

PENGENDALIAN KOLOM DISTILASI BINER MENGGUNAKAN METODE FUZZY GAIN SCHEDULING IMC-PID

Ricko Dwi Pambudi^{*)}, Budi Setiyono, and Wahyudi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}*e-mail: dwiricko09@yahoo.co.id*

Abstrak

Kolom distilasi merupakan teknologi pemisahan campuran komponen yang paling banyak digunakan dalam industri kimia dan industri perminyakan untuk pemurnian produk hasil akhir. Kolom distilasi biner memisahkan campuran cairan menjadi dua buah komposisi produk yaitu produk atas dan produk bawah. Perancangan kontrol kolom distilasi merupakan tantangan yang besar dalam bidang kontrol karena sifatnya seperti nonlinearitas pada proses, interaksi multivariabel, ketidakpastian termodinamika, proses dengan waktu tunda, dan adanya gangguan. Berdasarkan sifat kolom distilasi tersebut, dibutuhkan suatu metode kendali modern yang mampu membuat respon sistem mengikuti perubahan set point dan mengurangi atau menghilangkan gangguan sehingga keluaran komposisi produk sesuai yang diinginkan. Metode fuzzy gain scheduling IMC-PID memberikan respon close loop yang memuaskan dengan overshoot yang sedikit dan waktu naik yang lebih cepat saat mengikuti set point dan penghilangan gangguan. Berdasarkan pada simulasi yang telah dilakukan, metode fuzzy gain scheduling IMC-PID mempunyai nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan fuzzy IMC-PID.

Kata kunci : kolom distilasi biner, sistem multivariabel, fuzzy gain scheduling, IMC-PID

Abstract

Distillation column is most commonly used component mixture separation technology in the petroleum and chemical industries for purification of final products. Binary distillation column separates liquid mixture into two composition products called top product and bottom product. Designing control distillation column is great challenge in control field because of its characteristic such as nonlinearity of the process, multivariable interactions, uncertain thermodynamics, process with dead time, and presence of disturbance. Based on its characteristics, it needs modern control methods that method that can make the system response to track the set point change and reduce or eliminate the disturbances, so the product composition output as desired. Fuzzy gain scheduling IMC-PID method provides satisfactory closed-loop responses with less overshoot and shorter rising times in case of set point tracking and disturbances rejection. Based on the simulation tests performed, fuzzy gain scheduling IMC-PID method has smaller IAE value compared to fuzzy IMC-PID method.

Keywords : binary distillation column, multivariable system, fuzzy gain scheduling, IMC-PID

1. Pendahuluan

Kolom distilasi adalah teknologi pemisahan yang paling banyak digunakan dalam industri kimia dan industri perminyakan. Pemisahan menggunakan kolom distilasi mempunyai tujuan utama untuk menjaga kemurnian konsentrasi produk akhir. Kontrol kolom distilasi adalah hal yang paling banyak dipelajari dalam kontrol proses maupun kimia proses. Hal tersebut menjadi tantangan karena kolom distilasi mempunyai sifat yang nonstationer, multivariabel, nonlinier, ketidakpastian termodinamika, proses dengan *dead time*, dan adanya gangguan yang mempengaruhi sistem[1][2][3]. Dengan melihat

karakteristik yang dimiliki kolom distilasi diperlukan suatu metode kontrol yang mampu mengendalikan kolom distilasi sehingga memberikan hasil produk yang baik. IMC-PID merupakan desain kontroler PID yang robust, namun kurang cukup fleksibel untuk memastikan kecepatan respon dan kekokohan untuk ketidakpastian varian waktu. *Fuzzy gain scheduling* dapat menjadi solusi permasalahan kontrol yang kompleks. Untuk membuat kontrol IMC-PID beraksi lebih cepat dan lebih kokoh, skema *fuzzy gain scheduling* digunakan untuk *tuning* parameter kontrol IMC-PID secara *online*. Koefisien *close loop time constant* (λ) ditentukan dengan kontroler *fuzzy adjusting* berdasarkan *error* (e) dan *delta error* (de) dari

dinamika proses. Setelah itu parameter-parameter kontroler IMC-PID ditentukan dengan *gain scheduling*[4]. Berdasarkan latar belakang tersebut, pada penelitian ini dirancanglah suatu metode kontrol dengan menggunakan *Fuzzy Gain Scheduling* IMC-PID. Kontroler tersebut akan diterapkan pada sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) 2x2 kolom distilasi biner pemisahan *methanol-air* Wood & Berry[5].

2. Metode

2.1. Model FOPDT

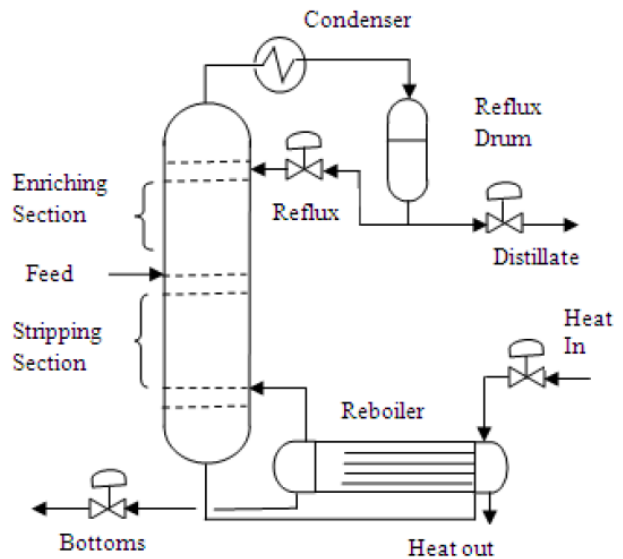
Model *First-Order Plus Dead Time* (FOPDT) merupakan suatu model fungsi alih orde satu yang disertai dengan adanya waktu tunda. Model FOPDT merepresentasikan dinamika perubahan atau perubahan keluaran proses terhadap perubahan sinyal kontrol atau variabel masukan proses di sekitar kondisi *steady state*. Model FOPDT mempunyai tiga buah parameter yaitu *gain process* (K), *time constant* (τ), dan *dead time* (θ). Ketiga parameter tersebut secara praktis dapat diperoleh atau diidentifikasi melalui eksperimen sederhana *bump test* atau sinyal tangga secara *open loop* pada keadaan kontrol manual. Model FOPDT dapat direpresentasikan ke dalam bentuk fungsi alih proses (G(s)) dengan transformasi *Laplace* yang ditunjukkan pada persamaan (1)[6][7].

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (1)$$

dengan K adalah *gain process*, τ merupakan konstanta waktu proses, dan θ merupakan waktu mati pada proses.

2.2. Kolom Distilasi Biner

Kolom distilasi biner merupakan sebuah kolom yang digunakan untuk memisahkan campuran cairan menjadi beberapa komponen yang terpisah. Tujuan pemisahan menggunakan kolom distilasi adalah untuk memperoleh kemurnian produk akhir hasil pemisahan. Kolom distilasi biner mempunyai satu masukan campuran komponen dengan konsentrasi masukan (X_F) dan dua buah keluaran dengan konsentrasi komponen yang berbeda yaitu produk atas atau disebut *distillate* (X_D) dan produk bawah yang disebut *bottoms* (X_B)[1]. *Feed* dimasukkan pada bagian tengah kolom di sebuah *tray* yang kemudian dikenal sebagai *feed tray*. *Feed tray* membagi kolom-kolom menjadi bagian atas *enriching* atau *rectification* dan bagian bawah *stripping section*[1]. Bagian atas *enriching* terdiri atas *tray* berada di atas *feed tray*, *condenser*, *reflux drum*, *reflux*, dan keluaran produk atas (X_D). Bagian *stripping* terdiri atas *tray* yang berada di bawah *feed tray*, *reboiler*, dan keluaran produk bawah (X_B). Diagram skematik kolom distilasi biner ditunjukkan oleh Gambar 1[8].



Gambar 1. Diagram skematik kolom distilasi biner.

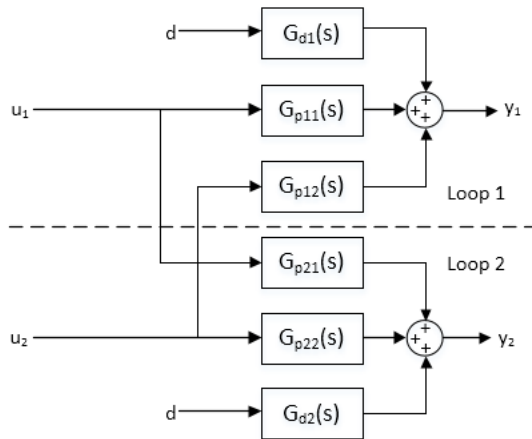
Operasi dasar dalam kolom distilasi adalah sebagai berikut, aliran *feed* dimasukkan ke dalam kolom melalui *feed tray*. *Feed* yang mengalir turun dalam kolom dikumpulkan di bawah untuk dipanaskan ulang. Panas dipasok dari *reboiler* dengan energi pemanasan tertentu untuk menghasilkan uap panas. Sumber masukan panas dapat dicocokkan dengan jenis cairan, sebagian besar pabrik kimia menggunakan *steam*. Uap dinaikkan di *reboiler* tersebut dan kembali dimasukkan ke dalam unit di bagian bawah kolom. Cairan yang lewat dari *reboiler* dan tidak menguap dikenal sebagai produk bawah (X_B). Uap bergerak naik di dalam kolom dan saat keluar di bagian atas didinginkan oleh *condenser*. Cairan kental disimpan dalam sebuah penampungan yang dikenal sebagai *reflux drum*. Cairan ini sebagian didaur ulang kembali ke atas kolom dan disebut sebagai *reflux*. Cairan yang dikeluarkan dari sistem ini dikenal sebagai distilat atau produk atas (X_D)[1]. Variabel *output* yang dikendalikan adalah X_D dan X_B , variabel *input* gangguan adalah perubahan laju *feed* (F), dan variabel *input* yang dimanipulasi adalah laju aliran *reflux* (R) dan laju aliran *steam* pada *reboiler* (S).

Pada penelitian ini, kolom distilasi yang digunakan adalah model kolom distilasi biner pemisahan *methanol-air* Wood & Berry. Fungsi alih kolom tersebut ditunjukkan oleh persamaan (2)[5].

$$\begin{bmatrix} X_D(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(s) \\ S(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-8,1s}}{14,9s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} \end{bmatrix} F(s) \quad (2)$$

2.3. Sistem Kendali MIMO

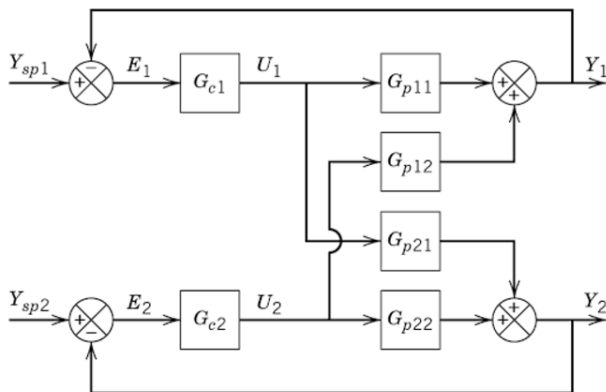
Sistem kendali MIMO mempunyai karakter berupa adanya proses interaksi antara variabel yang dimanipulasi dengan variabel yang dikontrol. Jumlah variabel yang dimanipulasi sama dengan jumlah variabel yang dikontrol. Sistem MIMO 2x2 merupakan suatu sistem multivariabel yang memiliki dua variabel yang dikontrol (y) dan dua variabel yang dimanipulasi (u). Blok diagram sistem MIMO 2x2 ditunjukkan oleh Gambar 2[9].



Gambar 2. Diagram blok interaksi sistem MIMO 2x2

2.3.1. Sistem MIMO Terdesentralisasi

Sistem kendali MIMO terdesentralisasi terdiri dari pengendali umpan-balik independen yang mengendalikan subset dari variabel output yang dikendalikan dengan subset dari variabel input yang dimanipulasi. Sistem kendali MIMO terdesentralisasi terdiri dari satu rangkaian sistem kendali SISO independen. Sistem kendali MIMO 2x2 terdesentralisasi memiliki dua struktur yang berbeda, yaitu struktur pengendali 1-1/2-2 dan struktur pengendali 1-2/2-1[10][11]. Struktur 1-1/2-2 sistem MIMO terdesentralisasi ditunjukkan oleh Gambar 3.



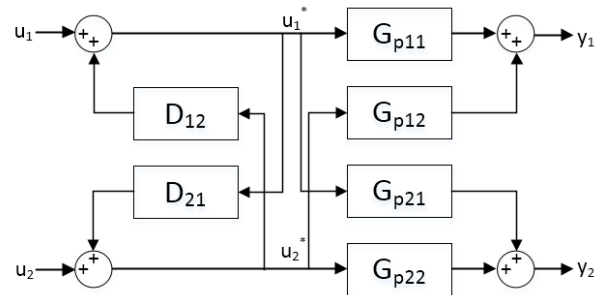
Gambar 3. Struktur 1-1/2-2 sistem MIMO terdesentralisasi

2.3.2. Decoupling MIMO

Pada sistem MIMO perubahan salah satu variabel yang dimanipulasi akan mempengaruhi semua variabel yang dikontrol. Salah satu pendekatan yang populer untuk mengatasi interaksi tersebut adalah merancang suatu skema pengendalian yang tidak berinteraksi satu sama lain yang biasa disebut teknik *decoupling*. Struktur *decoupling* untuk sistem MIMO 2x2 ditunjukkan pada Gambar 4[12]. *Decoupler* untuk sistem MIMO 2x2 kolom distilasi biner pemisahan *methanol-air* Wood & Berry ditunjukkan oleh persamaan (3)[12][13].

$$D_{12} = -\frac{G_{p12}}{G_{p11}} = \frac{(18.9/12.8)(16.7s+1)e^{-2s}}{21s+1}$$

$$D_{21} = -\frac{G_{p21}}{G_{p22}} = \frac{(6.6/19.4)(14.4s+1)e^{-4s}}{10.9s+1} \quad (3)$$



Gambar 4. Struktur *decoupling* sistem MIMO 2x2.

2.4. IMC-PID

Kontrol PID merupakan metode kontrol konvensional yang paling banyak diterapkan di dunia industri. Kontrol PID konvensional tidak dapat mengatasi perubahan gangguan dan dinamika proses, maka diadopsi IMC untuk merancang *tuning* kontroler PID yang dikenal dengan metode IMC-PID. Kontroler IMC dapat dibentuk ke dalam bentuk kontroler umpan balik ideal. Kontroler IMC dalam bentuk umpan balik ideal ditunjukkan pada persamaan (4)[4][14][15].

$$G_{C_{IMCfeedback}}(s) = \frac{(1+\tau s)(1+\frac{\theta}{2}s)/k(\lambda^2 s^2 + \lambda s + 1)}{1 - [(1-\frac{\theta}{2}s)/(\lambda^2 s^2 + \lambda s + 1)]} \quad (4)$$

Dengan membandingkan persamaan kontroler umpan balik yang ekuivalen dengan IMC ($G_{C_{IMCfeedback}}(s)$) pada persamaan (4) dengan persamaan kontroler PID pada persamaan (5) didapatkan parameter-parameter kontroler IMC-PID seperti persamaan (6) sampai persamaan (9)[4].

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \quad (5)$$

$$T_i = \frac{\theta}{2} + \tau - T_f \quad (6)$$

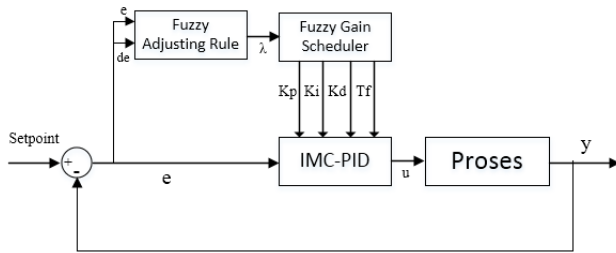
$$T_d = \frac{\theta\tau}{2T_i} - T_f \quad (7)$$

$$K_p = \frac{T_i}{K(2\lambda + \frac{\theta}{2})} \quad (8)$$

$$T_f = \frac{\lambda^2}{(2\lambda + \frac{\theta}{2})} \quad (9)$$

2.5. Fuzzy Gain Scheduling IMC-PID

IMC-PID merupakan desain kontroler PID yang *robust*, namun kurang cukup fleksibel untuk memastikan kecepatan respon dan kekokohan terhadap ketidakpastian varian waktu. *Fuzzy gain scheduling* dapat menjadi solusi permasalahan kontrol yang kompleks. Untuk membuat kontrol IMC-PID beraksi lebih cepat dan lebih kokoh, skema *fuzzy gain scheduling* digunakan untuk *tuning* parameter kontrol IMC-PID secara *online*. Parameter λ ditentukan dengan menggunakan *fuzzy adjusting* berdasarkan pada nilai *error* dan *delta error* dari dinamika proses kemudian parameter kontroler IMC-PID ditentukan dengan *gain scheduling*. Skema kontroler *fuzzy gain scheduling* IMC-PID ditunjukkan pada Gambar 5[4].



Gambar 5. Sistem kontrol *fuzzy gain scheduling* IMC-PID.

Pada *fuzzy adjusting* terdapat dua buah masukan *fuzzy* yaitu *error* (e) dan *delta error* (de). Keluarannya adalah λ , yang diperoleh dari basis aturan *fuzzy* oleh kontroler *fuzzy adjusting*. Nilai λ untuk parameter IMC-PID ditentukan berdasarkan pada set aturan *fuzzy* seperti persamaan (10)[4].

$$IF e \text{ is } A_i \text{ and } de \text{ is } B_i \text{ THEN } \lambda = \lambda_i \quad (10)$$

Kontroler *fuzzy adjusting* akan membangkitkan sebuah nilai $\lambda(k)$ untuk nilai dari $e(k)$ dan $de(k)$ yang diberikan pada waktu tersebut. Terdapat hubungan nonlinear antara parameter kontroler IMC-PID dan λ , pendekatan yang umum digunakan untuk membuat sistem nonlinear menjadi linear adalah dengan membagi nonlinearitas ke dalam bagian linear lokal. *Gain scheduler* digunakan untuk mengatasi hubungan nonlinear antara parameter kontroler IMC-PID dan λ . Inti dari *gain scheduler* yang digunakan adalah sebuah sistem *fuzzy* dengan aturan inferensi seperti persamaan (11)[4].

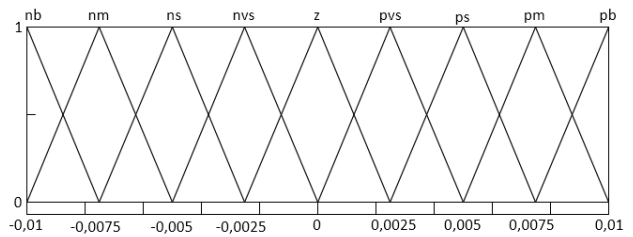
$$IF \lambda = \lambda_n,$$

$$THEN u_n = (K_{pn} + \frac{K_{in}}{s} + \frac{K_{dn}s}{T_{fn}s+1})e \quad (11)$$

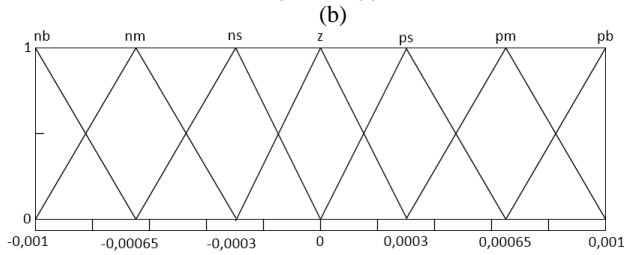
2.5.1. Fuzzy self adjusting

Fuzzy self adjusting digunakan untuk menentukan nilai parameter λ . Pada penelitian ini ada dua buah logika *fuzzy* yang dirancang yaitu logika *fuzzy* untuk kontroler 1 dan logika *fuzzy* untuk kontroler 2. Masing-masing logika *fuzzy* yang digunakan memiliki dua buah variabel masukan dan satu variabel keluaran. Variabel masukan logika *fuzzy* tersebut adalah *error* dan *delta error* dan variabel keluaran logika *fuzzy* adalah λ .

Fungsi keanggotaan variabel masukan untuk *fuzzy self adjusting* kontroler 1 yaitu *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 6. Variabel keluaran λ untuk kontroler 1 mempunyai *range* fungsi keanggotaan dari $0,1\theta$ sampai dengan $1,2\theta$ dengan nilai θ mengacu pada parameter fungsi alih proses G_{p11} pada persamaan (2). Parameter θ pada G_{p11} mempunyai nilai sebesar 1, maka variabel keluaran λ untuk kontroler IMC-PID 1 mempunyai *range* fungsi keanggotaan dari 0,1 sampai dengan 1,2. Fungsi keanggotaan variabel keluaran logika *fuzzy* untuk kontroler 1 ditunjukkan pada Gambar 7.

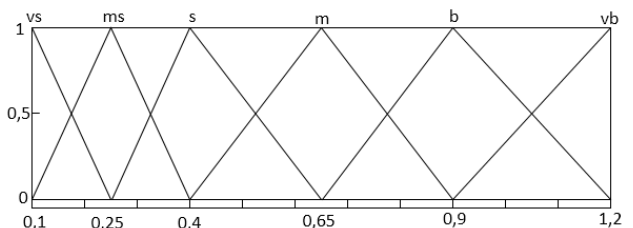


(a) Fungsi keanggotaan *error*.



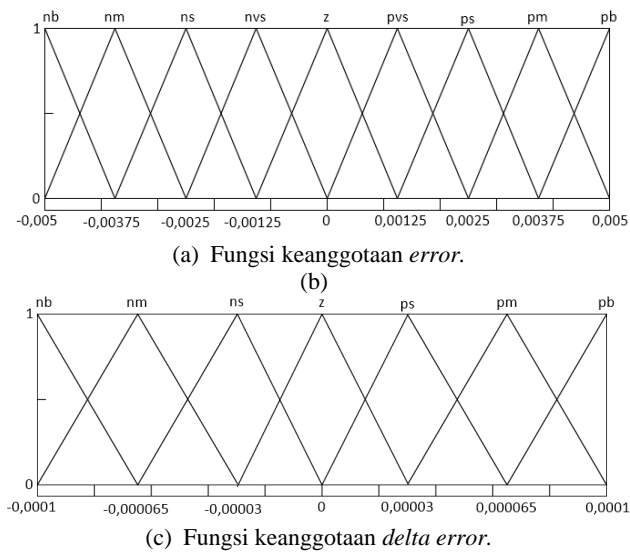
(b) Fungsi keanggotaan *delta error*.

Gambar 6. Fungsi keanggotaan masukan logika *fuzzy* untuk kontroler 1

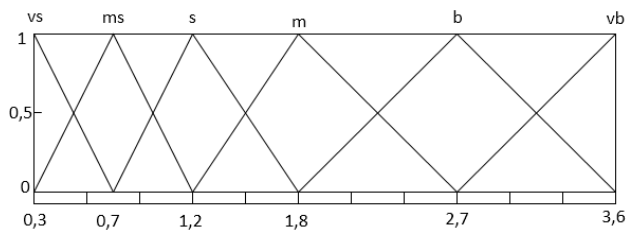


Gambar 7. Fungsi keanggotaan λ untuk kontroler 1

Fungsi keanggotaan variabel masukan untuk *fuzzy self adjusting* kontroler 2 yaitu *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 8. Variabel keluaran λ untuk kontroler 2 mempunyai *range* fungsi keanggotaan dari $0,1\theta$ sampai dengan $1,2\theta$ dengan nilai θ mengacu pada parameter fungsi alih proses G_{p22} pada persamaan (2). Parameter θ pada G_{p22} mempunyai nilai sebesar 3, maka variabel keluaran λ untuk kontroler IMC-PID 1 mempunyai *range* fungsi keanggotaan dari 0,3 sampai dengan 3,6. Fungsi keanggotaan variabel keluaran logika *fuzzy* untuk kontroler 2 ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Fungsi keanggotaan masukan logika *fuzzy* untuk kontroler 2



Gambar 9. Fungsi keanggotaan λ untuk kontroler 2.

Setelah merancang fungsi keanggotaan dari masukan dan keluaran logika *fuzzy* dilakukan perancangan basis aturan. Basis aturan merupakan kumpulan aturan pada logika *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan variabel keluaran λ berdasarkan variabel masukan *error* dan *delta error* agar mencapai tujuan yang diharapkan. Perancangan basis aturan didasarkan pada pengaruh *gain* parameter kontroler IMC-PID terhadap respon pengendalian. Masing-masing logika *fuzzy* yang dirancang menggunakan basis aturan yang sama. Basis aturan yang dirancang pada penelitian ini terdiri atas 63 aturan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Basis Aturan Logika *Fuzzy*

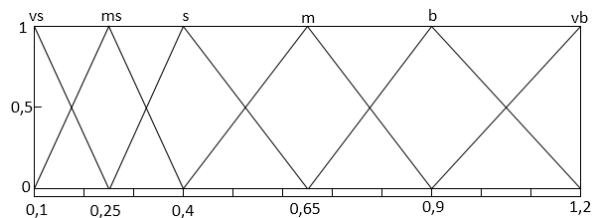
	delta error							
	nb	nm	ns	z	ps	pm	pb	
error	nb	-	s	ms	vs	ms	m	vb
	nm	-	s	s	s	s	m	b
	ns	-	s	s	m	m	m	b
	nvs	m	m	m	b	b	b	b
	z	b	b	vb	vb	vb	b	b
	pvs	b	b	b	b	m	m	m
	ps	b	m	m	m	s	s	-
	pm	b	m	s	s	s	s	-
	pb	vb	m	ms	vs	ms	s	-

2.5.2. *Fuzzy Gain Scheduler* untuk parameter IMC-PID

Parameter IMC-PID dan λ memiliki hubungan yang tidak linear, untuk mengatasi hal tersebut maka digunakan *gain scheduling*. *Fuzzy gain scheduler* dirancang dengan aturan inferensi seperti pada persamaan (11). Variabel masukan *fuzzy gain scheduler* adalah nilai parameter λ dan variabel keluaran adalah nilai K_p , K_i , K_d , dan N . Nilai λ untuk kontroler 1 dibagi menjadi 6 daerah *scheduling*, yaitu 0,1, 0,25, 0,4, 0,65, 0,9, dan 1,2. Variabel masukan λ untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 1 ditunjukkan pada Gambar 10. Variabel keluaran K_p , K_i , K_d , dan N untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 1 berupa konstanta yang ditentukan berdasarkan persamaan parameter IMC-PID pada persamaan (6) sampai (9) sehingga didapat nilai *tuning* parameter IMC-PID dengan daerah *scheduling* yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Tuning IMC-PID kontroler 1 berdasarkan daerah *scheduling*.

λ	K_p	K_i	K_d	N
0,1	1,91805	0,11161	0,90452	70
0,25	1,33887	0,07813	0,056866	16
0,4	1,02626	0,0601	0,3759	8,125
0,65	0,073634	0,0434	0,18958	4,26036
0,9	0,57228	0,03397	0,08209	2,8391
1,2	0,45	0,02694	0,001505	2,014



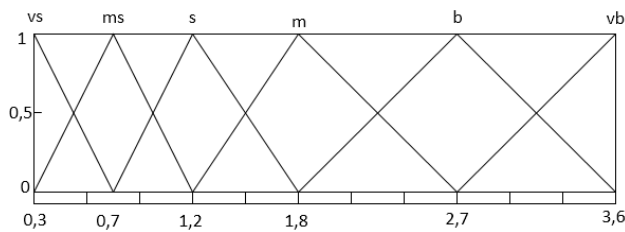
Gambar 10. Fungsi keanggotaan masukan λ untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 1.

Nilai λ untuk kontroler 2 dibagi menjadi 5 bagian, yaitu 1,2, 1,8, 2,4, 3, dan 3,6. Variabel masukan λ untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 1 ditunjukkan pada Gambar 11. Variabel keluaran K_p , K_i , K_d , dan N untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 2 berupa konstanta yang ditentukan berdasarkan persamaan parameter IMC-PID pada persamaan (6) sampai (9) sehingga didapat nilai *tuning*

parameter IMC-PID dengan daerah *scheduling* yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Tuning IMC-PID kontroler 2 berdasarkan daerah *scheduling*.

λ	K_p	K_i	K_d	N
0,3	-0,38923	-0,02455	-0,51351	23,3333
0,7	-0,27961	-0,0178	-0,3367	5,9184
1,2	-0,20527	-0,0132	-0,2097	2,7083
1,95	-0,14505	-0,0096	-0,1040	1,4201
2,7	-0,11089	-0,00747	-0,0442	0,9465
3,6	-0,08538	-0,00592	-0,00079	0,6713



Gambar 11. Fungsi keanggotaan masukan λ untuk *fuzzy gain scheduler* kontroler 2.

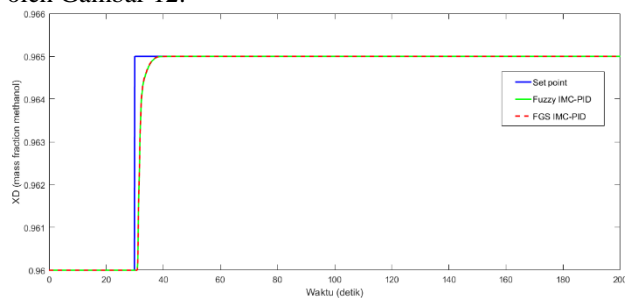
3. Hasil dan Analisa

Pengujian dilakukan dengan kontroler tanpa gangguan dan kontroler dengan gangguan. Pada pengujian kontroler tanpa gangguan, pengujian dilakukan dengan mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D) dan *set point* produk bawah (X_B). Pada pengujian kontroler dengan gangguan mempengaruhi proses, pengujian dilakukan dengan memberikan *input step* pada variabel *input* gangguan (F).

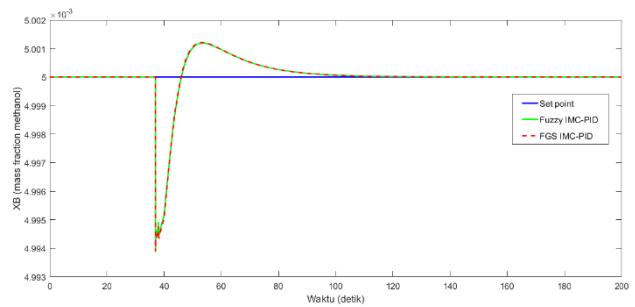
3.1. Pengujian Kontroler Tanpa Gangguan

Pengujian pada bagian ini dilakukan dengan menaikkan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar $X_D + 0,005$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B) dan menaikkan *set point* komposisi produk bawah (X_B) sebesar $X_B + 0,004$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D).

Pada pengujian kenaikan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar $X_D + 0,005$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B), respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 12.



(a) Respon produk atas (X_D)

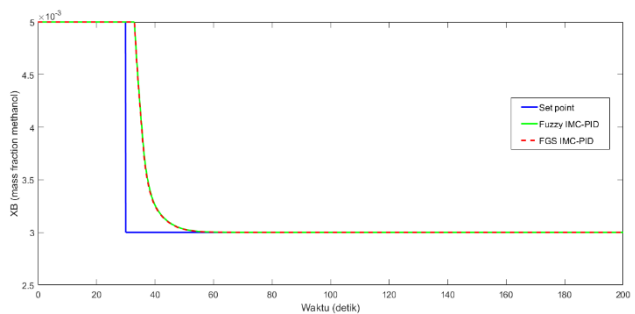


(b) Respon produk atas X_B

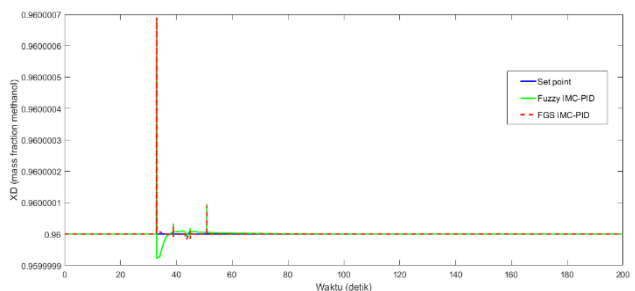
Gambar 12. Respon X_D dan X_B terhadap kenaikan *set point* $X_D + 0,005$.

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 12, dapat dilihat bahwa pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID mampu mengikuti perubahan *set point* pada komposisi produk atas (X_D) dan mampu mempertahankan *set point* komposisi produk bawah (X_B). Pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan pengendali *fuzzy* IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE untuk pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID sebesar $0,01006$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan $5,753 \times 10^{-5}$ pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk pengendali *fuzzy* IMC-PID sebesar $0,01013$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan $5,684 \times 10^{-5}$.

Pada pengujian penurunan *set point* komposisi produk bawah (X_B) sebesar $X_B - 0,002$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D), respon komposisi produk bawah (X_B) dan respon komposisi produk atas (X_D) ditunjukkan oleh Gambar 13.



(a) Respon produk bawah (X_B)



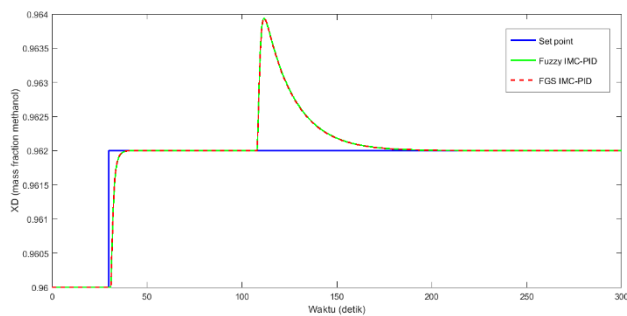
(b) Respon produk atas X_D

Gambar 13. Respon X_D dan X_B terhadap penurunan *set point* $X_B - 0,002$.

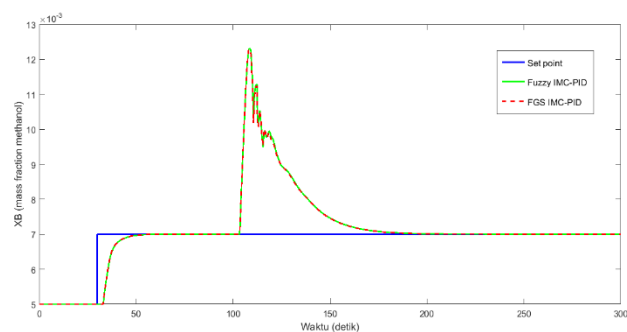
Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 13, dapat dilihat bahwa *fuzzy gain scheduling* IMC-PID mampu mengikuti perubahan *set point* pada komposisi produk bawah (X_B) dan mampu mempertahankan *set point* komposisi produk atas (X_D). Pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan pengendali *fuzzy* IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE untuk pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID sebesar $3,48 \times 10^{-7}$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,01302 pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk pengendali *fuzzy* IMC-PID sebesar $5,71 \times 10^{-8}$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,01318 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

3.2. Pengujian Kontroler dengan Gangguan

Pengujian pada bagian ini dilakukan dengan memberikan *input* unit *step* pada variabel *input* gangguan perubahan laju *feed* (F). Pengujian dengan menggunakan unit *step* dilakukan dengan mengubah nilai variabel *input* gangguan sebesar $F+0,004$ serta menaikkan *set point* komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) masing-masing sebesar $+0,002$. Pada pengujian ini, respon komposisi produk atas (X_D) dan respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 14.



(a) Respon produk atas (X_D)



(b) Respon produk atas X_B

Gambar 14. Respon X_D dan X_B terhadap penambahan gangguan $F+0,004$.

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 14, dapat dilihat bahwa pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID mampu meredam gangguan laju aliran *feed* (F) dan

mengembalikan respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) pada *set point* yang diberikan. Pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan pengendali *fuzzy* IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID sebesar 0,04186 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1147 pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk pengendali *fuzzy* IMC-PID sebesar 0,04223 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1158 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh uji coba yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengendali *fuzzy gain scheduling* IMC-PID yang digunakan pada sistem multivariabel kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry mampu mengendalikan sistem untuk mencapai nilai *set point* komposisi produk yang diberikan dan mampu meredam gangguan yang masuk pada proses. Berdasarkan seluruh pengujian yang dilakukan, metode *fuzzy gain scheduling* IMC-PID mempunyai hasil nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan metode *fuzzy* IMC-PID.

Referensi

- [1]. R. K. Mishra, "Design Of An Internal Model Controller For Binary Distillation Column Design Of An Internal Model Controller," National Institute of Technology Rourkela, 2013.
- [2]. G. P. Athira and R. M. Francis, "Control of Totally Refluxed Reactive Distillation Column Using Model Predictive Controller," vol. 3, no. 8, pp. 31–35, 2015.
- [3]. P. B. Deshpande and C. A. Plank, *Distillation Dynamics and Control*. Instrument Society of America, 1985.
- [4]. X. Li and S. Chen, "Application of The Fuzzy Gain Scheduling IMC- PID for The Boiler Pressure Control," vol. 1, no. 1, 2014.
- [5]. R. K. Wood and M. W. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 28, pp. 1707–1717, 1973.
- [6]. I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo, 2008.
- [7]. Coleman Brosilow and Babu Joseph, *Techniques of Model-Based Control*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [8]. R. Sivakumar and S. Mathew, "Design and Development of Model Predictive Controller for Binary Distillation Column," *Int. J. Sci. Res. ISSN 2319-7064*, vol. 2, no. 12, pp. 445–451, 2013.
- [9]. Bayu Bagas Wara, "Perancangan Kontroler Internal Model Control Pada Kolom Distilasi," Universitas Diponegoro, 2016.
- [10]. J. Pathel, "Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Process Control," in *Handout*, Institut of Technology Nirma University, Ahmedabad.
- [11]. M. Barathi and C. Selvakumar, "Dynamic Modelling, Simulation and Control of MIMO system," *IJCTT*, vol. 3, no. 3, pp. 36–88, 2012.

- [12]. A. Fabiany, "Perancangan Kontroler PID-GA untuk Sistem Pengaturan Level dan Pressure pada Simulator Plant Boiler-Turbine dengan Metode Dekopling Sistem MIMO," Institut Teknologi Sepuluh Noverber, 2016.
- [13]. Zhuo Li and Yang Quan Chen, "Ideal, Simplified and Inverted Decoupling of Fractional Order TITO Process", The International Federation of Automatic Control, 2014.
- [14]. M. Morari, S. Skogestad, and Daniel E. Rivera, "Internal Model Control. 4. P I D Controller Design," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 25, pp. 252–265, 1986.
- [15]. B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design and Simulation*. Prentice Hall, 2002.