

Keandalan Kontroler *Internal Model Control* pada Pengendalian Kolom Distilasi terhadap Pengaruh Gangguan

Wahyudi ¹⁾, Bayu Bagas Wara ²⁾, Budi Setiyono ³⁾

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

Jln. Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang, Indonesia

Email : ¹⁾wahyuditinom@elektro.undip.ac.id, ²⁾bagasundip@gmail.com, ³⁾budisty@gmail.com

Abstrak

Kolom distilasi sangat penting dalam industri kimia dan perminyakan. Gangguan yang muncul pada proses distilasi seringkali menyebabkan produk distilasi tidak mempunyai kemurnian tinggi. Kolom distilasi membutuhkan metode kontrol yang mampu menghilangkan pengaruh gangguan. IMC adalah metode kontrol yang mampu menolak gangguan dengan baik karena adanya model proses yang dibandingkan dengan model proses itu sendiri. Penelitian ini bertujuan melihat respon metode IMC 1 Degree Of Freedom yang digunakan untuk mengendalikan plant kolom distilasi biner Wood & Berry MIMO 2x2 terhadap pengaruh gangguan dengan sinyal uji step dan band limited white noise. Variabel yang dikontrol dalam kolom distilasi adalah konsentrasi produk atas dan produk bawah dengan memanipulasi variabel laju aliran reflux dan laju steam pada reboiler. Variabel gangguan yang mempengaruhi proses adalah laju aliran umpan dan konsentrasi umpan. Model proses pada perancangan IMC 1 DOF menggunakan asumsi model sempurna dan mengikuti aturan perancangan MIMO IMC. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada pengujian dengan sinyal uji step kontroler IMC mampu meredam efek gangguan dan mengembalikan respon sistem ke dalam kondisi steady state. Pada pengujian dengan sinyal uji band limited white noise didapatkan hasil kontroler tidak mampu membawa respon sistem ke dalam kondisi steady state karena sistem terus berosilasi.

Kata kunci: Kolom Distilasi, IMC, MIMO, gangguan.

1. Pendahuluan

Kolom distilasi yang banyak dipakai pada industri kimia dan perminyakan merupakan sebuah kolom yang digunakan untuk memisahkan campuran menjadi komponen dengan kemurnian tertentu (Vasikaninova et al, 2007). Gangguan yang terjadi pada proses distilasi menyebabkan proses pemisahan campuran dengan kemurnian yang tinggi sulit diperoleh. Gangguan pada proses distilasi dapat berupa perubahan laju aliran umpan (F) dan perubahan konsentrasi umpan (XF) (Mishra et al, 2013).

Struktur kontrol *Internal Model Control* (IMC) merupakan struktur sistem kontrol *robust* yang mampu meredam adanya efek gangguan yang terjadi selama proses distilasi berlangsung. IMC memiliki kemampuan untuk mengikuti *set point* yang diinginkan sekaligus juga menghilangkan adanya pengaruh gangguan yang terjadi pada sebuah proses (Brosilo and Joseph, 2002). IMC dapat menjamin kestabilan proses yang dikontrol, sehingga metode IMC sangat baik digunakan untuk sistem industri dengan gangguan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan keluaran kolom distilasi biner dengan menggunakan metode IMC 1 *Degree Of Freedom* (DOF) yang digunakan untuk mengendalikan plant kolom distilasi biner Wood & Berry MIMO 2x2 terhadap pengaruh gangguan. Gangguan berupa laju aliran umpan dan gangguan konsentrasi

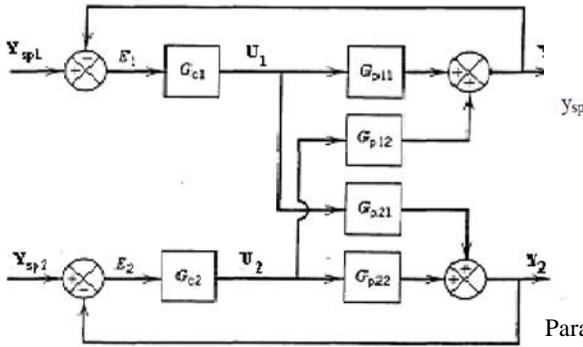
umpan, baik berupa *unit step* maupun *band-limited white noise*. Gangguan diuji pada bagian produk atas dan produk bawah. Metode *tuning* parameter kontrol IMC yang digunakan adalah metode Lee et al dan Skogestad.

2. *Internal Model Control* (IMC)

Bentuk konfigurasi kontrol IMC untuk sistem *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) mempunyai pengaruh terhadap kestabilan proses. Konfigurasi kontrol yang baik dalam sistem IMC MIMO adalah konfigurasi yang dapat meminimalkan proses interaksi dalam sistem MIMO dan menjamin bahwa variabel yang dimanipulasi memberikan kontrol yang efektif terhadap variabel yang dikontrol. Sistem MIMO dengan jumlah n variabel yang dikontrol dan n variabel yang dimanipulasi akan menghasilkan kemungkinan konfigurasi sebanyak $n!$ (Devikumari and Selvakumar, 2015).

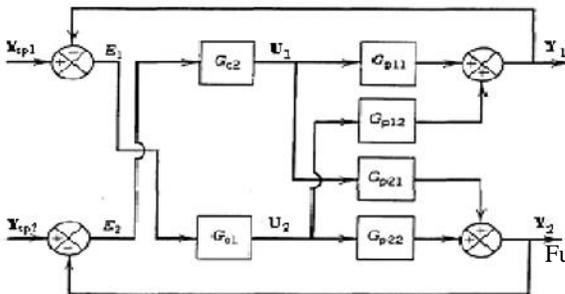
Struktur sistem MIMO 2x2 memiliki dua konfigurasi kontrol yaitu konfigurasi 1-1/2-2 dan konfigurasi 1-2/2-1.

Gambar 1 memperlihatkan konfigurasi 1-1/2-2 MIMO 2x2.



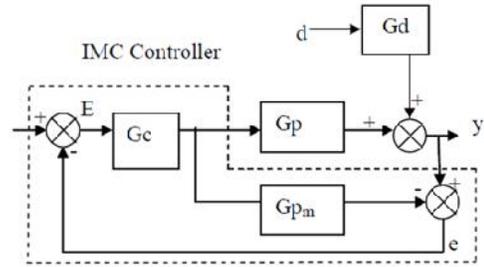
Gambar 1. Konfigurasi 1-1/2-2 MIMO 2x2

Pada konfigurasi 1-1/2-2, kontroler G_{c1} mempengaruhi proses G_{p11} dan proses G_{p21} sementara kontroler G_{c2} mempengaruhi proses G_{p12} dan proses G_{p22} , sedangkan pada konfigurasi 1-2/2-1 dapat dilihat bahwa kontroler G_{c1} mempengaruhi proses G_{p12} dan proses G_{p21} , sementara kontroler G_{c2} mempengaruhi proses G_{p11} dan proses G_{p22} . Gambar 2 menunjukkan konfigurasi yang tersedia untuk sistem MIMO 2x2 (Pathel, 2015).



Gambar 2 Konfigurasi 1-2/2-1 MIMO 2x2.

Struktur kontroler IMC 1 DOF ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur kontrol IMC1 DOF.

Parameter G_p adalah fungsi alih proses, G_{pm} adalah fungsi alih model IMC, G_c adalah kontroler IMC, G_d adalah fungsi alih gangguan, y adalah keluaran sistem yang disertai gangguan, d adalah beban gangguan, y_{sp} adalah *set point*, dan E adalah *error*.

Persamaan keluaran sistem terhadap *set point* diberikan pada persamaan (1) (Anwar, 2014).

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_c(s)[G_p(s) - G_{pm}(s)]} \quad (1)$$

Persamaan keluaran sistem terhadap beban gangguan ditunjukkan oleh persamaan (2).

$$\frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{1 - G_p(s)G_c(s)}{1 + G_c(s)[G_p(s) - G_{pm}(s)]} \quad (2)$$

Persamaan (1) akan berubah menjadi persamaan (3) dan persamaan (2) berubah menjadi persamaan (4) jika model IMC proses sama dengan proses itu sendiri ($G_{pm}=G_p$). Model seperti ini disebut dengan representasi model sempurna.

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = G_p(s)G_c(s) \quad (3)$$

$$\frac{Y(s)}{d(s)} = 1 - G_{pm}(s)G_c(s) \quad (4)$$

Kontroler IMC didesain berdasarkan invers model IMC proses dan sebuah filter pengendali yang membuat kontroler bersifat *robust*. Persamaan matematis dari desain kontrol IMC dituliskan dalam persamaan (5).

$$G_c(s) = \frac{1}{G_{pm}(s)} f(s)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{G_{pm}(s)(\tau_c s + 1)^n} \quad (5)$$

$$f(s) = \frac{1}{(\tau_c s + 1)^n} \quad (6)$$

Fungsi alih $f(s)$ adalah filter pengendali IMC

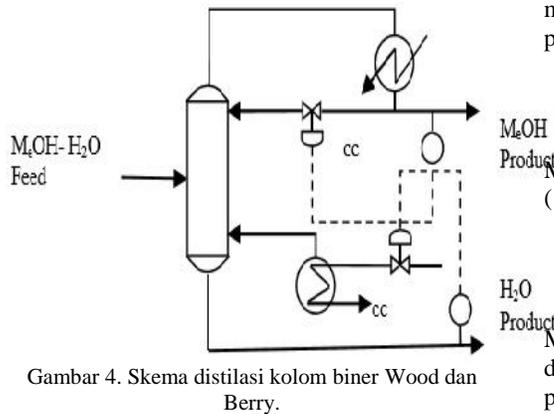
dengan τ_c adalah parameter filter kontroler IMC

dan n adalah integer yang membuat pengendali IMC bersifat *proper* atau *semiproper*. Proses *tuning* parameter yang tepat akan memberikan respon sistem yang *robust* dan sangat stabil.

3. Metode

3.1 Penentuan Fungsi Alih Proses

Skematik kolom distilasi biner Wood dan Berry ditunjukkan oleh Gambar 4 (Wood and Berry, 1973).



Gambar 4. Skema distilasi kolom biner Wood dan Berry.

Produk atas (XD) dikendalikan oleh *reflux* (L) dan produk bawah (XB) dikendalikan oleh laju *steam* (Qr) yang digunakan oleh *reboiler*.

Bentuk fungsi alih proses *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) MIMO 2x2 dapat dituliskan seperti persamaan (7).

$$\begin{bmatrix} y_{p1}(s) \\ y_{p2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & \frac{-19,9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fungsi alih gangguan dapat dituliskan pada persamaan (8) (Wood and Berry, 1973).

$$\begin{bmatrix} y_{d1}(s) \\ y_{d2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-4,1s}}{14,9s+1} & \frac{0,22e^{-1,1s}}{14s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} & \frac{14e^{-9,2s}}{12,1s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Parameter $y_{p1}(s)$ adalah keluaran produk atas

proses (XD_p), $y_{p2}(s)$ adalah keluaran produk

bawah proses (XB_p), $y_{d1}(s)$ adalah keluaran

produk atas gangguan (XD_d), $y_{d2}(s)$ adalah

keluaran produk bawah gangguan (XB_p), $u_1(s)$

adalah laju aliran *reflux* (L), $u_2(s)$ adalah laju

aliran *steam* yang dipakai *reboiler* (Qr), $d_1(s)$

adalah laju aliran umpan (F), dan $d_2(s)$ adalah

konsentrasi umpan (XF).

3.2 Penentuan Parameter Kontrol IMC

Kontroler IMC dengan menggunakan model mempunyai fungsi alih sistem MIMO 2x2 seperti pada persamaan (9) (Baqir, 2013).

$$G_p = \begin{bmatrix} g_{p11} & g_{p12} \\ g_{p21} & g_{p22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Model multivariabel IMC seperti pada persamaan (10) dapat diperoleh dari persamaan (9).

$$G_{pm} = \begin{bmatrix} g_{p11} & 0 \\ 0 & g_{p22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Model *plant* pada persamaan (11) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (6), model proses, serta persamaan sistem yang ditunjukkan pada persamaan (7).

$$G_{pm} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-1s}}{16,7s+1} & 0 \\ 0 & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Bagian model proses yang dapat diinverskan dari persamaan (11) ditunjukkan oleh persamaan (12) dan (13).

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

$$G_{pm22}^{-1} = \frac{-19,4}{14,4s+1} \quad (13)$$

Dari persamaan (12) dan (13) dapat dicari persamaan kontroler IMC yang merupakan invers dari model itu sendiri dan dituliskan pada persamaan (14) dan (15).

$$G_{c1} = \frac{16,7s+1}{12,8(\tau_c s+1)} \quad (14)$$

$$G_{c2} = \frac{14,4s+1}{-19,4(\tau_c s+1)} \quad (15)$$

Metode Lee et al dan Skogestad merupakan dua metode empiris yang berbeda dalam melakukan *tuning* parameter kontroler IMC. Metode Lee et al melakukan *tuning* parameter kontroler (τ_c) berdasarkan konstanta waktu proses (τ), sedangkan metode Skogestad melakukan *tuning* parameter kontroler (τ_c) berdasarkan nilai *dead time* (θ). *Tuning* parameter kontrol kedua metode diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. *Tuning* parameter kontrol IMC.

Metode	<i>Tuning</i> τ_c
Lee et al	$\tau_c \geq 0,1\tau$
Skogestad	$\tau_c = \theta$

Sumber : Sharma, 2013

Perhitungan dilakukan berdasarkan konstanta waktu proses (τ) dan *dead time* (θ). Berdasarkan

persamaan (11) kontroler pertama dan kedua memiliki konstanta waktu dan *dead time* yang dapat dituliskan pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter konstanta waktu dan *dead time*.

Kontroler	Konstanta waktu proses (τ)	<i>dead time</i> (θ)
Gc 1	16,7	1
Gc 2	14,4	3

Nilai parameter filter kontroler IMC (τ_c) dapat

dihitung dengan menggunakan tuning parameter pada Tabel 1 dan parameter konstanta waktu dan *dead time* pada Tabel 2. Hasil perhitungan *tuning* parameter diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil *tuning* parameter kontroler IMC (τ_c).

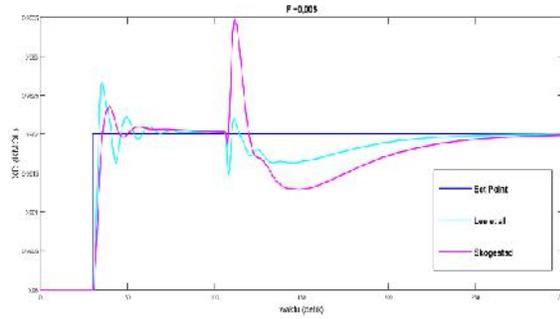
Kontroler	Lee et al	Skogestad
Gc 1	1,67	1
Gc 2	1,44	3

4. Hasil dan Pembahasan

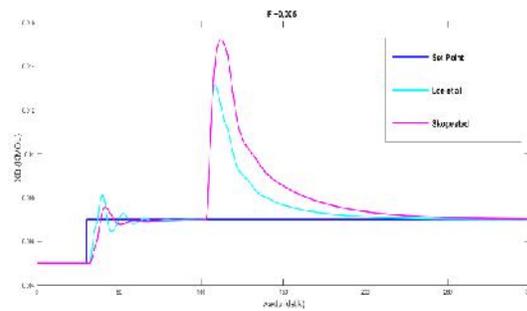
Pengujian terhadap kehandalan kontroler IMC dilakukan pada model sempurna ($G_p=G_{pm}$). Gangguan yang mempengaruhi proses berupa sinyal *unit step* dan sinyal *band-limited white noise* pada variabel gangguan laju aliran umpan dan laju konsentrasi umpan. Kinerja kontroler IMC dilakukan dengan melihat kemampuannya dalam meredam efek gangguan dan mempertahankan *set point* yang telah ditetapkan.

4.1 Gangguan Unit Step

Pengujian dengan sinyal uji *step* pada variabel gangguan laju aliran umpan dilakukan dengan menaikkan beban variabel gangguan sebesar +0,005 dan menurunkan beban gangguan sebesar -0,002. Perubahan gangguan dilakukan pada kondisi *set point* PRODUK ATAS dan XB dinaikkan masing-masing +0,002. Respon PRODUK ATAS dan XB terhadap kenaikan beban laju aliran umpan sebesar +0,005 ditunjukkan oleh Gambar 5 dan Gambar 6.

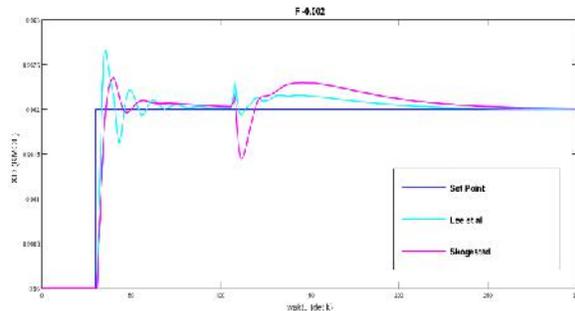


Gambar 5. Respon produk atas dengan gangguan F +0,005.

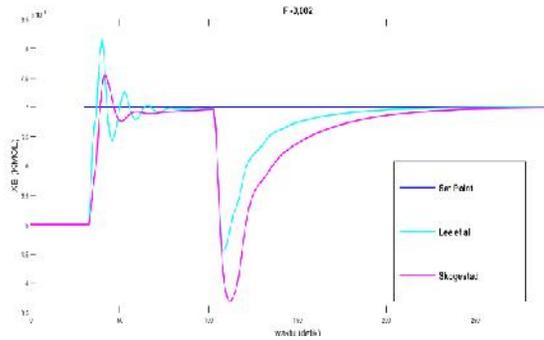


Gambar 6. Respon produk bawah dengan gangguan F +0,005.

Berdasarkan Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa kontroler IMC 1 DOF mampu meredam kenaikan beban variabel gangguan F, hal ini dapat dibuktikan dengan melihat respon XD dan XB kembali ke posisi *set point* yang diinginkan setelah diberikan gangguan. Kedua metode *tuning* filter IMC yang digunakan mampu membuat respon sistem kembali menuju kondisi *steady state*. Nilai *Integral Area Error* (IAE) terkecil untuk XD 1,303 diperoleh metode *tuning* Skogestad dan untuk XB 4,803 juga diperoleh metode *tuning* Skogestad. Respon XD dan XB untuk kondisi penurunan beban gangguan F sebesar -0,002 ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Gambar 8.



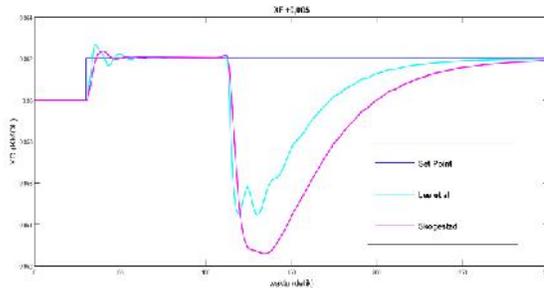
Gambar 7. Respon produk atas dengan gangguan F -0,002



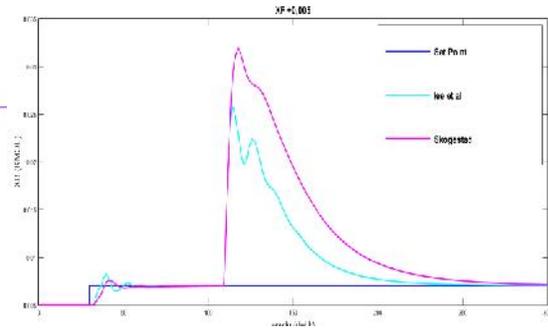
Gambar 8. Respon produk bawah dengan gangguan F - 0,002.

Respon XD dan XB pada kondisi penurunan beban gangguan F sebesar -0,002 menunjukkan bahwa kontroler IMC mampu meredam efek gangguan yang diberikan, hal ini dibuktikan dengan respon sistem mampu kembali pada *set point* yang diinginkan baik pada XD maupun XB. Kedua metode *tuning* filter IMC yang digunakan juga mampu membawa sistem ke dalam kondisi *steady state*. Nilai IAE terkecil pada pengujian diperoleh metode Skogestad dengan nilai pada XD 0,5377 dan XB 2,522.

Pengujian dengan sinyal uji *step* pada variabel gangguan konsentrasi umpan dilakukan dengan menaikkan beban variabel gangguan sebesar +0,005 dan menurunkan beban gangguan sebesar -0,004. Perubahan gangguan dilakukan pada kondisi *set point* XD dan XB dinaikkan masing-masing +0,002. Respon XD dan XB terhadap kenaikan beban XF sebesar +0,005 ditunjukkan oleh Gambar 9 dan Gambar 10.



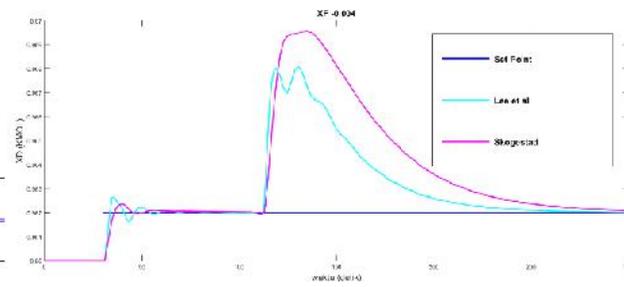
Gambar 9 Respon produk atas dengan gangguan XF +0,005.



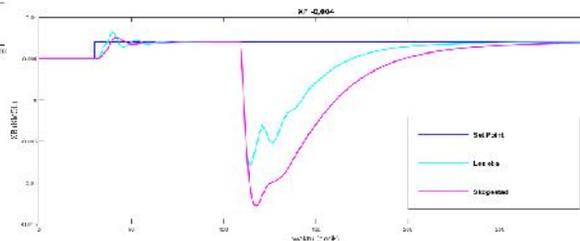
Gambar 10. Respon produk bawah dengan gangguan XF +0,005

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 dapat dilihat bahwa kontroler IMC 1 DOF mampu meredam kenaikan beban variabel gangguan XF, hal ini dapat dibuktikan dengan melihat respon XD dan XB kembali ke posisi *set point* yang diinginkan setelah diberikan gangguan. Kedua metode *tuning* parameter kontrol IMC yang digunakan mampu membuat respon sistem kembali menuju kondisi *steady state*. Nilai IAE terkecil untuk XD 19,58 diperoleh metode Skogestad dan untuk XB 22,01 juga diperoleh metode Skogestad.

Respon XD dan XB untuk kondisi penurunan beban gangguan XF sebesar -0,004 ditunjukkan oleh Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Respon produk atas dengan gangguan XF - 0,004.



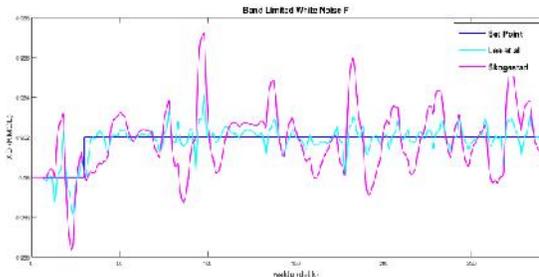
Gambar 12. Respon produk bawah dengan gangguan XF -0,004.

Respon XD dan XB pada kondisi penurunan beban gangguan XF sebesar -0,004 menunjukkan bahwa kontroler IMC mampu meredam efek gangguan yang diberikan, hal ini dibuktikan dengan respon

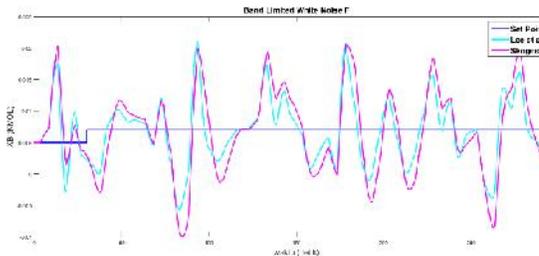
sistem mampu kembali pada *set point* yang diinginkan baik pada XD maupun XB. Kedua metode *tuning* filter IMC yang digunakan juga mampu membawa sistem ke dalam kondisi *steady state*. Nilai IAE terkecil pada pengujian penurunan beban XF -0,004 diperoleh metode Skogestad dengan nilai pada XD 15,63 dan pada XB 18,29.

4.2 Gangguan *Band Limited White Noise*

Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal gangguan *band-limited white noise* pada variabel gangguan F dengan *noise power* 0,0001 dan *sample time* 5. *Set point* XD adalah +0,002 dan *set point* XB adalah +0,002. Respon dari produk atas ditunjukkan oleh Gambar 13 dan respon pada produk bawah ditunjukkan oleh Gambar 14.



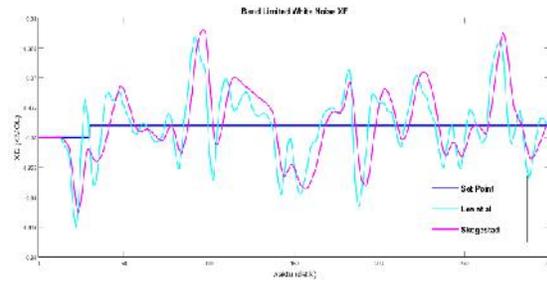
Gambar 13. Respon produk atas dengan pemberian gangguan F *band limited white noise*.



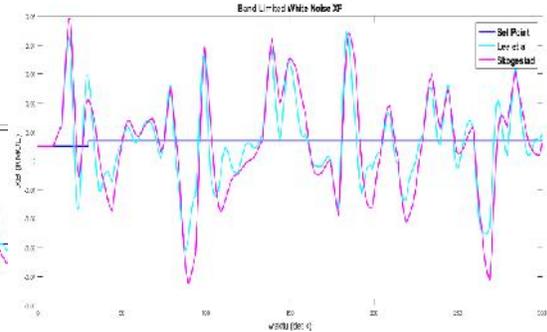
Gambar 14. Respon produk bawah dengan pemberian gangguan F *band limited white noise*.

Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan bahwa respon sistem pengendalian kolom distilasi biner dengan menggunakan metoda IMC 1 DOF pada produk atas dan produk bawah dengan gangguan *band limited white noise* pada variabel gangguan F menunjukkan sistem tidak mampu meredam gangguan yang terjadi secara terus menerus dan respon sistem tidak mampu mencapai keadaan *steady state*. Nilai IAE terkecil pada XD 0,3352 diperoleh metode Lee et al dan pada XB 1,984 diperoleh metode Skogestad.

Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal gangguan *band-limited white noise* pada variabel gangguan XF dengan *noise power* 0,0001 dan *sample time* 5. *Set point* XD adalah +0,002 dan *set point* XB adalah +0,002. Respon dari produk atas ditunjukkan oleh Gambar 15 dan respon pada produk bawah ditunjukkan oleh Gambar 16.



Gambar 15. Respon produk atas dengan pemberian gangguan XF *band limited white noise*.



Gambar 16. Respon produk bawah dengan pemberian gangguan XF *band limited white noise*.

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan bahwa respon sistem pengendalian kolom distilasi biner dengan menggunakan metoda IMC 1 DOF pada produk atas dan produk bawah dengan gangguan *band limited white noise* pada variabel gangguan XF menunjukkan sistem tidak mampu meredam gangguan yang terjadi secara terus menerus dan respon sistem tidak mampu mencapai keadaan *steady state*. Nilai IAE terkecil XD 4,626 dan XB 6,423 diperoleh oleh metode Skogestad.

5. Kesimpulan

Pada pengujian perubahan beban gangguan dengan sinyal uji *step* menunjukkan kontroler IMC mampu meredam pengaruh gangguan yang terjadi baik pada variabel gangguan F dan XF hal ini ditunjukkan oleh keluaran XD dan XB kembali ke kondisi *steady state* setelah diberi efek gangguan. Sementara pada pengujian dengan sinyal uji *band limited white noise* menunjukkan kontroler IMC tidak mampu mengakomodasi gangguan yang muncul terus-menerus, keluaran XD dan XB terus berosilasi dan tidak dapat mencapai kondisi *steady state* baik pada pengujian variabel F maupun XF. Metode Skogestad dengan $\tau_c1 = 1$ dan $\tau_c2 = 3$ memperoleh nilai IAE terkecil pada semua pengujian kecuali pada respon atas pengujian *Band Limited White Noise* pada variabel gangguan F. Metode Skogestad dengan $\tau_c1 = 1$ dan $\tau_c2 = 3$ memperoleh nilai IAE terkecil pada semua pengujian kecuali pada respon atas pengujian *Band Limited White Noise* pada variabel gangguan F.

Daftar Pustaka

- A. Vasikaninova, M. Basokova, and M. Karsiova, "Cascade Fuzzy Logic Control of A Distillation Column," in proceeding 16th International Conference Process Control 2007.
- R. K. Mishra, R. Khalkho, B. Kumar, and T. K. Dan, "Effect of Tuning Parameters of a Model Predictive Binary Distillation Column", Department of Electronics and Communication Engineering National Institute of Technology, pp. 3–8, 2013.
- C. Brosilow and B. Joseph "Techniques of Model Based Contro," Prentice Hall, New York, April 2002.
- Wood R. K. And Berry M. W., " Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column", M.S Thesis, University of Alberia, 1973.
- A. H. Devikumari and V. Vijayan, "Decentralized PID Controller Design for 3x3 Multivariable System using Heuristic Algorithms," Indian Journal of Science and Technology, vol. 8, no. July, pp. 1–6, 2015.
- N. Anwar, "A PID controller design in 2DOF - IMC structure for integrating processes with dead - time," ANCONIB, Hiroshima, 2014.
- M. Baqir, and C. B. Pamungkas, "DESAIN PENGENDALI SISTEM MIMO 2x2 DENGAN METODE IMC PADA FUNGSI TRANSFER PROSES KOLOM DISTILASI WOOD & BERRY (FOPDT)," JURNAL TEKNIK POMITS, vol. 2, no. 1, 2013.
- A.K. Sharma, A. Electronics, and I. Engineering, "Model-based Approach of Controller Design for a FOPTD System and its Real Time Implementation," IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 8, no. 6, pp. 21–26, 2013.
- JB. Pathel "Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Process Control." Handout, Institut of Technology Nirma University, Ahmedabad, 2015.