

PENERAPAN MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) PADA FLOW LINE SISTEM PRODUKSI MENGGUNAKAN ALJABAR MAX-PLUS

Imam Fauzi¹, Dieky Adzkiya²

¹Universitas Abdurachman Saleh, Situbondo, Indonesia

²Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

E-mail: imam_fauzi@unars.ac.id

ABSTRACT

Model Predictive Control (MPC) is a controller design method is popularly used in the industrial world. This research will be presented at the MPC application of flow line production system modeled using max-plus linear systems. The main advantage of the MPC is its ability to provide certain constraints or limits on the control signal input and output. Flow line of production systems is a diagram illustrating the process sequence in the production system, ranging from the input, processing and output. Of flow line production system, be applicable MPC as time optimization control of the production process. Furthermore, the results of the input and output MPC construction of a flow line production system can be obtained by using matlab program.

Keywords: *Max-Plus Linier System, Flow Line, Production System, Model Predictive Control.*

PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, efisiensi waktu sangatlah penting, karena tuntutan produksi yang semakin meningkat untuk memenuhi kebutuhan pasar. Oleh karena itu, ketepatan waktu sangatlah dibutuhkan dalam dunia industri. Dalam satu dekade terakhir, model predictive control (MPC) atau dengan kata lain model kendali terprediksi adalah salah satu metode yang populer digunakan dalam dunia industri, karena MPC adalah cara yang efektif dalam proses kontrol yang praktis, dan dapat diterima secara luas dalam proses industri. Keuntungan utama dari MPC adalah kemampuannya untuk memberikan constraint atau batasan tertentu pada sinyal pengendali input maupun output.

Sebelum memodelkan sistem produksi ke bentuk persamaan aljabar max-plus, terlebih dahulu dikonstruksi bentuk *flow line* dari sistem produksi, yaitu diagram yang menggambarkan skema urutan proses dari suatu sistem produksi mulai dari input, pemroses, dan output. Setelah terbentuk *flow line* dari sistem produksi kemudian dimodelkan sebagai sistem MPL. Selanjutnya diterapkan MPC pada *flow line* sistem produksi dalam sistem MPL untuk mendapatkan waktu optimal terprediksi.

Penelitian tentang pemodelan sistem produksi menggunakan aljabar max-plus telah banyak dilakukan sebelumnya. Misalnya Seleim dan ElMaraghy dalam papernya (Seleim dan ElMaraghy, 2014a) membahas tentang pemodelan sistem produksi dengan aljabar max-plus. Selanjutnya Seleim dan ElMaraghy dalam papernya (Seleim dan ElMaraghy, 2014b) mengembangkan paper mereka sendiri dengan menambahkan bahasan tentang *flow line* sistem produksi yang memuat pemroses yang tersusun secara campuran seri dan paralel dengan *buffer* terbatas. Kemudian Pohet Bintoto pada

¹ Dosen Universitas Abdurachman Saleh

² Dosen Institut Teknologi Sepuluh Nopember

tesisnya (Pohet B., 2015) menjelaskan bentuk umum dari suatu model *flow line* sistem produksi yang dimodelkan sebagai persamaan aljabar max-plus.

Selanjutnya De Schutter dan van den Boom dalam papernya (De Schutter dan van den Boom, 2001) menjelaskan tentang penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi sederhana. Untuk itu penelitian ini mengembangkan penelitian-penelitian sebelumnya dengan menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi dalam bentuk sebarang baik tanpa *buffer* maupun dengan *buffer* yang dimodelkan sebagai sistem MPL. Untuk memperjelas pemahaman tentang penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi, dalam penelitian ini diberikan contoh dari model tersebut dalam suatu *flow line* sistem produksi. Selanjutnya penerapan MPC pada sistem produksi tersebut diimplementasikan kedalam program matlab untuk mendapatkan waktu optimal terprediksi pada sistem produksi.

METODE PENELITIAN

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

Pada tahap ini dikumpulkan informasi mengenai model predictive control (MPC), sistem max-plus linier (MPL), dan *flow line* sistem produksi. Informasi-informasi tersebut akan didapatkan dari buku-buku, journal ilmiah, *paper-paper*, dan artikel-artikel yang terkait dengan penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi yang dimodelkan sebagai sistem MPL.

2. Mempelajari bentuk sistem MPL dari *flow line* sistem produksi (Pohet B. 2015)

Pada tahap ini mempelajari bagaimana cara penyusunan sistem MPL dari *flow line* sistem produksi dalam bentuk sebarang baik tanpa *buffer* maupun dengan *buffer*.

3. Penerapan model predictive control (MPC) pada sistem produksi

Setelah mempelajari bentuk sistem MPL dari *flow line* sistem produksi dalam bentuk sebarang baik tanpa *buffer* maupun dengan *buffer*, kemudian diterapkan MPC pada sistem produksi tersebut, untuk mendapatkan waktu optimal terprediksi dari sistem produksi.

4. Menyajikan suatu contoh

Untuk mempermudah pemahaman tentang bagaimana menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi dalam bentuk sebarang yang dimodelkan sebagai sistem MPL, maka diberikan contoh dari bentuk model MPC-MPL dari *flow line* sistem produksi tersebut.

5. Penyelesaian MPC dan menganalisa hasil simulasi

Pada tahap ini akan dicari penyelesaian dari penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi dengan menggunakan program matlab dan menganalisa hasil simulasi, kemudian akan diperoleh waktu optimal terprediksi pada sistem produksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Penerapan MPC pada *flow line* Sistem Produksi

Penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi dibagi menjadi dua macam, yaitu penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang tanpa *buffer* dan penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan *buffer* seperti yang dijelaskan sebagai berikut.

a. Penerapan MPC Pada *Flow Line* Sistem Produksi Tanpa *Buffer*

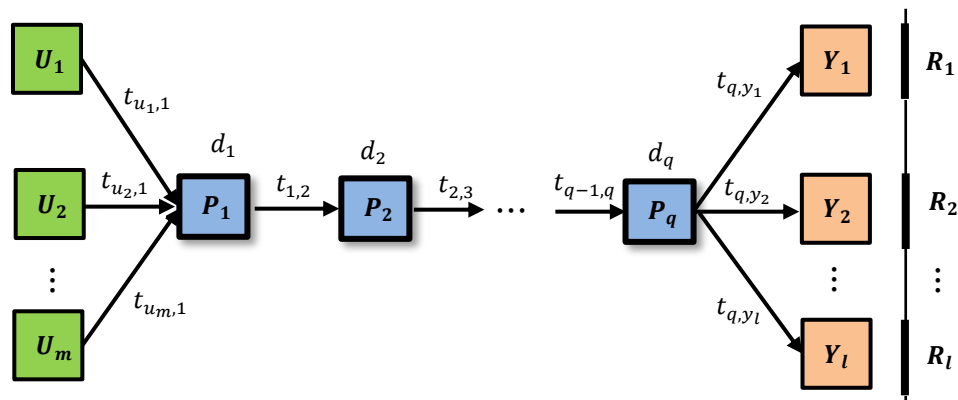
Dalam menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer*, ada beberapa tahapan penyelesaian, yaitu sebagai berikut.

1) Tahap pertama

Mengetahui susunan skema dari suatu mesin produksi yang akan dimodelkan sebagai *flow line* sistem produksi. Untuk mengkonstruksi *flow line* sistem produksi, terlebih dahulu harus mengetahui susunan skema dari suatu mesin produksi yang akan dikonstruksi sebagai *flow line* sistem produksi mulai dari input, pemroses, sampai output.

2) Tahap kedua

Mengkonstruksi model *flow line* sistem produksi sesuai dengan susunan skema dari mesin produksi beserta waktu prosesnya. Setelah mengetahui suatu mesin produksi yang akan dimodelkan, kemudian dikonstruksi bentuk *flow line* sistem produksi sesuai dengan mesin produksi tersebut. Misalkan diberikan bentuk *flow line* sistem produksi pada Gambar 3 yang menggambarkan susunan skema dari mesin produksi dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer* sebagai berikut.



Gambar 1: *Flow line* dengan m input, q pemroses, l output, dan l waktu *deadline* [6].

3) Tahap ketiga

Mendapatkan model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer*. Setelah mengkonstruksi bentuk *flow line* sistem produksi seperti yang terlihat pada Gambar 3, kemudian dimodelkan sebagai sistem MPL dari *flow line* sistem produksi tersebut. Persamaan aljabar max-plus dalam bentuk matriks dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang tanpa *buffer* pada Gambar 3 adalah sebagai berikut (Pohet B., 2015).

$$X(k+1) = A \otimes X(k+1) \oplus B \otimes X(k) \oplus D \otimes U(k) \quad (3.1)$$

$$Y(k) = C \otimes X(k) \quad (3.2)$$

dengan $A, B \in \mathbb{R}_\varepsilon^{q \times q}$, $C \in \mathbb{R}_\varepsilon^{n \times q}$, dan $D \in \mathbb{R}_\varepsilon^{q \times m}$.

Dari persamaan (2.1) dan (2.2), kemudian persamaan (3.1) dan (3.2) dapat disederhanakan, sehingga didapatkan bentuk sistem MPL dari *flow line* sistem produksi pada Gambar 3 sebagai berikut.

$$X(k+1) = \hat{A} \otimes X(k) \oplus \hat{B} \otimes U(k) \quad (3.3)$$

$$Y(k) = C \otimes X(k) \quad (3.4)$$

dengan $\hat{A} = A^* \otimes B$ dan $\hat{B} = A^* \otimes D$.

4) Tahap keempat

Mendapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer* dengan cara menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi tersebut. Setelah tersusun model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi, kemudian diterapkan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer* yang dimodelkan sebagai sistem MPL, yang tentunya harus diketahui:

- 1) Batas waktu
- deadline*
- maksimum
- $R(k)$
- yaitu

$$\check{Y}(k+j|k) \leq R(k+j) \quad \text{untuk } j = 1, \dots, N_p$$

- 2) Kondisi awal waktu input
- $U(-1)$
- ,

- 3) Kondisi awal waktu proses pada pemroses
- $X(0)$
- ,

- 4) Kontrol horizon
- N_c
- yaitu rentang waktu pengendalian,

- 5) Prediksi horizon
- N_p
- yaitu rentang waktu prediksi,

- 6)
- $k = 0$
- yaitu variabel pada setiap langkah waktu kejadian input maupun output,

- 7) Bilangan tak negatif
- $\lambda \geq 0$
- , yaitu sebagai
- trade-off*
- antara kriteria biaya output
- J_{out}
- dan kriteria biaya input
- J_{in}
- .

- 8) Batasan untuk selisih dari setiap langkah waktu ketika bahan baku masuk ke sistem (
- ΔU
-), yaitu untuk batas maksimum
- b_1
- dan batas minimum
- a_1

$$a_1(k+j) \leq \Delta U(k+j-1) \leq b_1(k+j) \quad \text{untuk } j = 1, \dots, N_c.$$

Setelah ditentukan nilai-nilai dari beberapa kondisi yang diketahui diatas, kemudian nilai-nilai tersebut disubstitusikan ke persamaan sistem MPL yang berbentuk taksiran atau estimasi, sehingga didapatkan bentuk matriks evolusi sistem sebagai berikut.

$$\check{Y}(k) = H \otimes \check{U}(k) \oplus G(k)$$

Setelah diperoleh model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer*, kemudian didapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi dengan cara memasukkan matriks parameter dari sistem MPL beserta batasan yang berhubungan dengan MPC ke dalam *toolbox* MPC program matlab (Bart De Schutter, 2001), kemudian didapatkan urutan waktu optimal input $[U_{\text{opt}}]_{k=0}^{N_p-1}$ dan urutan waktu optimal output $[Y_{\text{opt}}]_{k=1}^{N_p}$.

Dari persamaan (2.3) formula untuk kriteria biaya J_{out} adalah sebagai berikut.

$$J_{\text{out}} = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^l \max(\check{Y}_i(k+j|k) - R_i(k+j), 0)$$

Dari persamaan (2.4) formula untuk kriteria biaya J_{in} adalah sebagai berikut.

$$J_{\text{in}} = - \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^m U_i(k+j-1)$$

Jadi, dengan memaksimalkan waktu ketika bahan baku masuk ke sistem J_{in} sedemikian hingga waktu ketika bahan jadi meninggalkan sistem J_{out} tidak melewati atau sama dengan batas waktu *deadline* maksimum $R(k)$ yang telah ditentukan. Sehingga formula untuk mendapatkan waktu optimal terprediksi dari sistem produksi adalah sebagai berikut.

$$\min_{\check{U}(k)} J = \min_{\check{U}(k)} (J_{\text{out}} + \lambda J_{\text{in}})$$

dengan $\lambda \geq 0$.

b. Penerapan MPC Pada *Flow Line* Sistem Produksi yang Disertai *Buffer*

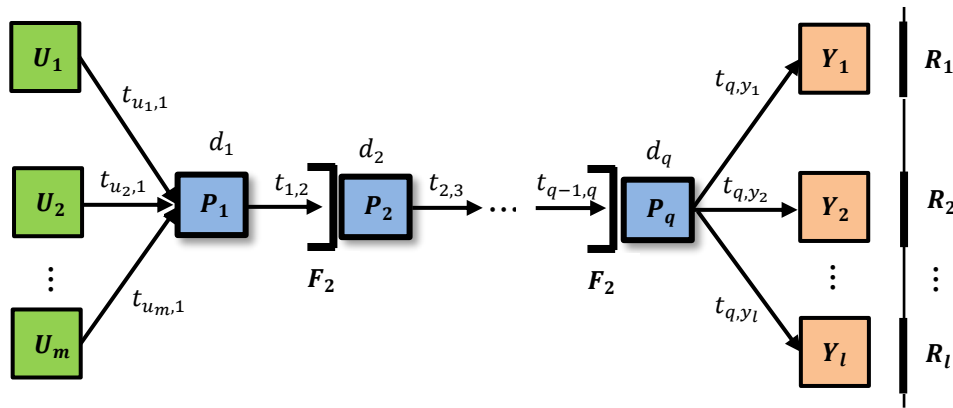
Penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer* juga memiliki beberapa tahapan penyelesaian, yaitu sebagai berikut.

1) Tahap pertama

Mengetahui susunan skema dari suatu mesin produksi yang akan dimodelkan sebagai *flow line* sistem produksi. Untuk mengkonstruksi *flow line* sistem produksi, terlebih dahulu harus mengetahui susunan skema dari suatu mesin produksi yang akan dikonstruksi sebagai *flow line* sistem produksi mulai dari input, pemroses, dan output.

2) Tahap kedua

Mengkonstruksi model *flow line* sistem produksi sesuai dengan susunan skema dari mesin produksi beserta waktu prosesnya. Setelah mengetahui suatu mesin produksi yang akan dimodelkan, kemudian dikonstruksi *flow line* sistem produksi sesuai dengan mesin produksi tersebut. Misalkan diberikan bentuk model *flow line* sistem produksi pada Gambar 4 yang menggambarkan susunan skema dari mesin produksi sebagai berikut.



Gambar 1: *Flow line* dengan m input, q pemroses, l output, l waktu *deadline*, dan disertai *buffer* pada pemroses P_2, P_3, \dots, P_q [6].

3) Tahap ketiga

Mendapatkan model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer*. Setelah mengkonstruksi bentuk *flow line* sistem produksi seperti yang terlihat pada Gambar 4, kemudian dimodelkan sebagai sistem MPL dari *flow line* sistem produksi tersebut. Persamaan aljabar max-plus dalam bentuk matriks dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer* pada Gambar 4 adalah sebagai berikut (Pohet B. 2015).

$$X(k + 1) = A \otimes X(k + 1) \oplus B \otimes X(k) \oplus D \otimes U(k) \oplus A_2 \otimes X_2(k - F_2) \quad (3.5)$$

$$\oplus A_3 \otimes X_3(k - F_3) \oplus \dots \oplus A_q \otimes X_q(k - F_q) \quad (3.6)$$

$$Y(k) = C \otimes X(k)$$

dengan $A, B, A_2, \dots, A_q \in \mathbb{R}_\varepsilon^{q \times q}$, $C \in \mathbb{R}_\varepsilon^{n \times q}$, dan $D \in \mathbb{R}_\varepsilon^{q \times m}$.

Dari persamaan (2.1) dan (2.2), Persamaan (3.5) dapat disederhanakan dengan mendapatkan matriks A^* . Sehingga persamaan (4.5) dan (4.6) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X(k+1) = \hat{A} \otimes X(k) \oplus \hat{B} \otimes U(k) \oplus \widehat{AB}_2 \otimes X_2(k-F_2) \oplus \widehat{AB}_3 \otimes X_3(k-F_3) \oplus \dots \oplus \widehat{AB}_q \otimes X_q(k-F_q) \quad (3.7)$$

$$Y(k) = C \otimes X(k)$$

dengan $\hat{A} = A^* \otimes B$, $\hat{B} = A^* \otimes D$, dan $\widehat{AB}_i = A^* \otimes A_i$.

Karena operasi \oplus pada aljabar max-plus bersifat komutatif maka persamaan (4.7) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X(k+1) = \hat{A} \otimes X(k) \oplus \widehat{AB}_2 \otimes X_2(k-F_2) \oplus \widehat{AB}_3 \otimes X_3(k-F_3) \oplus \dots \oplus \widehat{AB}_q \otimes X_q(k-F_q) \oplus \hat{B} \otimes U(k) \quad (3.8)$$

$$Y(k) = C \otimes X(k)$$

Dari persamaan (3.8), kemudian diperoleh persamaan sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang yang pemrosesnya disertai *buffer* adalah sebagai berikut.

$$\check{X}(k+1) = \check{A} \otimes \check{X}(k) \oplus \check{B} \otimes U(k) \quad (3.9)$$

$$Y(k) = \check{C} \otimes \check{X}(k) \quad (3.10)$$

dengan $\check{A} \in \mathbb{R}_\varepsilon^{\check{q} \times \check{q}}$, $\check{B} \in \mathbb{R}_\varepsilon^{\check{q} \times m}$, dan $\check{C} \in \mathbb{R}_\varepsilon^{n \times \check{q}}$ untuk $\check{q} = q(\max(F_1, F_2, \dots, F_q) + 1)$

4) Tahap keempat

Mendapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer* dengan cara menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi tersebut. Setelah tersusun model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi dengan pemrosesnya yang disertai *buffer*, kemudian diterapkan MPC pada *flow line* sistem produksi bentuk sebarang yang disertai *buffer* yang dimodelkan sebagai sistem MPL, yang tentunya harus diketahui:

- 1) Batas waktu *deadline* maksimum $R(k)$ yaitu

$$\check{Y}(k+j|k) \leq R(k+j) \quad \text{untuk } j = 1, \dots, N_p$$

- 2) Kondisi awal waktu input $U(-1)$,
- 3) Kondisi awal waktu proses pada pemroses $X(0)$,
- 4) Kontrol horizon N_c yaitu rentang waktu pengendalian,
- 5) Prediksi horizon N_p yaitu rentang waktu prediksi,
- 6) $k = 0$ yaitu variabel pada setiap langkah waktu kejadian input maupun output,
- 7) Bilangan tak negatif $\lambda \geq 0$ yaitu sebagai *trade-off* antara kriteria biaya output J_{out} dan kriteria biaya input J_{in} ,
- 8) Batas untuk selisih dari setiap langkah waktu pada saat bahan baku masuk ke sistem (ΔU) yaitu untuk batas maksimum b_1 dan batas minimum a_1 .

$$a_1(k+j) \leq \Delta U(k+j-1) \leq b_1(k+j) \quad \text{untuk } j = 1, \dots, N_c.$$

Setelah ditentukan nilai-nilai dari beberapa kondisi yang diketahui diatas, kemudian nilai-nilai tersebut disubstitusikan ke persamaan sistem MPL yang berbentuk taksiran atau estimasi, sehingga didapatkan bentuk matriks rekursif sistem, yaitu sebagai langkah untuk mendapatkan waktu optimal output terprediksi, sebagai syarat untuk mendapatkan kriteria biaya. Dengan rekursif sistem dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$\check{Y}(k) = H \otimes \check{U}(k) \oplus G(k)$$

Setelah diperoleh model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya disertai *buffer*, kemudian didapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi dengan cara memasukkan matriks parameter

dari sistem MPL beserta batasan-batasan yang berhubungan dengan MPC ke dalam *toolbox* MPC program matlab (Bart De Schutter, 2001), kemudian didapatkan urutan waktu optimal input $[U_{\text{opt}}]_{k=0}^{N_p-1}$ dan urutan waktu optimal output $[Y_{\text{opt}}]_{k=1}^{N_p}$.

Dari persamaan (2.3) formula untuk kriteria biaya J_{out} adalah sebagai berikut.

$$J_{\text{out}} = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^l \max(\tilde{Y}_i(k+j|k) - R_i(k+j), 0)$$

Dari persamaan (2.4) formula untuk untuk kriteria biaya J_{in} adalah sebagai berikut.

$$J_{\text{in}} = - \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^m U_i(k+j-1)$$

Jadi, dengan memaksimalkan waktu ketika bahan baku masuk ke sistem J_{in} sedemikian hingga waktu ketika bahan jadi meninggalkan sistem J_{out} tidak melewati atau sama dengan batas waktu *deadline* maksimum $R(k)$ yang telah ditentukan. Sehingga formula untuk mendapatkan waktu optimal terprediksi dari sistem produksi adalah sebagai berikut.

$$\min_{\tilde{u}(k)} J = \min_{\tilde{u}(k)} (J_{\text{out}} + \lambda J_{\text{in}})$$

dengan $\lambda \geq 0$.

KESIMPULAN

Penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi terdapat beberapa tahapan penyelesaian, yaitu 1) Tahap pertama mengetahui susunan skema dari suatu mesin produksi yang akan dikonstruksi sebagai *flow line* sistem produksi mulai dari input, pemroses, sampai output. 2) Tahap kedua mengkonstruksi bentuk *flow line* sistem produksi sesuai dengan susunan skema dari mesin produksi tersebut beserta waktu prosesnya. 3) Tahap ketiga mendapatkan model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer* maupun disertai *buffer*. 4) Tahap keempat mendapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi bentuk sebarang dengan pemrosesnya tidak disertai *buffer* maupun disertai *buffer* dengan cara menerapkan MPC pada *flow line* sistem produksi tersebut.

Setelah tersusun model sistem MPL dari *flow line* sistem produksi tersebut, kemudian diterapkan MPC pada *flow line* sistem produksi yang dimodelkan sebagai sistem MPL yang tentunya diberikan batasan-batasan yang berhubungan dengan MPC. Kemudian didapatkan waktu optimal terprediksi dari *flow line* sistem produksi dengan cara memasukkan matriks parameter dari sistem MPL beserta batasan-batasan yang berhubungan dengan MPC ke dalam *toolbox* MPC program matlab (Bart De Schutter, 2001). Hasil simulasi dan analisa penerapan MPC pada *flow line* sistem produksi dengan program matlab kemudian didapatkan urutan waktu optimal input $[U_{\text{opt}}]_{k=0}^{N_p-1}$ dan urutan waktu optimal output $[Y_{\text{opt}}]_{k=1}^{N_p}$. Selanjutnya dari urutan waktu optimal input dan output tersebut kemudian diperoleh kriteria biaya output J_{out} dan kriteria biaya input J_{in} , sehingga didapatkan kriteria biaya sistem produksi J .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Baccelli, F., Cohen, G., Olsder G.J., and Quadrat, J.P., (1992). *Synchronization and Linearity: An Algebra for Discrete Event Systems*. John Wiley & Sons. New York.
- [2] De Schutter, B. and van den Boom, T., (2000). *Model Predictive Control for Max-Plus-Linear Discrete Event Systems*. *Automatica*, vol.37, no.7, pp. 1049-1056, July 2001.
- [3] Gross, J. L. and Yallen, J., (2006). *Graph Theory and Application (Second Edition)*. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York.
- [4] Heidergott, B., Olsder, G.J., Woude, J., (2006). *Max-Plus At Work: Modelling and Analysis of Synchronized Systems: A Course on Max-plus Algebra and Its Application*. Princeton University Press, New Jersey.
- [5] Nila N., (2014). *Penjadwalan dan Alokasi Resource Sebagai Perbaikan Produksi Menggunakan Holonic Manufacturing System, Petri Net, dan Aljabar Max-Plus*. Tesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6] Pohet B., (2015). *Generalisasi Model Sistem Produksi Menggunakan Aljabar Max-Plus*. Tesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [7] Seborg, D.E., Edger, T.F., Mellichamp, D.A., and Doyle III, F.J., (2011). *Process Dynamics and Control: Chapter 20: Model Predictive Control (Third Edition)*. John Wiley & Sons. New York.
- [8] Seleim, A., Elmaraghy, H., (2014a). *Generating Max-Plus Equation for Efficient Analysis of Manufacturing Flow Lines*. Proceeding of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- [9] Seleim, A., Elmaraghy, H., (2014b). *Generating Max-Plus Equation for Efficient Analysis of Manufacturing Flow Lines*. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 314.
- [10] Subiono, (2015). *Aljabar Min-Max-Plus dan Terpanya*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.