

ALOKASI RESOURCE SEBAGAI PERBAIKAN PRODUKSI MENGUNAKAN *HOLONIC MANUFACTURING SYSTEM*, *PETRI NET* DAN ALJABAR MAX-PLUS

Moses L. Singgih¹ dan Nila Nurlina²

^{1,2}Laboratorium Sistem Manufaktur, Jurusan Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh
Nopember, Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya – 60111
(moseslinggih@ie.its.ac.id)

ABSTRAK

Tantangan industri manufaktur pada era pesatnya perkembangan IPTEK adalah bagaimana perusahaan mampu menghadapi perubahan dan ketidakpastian sistem manufaktur. Sebagai perusahaan yang bergerak pada bidang power energy dengan sistem produksi berdasarkan pesanan, peningkatan produktivitas ditandai dengan banyaknya output yang sesuai spesifikasi konsumen dan waktu yang telah ditentukan. Output yang dihasilkan proses Header TS tergantung pada kedatangan material, kecepatan bekerja, serta ketersediaan resource. Pemodelan yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan pendekatan Petri net yang didasarkan pada interaksi dan koordinasi holon dalam Holonic Manufacturing System (HMS). Interaksi antar holon tersebut kemudian dimodelkan dan disimulasikan dengan Petri net. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang model Petri net yang dapat menggambarkan kondisi eksisting dan didasarkan atas interaksi dan koordinasi antar holon serta merancang model penjadwalan dan alokasi sumber daya manufaktur agar output sesuai target dan jadwal proyek perusahaan. Hasil pemodelan disimulasikan dan dianalisis sebagai dasar penentuan kelayakan sistem produksi. Kemudian, disusun penjadwalan dan pengalokasian sumber daya manufaktur sebagai skenario perbaikan.

Hasil yang didapatkan dari pemodelan menggunakan Petri net adalah didapatkannya net bounded dan live, serta tidak deadlock. Keadaan tersebut mengindikasikan sistem produksi layak digunakan. Model Petri net eksisting disusun berdasarkan kondisi sebenarnya dimana sistem produksi dapat dimulai sesegera mungkin setelah produk berhasil diproduksi. Resource pada proses produksi ke 2, 3, 4, dan 5 memiliki waktu tunggu selama 33 menit, 72 menit, 82 menit dan 142 menit. Produk yang berhasil dikirim adalah 2 produk Header TS. Sementara, hasil skenario perbaikan menunjukkan bahwa model Petri net yang dibangun adalah bounded dan live, serta tidak terjadi deadlock. Setiap pekerja yang memiliki waktu tunggu pada skenario perbaikan ini akan dijadwalkan dan dialokasikan untuk membantu proses pendahulunya dalam menyelesaikan proses produksi. Hasil yang didapat yaitu target perusahaan dapat dicapai.

Kata kunci: Alokasi, Holon, Penjadwalan, Petri net

I. PENDAHULUAN

Kompleksitas kebutuhan manusia membawa perubahan dalam dunia industri manufaktur. Kompleksitas kebutuhan tersebut merubah paradigma pasar yang semula didasarkan pada *seller's market* menjadi *buyer's market*. Perusahaan tidak lagi menciptakan produk yang menonjolkan kemampuan perusahaan, namun cenderung menyesuaikan selera dan kebutuhan konsumen. Tantangan industri manufaktur pada era transformasi informasi dan teknologi sekarang adalah bagaimana cara perusahaan menghadapi kompleksitas dan perubahan lingkungan yang tidak pasti terhadap kejadian yang tidak direncanakan seperti jumlah *output* yang dihasilkan oleh stasiun produksi, ketersediaan material, produksi yang berlebihan, serta *delay* dalam proses produksi.

Perusahaan yang diteliti yaitu perusahaan Boiler dan beroperasi dengan sistem *order*. Produk yang diproduksi oleh perusahaan ini sesuai dengan spesifikasi konsumen yang terdiri atas spesifikasi material, dimensi, bentuk dan waktu pemenuhan pesanan. Perusahaan boiler memiliki 7 area kerja

yang selanjutnya disebut dengan *bay*. Salah satu *bay* yang dimiliki perusahaan ini adalah *bay* Header TS. *Bay* Header TS dijadikan sebagai objek penelitian karena proses produksi yang dimiliki lebih kompleks daripada proses lainnya pada unit kerja HRSG perusahaan.

Kelancaran proses produksi yang terdapat pada *bay* Header TS tergantung pada proses-proses sebelumnya, *output* masing-masing proses produksi dan keberadaan pekerja. Gangguan proses produksi mengakibatkan produk yang dihasilkan tidak sesuai dengan target dimana produk yang dihasilkan oleh *bay* ini dibutuhkan oleh *bay* selanjutnya dengan spesifikasi produk, jumlah dan waktu yang telah ditentukan. Selain itu, ketidakpastian yang tinggi terhadap material yang datang dan memiliki saling ketergantungan antar proses produksi membutuhkan perencanaan proses produksi yang berubah setiap hari. Ketidakpastian dan saling ketergantungan dalam proses produksi ini mengakibatkan kompleksitas dimana produk yang dihasilkan dituntut harus sesuai dengan target dan waktu yang telah ditentukan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang tepat untuk

membantu perusahaan dalam menganalisa permasalahan serta mengambil keputusan secara cepat.

Penelitian ini bertujuan membuat pemodelan simulasi terhadap permasalahan eksisting dengan menggunakan Petri net dan HMS (*Holonic Manufacturing System*). Pemodelan simulasi merupakan salah satu cara untuk menyelesaikan permasalahan di dunia nyata dimana *prototype* atau eksperimen sulit digunakan (Borschchev & Filippov, 2004). Petri net merupakan suatu alat pemodelan matematis dan grafis yang digunakan untuk memodelkan sistem *discrete event*. Sebagai alat pemrograman secara matematis, Petri net mampu menyelesaikan permasalahan yang berdasarkan persamaan aljabar. Sementara, sebagai alat pemrograman secara grafis, Petri net dapat menampilkan visualisasi kondisi sistem yang dinyatakan dengan token bergerak. Pergerakan *token* ini menjadi keunggulan tersendiri bagi Petri net dibandingkan dengan visualisasi matematis seperti diagram blok dan *flowchart*. Sementara, *Holonic Manufacturing System* merupakan suatu kumpulan entitas holon (*holarchy*) yang mengelompokkan keseluruhan aktivitas manufaktur berdasarkan entitas yang memiliki tujuan sama. Holon dalam konsep HMS memiliki kemampuan untuk membuat dan mengontrol eksekusi secara individu tanpa menunggu perintah dan dapat bekerjasama dengan holon lainnya (Hsieh and Chiang, 2011). Dalam penelitian ini, aktivitas manufaktur sebagai interaksi antar holon dibedakan menjadi *product holon*, *order holon*, dan *resource holon*. HMS digunakan untuk membuat sistem koordinasi dan komunikasi antar holon tanpa mengganggu aktivitas produksi. Petri net digunakan untuk mengetahui *product* dan *resource* holon mana yang baik digunakan dalam memproses sebuah pesanan berdasarkan spesifikasi produk dan waktu yang telah ditentukan. Petri net mampu memvisualisasikan aktivitas holon-holon dalam sistem holonik. Pemodelan Petri net yang didasarkan atas konsep HMS tersebut diharapkan mampu memodelkan permasalahan eksisting sehingga dapat dibuat skenario perbaikan secara tepat dan cepat.

II. URAIAN PENELITIAN

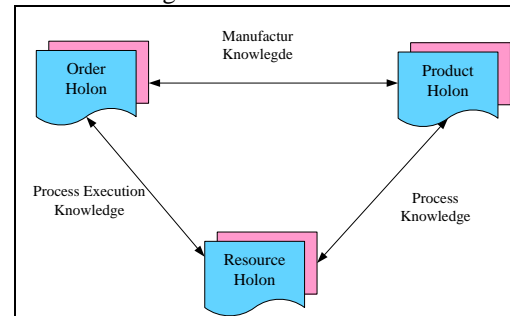
2.1 Tahap Telaah Pustaka

2.1.1 *Holonic Manufacturing System*

Holonic Manufacturing System (HMS) didasarkan pada notasi holon, mampu membuat keputusan sendiri, bekerjasama dengan holon lainnya, dan mampu menghadapi masalah manufaktur yang kompleks [1]. Aplikasi konsep HMS dalam sistem manufaktur dilatarbelakangi oleh ketidakstabilan sistem manufaktur terhadap

fasilitas manufaktur yang dimiliki perusahaan dan ketidakpastian permintaan konsumen [1].

Holonic Manufacturing System (HMS) adalah sekumpulan holon yang membentuk *holarchy* (*composite*) dan mengintegrasikan keseluruhan aktivitas manufaktur (Botti and Giret, 2008). HMS didasarkan konsep holonik yang dikembangkan oleh Athur Koestler terdiri dari tiga jenis holon yaitu, *order holon*, *resource holon* dan *product holon* (Botti and Giret, 2008). Komunikasi antar holon tersebut apabila digambarkan dalam diagram blok adalah sebagai berikut.



Gambar 1 Holonic Manufacturing System (Sumber: Botti dan Giret (2008))

Struktur HMS diklasifikasikan berdasarkan tugas dan interaksi masing-masing holon. Tingkah laku holon dapat disimulasikan dengan Petri net.

2.1.2 Holon

Holon merupakan *building block* sistem manufaktur yang memiliki sifat *autonomous* dan *cooperative*. Sifat *autonomous* holon memungkinkan holon bekerja secara mandiri tanpa menunggu perintah dari level holon yang ada di atasnya. Sifat *cooperative* holon memungkinkan holon untuk bekerja sama dengan holon lainnya. Konsep holonik dikembangkan oleh *philosopher* Athur Koestler untuk menjelaskan perubahan sistem biologi dan sosial. Setiap holon dalam HMS membentuk komunitas masing-masing didasarkan pada tujuan yang sama. Memproses sebuah pesanan produk, holon membentuk *composite* yang disebut dengan *holarchy*. Menurut Botti dan Giret (2008), arsitektur holon disusun dalam PROSA (Product-Resource-Order-Staff). PROSA merupakan jenis-jenis holon yang umum digunakan dalam sistem manufaktur. Jenis-jenis holon tersebut mampu bertanggungjawab dan mampu berinteraksi dengan lingkungannya. Arsitektur dasar holon dispesifikasikan menjadi tiga macam, yaitu *order holon*, *product holon*, dan *resource holon*. *Order holon* merupakan produk yang dipesan konsumen. *Resource holon* merupakan sumber daya dalam sistem manufaktur yang bertugas untuk menjalankan aktivitas manufaktur. Sementara *product holon* merupakan informasi proses produksi untuk memenuhi *order*.

Composite holon independent terdiri atas satu *product holon* dan serangkaian *resource holon* [2].

Composite holon independent $c_{ii}(R_x)$ ditunjukkan oleh dua garis yaitu $c_{ii}(R_n, E_{ii})$ dan $\alpha: R_x \rightarrow \Gamma_x$.

Dimana:

$c_{ii}(R_x)$ = Composite holon independent

R_n = Resource holon potensial

N_n = Node yang bertanggung jawab terhadap R_n

E_{ii} = Arc yang menghubungkan resource holon dan operasi holon

$\alpha: R_x \rightarrow \Gamma_x$ = Fungsi yang memetakan resource R_n menjadi $\alpha(r)$, dimana Γ_x merupakan jenis resource yang dibutuhkan h_n .

Composite holon dependent terdiri atas satu product holon, serangkaian resource holon dan satu atau lebih dari composite holon. Menurut Hsieh (2008), dependent composite holon $c_{ii}(U_x, R_x)$ ditunjukkan oleh dua garis yaitu $c_{ii}(U_n, E_{ii})$.

Dimana :

$c_{ii}(U_x, R_x)$ = Composite holon dependent

R_n = Resource holon

N_n = Node yang bertanggung jawab terhadap R_n dan U_n

E_{ii} = Arc yang menghubungkan resource holon dan operasi holon, serta menghubungkan composite holon dengan operasi holon

2.1.3 Petri Net

Petri net ditemukan oleh Carl Adam Petri dalam penelitiannya yang berjudul "Communication with Automata" tahun 1962. Penelitian Carl Adam Petri menjelaskan mengenai hubungan sebab akibat pada suatu sistem komputer. Pada tahun 1967, Carl Adam Petri melakukan penelitian kembali dengan judul "Fundamentals (Basics) for description of discrete processes". Penelitian tersebut berisi perkembangan Petri net sebagai alat pemodelan dan analisis system event discrete. Konsep Petri net menghasilkan metodologi untuk mendiskripsikan, menganalisis, dan mengontrol aliran pemrosesan informasi.

Struktur Petri net didefinisikan dengan tuple yang terdiri atas, place, transisi, Precedence matrix, Post matrix. Petri net didefinisikan dengan 4 tuple {P, T, Pre, Post}, dimana:

$P = \{ p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \}$, P merupakan himpunan terbatas dari place.

$T = \{ t_1, t_2, t_3, \dots, t_n \}$, T merupakan himpunan terbatas dari transisi.

Pre: $(P \times T) \rightarrow N$, Pre merupakan fungsi yang mendefinisikan tanda panah (arc) dari place menuju ke transisi.

N = Bilangan integer non-negative

Post: $(P \times T) \rightarrow N$, post merupakan fungsi yang mendefinisikan tanda panah (arc) dari transisi menuju place

Place dan transisi tidak harus bilangan berhingga, namun dapat berupa himpunan bilangan tak hingga terhitung (countable sets). Representasi Petri net dapat dinyatakan secara grafis dan matriks [3].

Circuit tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah model yang dibangun dapat kembali pada keadaan awal atau tidak setelah dilakukan firing. Apabila diberikan penanda awal adalah M_0 , urutan firing transisi e, dan matriks incidence A, maka T-invariant adalah $M_0 + A \cdot e = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$. Nilai 1 tersebut mengindikasikan bahwa setiap transisi dapat dilakukan firing [3].

Analisis P-invariant akan menghasilkan keadaan Petri net yang selalu menjaga pergerakan token [4]. Dengan kata lain, jumlah token yang tersisa tidak akan berubah pada setiap terjadi firing. Apabila diberikan penanda M yang dapat dicapai transisi pada setiap kali firing, urutan firing transisi e dan matriks incidence A, maka P-invariant adalah $M^T \cdot x = (M_0 + A \cdot e)^T \cdot x = M_0^T \cdot x$. Nilai P-invariant adalah 1 dan 0 dimana jumlah token yang berada pada place tidak akan berubah [3].

2.1.4 Aljabar Max-Plus

Aljabar max-plus digunakan untuk memodelkan penjadwalan proses produksi dengan memberikan hasil analitis dan kemudahan komputasi. Operasi dasar aljabar max-plus adalah maksimum dan penjumlahan [5]. Maksimum dinotasikan dengan \oplus dan penjumlahan dinotasikan dengan \otimes . Notasi \mathbb{R}_{max} adalah himpunan dari $\{\mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty, 0\}\}$, dimana \mathbb{R} adalah himpunan bilangan real. Elemen ∞ dinotasikan dengan ϵ , yaitu elemen netral terhadap operasi \oplus . Sementara 0 adalah elemen identitas dari operasi \otimes .

2.2 Pengumpulan Data

Tahap Persiapan

Tahap persiapan berisi tentang perumusan masalah dan tujuan, studi literatur dan studi lapangan. Berikut penjelasan dari masing-masing langkah dalam tahap persiapan.

Perumusan Masalah dan Tujuan

Perumusan masalah yang akan diselesaikan adalah Bagaimana merancang model petri net yang dapat menggambarkan kondisi sistem eksisting dan didasarkan atas interaksi dan koordinasi antar holon. Selain itu, Bagaimana cara merancang model penjadwalan dan alokasi sumber daya manufaktur agar output sesuai target dan jadwal proyek perusahaan.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan 3 tahapan yaitu fase identifikasi kebutuhan, fase pemodelan, dan fase penadwalan serta alokasi resource.

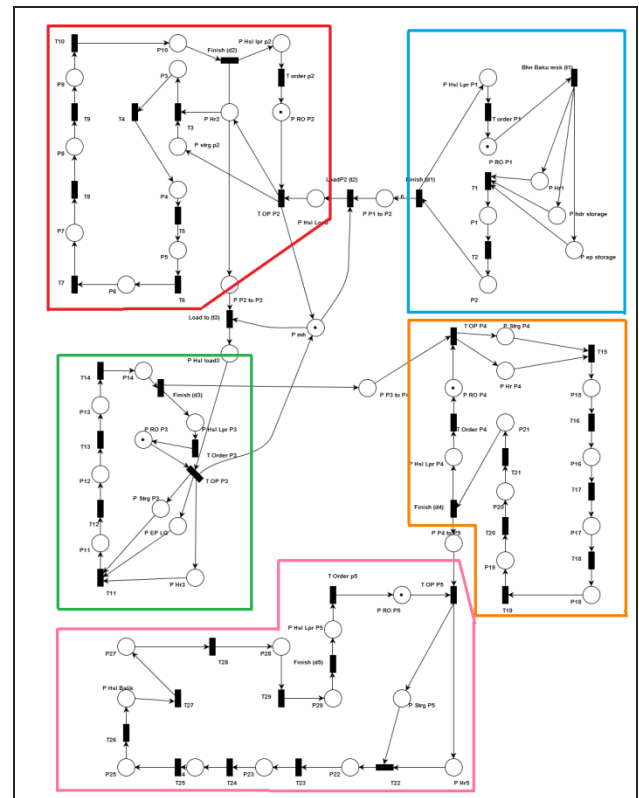
Fase Identifikasi Kebutuhan

Fase identifikasi kebutuhan dimulai dengan identifikasi pemeran sistem manufaktur (manusia, mesin, material, tim manajemen, *supervisor*, dan produk) berdasarkan jenis holon. Pada fase ini terdapat dua jenis holon yaitu *independence* dan *dependence* holon.

Fase Pemodelan

Fase pemodelan digunakan untuk merancang model konseptual. Perancangan model tersebut menggunakan metode Petri net dan divisualisasikan dengan PIPE Petri net. Berdasarkan model konseptual tersebut, masing-masing holarchy proses produksi Header TS dimodelkan dengan penambahan sumber daya manufaktur. Selanjutnya, masing-masing proses tersebut diperluas dengan pemodelan level pertama, dekomposisi dan *mutual exclusive*.

Berdasarkan model yang dibangun dengan metode Petri net tersebut, didapatkan hasil simulasi token net dimana model selalu dapat dilakukan *firing* transisi. Sifat net yang didapatkan dari model yang dibangun yaitu *bounded*, *live* dan *deadlock-free*. Model dikatakan *bounded* mengindikasikan bahwa model yang dibangun tidak akan memiliki token dengan kapasitas menuju tak hingga. Model dikatakan *live* apabila terdapat transisi *enabled* meskipun dilakukan beberapa kali *firing*. Model dikatakan *deadlock-free* mengindikasikan bahwa pada sistem tidak terjadi perebutan sumber daya. Namun, saat sistem ditambahkan dengan *material handling* yang digunakan secara bersama oleh proses 1, 2, dan 3 akan terjadi *deadlock*.



Gambar 1 Model Petri Net Bay Header TS

Fase Penjadwalan dan Alokasi Resource

Fase penjadwalan dalam alokasi *resource* digunakan untuk menyusun jadwal proses produksi *bay* Header TS. Penyusunan jadwal sebagai skenario perbaikan bertujuan untuk mencapai *output* produksi yang dapat mencapai target perusahaan.

Penjadwalan produksi menggunakan aljabar max-plus. Proses produksi Header TS pada masing-masing *product* holon didefinisikan sebagai berikut:

- $\mu_i(k)$ adalah waktu ketika material dimasukkan ke dalam sistem untuk pemrosesan ke- $(k+1)$.
- $x_i(k)$ adalah waktu ketika material dilakukan pemrosesan ke- i dan mulai bekerja pada proses ke- k
- $y_i(k)$ adalah waktu saat produk ke- k meninggalkan sistem

Berdasarkan definisi di atas, maka dapat dirumuskan aturan waktu sinkronisasi masing-masing proses yang didasarkan pada model yang telah dibangun dengan sistem Holonic dan Petri net.

☞ Persamaan linear dan matriks max-plus pada sistem produksi Header TS

Berdasarkan data waktu proses pada Tabel 4.3 dan aturan proses produksi di atas, maka dapat disusun persamaan linear sistem produksi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= \max(x_1(k) + 30, \mu(k) + 1) \\
 x_2(k+1) &= \max(x_1(k) + 33, x_2(k) + 35, \mu(k) + 34) \\
 x_3(k+1) &= \max(x_1(k) + 72, x_2(k) + 39, x_3(k) + 10, \mu(k) + 73) \\
 x_4(k+1) &= \max(x_1(k) + 82, x_2(k) + 49, x_3(k) + 10, x_4(k) + 60, \mu(k) + 83) \\
 x_5(k+1) &= \max(x_1(k) + 142, x_2(k) + 109, x_3(k) + 70, x_4(k) + 60, x_5(k) + 90, \mu(k) + 143) \\
 y(k) &= x_5(k) + 90
 \end{aligned}$$

Persamaan di atas apabila ditulis kembali menggunakan simbol aljabar max-plus \otimes dan \oplus , sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= 30 \otimes x_1(k) \oplus 1 \otimes \mu(k) \\
 x_2(k+1) &= 33 \otimes x_1(k) \oplus 35 \otimes x_2(k) \oplus 34 \otimes \mu(k) \\
 x_3(k+1) &= 72 \otimes x_1(k) \oplus 39 \otimes x_2(k) \oplus 10 \otimes x_3(k) \oplus 73 \otimes \mu(k) \\
 x_4(k+1) &= 82 \otimes x_1(k) \oplus 49 \otimes x_2(k) \oplus 10 \otimes x_3(k) \oplus 60 \otimes x_4(k) \oplus 83 \otimes \mu(k) \\
 x_5(k+1) &= 142 \otimes x_1(k) \oplus 109 \otimes x_2(k) \oplus 70 \otimes x_3(k) \oplus 60 \otimes x_4(k) \oplus 90 \otimes x_5(k) \oplus 143 \otimes \mu(k) \\
 y(k) &= 90 \otimes x_5(k)
 \end{aligned}$$

Matriks persamaan sistem produksi Header TS tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= A \otimes x(k) \oplus B \otimes \mu(k) \\
 y(k) &= C \otimes x(k)
 \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 30 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 33 & 35 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 72 & 39 & 10 & \varepsilon & \varepsilon \\ 82 & 49 & 10 & 60 & \varepsilon \\ 142 & 149 & 70 & 60 & 90 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 34 & 73 & 83 & 143 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 90 \end{bmatrix}$$

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 30 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 33 & 35 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 72 & 39 & 10 & \varepsilon & \varepsilon \\ 82 & 49 & 10 & 60 & \varepsilon \\ 142 & 149 & 70 & 60 & 90 \end{bmatrix} \otimes x(k) \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 34 \\ 73 \\ 83 \\ 143 \end{bmatrix} \otimes \mu(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 90 \end{bmatrix} \otimes x(k)$$

- Dimana:
- K = 1, 2, 3, 4, 5 dan $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_5(k)]^T$
 - A = Waktu sistem produksi yang sedang berlangsung
 - B = Waktu transfer bahan baku pertama kali ke dalam sistem sebelum kejadian ke-i
 - C = Waktu kejadian akhir dan waktu transfer sebelum produk dapat diambil

Desain penjadwalan digunakan untuk menyusun jadwal sistem produksi secara periodik. Penjadwalan aljabar max-plus menggunakan nilai eigen dan vektor eigen. Pada penelitian ini, nilai eigen dan vektor eigen dihitung dengan *software* scilab dan fungsi-fungsi yang terdapat pada *Maxplus Toolbox Algebra*. Hasil *running scilab* menunjukkan bahwa didapatkan nilai eigen sebesar 233. Sementara, vektor eigen hasil *running scilab* bernilai [91 124 163 173 233]^T atau dapat disederhanakan dengan mencari pola sama yaitu menjadi [0 33 72 82 142]^T. Vektor eigen tersebut digunakan sebagai periode waktu pada masing-masing proses bay Header TS dimulai.

Tabel 1 Jadwal Produksi Bay Header TS

Produksi ke-	Proses 1	Proses 2	Proses 3	Proses 4	Proses 5
1		7:33:00	8:45:00	10:07:00	12:29:00
2		8:06:00	9:57:00	11:29:00	14:51:00
3		8:39:00	11:09:00	12:51:00	17:13:00
4		9:12:00	12:21:00	14:13:00	19:35:00
5		9:45:00	13:33:00	15:35:00	21:57:00
6		10:18:00	14:45:00	16:57:00	0:19:00

Produk pertama dapat diproses pada pukul 07.00, dimana proses pertama produk langsung diproses sesuai dengan target setiap *shift*. Proses kedua dimulai pada pukul 8.45 dan seterusnya sampai produk selesai diproses oleh P5. Kemudian, dengan secepat mungkin produksi produk kedua proses 2 dapat dimulai kembali pada pukul 9.57, proses 3 dimulai pukul 11.29 dan seterusnya sampai produk selesai diproses pada P5. Penjadwalan akan selalu berulang dengan periodik sebesar nilai eigen untuk lama produksi 1 produk Header TS dan sebesar vektor eigen untuk memulai produksi pada masing-masing proses.

Berdasarkan jadwal tersebut, diketahui bahwa Header TS yang berhasil diproduksi pada 1 shift dengan alokasi waktu maksimal bekerja 8 jam adalah 2 Header TS. Terdapat WIP pada sistem tersebut yaitu berupa *output* dari proses 2 sebanyak 6 unit, *output* proses 3 sebanyak 5 unit, dan *output* proses 4 sebanyak 3 unit.

Skenario perbaikan

Skenario perbaikan alokasi pekerja dan waktu tunggu merupakan skenario perbaikan yang didasarkan atas lama waktu tunggu pekerja sebelum ia dapat melakukan pekerjaannya. Skenario perbaikan dengan konsep ini yaitu mengalokasikan *fitter* dan *welder* pada masing-masing proses untuk membantu proses lainnya. Alokasi sumberdaya pada masing-masing proses mempertimbangkan waktu berpindah dan *set up* mesin. Waktu yang diperlukan untuk *set up* mesin sebesar 2 menit. Waktu yang diperlukan untuk berpindah menuju jarak maksimal adalah 1 menit. Jarak paling jauh dari stasiun 1 menuju stasisun berikutnya adalah 6 meter. Sementara, perpindahan mesin ketika terjadi alokasi *resource* tidak menggunakan material handling untuk mengangkat *order*. Masing-masing mesin memiliki roda yang melekat pada dasar mesin tersebut, sehingga mesin dapat langsung dipindahkan tanpa menunggu kedatangan *material handling*.

Tabel 2 Aturan Skenario Perbaikan

Asal	Tujuan	Alokasi		Keterangan
		Ya	Tidak	
P2	P1		V	Waktu yang diperlukan untuk berpindah dari P1 ke P2 serta waktu <i>set up</i> mesin P2 lebih besar daripada waktu <i>unloading</i> material P1 menuju P2
P3		V		Memiliki waktu tunggu yang cukup untuk memulai proses produksi P3 setelah P1 selesai, yaitu selama 17 menit
P4		V		Memiliki waktu tunggu yang cukup untuk memulai proses produksi P4 setelah P1 selesai, yaitu selama 19,5 menit
P5			V	Waktu yang diperlukan untuk berpindah dari P1 ke P2 serta waktu <i>set up</i> mesin P2 lebih besar daripada waktu <i>unloading</i> material P1 menuju P2
P1	P2	V		P1 telah selesai melakukan proses produksi dan memiliki waktu
P3		V		Setelah mengerjakan p2 masih memiliki alokasi waktu untuk berpindah ke p3 sebesar 3 menit
P4		V		Sudah dialokasikan pada P1 sebelum P2 dimulai
P5		V		Waktu tunggu P5 mulai diproduksi masih memenuhi apabila digunakan untuk alokasi menuju P2
P1	P3	V		Digunakan untuk alokasi P4
P2		V		Digunakan untuk alokasi P4

Tabel 2 Aturan Skenario Perbaikan (Lanjutan)

Asal	Tujuan	Alokasi		Keterangan
		Ya	Tidak	
P4	P3		V	Tidak terdapat waktu untuk berpindah dan <i>set up</i> mesin
P5		V		
P1	P4	V		Memiliki waktu tunggu yang cukup sebelum memulai produksi P5
P2		V		Memiliki waktu tunggu yang cukup sebelum memulai produksi P5
P3			V	Tidak terdapat waktu untuk berpindah dan <i>set up</i> mesin
P5			V	Tidak terdapat waktu untuk berpindah dan <i>set up</i> mesin
P1	P5		V	Waktu memasukkan bahan baku setelah P5 selesai diproduksi lebih kecil daripada waktu P1 berpindah dan <i>set up</i> mesin
P2			V	Digunakan untuk alokasi P4 dan tidak terdapat alokasi waktu berpindah dan <i>set up</i> mesin ketika P5 mulai diproduksi
P3		V		Setelah P3 selesai melakukan proses produksi, P3 tidak dialokasikan untuk mengerjakan P4 dan memiliki waktu tunggu yang cukup untuk digunakan memproduksi P5
P4			V	Tidak terdapat waktu untuk berpindah dan <i>set up</i> mesin

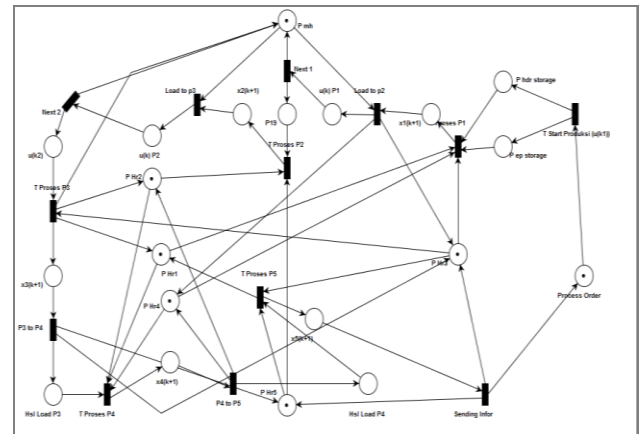
Pemeran sistem manufaktur pada konsep *Holonic Manufacturing System* dibedakan menjadi 3 macam yaitu *order* holon, *resource* holon dan *product* holon. Pengertian masing-masing entitas tersebut telah dijelaskan di atas. *Order* holon dan *product* holon pada skenario perbaikan ini tidak mengalami perubahan. Perubahan pada model skenario perbaikan adalah perubahan terhadap jumlah *resource* yang dialokasikan pada masing-masing *product* holon. Adapun perubahan tersebut adalah sebagai berikut.

- *Product* holon 1 memiliki *resource* F_1, F_3, F_4 dengan jumlah masing-masing adalah 1, 2, dan 4 *resource*.
- *Product* holon 2 memiliki *resource* F_2, F_1, F_5 dengan jumlah masing-masing adalah 1, 1, dan 2.
- *Product* holon 3 memiliki *resource* F_3, F_5 dengan jumlah masing-masing adalah 1 dan 2.
- *Product* holon 4 memiliki *resource* F_1, F_2, F_4 dengan jumlah masing-masing adalah 1.
- *Product* holon 5 memiliki *resource* F_3, F_5 dengan jumlah masing-masing adalah 1 dan 2.

Jumlah alokasi *resource* yang digunakan sebagai rekomendasi perbaikan didasarkan pada jumlah *resource* yang ditargetkan oleh perusahaan.

Adapun interaksi antar pemeran sistem produksi *bay* Header TS dibedakan menjadi dua macam yaitu interaksi holon *dependent* dan interaksi holon *independent*

Skenario perbaikan yang diusulkan mengakibatkan berubahnya kondisi sistem, dimana pekerja yang menganggur dialokasikan untuk mengerjakan produk lain. Berdasarkan aturan alokasi yang diterapkan di atas, maka didapat model Petri net sistem produksi baru sebagai berikut.



Gambar 2 Model Petri Net Skenario Perbaikan

Berdasarkan hasil *generate software*, didapatkan sifat Petri net *bounded* dan tidak *deadlock*. Sifat *bounded* memiliki arti bahwa model yang dibangun memiliki jumlah token yang terbatas. Keterbatasan tersebut digunakan untuk menjaga sistem agar tetap dalam keadaan stabil, tidak terjadi penumpukan *resource*. Hasil *deadlock false* mengindikasikan bahwa pada sistem tidak akan terjadi penggunaan *resource* bersama dalam waktu yang bersamaan.

III TAHAP ANALISIS DAN KESIMPULAN

Perancangan model Petri net dilakukan melalui 3 tahapan yaitu, perancangan pemodelan *product* holon level pertama, pemodelan dekomposisi proses dan pemodelan *mutual exclusive*. Pemodelan *product* holon level pertama digunakan untuk memodelkan aliran sub-proses produksi pada masing-masing proses pada *bay* Header TS. Pemodelan dekomposisi proses digunakan untuk menambahkan signal informasi dimana informasi tersebut merupakan tanda bahwa *order* holon hasil produksi *product* holon telah siap untuk dipindahkan dan *product* holon siap untuk menerima *order* berikutnya. Pemodelan ketiga yaitu *mutual exclusive*. Pemodelan tersebut dibuat apabila terdapat holon yang menggunakan *resource* sama. Semua model pada *product* holon tersebut memiliki sifat net yang memiliki kapasitas terbatas, tidak terjadi penggunaan *resource* sama pada waktu

yang bersamaan, dan dapat dilakukan proses produksi ulang. Dengan demikian, semua entitas manufaktur dapat dikatakan layak untuk menjalankan proses produksi meskipun terjadi perubahan alokasi *resource*.

Penjadwalan menggunakan aljabar max-plus menunjukkan hasil bahwa alokasi waktu produksi sebesar 8 jam tidak dapat menghasilkan *output* dengan jumlah sesuai target perencanaan. Adapun maksimal *output* yang dapat diperoleh yaitu sebanyak 6 WIP Header TS pada proses 1, 6 WIP Header TS pada proses 2, 5 WIP Header TS pada proses 3, 4 WIP Header TS pada proses 1, dan 2 WIP Header TS pada proses 5. *Output* yang dihasilkan dan dapat dikirim menuju stasiun berikutnya dari sistem produksi eksisting adalah 2 Header TS. Pencapaian *output* produksi dapat dilakukan dengan menggunakan skenario perbaikan dimana pekerja dengan waktu tunggu yang lama dapat dialokasikan untuk mengerjakan pekerjaan pendahulunya. Skenario perbaikan ini menggunakan aturan bahwa sistem produksi produk kedua dapat dimulai sesegera mungkin ketika produksi pertama selesai. Adapun jadwal yang didapat dari perhitungan aljabar max-plus menunjukkan bahwa produk target produksi dapat dicapai. Penghematan waktu produksi yang dihasilkan berdasarkan skenario perbaikan adalah sebesar 70%

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Bapak Adi Waluyo yang telah memberikan arahan selama melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Botti, V., & Giret, A. (2008). *ANEMONA: A Multi Agent-Methodology for Holonic Manufacturing Systems*. Spanyol: Springer.
- [2] Hsieh, F. S. (2008). "Holarchy Formation and Optimization in Holonic Manufacturing System with Contract Net". *Automatica*, 959-970.
- [3] Cassandras, C. G. (1993). *Discrete Event System: Modelling and Performance Analysis*. Boston: Aksen Associates Incorporate Publisher.
- [4] Diaz, M. (2009). *Petri Nets: Fundamental Model, Verification and Application*. (M. Diaz, Ed.) London: ISTE Ltd.
- [5] Judd, R. P., & Patlola, P. R. (2010). Efficiency Evaluation of Manufacturing System Performance Using Max-Plus Algebra.