

TUNING KENDALI IMC-PID PADA KOLOM DISTILASI DENGAN MENGGUNAKAN FUZZY

Wahyudi¹, Ricko Dwi Pambudi², Budi Setiyono³, Sumardi⁴

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
Email: wahyuditinom@elektro.undip.ac.id

Abstrak

Kolom distilasi adalah unit yang paling banyak digunakan dalam industri kimia dan industri perminyakan. Kolom distilasi biner memisahkan campuran cairan menjadi dua buah komposisi produk dengan kemurnian tertentu, yaitu produk atas (X_d) dan produk bawah (X_b). Kolom distilasi mempunyai sifat yang nonlinear, adanya interaksi multivariabel, adanya waktu tunda, dan gangguan. Berdasarkan sifat tersebut dibutuhkan kendali modern yang mampu membuat keluaran produk sesuai yang diinginkan. IMC-PID merupakan desain kendali PID yang robust, namun kurang cukup fleksibel untuk kecepatan respon. Untuk membuat kendali IMC-PID beraksi lebih cepat dan lebih kokoh, fuzzy digunakan untuk tuning kendali IMC-PID secara online. Metode fuzzy 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 pengujian yang telah dilakukan, tuning kendali IMC-PID dengan fuzzy mempunyai nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan IMC-PID.

Kata kunci: tuning; IMC-PID; kolom distilasi biner

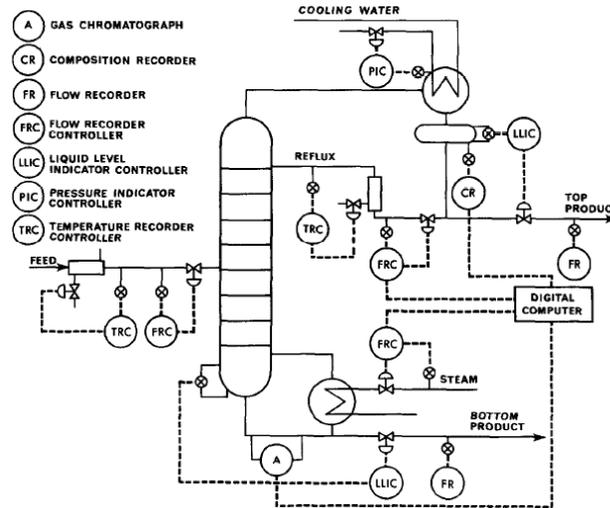
Pendahuluan

Kolom distilasi adalah unit yang paling banyak digunakan dalam dunia industri, terutama pada industri kimia dan industri perminyakan. Kolom distilasi biner memisahkan campuran cairan menjadi dua buah produk akhir dengan kemurnian tertentu, yaitu produk atas (X_d) dan produk bawah (X_b). Tujuan pengendalian kolom distilasi adalah memperoleh kemurnian produk akhir sesuai dengan yang dikehendaki. Kendala dalam pengendalian kolom distilasi adalah sifat kolom distilasi yang nonlinear, adanya interaksi multivariabel, adanya waktu tunda, dan gangguan berupa laju aliran campuran. Berdasarkan sifat tersebut dibutuhkan kendali modern yang mampu membuat keluaran produk sesuai yang diinginkan (Deshpande, 1985; Mushra, 2013; Athira, 2015).

IMC-PID adalah kendali PID yang mengadopsi IMC sebagai *tuning* parameter (Muhammad, 2010). Kendali IMC-PID merupakan desain kendali PID yang robust, namun kurang cukup fleksibel untuk kecepatan respon. Untuk membuat kendali IMC-PID menghasilkan respon yang lebih cepat dan lebih kokoh, maka *fuzzy* digunakan untuk *tuning* kendali IMC-PID secara *online*. Pada penelitian ini dilakukan perancangan *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* pada *plant* kolom distilasi biner Wood & Berry.

Metode Penelitian

Model kolom distilasi biner dalam bentuk *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) 2x2 pertama kali disajikan oleh Wood dan Berry. Penelitian tersebut dilakukan pada kolom tunggal dengan diameter 9 inci, terbagi atas 8 tray, dilengkapi dengan *condenser* tipe total, dan *reboiler* jenis bola basket untuk memisahkan methanol - air. Skematik kolom distilasi biner Wood dan Berry ditunjukkan oleh Gambar 1 (Wahyudi, 2019). Produk atas (XD) dikendalikan oleh *reflux*(R) dan produk bawah (XB) dikendalikan oleh laju *steam*(S) yang digunakan oleh *reboiler*. Data *steady state* sistem ditunjukkan oleh Tabel 1.



Gambar 1. Skematik kolom distilasi biner Wood dan Berry

Tabel 1. Data *steady state* kolom distilasi *methanol* – air

Aliran	Laju (lb/min)	Komposisi (mass fraction methanol)
Produk atas /distilat	1,18	0,96
Reflux	1,95	0,96
Produk bawah	1,27	0,005
Feed	2,45	0,465
Uap Air	1,71	-

Fungsi alih linier kolom distilasi biner pemisahan *methanol* – air model Wood dan Berry didapat melalui serangkaian *bump testing model self regulating process* secara online dengan komputer IBM yang menghasilkan parameter proses kemudian didekati dengan bentuk *First Order Plus Dead Time* (FOPDT). Bentuk fungsi alih proses FOPDT MIMO 2x2 dapat dituliskan seperti persamaan (1).

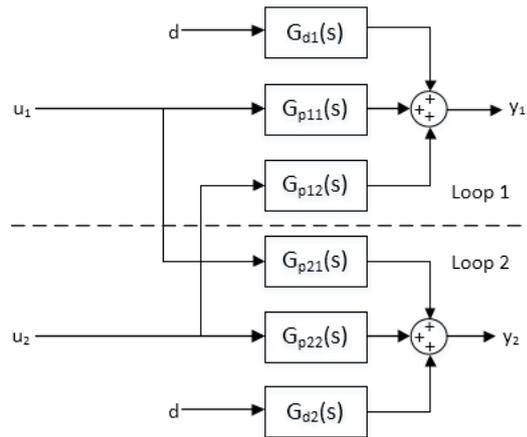
$$\begin{bmatrix} X_D(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,8e^{-1s} & -18,9e^{-3s} \\ 16,7s+1 & 21s+1 \\ 6,6e^{-7s} & -19,4e^{-3s} \\ 10,9s+1 & 14,4s+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(s) \\ S(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fungsi alih gangguan dapat dituliskan pada persamaan (2).

$$\begin{bmatrix} X_D(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,8e^{-8,1s} \\ 14,9s+1 \\ 4,9e^{-3,4s} \\ 13,2s+1 \end{bmatrix} F(s) \quad (2)$$

Blok diagram interaksi antara *input* dan *output* sistem MIMO 2x2 kolom distilasi biner ditunjukkan pada Gambar 2 (Barathani, 2012). 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 pengontrolan yang tidak berinteraksi satu sama lain yang biasa disebut teknik *decoupling*. Struktur *decoupling* untuk sistem MIMO 2x2 ditunjukkan pada Gambar 3. *Decoupler* untuk sistem MIMO 2x2 kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry ditunjukkan oleh persamaan (3) (Li Z, 2014).

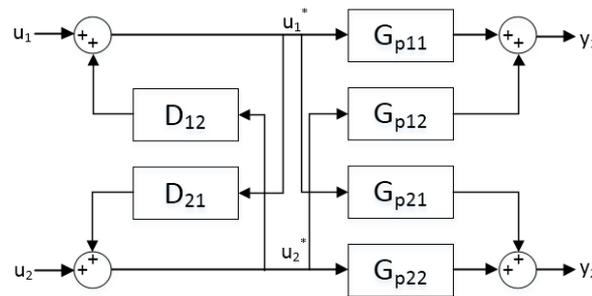
Kendali PID merupakan metode kendali konvensional yang paling banyak diterapkan di dunia industri. Persamaan kendali PID ditunjukkan oleh persamaan (4). Kendali PID konvensional tidak dapat mengatasi perubahan gangguan dan dinamika proses, maka diadopsi IMC sebagai *tuning* kendali PID yang dikenal dengan metode IMC-PID. Kendali IMC dapat dibentuk ke dalam bentuk kontroler umpan balik ideal dengan memodifikasi strukturnya. Kendali IMC dalam bentuk umpan balik ideal ditunjukkan pada persamaan (5) (Li X, 2014).



Gambar 2. Diagram blok sistem MIMO 2x2.

$$D_{12} = -\frac{G_{p12}}{G_{p11}} = \frac{(18.9/12.8)(16,7s + 1)e^{-2s}}{21s + 1}$$

$$D_{21} = -\frac{G_{p21}}{G_{p22}} = \frac{(6.6/19.4)(14,4s+1)e^{-4s}}{10,9s+1} \tag{3}$$



Gambar 3. Struktur *decoupling* sistem MIMO 2x2

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \tag{4}$$

$$G_{C_{IMCfeedback}}(s) = \frac{(1+\tau s)(1+\frac{\theta}{2}s)/k(\lambda^2 s^2 + \lambda s + 1)}{1 - [(1-\frac{\theta}{2}s)/(\lambda^2 s^2 + \lambda s + 1)]} \tag{5}$$

Dengan membandingkan persamaan kontroler umpan balik yang ekivalen 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) (Li X, 2014; Morari, 1986; Paul, 2016).

$$T_i = \frac{\theta}{2} + \tau - T_f \tag{6}$$

$$T_d = \frac{\theta \tau}{2T_i} - T_f \tag{7}$$

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

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

Dengan K_p merupakan konstanta proporsional, T_i merupakan waktu integral, T_d merupakan waktu derivatif, dan T_f merupakan filter derivatif. Pada persamaan K_p, T_i, T_d, T_f terdapat satu parameter yang belum diketahui, yaitu λ atau *close loop time constant*. Parameter λ dipilih dengan nilai sebesar 1, maka didapat parameter kontroler untuk kontroler pertama dengan nilai $K, \theta,$ dan τ mengacu pada G_{p11} pada persamaan (1), yaitu K_p sebesar 0,525, T_i sebesar 16,8, T_d sebesar 0,09702381, T_f sebesar 0,4, sedangkan untuk kontroler kedua nilai $K, \theta,$ dan τ mengacu pada G_{p22} pada persamaan (1) didapat nilai K_p sebesar -0,101, T_i sebesar 14,7, T_d sebesar 0,26939, T_f sebesar 1,2.

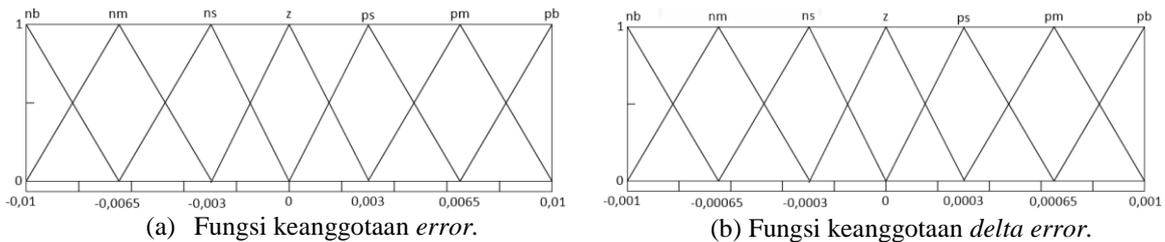
Pemilihan nilai λ yang tepat akan memberikan dampak yang baik pada respon transien proses. Pada saat keluaran proses jauh dari nilai yang diinginkan, pemilihan nilai λ yang kecil dapat mempercepat waktu naik. Di sisi lain performa *steady state* yang baik dapat dicapai dengan memberikan nilai λ yang besar. Jadi dengan menggunakan variasi yang tepat pada pemilihan nilai λ dapat memberikan performa kendali IMC-PID yang lebih baik (Paul, 2013).

Fuzzy digunakan untuk menentukan nilai λ berdasarkan nilai *error* dan *delta error* dari dinamika respon proses. Nilai λ untuk parameter kendali IMC-PID ditentukan berdasarkan pada basis aturan *fuzzy* seperti pada persamaan (10).

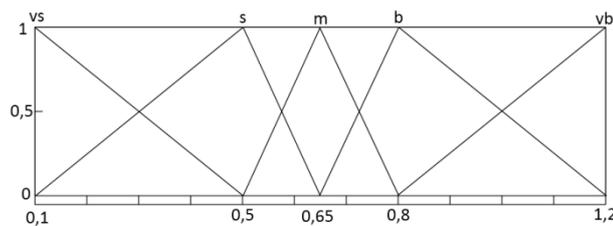
$$IF e \text{ is } A_i \text{ and } de \text{ is } B_i \text{ THEN } \lambda = \lambda_i \tag{10}$$

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* tersebut adalah λ .

Fungsi keanggotaan variabel masukan untuk *fuzzy* kontroler 1 yaitu *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 4. 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 (1). Fungsi keanggotaan variabel keluaran logika *fuzzy* untuk kontroler 1 ditunjukkan pada Gambar 5.

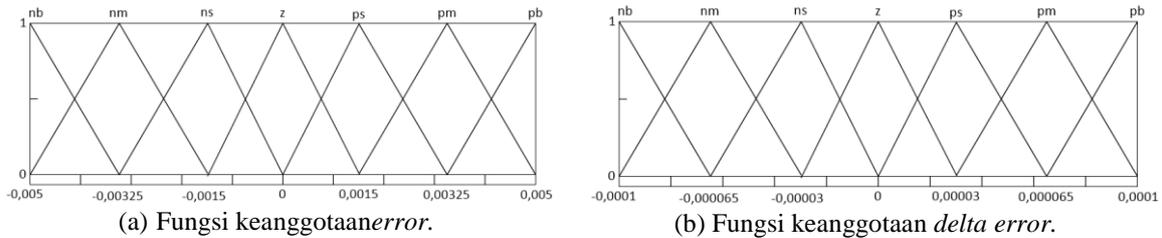


Gambar 4. Fungsi keanggotaan masukan logika *fuzzy* untuk kontroler 1

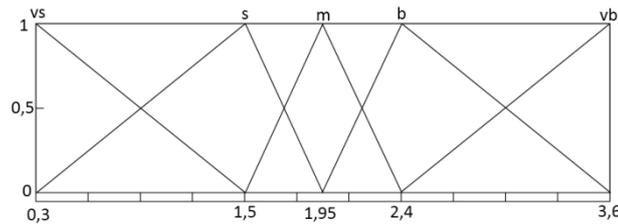


Gambar 5. Fungsi keanggotaan λ untuk kontroler 1

Fungsi keanggotaan variabel masukan untuk *fuzzy* kontroler 2 yaitu *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 6. 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 7. Basis aturan logika *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan variabel keluaran λ berdasarkan variabel masukan *error* dan *delta error* agar mencapai tujuan yang diharapkan. Basis aturan yang dirancang terdiri atas 45 aturan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.



(a) Fungsi keanggotaan *error*. (b) Fungsi keanggotaan *delta error*.
 Gambar 6. Fungsi keanggotaan masukan logika *fuzzy* untuk kontroler 2



Gambar 7. Fungsi keanggotaan λ untuk kontroler 2

Tabel 2. Basis aturan logika *fuzzy*

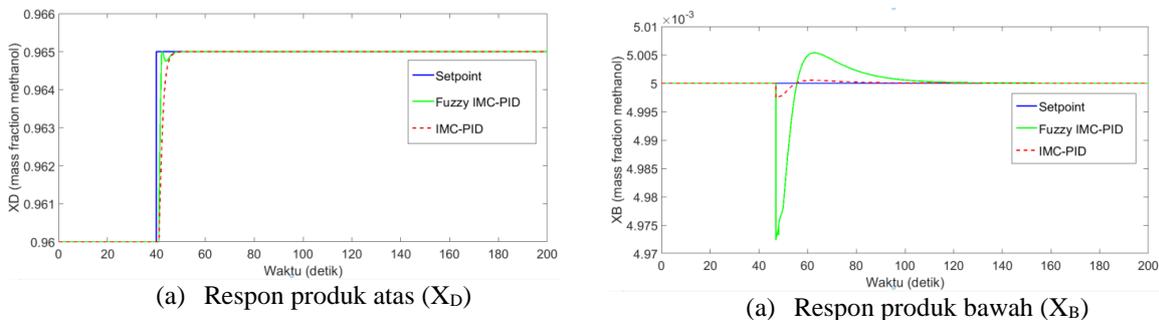
Masukan fuzzy		<i>delta error</i>						
		nb	nm	ns	z	ps	pm	pb
<i>error</i>	nb	-	vb	vb	vs	s	m	vb
	nm	-	b	b	s	m	m	b
	ns	b	b	b	m	m	m	b
	z	b	m	m	vb	m	m	b
	ps	b	m	m	m	b	b	b
	pm	b	m	m	s	b	b	-
	pb	vb	m	m	vs	vb	vb	-

Hasil dan Analisis

Pengujian kinerja hasil perancangan *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* dilakukan dengan uji perubahan *set point* dan uji terhadap gangguan. Pengujian kinerja kendali dilakukan dengan memberikan sinyal gangguan *step* pada variabel gangguan laju aliran umpan (F).

Pengujian perubahan *set point* dilakukan dengan mengubah nilai *set point* komposisi produk atas (X_D) tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B) dan sebaliknya. Pengujian perubahan *set point* komposisi produk atas (X_D) dilakukan dengan menaikkan nilai *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar +0,004 tanpa mengubah komposisi produk bawah (X_B). Pengujian perubahan *set point* komposisi produk bawah (X_B) dilakukan dengan menurunkan nilai *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar -0,002 tanpa mengubah komposisi produk atas (X_D).

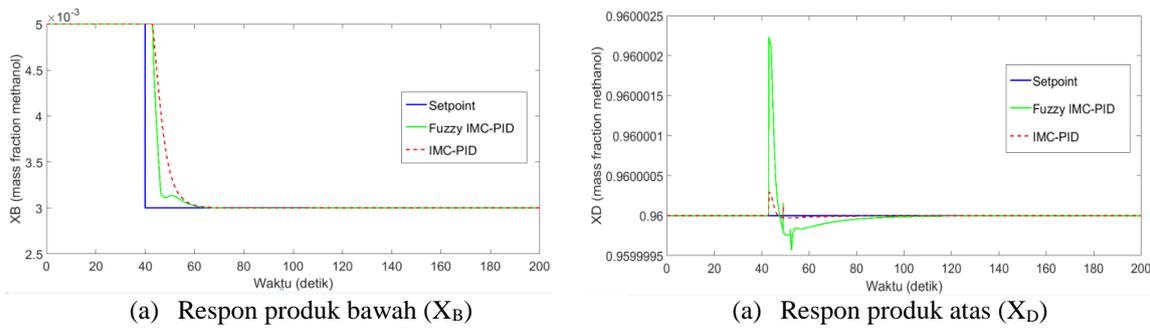
Pada pengujian kenaikan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar +0,004 tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B), respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan pada Gambar 8.



(a) Respon produk atas (X_D) (a) Respon produk bawah (X_B)
 Gambar 8. Respon X_D dan X_B terhadap kenaikan *set point* $X_D+0,004$

Gambar 8 menunjukkan bahwa *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mampu mengikuti perubahan *set point* komposisi produk atas (X_D) dan mengembalikan nilai komposisi produk bawah (X_B) ke *set point* yang diberikan. *Tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mempunyai nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan kendali IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE untuk *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* sebesar 0,007978 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,000253 pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk kendali IMC-PID sebesar 0,0125 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan $2,362 \times 10^{-3}$ pada respon komposisi produk bawah (X_B).

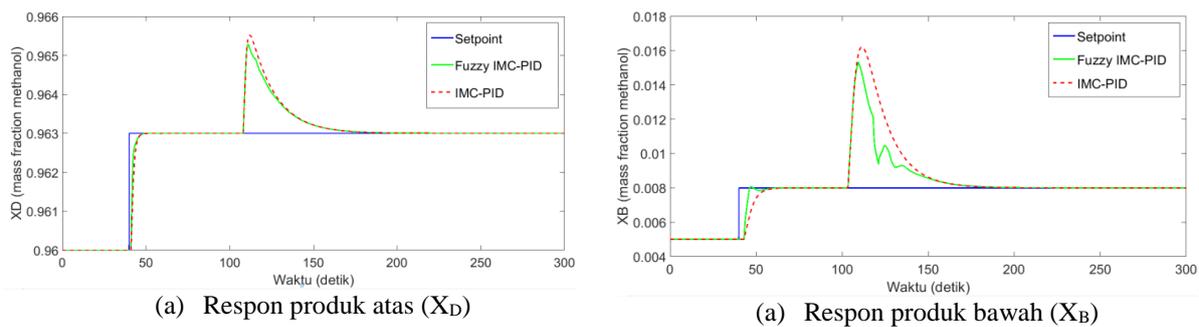
Pada pengujian penurunan *set point* komposisi produk bawah (X_B) sebesar +0,002 tanpa mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D), respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan pada Gambar 9.



(a) Respon produk bawah (X_B) (a) Respon produk atas (X_D)
 Gambar 9. Respon X_D dan X_B terhadap penurunan *set point* X_B -0,002

Gambar 9 menunjukkan bahwa *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mampu mengikuti perubahan *set point* komposisi produk bawah (X_B) dan mengembalikan nilai komposisi produk atas (X_D) ke *set point* yang diberikan. *Tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mempunyai nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan kendali IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE untuk *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* sebesar $9,565 \times 10^{-6}$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,01043 pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk kendali IMC-PID sebesar $1,175 \times 10^{-6}$ pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,015 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

Pengujian dengan gangguan dilakukan dengan memberikan masukan *unitstep* pada variabel *input* gangguan perubahan laju aliran *feed* (F). Pengujian penambahan gangguan dilakukan dengan mengubah *input* gangguan sebesar $F+0,005$ serta menaikkan *set point* komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) masing-masing sebesar +0,003. Pada pengujian perubahan laju aliran umpan sebesar $F+0,004$, respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 10.



(a) Respon produk atas (X_D) (a) Respon produk bawah (X_B)
 Gambar 10. Respon X_D dan X_B terhadap penambahan gangguan $F+0,005$

Gambar 10 menunjukkan bahwa *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mampu meredam gangguan laju aliran *feed* (F) dan mengembalikan nilai komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) ke *set point* yang diberikan. *Tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mempunyai nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan kendali IMC-PID. Pada pengujian ini diperoleh nilai IAE untuk *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* sebesar 0,04972 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1422 pada respon komposisi produk bawah (X_B), sedangkan nilai IAE untuk kendali IMC-PID sebesar 0,055 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,2062 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

Kesimpulan

Berdasarkan seluruh pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* pada sistem multivariabel kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry mampu mengendalikan sistem

untuk mencapai nilai *set point* yang diberikan dan mampu meredam gangguan yang mempengaruhi proses. Berdasarkan seluruh pengujian yang dilakukan, *tuning* kendali IMC-PID dengan *fuzzy* mempunyai hasil nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan kendali IMC-PID, yaitu pada pengujian kenaikan *set point* $X_D+0,005$ memiliki IAE sebesar 0,007978 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,000253 pada respon komposisi produk bawah (X_B), pada pengujian penurunan *set point* X_B mempunyai nilai IAE sebesar 565×10^{-6} pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,01043 pada respon komposisi produk bawah (X_B), dan pada pengujian gangguan $F+0,005$ mempunyai nilai IAE sebesar 0,04972 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1422 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

Daftar Pustaka

- Athira G. P., & Francis, R. M., (2015),. “Control of Totally Refluxed Reactive Distillation Column Using Model Predictive Controller”, 3, no. 8, 31–35.
- Barathani, and C. Selvakumar. ,(2012),. “Dynamic Modelling, Simulation and Control of MIMO system”, *IJCTT*, 3(3), 36–88.
- Deshpande, P. B., & Plank, C. A., (1985),. “Distillation Dynamics and Control”, Instrument Society of America
- Li, X., & Chen, S.,(2014), “Application of The Fuzzy Gain Scheduling IMC- PID for The Boiler Pressure Control”, *I*(1).
- Li, Z., & Chen, Y. , (2014), “Simplified and Inverted Decoupling of Fractional Order TITO Processes”, *Ideal*, 2897–2902
- Mishra, R. K., (2013),. “Design of an Internal Model Controller for Binary Distillation Column Design of an Internal Model Controller”, National Institute of Technology Rourkela.
- Morari, M., Skogestad, S., & Daniel E. Rivera.,(1986), “Internal Model Control. 4. P I D Controller Design”, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 25, 252–265.
- Muhammad, Z. Ahmad dan N. Aziz, (2010) “Implementation of Internal Model Control (IMC) in Continuous Distillation Column”, Proc. of The 5th International Symposium on Design, Operation, and Control Of Chemical Processes ISBN: 978-981-08-6395-1, 2010.
- Paul, P. K. , (2013), “Design of Fuzzy Based IMC-PID Controller for IPD Process”, *I*, 1–4. <http://doi.org/10.1109/ISCBI.2013.30>
- Paul, P. K., (2016), “Design of Multi-loop IMC-PID Controller for TITO Process with Dead Time”, 45–49.
- Wahyudi, Reza B Sutapa, Ngatelan and Budi Setiyono, (2019), “Design of Adaptive Internal Control Model on Binary Distillation Column”, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1175, Issue 1.