010.
- [4] Lestari, Poppy D. "Perancangan Pengendali Proporsional Integrator SISO terdesentralisasi pada Proses Non Linier Multivariabel". Laporan Penelitian UIN Suska Riau, Pekanbaru. 2008.
- [5] Luyben, W. "Process Modeling, Simulation and Control Engineering", 2nd Edition. Mc Graw Hill, New York. 1999.
- [6] Ogata, Katsuhiko. "Modern Control Engineering". Prentice-Hall, New Delhi. 2002.