

SIMULASI MODEL KENDALI KOLOM DISTILASI BINER WOOD & BERRY DENGAN *ADAPTIVE INTERNAL MODEL CONTROL 2 DEGREE OF FREEDOM* (AIMC 2 DOF) MENGGUNAKAN MATLAB

Reza Baskara Sutapa^{*)}, Budi Setiyono, and Wahyudi

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

^{*)}email: rezabaskarazpk@gmail.com

Abstrak

Distilasi merupakan salah satu unit operasi terpenting dalam teknik kimia. Kolom distilasi biner Wood & Berry memisahkan aliran *feed* (F, X_F) menjadi produk atas (D, X_D) dan produk bawah (B, X_B). Perancangan kendali pada kolom distilasi biner memiliki beberapa kendala yang disebabkan oleh non-linearitas pada proses, interaksi multivariabel, dan adanya gangguan. Berdasarkan hal tersebut, dibutuhkan suatu metode kendali modern yang mampu membuat respon sistem mengikuti perubahan set point dan meredam atau mengeliminasi gangguan, sehingga keluaran komposisi produk sesuai dengan yang diharapkan. Metode *Adaptive Internal Model Control 2 Degree of Freedom* (AIMC 2 DoF) merupakan salah satu jenis metode kendali modern yang mampu mengendalikan plant multivariabel dan meredam atau mengeliminasi gangguan yang ada. Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, pengendali AIMC 2 DoF menggunakan metode *tuning* parameter filter Skogestad dengan nilai $\tau_{c1} = 1$ dan $\tau_{c2} = 3$ serta nilai gain adaptasi $\gamma_1 = 30$ dan $\gamma_2 = 30$ pada sistem multivariabel kolom distilasi biner Wood & Berry memiliki nilai IAE terkecil dibandingkan keempat metode lainnya.

Kata kunci: kolom distilasi, multivariabel, gangguan, AIMC 2 DoF, tuning

Abstract

Distillation is one of the most important operating units in chemical engineering. Wood & Berry binary distillation columns separate feed streams (F, X_F) into top products (D, X_D) and bottom products (B, X_B). The control design in the binary distillation column has several constraints caused by non-linearity of the process, multivariable interactions, and presence of disturbances. Based on that constraints, it needs a modern control 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. Adaptive Internal Model Control 2 Degree of Freedom (AIMC 2 DoF) method is one of the modern control methods that is capable of controlling multivariable plants and reduces or eliminate existing disturbances. Based on all the tests performed, the AIMC 2 DoF controller using Skogestad filter parameter tuning method with $\tau_{c1} = 1$ and $\tau_{c2} = 3$ and the adaptation gain $\gamma_1 = 30$ dan $\gamma_2 = 30$ on Wood & Berry binary distillation columns multivariable system has the smallest IAE value compared to the other four methods.

Keywords: distillation column, multivariable, disturbance, AIMC 2 DoF, tuning

1. Pendahuluan

Distilasi merupakan salah satu unit operasi terpenting dalam teknik kimia. Kolom distilasi biner sederhana memisahkan suatu aliran pengisian campuran menjadi dua bagian, yaitu produk atas dan produk bawah. Perancangan kendali pada kolom distilasi biner memiliki beberapa kendala yang disebabkan oleh non-linearitas pada proses, interaksi multivariabel, dan adanya gangguan[1]. Berdasarkan hal tersebut, dibutuhkan suatu metode kendali modern yang mampu mengendalikan respon sistem untuk mengikuti perubahan *set point* dan meredam atau

mengeliminasi gangguan, sehingga keluaran komposisi produk sesuai dengan yang diharapkan. Metode *Adaptive*

Internal Model Control 2 Degree of Freedom (AIMC 2 DoF) merupakan salah satu jenis metode kendali modern yang mampu mengendalikan *plant* multivariabel dan meredam atau mengeliminasi gangguan yang ada. Metode AIMC 2 DoF pada Penelitian ini merupakan metode MRAC tradisional yang dimodifikasi berdasarkan struktur IMC 2 DoF. Pengendali AIMC 2 DoF dipilih karena dengan memadukan pengendali adaptif seperti MRAC dan pengendali yang bersifat *robust* seperti IMC 2 DoF mampu

meningkatkan respon transien sistem pada umumnya [2][3]. Metode *tuning* parameter filter kendali IMC yang dibandingkan adalah Chien & Fruehauf, Lee et al, RC.Panda, Rivera, dan Skoegestad[2][4]. Pengendali tersebut diterapkan pada sistem multivariabel kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry[5]. Analisis perbandingan kinerja sistem kendali AIMC 2 DoF dengan lima metode empiris *tuning* parameter filter pengendali IMC tersebut berdasarkan nilai IAE.

2. Metode

2.1. Model First-Order Plus Dead Time (FOPDT)

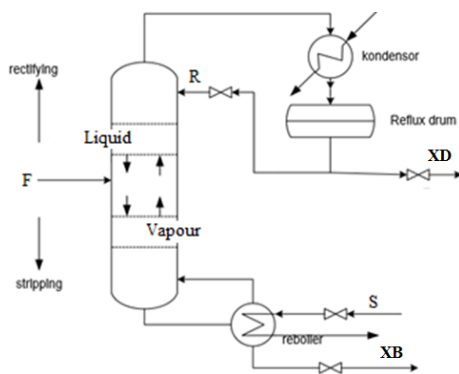
Suatu fungsi alih yang merupakan kombinasi dari sistem orde satu dengan waktu tunda disebut dengan model *First-Order Plus Dead Time* (FOPDT)[6]. Model matematis respon proses FOPDT dapat direpresentasikan ke dalam bentuk fungsi alih proses (G(s)) dengan transformasi *Laplace* yang ditunjukkan pada persamaan (1)[7][8].

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

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

2.2. Kolom Distilasi Biner

Kolom distilasi biner memisahkan suatu aliran pengisian campuran menjadi dua bagian, yaitu produk atas atau yang disebut distilat (X_D) dan produk bawah (X_B). Tujuan dari pemisahan tersebut adalah memperoleh kemurnian produk akhir hasil pemisahan. Bagian dalam kolom distilasi secara umum terdiri dari beberapa *tray* dengan ukuran identik, *condenser*, *reflux drum*, *reflux*, tempat keluaran produk atas (X_D), *reboiler*, dan tempat keluaran produk bawah (X_B)[1]. Diagram skematik kolom distilasi biner ditunjukkan oleh Gambar 1[9].



Gambar 1. Diagram skematik aliran proses kolom distilasi biner.

Operasi pada kolom distilasi dapat dijelaskan sebagai berikut. Aliran *feed* masuk melalui *feed tray* kemudian dipanaskan pada *reboiler* untuk menghasilkan uap. Cairan

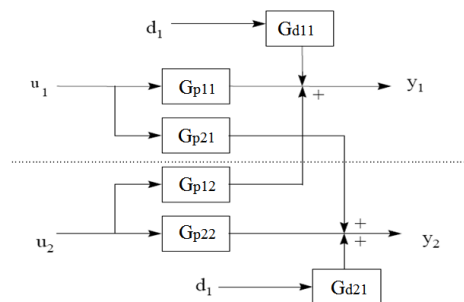
yang dikeluarkan dari *reboiler* dan tidak menguap disebut sebagai produk bawah (X_B). Uap bergerak naik menuju bagian atas kolom, kemudian dikondensasikan oleh *condenser*. Hasil kondensasi ditampung pada *reflux drum*[2]. Sebagian cairan ini dimasukkan kembali ke bagian atas kolom distilasi atau yang disebut dengan *reflux*[1]. Sebagian cairan yang lain dikeluarkan dan disebut sebagai produk atas atau distilat (X_D)[2]. 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][10].

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

2.3. Sistem Kendali MIMO

Sistem kendali dengan variabel *output* yang dikendalikan dan variabel *input* yang dimanipulasi berjumlah lebih dari satu disebut dengan sistem kendali *multiple input multiple output* (MIMO)[11]. Salah satu karakteristik dari sistem kendali MIMO adalah adanya interaksi antara variabel *output* yang dikendalikan dengan variabel *input* yang dimanipulasi. Sistem MIMO 2x2 merupakan suatu sistem multivariabel dengan dua variabel *output* yang dikendalikan (y) dan dua variabel *input* yang dimanipulasi (u)[2]. Interaksi antara variabel *output* yang dikendalikan, variabel *input* yang dimanipulasi, dan variabel *input* gangguan pada sistem MIMO 2x2 dapat ditunjukkan dengan menggunakan diagram blok pada Gambar 2[2].

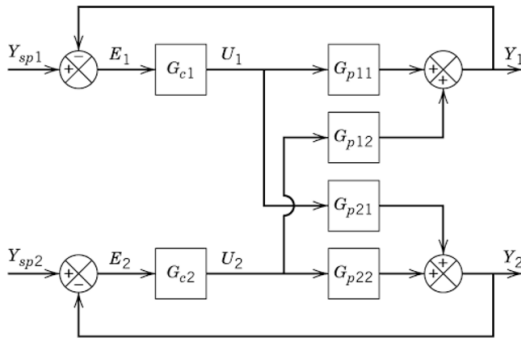


Gambar 2. Diagram blok interaksi sistem MIMO 2x2.

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[11]. Sistem kendali MIMO terdesentralisasi terdiri dari satu rangkaian

sistem kendali SISO independen[12]. Sistem kendali MIMO 2x2 terdesentralisasi memiliki dua struktur yang berbeda, yaitu struktur pengendali 1-1/2-2 dan struktur pengendali 1-2/2-1[13]. Struktur 1-1/2-2 sistem MIMO terdesentralisasi ditunjukkan oleh Gambar 3[13].



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

2.3.2. Relative Gain Array (RGA)

RGA berfungsi untuk menghitung interaksi masukan-keluaran pada sistem kendali MIMO dan menentukan struktur sistem kendali MIMO terdesentralisasi[14]. Analisis RGA pada proses sistem MIMO 2x2 digunakan menentukan struktur atau konfigurasi sistem MIMO terdesentralisasi yang akan digunakan[13]. Jika nilai *relative gain* yang diperoleh lebih besar atau sama dengan 0,5 ($\lambda \geq 0,5$), struktur MIMO 2x2 terdesentralisasi yang digunakan adalah konfigurasi 1-1/2-2. Jika nilai *relative gain* yang diperoleh lebih kecil dari 0,5 ($\lambda < 0,5$), struktur MIMO 2x2 terdesentralisasi yang digunakan adalah konfigurasi 1-2/2-1[13].

Penentuan nilai RGA pada sistem MIMO 2x2 terdesentralisasi dilakukan dengan mengambil nilai *gain* dari fungsi alih proses[15]. Nilai *gain process* pada sistem MIMO 2x2 kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry dapat disusun ke dalam bentuk matriks yang ditunjukkan oleh persamaan (3).

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,8 & -18,9 \\ 6,6 & -19,4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Relative gain (λ) fungsi alih proses G_{p11} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4).

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11}}{K_{11} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{22}}} = \frac{12,8}{6,37} = 2,009 \quad (4)$$

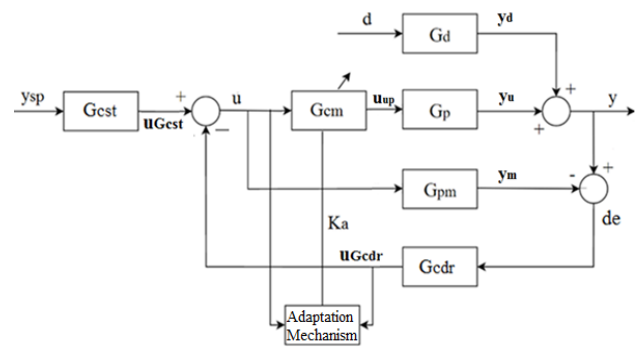
Matriks RGA pada sistem MIMO 2x2 kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry dapat ditunjukkan oleh persamaan (5).

$$RGA = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{21} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 1-\lambda \\ 1-\lambda & \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,009 & -1,009 \\ -1,009 & 2,009 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Relative gain (λ) yang diperoleh ($\lambda = 2,009$) memiliki nilai yang lebih besar dari 0,5 ($\lambda \geq 0,5$), sehingga struktur kendali yang dipilih pada kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry adalah struktur pengendali 1-1/2-2 sistem MIMO 2x2 terdesentralisasi.

2.4. Adaptive IMC 2 DoF (AIMC 2 DoF)

Pengendali AIMC 2 DoF merupakan pengembangan dari pengendali IMC 2 DoF dengan menambahkan estimasi parameter secara *online*. Pengendali AIMC 2 DoF pada Penelitian ini merupakan pengendali MRAC tradisional yang dimodifikasi berdasarkan struktur pengendali IMC 2 DoF. Struktur dari AIMC 2 DoF ini merupakan pengembangan dari struktur AIMC 1 DoF yang digunakan oleh Qing Wei Jia dan Shinobu Yoshida[16]. Struktur AIMC 2 DoF ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Struktur AIMC 2 DoF.

Berdasarkan Gambar 4, parameter pada struktur AIMC 2 DoF meliputi fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}), fungsi alih pengendali *disturbance rejections* (G_{cdr}), fungsi alih proses (G_p), fungsi alih model proses (G_{pm}), fungsi alih gangguan (G_d), pengendali MRAC (G_{cm}), *adaptation mechanism*, *set point* variabel *output* yang dikendalikan (y_{sp}), variabel *output* yang dikendalikan (y), variabel *output* keluaran model proses (y_m), variabel *output* yang hanya dipengaruhi oleh variabel *input* yang dimanipulasi (y_u), variabel *output* yang hanya dipengaruhi oleh variabel *input* gangguan (y_d), variabel sinyal keluaran pengendali (u), variabel estimasi pengaruh gangguan (de), variabel *gain* kompensasi (K_a), variabel *input* yang dimanipulasi / sinyal keluaran pengendali MRAC (u_{up}), variabel keluaran pengendali *set point tracking* (u_{Gcst}), dan variabel keluaran pengendali *disturbance rejections* (u_{Gcdr})[11][17][18].

2.4.1. AIMC 2 DoF pada Sistem Multivariabel Kolom Distilasi Biner Pemisahan *Methanol*-Air Wood & Berry

Pada Penelitian ini, *plant* yang digunakan adalah kolom distilasi biner pemisahan *methanol*-air Wood & Berry[5]. Metode pengendalian yang digunakan pada sistem ini

adalah metode AIMC 2 DoF. Fungsi alih dari kolom tersebut ditunjukkan oleh persamaan (2).

Fungsi alih proses (G_p) dalam bentuk FOPDT dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan (6)[5][10].

$$G_p = \begin{bmatrix} G_{p11} & G_{p12} \\ G_{p21} & G_{p22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Fungsi alih gangguan (G_d) dalam bentuk FOPDT dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan (7)[5][10].

$$G_d = \begin{bmatrix} G_{d11} \\ G_{d21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-8,1s}}{14,9s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fungsi alih model proses (G_{pm}) dalam bentuk FOPDT pada sistem AIMC 2 DoF dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan (8)[19].

$$G_{pm} = \text{diag.} [G_{p11} \quad G_{p22}] = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & 0 \\ 0 & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fungsi alih model proses (G_{pm}) dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian yang dapat diinversikan (G_{pm}^-) dan bagian yang tidak dapat diinversikan (G_{pm}^+), yang dapat dituliskan dengan persamaan (9) dan (10)[21].

$$G_{pm11} = G_{pm11}^- \cdot G_{pm11}^+ = \frac{12,8}{16,7s+1} \cdot \frac{1-\frac{s}{2}}{1+\frac{s}{2}} \quad (9)$$

$$G_{pm22} = G_{pm22}^- \cdot G_{pm22}^+ = \frac{-19,4}{14,4s+1} \cdot \frac{1-\frac{3s}{2}}{1+\frac{3s}{2}} \quad (10)$$

Fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) pada AIMC 2 DoF dapat dirancang dengan menggunakan persamaan (11)[19][21].

$$G_{cst} = \text{diag.} [G_{cst1} \quad G_{cst2}] = \begin{bmatrix} \text{inv.} (G_{pm11}^-) \cdot f_1 & 0 \\ 0 & \text{inv.} (G_{pm22}^-) \cdot f_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f = \frac{1}{\tau_c s + 1} \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan (9), (10), (11), dan (12), fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) dapat dituliskan dengan persamaan (13) dan (14).

$$G_{cst1} = \frac{16,7s+1}{12,8(\tau_{c1}s+1)} \quad (13)$$

$$G_{cst2} = \frac{14,4s+1}{-19,4(\tau_{c2}s+1)} \quad (14)$$

Fungsi alih pengendali *disturbance rejection* (G_{cdr}) pada AIMC 2 DoF dapat dirancang dengan menggunakan persamaan (15)[22].

$$G_{cdr} = \text{diag.} [G_{cdr1} \quad G_{cdr2}] = \begin{bmatrix} G_{cst1} \cdot \frac{\alpha_1 s + 1}{\tau_{c1} s + 1} & 0 \\ 0 & G_{cst2} \cdot \frac{\alpha_2 s + 1}{\tau_{c2} s + 1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{(1-\frac{\tau_c}{\tau})^2 - e^{-\frac{\theta}{\tau}}}{-e^{-\frac{\theta}{\tau}}} \cdot \tau \quad (16)$$

Metode *tuning* parameter filter (τ_c) pengendali IMC pada fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) dan fungsi alih pengendali *disturbance rejections* (G_{cdr}) ditunjukkan oleh Tabel 1[2][20].

Tabel 1. Metode *tuning* parameter filter IMC

Metode <i>Tuning</i> Parameter Filter IMC	Syarat <i>Tuning</i> τ_c
Chien & Fruehauf	$\tau > \tau_c > \theta$
Lee et al	$\tau_c \geq 0,1\tau$
RC. Panda	$\tau_c = \max(0,2\tau, 1,7\theta)$
Rivera	$\tau_c > 0,8\theta$
Skogestad	$\tau_c = \theta$

Berdasarkan nilai θ dan τ pada fungsi alih model proses G_{pm11} dan G_{pm22} , syarat *tuning* parameter filter (τ_c) pada Tabel 1, dan uji empiris yang dilakukan pada sistem, nilai *tuning* parameter filter (τ_c) pada fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) dan pengendali *disturbance rejections* (G_{cdr}) pada ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Nilai *tuning* parameter filter (τ_c) kelima metode empiris.

Metode <i>Tuning</i> Parameter Filter IMC	Nilai <i>Tuning</i>	
	τ_{c1}	τ_{c2}
Chien & Fruehauf	3,7	5,4
Lee et al	4,4	4,12
RC. Panda	3,34	5,1
Rivera	3,6	5,3
Skogestad	1	3

Substitusikan nilai *tuning* parameter filter (τ_{c1}, τ_{c2}) yang ditunjukkan pada Tabel 2 ke dalam persamaan (13) dan (14), sehingga fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) dapat ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst}) berdasarkan nilai *tuning* parameter filter (τ_c).

Metode	Fungsi Alih Pengendali <i>Set point Tracking</i>	
	G_{cst1}	G_{cst2}
Chien & Fruehauf	$\frac{16,7s+1}{47,36s+12,8}$	$\frac{14,4s+1}{-104,76s-19,4}$
Lee et al	$\frac{16,7s+1}{56,32s+12,8}$	$\frac{14,4s+1}{-79,92s-19,4}$
RC. Panda	$\frac{16,7s+1}{42,752s+12,8}$	$\frac{14,4s+1}{-98,94s-19,4}$
Rivera	$\frac{16,7s+1}{46,08s+12,8}$	$\frac{14,4s+1}{-102,82s-19,4}$
Skogestad	$\frac{16,7s+1}{12,8s+12,8}$	$\frac{14,4s+1}{-58,2s-19,4}$

Substitusikan nilai *tuning* parameter filter (τ_{c1}, τ_{c2}) pada Tabel 2, fungsi alih pengendali *set point tracking* (G_{cst1}, G_{cst2}) pada Tabel 3, serta nilai waktu mati (θ) dan konstanta waktu (τ) pada fungsi alih model proses G_{pm11} dan G_{pm22} ke dalam persamaan (15) dan persamaan (16), sehingga fungsi alih pengendali *disturbance rejections* (G_{cdr}) dapat ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Fungsi alih pengendali disturbance rejections (G_{cdr}) berdasarkan nilai tuning parameter filter (τ_c).

Metode	Fungsi Alih Pengendali Disturbance Rejections	
	G_{cdr1}	G_{cdr2}
Chien & Fruehauf	$\frac{119,713s^2 + 23,868s + 1}{175,232s^2 + 94,72s + 12,8}$	$\frac{141,593s^2 + 24,233s + 1}{-565,704s^2 - 209,52s - 19,4}$
Lee et al	$\frac{136,393s^2 + 24,867s + 1}{247,808s^2 + 112,64s + 12,8}$	$\frac{121,556s^2 + 22,841s + 1}{-329,303s^2 - 159,856s - 19,4}$
RC. Panda	$\frac{110,775s^2 + 23,333s + 1}{142,792s^2 + 85,504s + 12,8}$	$\frac{137,136s^2 + 23,923s + 1}{-504,594s^2 - 197,88s - 19,4}$
Rivera	$\frac{117,254s^2 + 23,721s + 1}{165,888s^2 + 92,16s + 12,8}$	$\frac{140,124s^2 + 24,131s + 1}{-544,946s^2 - 205,64s - 19,4}$
Skogestad	$\frac{46,727s^2 + 19,498s + 1}{12,8s^2 + 25,6s + 12,8}$	$\frac{101,831s^2 + 21,472s + 1}{-174,6s^2 - 116,4s - 19,4}$

Persamaan pada *adaptation mechanism* sistem AIMC 2 DoF dengan menggunakan *adaptation law* dapat dituliskan dengan persamaan (17).

$$K_{a1}(s) = -\frac{Y_1}{s} \cdot u_1(s) \cdot u_{Gcdr1}(s) \tag{17}$$

$$K_{a2}(s) = -\frac{Y_2}{s} \cdot u_2(s) \cdot u_{Gcdr2}(s)$$

Nilai *gain* adaptasi (γ) diperoleh dengan melakukan uji empiris pada sistem. Hasil uji empiris nilai *gain* adaptasi (γ) pada ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Nilai gain adaptasi (γ) pada tiap-tiap metode tuning parameter filter.

Metode Tuning Parameter Filter IMC	Gain Adaptasi	
	γ_1	γ_2
Chien & Fruehauf	100	99
Lee et al	105	90
RC. Panda	100	100
Rivera	100	100
Skogestad	30	30

Persamaan pada pengendali MRAC (G_{cm}) sistem AIMC 2 DoF dapat dituliskan dengan persamaan (18).

$$u_{1up}(s) = K_{a1}(s) \cdot u_1(s) \tag{18}$$

$$u_{2up}(s) = K_{a2}(s) \cdot u_2(s)$$

3. Hasil dan Analisa

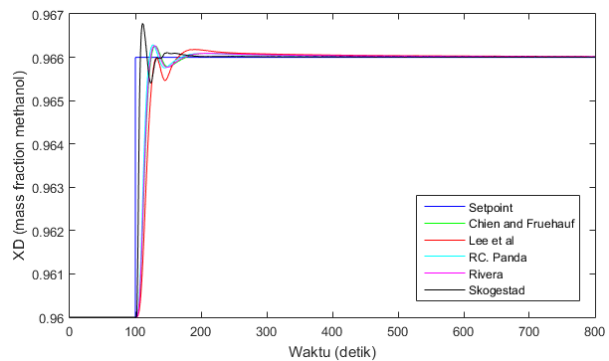
Pengujian dilakukan dengan asumsi model sempurna tanpa gangguan dan asumsi model sempurna dengan gangguan. Pada asumsi model sempurna tanpa gangguan, pengujian dilakukan dengan mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D) dan *set point* produk bawah (X_B). Pada asumsi model sempurna yang disertai gangguan, pengujian

dilakukan dengan memberikan *input step* pada variabel *input* gangguan (F).

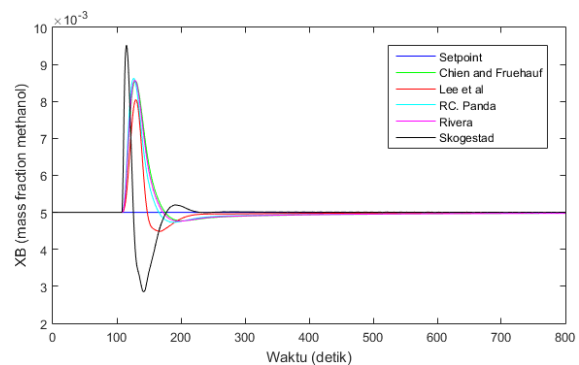
3.1. Pengujian Asumsi Model Sempurna Tanpa Gangguan

Pengujian pada bagian ini dilakukan dengan menaikkan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar $X_D + 0,006$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B) dan menaikkan *set point* komposisi produk bawah (X_B) sebesar $X_B + 0,003$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D).

Pada pengujian kenaikan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar $X_D + 0,006$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk bawah (X_B), respon komposisi produk atas (X_D) ditunjukkan oleh Gambar 5 sedangkan respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 5. Respon komposisi produk atas (X_D) terhadap kenaikan *set point* $X_D+0,006$.

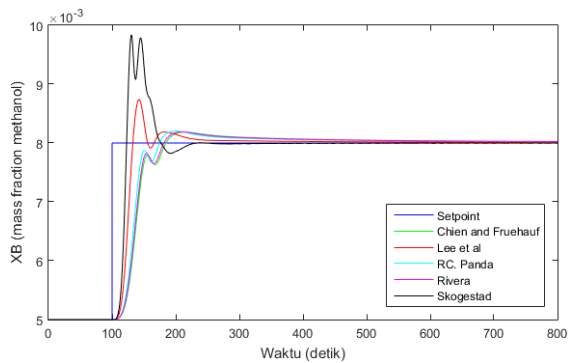


Gambar 6. Respon komposisi produk bawah (X_B) terhadap kenaikan *set point* $X_D+0,006$.

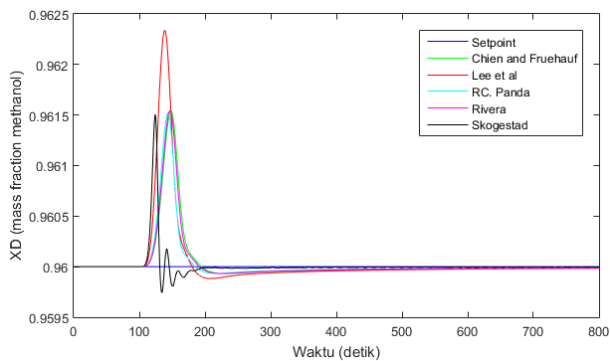
Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 5 dan Gambar 6, dapat dilihat bahwa pengendali AIMC 2 DoF mampu mengikuti perubahan *set point* pada komposisi produk atas (X_D) dan mampu mempertahankan *set point* komposisi produk bawah (X_B). Nilai IAE terkecil pada pengujian ini diperoleh menggunakan metode *tuning* parameter filter Skogestad dengan nilai IAE sebesar

0,04826 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1152 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

Pada pengujian kenaikan *set point* komposisi produk bawah (X_B) sebesar $X_B + 0,003$ tanpa mengubah *set point* komposisi produk atas (X_D), respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 7 sedangkan respon komposisi produk atas (X_D) ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 7. Respon komposisi produk bawah (X_B) terhadap kenaikan *set point* $X_B+0,003$.



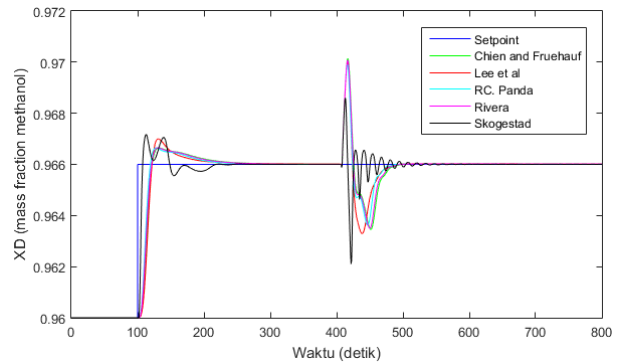
Gambar 8. Respon komposisi produk atas (X_D) terhadap kenaikan *set point* $X_B+0,003$.

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 7 dan Gambar 8, dapat dilihat bahwa pengendali AIMC 2 DoF mampu mengikuti perubahan *set point* pada komposisi produk bawah (X_B) dan mampu mempertahankan *set point* komposisi produk atas (X_D). Nilai IAE terkecil pada pengujian ini diperoleh menggunakan metode *tuning* parameter filter Skogestad dengan nilai IAE sebesar 0,02443 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,1132 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

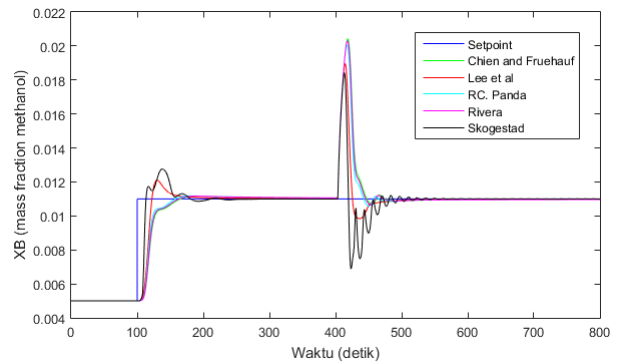
3.2. Pengujian Asumsi Model Sempurna dengan Gangguan

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 $+0,006$. Pada pengujian ini, respon komposisi produk atas (X_D) ditunjukkan oleh Gambar 9 sedangkan respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 10.



Gambar 9. Respon komposisi produk atas (X_D) terhadap kenaikan gangguan $F+0,004$.



Gambar 10. Respon komposisi produk bawah (X_B) terhadap kenaikan gangguan $F+0,004$.

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 9 dan Gambar 10, dapat dilihat bahwa pengendali AIMC 2 DoF mampu meredam gangguan yaitu kenaikan laju aliran *feed* (F) dan mengembalikan respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) pada *set point* yang diberikan. Nilai IAE terkecil pada pengujian ini diperoleh menggunakan metode *tuning* parameter filter Skogestad dengan nilai IAE sebesar 0,1246 pada respon komposisi produk atas (X_D) dan 0,2863 pada respon komposisi produk bawah (X_B).

4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh uji coba yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengendali AIMC 2 DoF 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, pengendali AIMC 2 DoF

menggunakan metode *tuning* parameter filter Skogestad dengan nilai *tuning* $\tau_{c1} = 1$ dan $\tau_{c2} = 3$ serta nilai *gain* adaptasi $\gamma_1 = 30$ dan $\gamma_2 = 30$ memiliki nilai IAE terkecil dibandingkan keempat metode lainnya.

Referensi

- [1]. -, Chapter 3 Modelling Of Distillation Column, -, -.
- [2]. Bayu Bagas Wara, *Pengontrolan Kolom Distilasi Biner Menggunakan Metode Internal Model Control*, Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, 2016.
- [3]. I.D Landau, R. Lozano, M. M'Saad, dan A. Karimi, *Introduction to Adaptive Control*, Adaptive Control Algorithms, Analysis, and Applications, Springer, 2011.
- [4]. -, *Controller Design Based on Transient Response Criteria*, Handbook Chapter 12, -.
- [5]. R. K. Wood dan M. W. Berry, *Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column*, Chemical Engineering Science Vol.28 pg.1707- 1717 Pergamon Press, 1973.
- [6]. Coleman Brosilow dan Babu Joseph, *Laplace Domain Models*, Techniques of Model-Based Control, Prentice Hall PTR, 2002.
- [7]. Coleman Brosilow dan Babu Joseph, *The First-Order Plus Dead Time Process*, Techniques of Model-Based Control, Prentice Hall PTR, 2002.
- [8]. -, *Transfer Function Models of Dynamical Processes*, Proses Dynamics and Control, -.
- [9]. Totok R. Biyanto, Heri Wahyudi, dan Hari Hadi Santoso, *Strategi Kontrol Kolom Distilasi Tunggal Sistem Biner Metanol-Air*, ResearchGate, 2005.
- [10]. R. Sivakumar dan Shennes Mathew, *Design and Development of Model Predictive Controller for Binary Distillation Column*, International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064, 2013.
- [11]. Sigurd Skogestad dan Ian Postlethwaite, *Introduction*, Multivariable Feedback Control Analysis and Design Second Edition, John Wiley & Sons, 2001.
- [12]. Gabor Szita dan C.K. Sanathanan, *A Model Matching Approach for Designing Decentralized MIMO Controllers*, Journal of the Franklin Institute 337 pg. 641-660, 2000.
- [13]. Dale E. Seborg, Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, dan Francis J. Doyle III, *Multiloop and Multivariable Control*, Process Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 2011.
- [14]. Wuhua Hu, Wen-Jian Cai, dan Gaoxi Xiao, *Relative Gain Array for MIMO Processes Containing Integrators and/or Differentiators*, 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision pg. 231-235 ISBN: 978-1-4244-7815-6, 2010.
- [15]. Sigurd Skogestad dan Ian Postlethwaite, "Relative Gain Array (RGA), Multivariable Feedback Control Analysis and Design 2nd Edition, Wiley, 2001.
- [16]. QingWei Jia and Shinobu Yoshida, *Design of HDD Servo Controller with Adaptive IMC Structure*, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation pg. 1280-1285, 2006.
- [17]. Nur Hidayah, Juwari, dan Renanto Handogo, *Maximum Peak-Gain Margin 2DoF-IMC Tuning For a 2 DoF-PID Filter Set Point Tracking Controller under Parametric Uncertainty Model*, IPTEK Journal of Proceeding Series vol. 1 ISSN: 2354-6026 pg. 8-16, 2014.
- [18]. Coleman Borislow dan Babu Joseph, *Two-Degree of Freedom Internal Model Control*, Techniques of Model-Based Control 1st Edition, Prentice Hall PTR, 2002.
- [19]. Dinny Winda Astuti, Juwari, dan Renanto Handogo, *Mp Tuning for Internal Model Control 2x2 Multi Input Multi Output (MIMO) System*, IPTEK Journal of Proceeding Series vol. 1 ISSN: 2354-6026 pg. 8-16, 2014.
- [20]. -, *Controller Design Based on Transient Response Criteria*, Handbook Chapter 12, -.
- [21]. Somnath Pan dan Md Nishat Anwar, *A PID Controller Design in 2DOF-IMC Structure for Integrating Processes with Dead-Time*, ADCONP Hiroshima pg.137-142 2014.
- [22]. Juwari, S.Y.Chin, N.A.F.Abdul Samad, dan B.B.Abdul Aziz, *A Structure of Two-Degree-of-Freedom Internal Model Control from Feedback/Feedforward Scheme*, 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision pg.2044-2048 ISBN: 978-1-4244-2287-6, 2008.