

PENJADWALAN PRODUKSI PADA SISTEM MANUFAKTUR *REPETITIVE MAKE TO ORDER FLOW SHOP* MELALUI PENDEKATAN *THEORY OF CONSTRAINTS*

Imam Sodikin¹, Aang Mashuri²

^{1,2}Jurusan Teknik Industri, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 14 Oktober 2011, revisi masuk: 3 Januari 2012, diterima: 15 Januari 2012

ABSTRACT

PT. Jaya Pulau Bintan, Bangka is a company that produces rubber in the form of semi-finished materials. Companies experiencing difficulties in meeting consumer demand is continuous, because the rubber product manufacturing process is very complicated and time consuming. The research method used in addressing the problems the company is the method of scheduling a flow shop with the approach of theory of constraint in repetitive manufacturing systems make to order. The result of data processing by using 2 production scheduling system, namely FCFS scheduling with makespan yield of 18.96 days. While the TOC scheduling with makespan obtained by 16.02 days in order to obtain savings of 2.94 days. Scheduling production with the TOC proposed because it has a greater throughput and successfully utilize the resources constraints, especially at work stations more effectively and efficiently.

Keywords: *Theory Of Constraints, Make To Order, Production Scheduling*

INTISARI

PT. Pulau Bintan Jaya, Bangka adalah perusahaan yang memproduksi karet berupa bahan setengah jadi. Perusahaan mengalami kesulitan dalam memenuhi permintaan konsumen secara kontinu, karena proses pembuatan produk karet sangatlah rumit dan memakan waktu lama. Metode penelitian yang digunakan dalam mengatasi permasalahan perusahaan tersebut yaitu metode penjadwalan produksi *flow shop* dengan pendekatan *theory of constraint* pada sistem manufaktur *repetitive make to order*. Hasil pengolahan data penjadwalan produksi dengan menggunakan 2 sistem penjadwalan, yaitu penjadwalan dengan FCFS memberikan hasil makespan sebesar 18,96 hari. Sedangkan penjadwalan dengan TOC diperoleh makespan sebesar 16,02 hari sehingga diperoleh penghematan sebesar 2,94 hari. Penjadwalan produksi dengan TOC diusulkan karena mempunyai *throughput* yang lebih besar dan berhasil memanfaatkan sumber daya terutama di stasiun kerja konstrain dengan lebih efektif dan efisien.

Kata kunci: Teori kendala, Produksi berdasarkan pesanan, Jadwal produksi

PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur dewasa ini mengarah kepada sistem manufaktur yang menghasilkan jenis produk yang bervariasi dengan kuantitas produk per jenis yang semakin kecil. Spesifikasi produk cenderung menyesuaikan dengan keinginan pelanggan. Siklus hidup produk pun cenderung semakin singkat, dan ini menyebabkan perusahaan harus bekerja dengan *lead time* yang lebih singkat agar tetap kompetitif dan terjaga kelangsungan hidup-

nya. Sistem manufaktur saat ini menunjukkan kecenderungan perubahan jenis sistem dari sistem MTS (*Make To Stock*) menjadi MTO (*Make To Order*) (Aswita, 2003). Perubahan kecenderungan sistem manufaktur dari MTS menjadi MTO membawa pergeseran pada tujuan perusahaan dari mencari keuntungan sebanyak-banyaknya ke arah pemuasan keinginan dan kebutuhan pelanggan pada tingkat keuntungan yang memadai (*reasonable*), pergeseran lain juga terjadi pada kebijakan manajemen produksi,

¹dikiam12@yahoo.com

dari pendekatan biaya (*cost world*) menjadi aliran *output* (*throughput world*).

Theory of Constraints (TOC) yang dikembangkan E. Goldratt (1997) dengan menggunakan dasar gabungan antara sistem dorong (*push system*) dan sistem tarik (*pull system*), mempunyai kemampuan untuk menyeimbangkan aliran produksi dalam suatu sistem produksi. Di samping itu juga penelitian yang dilakukan oleh Umble dan Srikanth, (1996) menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan sistem produksi dengan *Work In Process* (WIP) yang rendah dan *throughput* yang besar.

Penelitian ini dilakukan di PT. Pulau Bintang Jaya ini yang memproses karet alami menjadi bahan baku yang se-suai dengan standar internasional. Perusahaan ini berproduksi berdasarkan *order* yang diterima (*make to order*), dengan kebijakan *First Come First Serve* (FCFS) dalam merespon pesanan pelanggan. Kebijakan FCFS yaitu prioritas diberikan kepada *order* yang telah tiba dahulu di perusahaan karena perusahaan menekankan pada ketepatan dalam penyampaian *order* dan keadilan (*fairness*) dalam merespon setiap *order* pelanggan. Penerapan kebijakan ini mempunyai konsekuensi sering terjadi inefisiensi akibat mesin menganggur karena melakukan *setup* berulang-ulang (duplikasi), *setup* mesin terjadi bila produk selanjutnya yang akan diproses di stasiun konstrain berbeda dengan jenis produk yang sedang di proses di stasiun tersebut, dalam hal ini yang menjadi stasiun konstrain adalah divisi pengeringan (*drying devision*). Pada divisi pengeringan terjadi antrian produk yang menunggu untuk diproses dan memiliki waktu proses paling lama, sehingga dengan terjadinya inefisiensi akan sangat berpengaruh pada produktivitas perusahaan secara keseluruhan. Akibat adanya inefisiensi yang terjadi di stasiun konstrain mengakibatkan *lead time order* mencapai lebih kurang dua kali waktu baku memproses *order* tersebut. Sehingga diperlukan cara yang tepat untuk meminimasi total *setup time* agar tidak dijumpai keterlambatan pada saat proses produksi berlangsung. Melalui pengembangan algoritma penjadwalan dengan

menggunakan algoritma Zijm dan algoritma *Branch and Bound* berdasarkan *Theory of Constraints* (TOC) pada sistem manufaktur *Make to Order* (MTO) repetitif dengan proses *flow shop*, diharapkan dapat meningkatkan utilitas di stasiun konstrain (*drying devision*) dengan meminimasi total *setup time*, memper-kecil *makespan* dan *work in process* di lantai produksi. Menentukan saat *release order* di stasiun konstrain, dan membandingkan performansi solusi sistem penjadwalan yang diusulkan dengan sistem penjadwalan aktual di perusahaan.

Pengertian Sistem Manufaktur Istilah manufaktur banyak digunakan di kalangan industri dan akademis, namun pengertian manufaktur masih rancu hingga saat ini. Pengertian mengenai manufaktur cukup jelas dikemukakan oleh Arya (2004): a).Manufaktur (*manufacturing*) ini adalah kumpulan operasi dan aktivitas yang saling berhubungan untuk membuat suatu produk, meliputi: Perancangan produk, pemilihan material, perencanaan proses, perencanaan produksi, produksi, inspeksi, manajemen, dan pemasaran. b).Produksi (*manufacturing production*) adalah serangkaian proses yang dilakukan untuk membuat produk. c).Proses produksi manufaktur (*manufacturing process*) adalah aktivitas sistem manufaktur terkecil yang dilakukan untuk membuat produk, yaitu proses permesinan maupun proses pembentukan lainnya. d).Rekayasa manufaktur (*manufacturing engineering*) adalah kegiatan perancangan, operasi, dan pengendalian proses manufaktur. e).Sistem manufaktur (*manufacturing system*) adalah suatu organisasi yang melaksanakan berbagai kegiatan manufaktur yang saling berhubungan, dengan tujuan menjembatani fungsi produksi dengan fungsi-fungsi lain di luar fungsi produksi, agar dicapai performansi produktivitas total sistem yang optimal, seperti: waktu produksi, ongkos, dan utilitas mesin. Aktivitas sistem manufaktur termasuk perancangan, perencanaan, produksi, dan pengendalian. Fungsi lain di luar sistem manufaktur, yaitu: akuntansi, keuangan, dan personel.

Sistem manufaktur juga dapat dibagi berdasarkan bentuk proses pro-

duksi atau sistem produksinya. Arya (2004) membagi sistem produksi menjadi 3 sistem produksi antara lain:

Flow Sho, sistem produksi yang menyusun mesin-mesin berdasarkan urutan pemrosesan (*routing*) produk, sehingga sering disebut dengan istilah tata letak produk (*product layout*). Aliran dalam pemrosesan produk mulai dari material hingga produk jadi adalah searah, menurut arah aliran tertentu. Sistem produksi ini dibagi lagi menjadi 3 sistem : 1). *Continuous Flow Shop*, sistem produksi yang umumnya digunakan untuk memproduksi atau memproses material cair, bahan kimia, dan pengilangan minyak. 2). *Dedicated Repetitive Flow*, sistem produksi yang memproduksi satu jenis produk tertentu secara terus-menerus, namun masih diijinkan untuk adanya variasi, seperti variasi warna. Karakteristik khusus dari sistem produksi ini adalah material akan diproses di beberapa stasiun kerja yang melakukan berbagai proses produksi dengan waktu proses yang hampir sama. Peralatan di setiap stasiun kerja dikhususkan untuk melakukan satu atau beberapa dari proses tertentu. 3). *Mixed Model Repetitive Flow*, sistem produksi yang digunakan untuk memproses beberapa produk sekaligus. Namun waktu *setup* untuk berubah dari produk yang satu ke produk yang lain hampir tidak ada. Karena terjadi proses produksi untuk beberapa produk sekaligus, maka peralatan yang digunakan mempunyai fungsi yang relatif umum dan pekerja yang mampu mengerjakan beberapa tugas. 4). *Intermitten* atau *Batch Flow* Sistem produksi yang memproses dua atau tiga jenis produksi sekaligus. *Setup* mempunyai pengaruh yang cukup besar untuk perubahan dari satu produk ke produk lainnya, sehingga perlu ditentukan ukuran *batch* produksi yang menghasilkan waktu proses per unit yang minimum.

Job Shop, sistem produksi yang mempunyai karakteristik mengorganisasikan sejumlah peralatan berdasarkan fungsinya. Proses yang dialami inio setiap produk dilakukan di setiap stasiun kerja berbeda-beda. Oleh karena itu, dari peralatan yang digunakan mempunyai fungsi yang umum. Peralatan disusun berdasarkan proses produksi yang dila-

kukannya sehingga sistem produksi ini sering dikenal mempunyai sistem tata letak berdasarkan (*process layout*).

Fixed Size, sistem produksi yang mempunyai karakteristik membawa material, peralatan, dan pekerja ke suatu lokasi tempat produk akan diproduksi, karena ukuran produk yang dihasilkan sangat besar. Contoh produk yang diproduksi dengan sistem produksi ini adalah kapal laut, pesawat terbang, dan jembatan.

Sistem Manufaktur MTO-repetitif, sistem manufaktur *Make to Order* (MTO) adalah sistem manufaktur yang beroperasi berdasarkan pesanan. Sistem manufaktur ini dibagi lagi menjadi MTO non-repetitif dan MTO repetitif. Beberapa parameter yang membedakan kedua sistem MTO, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan antara Sistem Produksi MTO Repetitif dan Non-Repetitif

	MTO Repetitif	MTO Non-Repetitif
Karakteristik pesanan	Pesanan berulang dalam waktu singkat	Pesanan tidak berulang atau berulang dalam jangka panjang
Tindakan untuk mengulang <i>setup</i>	Dilakukan dengan meningkatkan efisiensi <i>setup</i> dan mengatur <i>order</i> yang akan diproses	Dilakukan dengan meningkatkan efisiensi <i>setup</i>

Sumber: Charthy, 1993

Kedua sistem MTO ini umumnya memiliki sistem produksi *job shop*, agar bisa mengakomodasikan *order* dengan ukuran yang kecil dan spesifikasi setiap *order* yang berbeda. Akan tetapi, untuk beberapa sistem manufaktur MTO yang berperan sebagai sub-kontraktor dapat memiliki sistem produksi *flow shop*, karena adanya kesamaan proses dalam sistem *order* yang diterima, misalnya sub-kontraktor produk semi konduktor, perusahaan pembuat tirai aluminium untuk jendela rumah dengan berbagai ukurannya, dan pabrik pengolahan karet alami.

Sistem produksi *flow shop* umumnya merupakan sistem produksi untuk sistem manufaktur *make to stock* (MTS) yang cenderung untuk mempro-

produksi produk-produk dalam jumlah besar dan variasi yang sedikit. Pada sistem manufaktur MTS, peningkatan performansi stasiun kerja dilakukan dengan memperbaiki cara kerja yang dilakukan di setiap stasiun. Sistem manufaktur MTO dapat juga memiliki sistem produksi *flow shop*, tetapi peningkatan performansi stasiun kerja tidak hanya dilakukan dengan memperbaiki cara kerja melainkan juga dengan mengatur urutan *order-order* yang akan diproses. Parameter-parameter lain yang membedakan sistem MTO repetitif dengan sistem MTS dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbedaan antara Sistem Manufaktur MTO Repetitif *Flow Shop* dan *Make to Stock Flow Shop*

	MTO Repetitif <i>Flow Shop</i>	MTS <i>Flow Shop</i>
Respons terhadap fluktuasi <i>demand</i>	Memperkecil waktu penyelesaian	Mencari jumlah inventori yang sesuai
Persediaan produk jadi	Tidak ada (siklus pemesanan besar)	ada
Saat mulai proses produksi	Jika ada pesanan	Sesuai hasil peramalan
Jumlah yang diproduksi	Tergantung jumlah pesanan	Sesuai hasil perencanaan produksi
Perencanaan produksi	Perencanaan kapasitas	Perencanaan jumlah yang diproduksi

Sumber: Charthy, 1993

Sistem MTO repetitif memiliki sistem produksi *job shop*, apabila urutan pengerjaannya tidak mengikuti suatu aliran urutan pengerjaan tertentu, sedangkan sistem produksi *flow shop* diterapkan jika urutan pengerjaan setiap *order* mengikuti urutan pengerjaan tertentu. Sistem MTO repetitif *job shop* dengan urutan pengerjaan yang tidak mengikuti aliran tertentu mempunyai variasi urutan pengerjaan yang lebih tinggi dibandingkan MTO repetitif *flow shop*, sehingga perkiraan saat *order* akan diproses di stasiun kerja tertentu untuk MTO repetitif *job shop* akan relatif lebih kompleks dibandingkan dengan MTO repetitif *flow shop*.

Penjadwalan Produksi, selang waktu saat *order* berada pada sistem

produksi tidak semuanya digunakan melakukan proses. Menurut Toha (1997) *lead time* suatu produk dalam sistem produksi terdiri dari: a).Waktu tunggu sebelum proses produksi 75%, waktu proses 75%; b).Waktu antara proses dan Transportasi untuk inspeksi 7 %, waktu tunggu sebelum inspeksi 7%; c). Waktu inspeksi dan transportasi ke stasiun kerja akhir 2%, hambatan dalam produksi 3%.

Data tersebut menunjukkan hanya 6% waktu yang menghasilkan nilai tambah, sedangkan 94% lainnya berupa kegiatan yang tidak menghasilkan nilai tambah. Upaya untuk meningkatkan prosentase nilai tambah tersebut dapat dilakukan dengan melakukan perbaikan penjadwalan produksi untuk setiap *order* yang diproses. Penjadwalan produksi didefinisikan sebagai proses pengalokasian sumber atau mesin untuk melakukan sekumpulan tugas dalam jangka waktu tertentu.

Proses penjadwalan produksi membutuhkan tiga informasi dasar untuk setiap *order*, (Suryati, 2000): a). *Processing time* (t_i) atau waktu proses, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk memberikan nilai tambah pada *order i*. b). *Ready time* (r_i) atau saat siap, yaitu saat paling awal *order i* dapat diproses oleh mesin. c). *Due date* (d_i) atau saat kirim, yaitu saat pengiriman *order* kepada konsumen.

Kriteria untuk mengevaluasi penjadwalan yang dilakukan telah banyak dikembangkan, antara lain oleh Toha (1997) yang menyatakan bahwa kriteria evaluasi penjadwalan adalah sebagai berikut : 1). *Completion time*, C_i atau saat selesai, yaitu saat penyelesaian operasi paling akhir suatu *order i*. 2). *Flow time*, $F_i = C_i - r_i$ atau waktu tinggal, yaitu waktu yang diperlukan oleh suatu *order i* berada di shop (disebut juga *shop time* atau *manufacturing interval*). 3). *Waiting*

time, $W_i = C_i - r_i - \sum_{j=1}^m t_{ij}$ atau waktu

tunggu, yaitu waktu menunggu antara waktu suatu proses selesai diproses sampai dimulai operasi berikutnya dari pengerjaan setiap operasi pada *order i*. 4). *Lateness*, $L_i = C_i - d_i$ yaitu waktu antara saat selesai dan *due date* (d_i) suatu *order i*. *Tardiness*, $T_i = \max \{0, L_i\}$ yaitu waktu keterlambatan saat selesai suatu

order *i*. Halim (1993) menunjukkan suatu kriteria lain untuk mengevaluasi penjadwalan yang sesuai dengan sistem penjadwalan mundur (*backward scheduling*), yaitu *actual flow time* $F_i^a = d_i - R_i$ atau waktu tinggal aktual. Waktu tinggal aktual adalah waktu yang diperlukan suatu *order* di *shop* mulai dari suatu *release* hingga *due date order* (Fogarty, 1998).

Kriteria-kriteria evaluasi penjadwalan tersebut digunakan sebagai parameter dalam pengambilan keputusan tujuan penjadwalan *forward*. Tiga jenis kriteria keputusan yang umumnya dipilih sebagai tujuan penjadwalan *forward* adalah (Arya, 2004): a). Efisiensi pemakaian sumber daya dengan mengurangi waktu mesin menganggur, yang dapat dilakukan dengan meminimasi maksimum saat selesai atau *completion time* (*makespan*), $C_{maks} = \max \{C_{ij}\} \forall 1$ responsif terhadap permintaan dengan mengurangi persediaan barang setengah jadi, dapat dilakukan dengan mengurangi rata-rata waktu tinggal (*flow time*) \bar{F} , atau mengurangi rata-rata waktu tunggu \bar{W} . b). Memenuhi batas waktu dan mengurangi keterlambatan, dengan cara minimasi rata-rata *tardiness*, T , minimasi *makespan tardiness*, T_{max} dan mengurangi jumlah *order* yang terlambat, N_t .

METODE

Tujuan-tujuan penjadwalan tersebut dengan tingkat optimalitas yang dibutuhkan dapat dicapai dengan mengembangkan berbagai metode penjadwalan. Metode penjadwalan yang telah dikembangkan, secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam 3 kelompok berdasarkan metode komputasi penjadwalan, yaitu (Charty, 1993): a). Metode optimum yang efisien. Metode ini menghasilkan jadwal optimum dalam waktu yang relatif singkat. Algoritma yang dikembangkan biasanya untuk permasalahan yang tidak besar, termasuk dalam metode ini misalnya adalah algoritma Johnson. b). Metode optimal enumerative metode ini menghasilkan jadwal optimal berdasarkan formulasi matematis, diikuti oleh metode *Branch and Bound*, *Mixer Integer Linear Programming*, dan *Dyna-*

mic Programming. b). Metode Heuristik metode heuristik melakukan pendekatan suatu solusi optimal. Dasar pengembangan metode heuristik dikategorikan menjadi 3, yaitu : 1). Penjadwalan dilakukan setiap mesin selesai melakukan proses atau setiap pekerjaan datang mengantri. Contoh pendekatan ini adalah *priority rule*. 2). Mendefinisikan struktur *neighbourhood* dan solusi diperoleh berdasarkan struktur tersebut. Contoh pendekatan ini adalah *tabu search*, *simulated annealing*, dan *genetic algorithm*. 3) Penjadwalan dilakukan pada setiap mesin. Contoh pendekatan ini adalah *shifting bottleneck procedure*.

Pengendalian lantai produksi sangat diperlukan untuk memastikan *order-order* yang dijadwalkan dapat diproses sesuai jadwalnya. Pengendalian ini dilakukan antara lain dengan mengendalikan prioritas *release order*, manajemen panjang antrian, dan pengendalian keluar masuk *order*. Penentuan prioritas yang adil adalah dengan menggunakan metoda FCFS, karena *order* akan *dirlease* sesuai dengan urutan kedatangan *order* tersebut. Oleh karena itu, sistem penentuan prioritas ini sering digunakan oleh sistem manufaktur MTO yang selalu berusaha untuk menjaga keadilan dalam menentukan *order* yang akan diproses. Evaluasi terhadap cara-cara penentuan prioritas perlu dilakukan untuk menentukan efektivitas dari cara penentuan prioritas tersebut, yang dapat dilakukan dengan menggunakan kriteria berikut : a). Prosentase *order* yang tepat waktu sampai ke pelanggan. b). Rata-rata jumlah *order* yang terlambat. c). Rata-rata persediaan produk setengah jadi. d). Waktu *idle* (menganggur). e). Minimasi waktu *setup*. f). Efisiensi pemanfaatan energy.

Theory of Constraints, Optimized Production Technology (OPT) diperkenalkan secara luas oleh E. Goldratt (Arya, 2004) melalui bukunya *The Goal: A Process of Ongoing Improvement* yang ditulis pada tahun 1986. konsep OPT menekankan pada optimasi pemanfaatan stasiun konstrain, sehingga metoda ini juga dikenal dengan nama *Theory of Constraints (TOC)*. Metoda yang dikembangkan ini masih bersifat umum dan

logika berpikir dari metoda ini dapat diterapkan untuk memecahkan permasalahan dalam berbagai sistem, selain sistem produksi. Metoda ini menekankan untuk memaksimalkan *throughput* dengan persediaan dan biaya operasional yang minimum. *Throughput* didefinisikan sebagai aliran uang yang masuk ke perusahaan.

Peningkatan *throughput* dengan menggunakan pendekatan TOC dikenal dengan 5 langkah TOC untuk memperbaiki sistem yaitu (Arya, 2004): a). Identifikasi konstrain dalam sistem (*Identifying Constraint*). b). Melakukan eksploitasi terhadap stasiun konstrain (*Exploiting Constraint*). c). Subordinasi semua bagian lain dari sistem manufaktur (*Subordinate all parts of the manufacturing system*). d). Tingkatkan kemampuan stasiun konstrain untuk memecahkan masalah (*Elevating Constraint*). e). Jika konstrain telah dipecahkan atau timbul konstrain baru, kembali ke langkah-1.

Langkah-langkah perbaikan sistem yang dilakukan dalam TOC menunjukkan penekanan atau konsentrasi pendekatan TOC pada stasiun konstrain, dan stasiun non konstrain mengikuti hasil yang diperoleh dari stasiun konstrain. Penekanan ini mempermudah proses penjadwalan yang dilakukan, karena cukup hanya mencari jadwal yang sesuai untuk stasiun konstrain dan tidak mencari jadwal yang sesuai untuk semua elemen yang terlibat.

Aspek-aspek yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan pendekatan TOC ini tidak hanya pengendalian *Buffer* di stasiun konstrain. Keberhasilan penerapan TOC akan ditentukan oleh keberhasilan penerapan 10 prinsip dasar TOC, yaitu (Umble dan Srikanth, 1996): a). Penyeimbangan aliran bukan kapasitas. b). Tingkat utilitas stasiun *non-bottleneck* tidak ditentukan oleh potensinya tetapi oleh stasiun kerja *bottleneck* atau sumber kritisnya. c). Aktivitas tidak selalu sama dengan utilitas. d). Satu jam hilang di stasiun *bottleneck* berarti kehilangan satu jam pada seluruh sistem. e). Satu jam penghematan pada stasiun *non-bottleneck* merupakan penghematan sia-sia. f). *Bottleneck* mempengaruhi *throughput* dan *inventory*. g). *Transfer batch* tidak

harus selalu sama ukurannya dengan *process batch*. h). Ukuran *process batch* sebaliknya tidak tetap (variabel). i). Penjadwalan sebaiknya dilakukan dengan melihat semua sistem konstrain secara simultan. j). Jumlah dari optimum lokal tidak selalu sama dengan optimum keseluruhan (global).

Metode penjadwalan yang memusatkan perhatian pada stasiun konstrain dan menggunakan prinsip-prinsip dasar TOC adalah sistem penjadwalan *drum-buffer-rop* (DBR). Sistem penjadwalan DBR juga digunakan dalam *synchronous manufacturing* yang diperkenalkan oleh Umble dan Srikanth, (1996).

Konsep DBR dalam sistem produksi dapat dinyatakan sebagai usaha untuk menghasilkan produk sebanyak-banyaknya dengan *lead time* yang rendah dan persediaan di setiap stasiun juga rendah. *Drum* merupakan stasiun dengan kapasitas terendah atau konstrain dalam sistem produksi. Stasiun ini akan menentukan laju produksi (*throughput*) dari sistem. Karena stasiun ini menjadi penentu laju produksi keseluruhan sistem, maka stasiun kerja ini perlu mendapatkan perlindungan terhadap fluktuasi dan gangguan yang selalu terjadi dalam sistem produksi. Perlindungan yang diberikan mempunyai tujuan agar stasiun konstrain tidak menganggur akibat fluktuasi stasiunstasiun kerja sebelumnya. Perlindungan ini dilakukan dengan memberikan *buffer* yang ditempatkan di depan stasiun konstrain (*constraint buffer*). *Buffer* ini juga berfungsi agar laju produksi tidak terganggu oleh gangguan yang terjadi dalam sistem produksi, oleh karena itu *buffer* ini dikenal juga sebagai *buffer* pelindung (*protective buffer*).

Buffer atau penyangga terdiri dari 2 macam, yaitu (Umble dan Srikanth, 1996): a). *Time buffer*, yaitu waktu yang dijadikan penyangga dengan tujuan untuk melindungi laju produksi (*throughput*) sistem dari gangguan yang selalu terjadi dalam sistem produksi. b). *Stock buffer*, yaitu produk akhir maupun produk antara yang dijadikan penyangga dengan tujuan untuk memperbaiki kemampuan menanggapi sistem produksi terhadap permintaan, sehingga sistem mungkin

untuk menyelesaikan produk di bawah waktu penyelesaian normalnya.

Berdasarkan kedua definisi *buffer* di atas, maka tipe *buffer* yang paling sesuai untuk menjadi *buffer* di stasiun konstrain adalah *time buffer*, karena tujuan dari *time buffer* adalah hubungan melindungi *throughput* dari berbagai gangguan internal yang muncul. *Inventory* yang terjadi pada stasiun konstrain tampak seperti seperti *stock buffer* untuk melindungi stasiun konstrain, tetapi sesungguhnya *inventori* tersebut muncul karena setiap *order* diberikan *time buffer* di stasiun konstrain sehingga *order* tiba sebelum jadwalnya.

Penghubung antara laju produksi pada stasiun konstrain dengan stasiun non konstrain disebut sebagai *rope*. Adanya *rope* ini akan mengurangi jumlah persediaan yang terjadi pada stasiun kerja dan menjaganya pada tingkat tertentu yang sesuai, karena setiap stasiun akan melakukan produksi sesuai dengan kebutuhan stasiun konstrain, bukan sesuai kapasitasnya.

PEMBAHASAN

Untuk melakukan penjadwalan menggunakan algoritma penjadwalan dengan pendekatan TOC dilakukan dengan urutan-urutan penggunaan algoritma sebagai berikut:

Algoritma 1: penentuan waktu tunggu (*buffer time*), contoh perhitungan data laju kedatangan order X_5 adalah:
Penentuan laju kedatangan setiap order:

$$D^{(h)} = \frac{1}{MLT} = \frac{1}{(d^{(h)} - r^{(h)})_m} = D^{(h)} = 0,091$$

Untuk perhitungan data laju kedatangan setiap order dapat dilihat pada Tabel 3, 4 dan 5.

Algoritma 2: penentuan Etc dan Ltc. Hasil perhitungan selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 7.: Etc sebelum stasiun konstrain :

$$\begin{aligned} \text{ETCH (X5)} &= \text{SAAT SIAP} + (\text{EKSPETASI LEAD TIME P1} + \text{EKSPETASI LEAD TIME P2}) \\ \text{ETCH (X5)} &= 15 + (1,086 + 1,457) \\ &= 17, 5431 \end{aligned}$$

Ltch setelah stasiun konstrain Menganalisis *due date* setiap order dengan total *lead time* setelah konstrain untuk memperoleh *LtC*. Hasil perhitungan untuk setiap dari order ditunjukkan pada Tabel 6.:

Tabel 3. Laju kedatangan untuk setiap order

No. Order	Laju Kedatangan
X5	0,091
X6	0,071
X7	0,083
X8	0,067
X9	0,067

Tabel 4. Beban kerja untuk setiap stasiun

Stasiun Kerja	Beban Kerja
P1	0,379
P2	0,335
P3	0,633
P4	0,430

Tabel 5. Ekspektasi waktu tunggu untuk setiap stasiun kerja (hari)

Stasiun Kerja	Waktu Tunggu
1	0,3361
2	0,2071
3	1,2408
4	0,4764

Tabel 6. Etc dan Ltc untuk setiap order

Jenis Produk	No. Order	Ekspektasi Etc (hari)	Ekspektasi Ltc (hari)
1a	X5	17,5431	23,0254
3	X7	17,7931	23,2754
2b	X8	17,7931	28,0254
2a	X6	17,0431	24,2754
1b	X9	18,7931	29,0254

Algoritma 3: pendistribusian order-order di stasiun konstrain Dalam kasus ini, sistem produksi hanya mempunyai satu mesin sehingga algoritma tidak digunakan.

Tabel 7. Tabel hasil perhitungan ekspektasi *lead time*

Jenis Produk	No Order	Ekspektasi <i>lead time</i>				Total
		Sebelum Stasiun Konstrain		Stasiun Konstrain	Sesudah Stasiun Konstrain	
		P1	P2	P3	P4	
1a	X5	1,086	1,457	2,741	1,475	6,759
2a	X6	1,586	1,207	3,241	1,725	8,009
3	X7	1,586	1,207	3,491	1,475	7,759
2b	X8	1,086	0,707	2,241	1,975	6,009
1b	X9	1,086	0,707	2,741	1,475	6,009

Tabel 8. hasil perhitungan penjadwalan X5 tidak layak

Jenis Produk	No. Order	Etc	Waktu Proses	Set up	Ltc	Kelayakan
2a	X6	17,0431	2	0	24,2754	Layak
2b	X8	19,0431	1	0	28,0254	Layak
3	X7	20,5431	2,25	0,5	23,2754	Layak
1a	X5	24,2931	1,5	1,5	23,0254	Tidak Layak
1b	X9	25,7931	0	0	29,0254	Layak

Etc > Ltc penjadwalan tidak layak

Algoritma 4: penjadwalan untuk order di setiap mesin dengan pendekatan branch dan bound. Kasus ini selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan algoritma 4 yang akan menjadwalkan kelima order tersebut. Tahapan pertama kali dari algoritma 4 yang akan dijadwalkan pada kelima order tersebut. Tahapan pertama dari algoritma 4 adalah menghitung solusi inisial yang bertujuan untuk menentukan total waktu *setup* terendah yang dapat dicapai dengan menggunakan algoritma 4.

Algoritma 5: penentuan saat release setiap order ke rantai produksi, sehingga diperoleh hasil penjadwalan di setiap stasiun kerja. Perbandingan hasil penjadwalan dengan pendekatan FCFS dan TOC. Penjadwalan di Perusahaan (Penjadwalan *First Come First Serve*)

Tabel 9. Perhitungan waktu sisa *setup* dan total waktu *setup*

Alternatif	Σ sisa waktu (hari)	Σ sisa <i>setup</i> (hari)	t selesai (hari)
X5-X9-X6-X8-X7	1,5	2,5	19,50
X6-X8-X7-X5-X9	2	2	20,54
X7-X6-X8-X5-X9	1,5	2	20,04
X8-X6-X7-X5-X9	2	2	18,79
X9-X5-X6-X8-X7	1,5	2,5	20,29

Tabel 10. Tabel waktu *setup* antar jenis produk (hari)

Dari / Ke	Produk 1	Produk 2	Produk 3
Produk 1	0	1	1,5
Produk 2	1	0	0,5
Produk 3	1,5	0,5	0

Tabel 11. Tabel order-order yang akan dijadwalkan

Jenis Produk	No. Order	Waktu Proses (hari)				Total	Due date	Saat Siap
		P1	P2	P3	P4			
1a	X5	0,75	1,25	1,5	1,5	4,5	26	15
2a	X6	1,5	1	1	2	5,75	28	14
3	X7	1,25	1	1	2,25	5,5	27	15
2b	X8	0,75	0,5	0,5	1	3,75	32	17
1b	X9	0,75	0,5	0,5	1,5	3,75	32	17
Beban Stasiun Kerja		5,0	4,25	4,25	8,25			

Dalam sistem penjadwalan yang dilakukan di perusahaan, proses pembuatan produk berdasarkan pesanan ini yang paling dahulu tiba ditandai dengan saat siap terkecil. Sehingga urutan *release* ordernya sebagai berikut: Penjadwalan order X6, penjadwalan dimulai dari hari ke 15,00 (*release* P1 order X6).
 $Release\ P2 = release\ P1 + W.P\ 1\ order\ X6 + waktu\ tunggu\ P1$

$$= 15,00 + 1,5 + 0,34 = 16,84$$

Release P1 order X5:

$$Release\ P1 = saat\ release\ P2 + waktu\ setup\ (dari\ produk\ 2\ ke\ produk\ 1) = 16,84 + 1 = 17,84$$

$$Release\ P2 = release\ P1 + W.P\ 1\ order\ X5 + waktu\ tunggu :$$

$$P1 = 17,8 + 0,75 + 0,34 = 18,93$$

Untuk penentuan saat *release* seluruh order dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Penentuan saat *release* setiap order dan hasil penjadwalan di setiap stasiun kerja yang dilakukan di perusahaan dalam satuan hari

No Produk	Saat Release (hari)				Saat Siap	Saat release	Due date	Saat selesai	Waktu tinggal	Waktu tinggal aktual	
	P1	P2	P3	P4							
X6	15,00	16,84	18,04	21,28	14	15,00	28	23,00	8,00	13,00	
X5	17,84	18,93	21,28	24,02	15	17,84	26	25,49	7,56	7,65	
X7	20,43	22,02	24,02	27,51	15	20,43	27	28,98	8,55	6,57	
X8	22,52	24,02	27,51	29,75	16	22,52	31	31,72	9,20	8,48	
X9	25,02	27,51	29,75	32,49	17	25,07	32	33,96	8,94	6,98	
Rata-rata								8,45	8,25		

Penjadwalan yang dilakukan di perusahaan adalah sistem penjadwalan yang menggunakan *First Come First Serve*. Yaitu order yang akan diproses di lantai produksi hanya berdasarkan order yang datang lebih dulu dan tidak memperhatikan *due date* setiap order. Hal ini menyebabkan sering terjadinya setup yang berulang-ulang dan hal yang paling merugikan adalah terjadinya keterlambatan ini yang ditandai dengan order diselesaikan melebihi *due date* yang ditentukan. Salah satu kriteria terpenting untuk sistem manufaktur MTO adalah ketepatan pemenuhan *due date* yang telah ditentukan. Penjadwalan dengan pendekatan FCFS yang dilakukan di perusahaan ternyata mempunyai order yang diselesaikan lebih lambat dari *due datenya*, yaitu order X9 yang memiliki saat selesai pada hari ke 33,96. Order X9 memiliki keterlambatan selama 1 hari 9,6 jam. Keterlambatan dari *due date* yang telah ditentukan disebabkan penjadwalan FCFS hanya melihat kondisi saat setiap order tanpa memperhatikan *due date* dan waktu *setup* setiap order.

Hasil penjadwalan ini dengan pendekatan FCFS menghasilkan urutan order X6 - X5 - X7 - X8 - X9 dengan total waktu setup 4 hari. Nilai rata-rata waktu

tinggal dan waktu tinggal aktual terjadi pada penjadwalan FCFS menunjukkan *Work In Process* (WIP) di lantai produksi yang terjadi, yaitu 8 hari 4,5 jam untuk waktu aktual dan 8 hari 5,2 jam untuk waktu tinggal aktual. *Makespan* yang terjadi selama 18,96 hari.

Penjadwalan ini menggunakan pendekatan *Theory of Constraint* (TOC), usulan algoritma penjadwalan dengan pendekatan TOC disusun untuk mengakomodasikan beberapa karakteristik sistem manufaktur MTO repetitif yang umum, misalnya untuk kasus jumlah mesin di stasiun konstrain yang berbeda. Di samping itu, penentuan saat yang tepat untuk setiap order direlease ke lantai produksi perlu dilakukan agar order tersebut tidak di stasiun konstrain sesuai jadwal yang telah ditentukan. Oleh karena itu, algoritma penjadwalan yang diusulkan akan mempunyai fungsi-fungsi sebagai berikut: a). Minimasi total waktu *setup*, sebagai salah satu cara untuk meningkatkan utilisasi stasiun konstrain. Waktu *setup* merupakan waktu yang tidak produktif, tetapi *setup* harus dilakukan agar mesin dapat memproses material dengan baik. Proses minimasi jumlah *setup* dilakukan dengan pertimbangan saat selesai setiap order tidak

melampaui *due datenya* dan setiap order tidak dijadwalkan di stasiun konstrain sebelum saat siap order tersebut untuk diproses di stasiun konstrain. b).Penjadwalan order-order di setiap mesin dalam stasiun konstrain. Penjadwalan ini merupakan langkah untuk menemukan jumlah total *setup* yang minimum dan layak untuk setiap order. Order yang dijadwalkan layak, jika order tersebut dijadwalkan dengan tidak melanggar *due date* setiap order yang dijadwalkan. c).Penentuan saat release setiap order yang dijadwalkan, dalam penjadwalan ini dengan pendekatan TOC diperlukan *buffer time* untuk menghindari keterlambatan order

tiba di stasiun konstrain. Penentuan besarnya *buffer time* dalam penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan algoritma Zijm (Zijm, 1997). Algoritma ini untuk memperkirakan *lead time* dengan menggunakan pendekatan antrian. *Buffer time* sebelum stasiun konstrain akan menjadi *buffer time* bagi stasiun konstrain dan *buffer time* setelah stasiun konstrain akan menjadi *buffer time* untuk pengiriman.

Untuk memperoleh penjadwalan yang optimal digunakan algoritma *branch and bound*. Hasil penjadwalan dengan pendekatan TOC (dalam satuan hari) dapat dilihat pada Tabel 13 dan 14.

Tabel 13. Penentuan saat *release* setiap order dan hasil penjadwalan di setiap stasiun kerja menggunakan pendekatan TOC dalam satuan hari.

No Produk	Saat Release (hari)				Saat Siap	Saat release	Due date	Saat selesai	Waktu tinggal	Waktu tinggal aktual
	P1	P2	P3	P4						
X7	15,00	16,25	17,79	20,04	15	15,00	27	21,52	6,52	12,00
X5	19,00	19,75	21,54	23,04	15	19,00	26	24,52	5,52	7,00
X6	21,00	22,50	24,04	26,04	14	21,00	28	27,77	6,77	7,00
X8	24,25	25,00	26,04	27,04	16	24,25	31	29,02	4,77	6,75
X9	26,25	27,00	28,04	29,54	17	26,25	32	31,02	4,77	5,75
Rata-rata									5,67	7,70

Tabel 14. Perbandingan Hasil Akhir Menggunakan Penjadwalan Metode FCFS dan TOC

Kegiatan	Makespan		Keterangan	Waktu Set Up		Keterangan
	Metode FCFS (hari)	Metode TOC (hari)		Metode FCFS (hari)	Metode TOC (hari)	
Penjadwalan konstrain	18,96	16,02	Terjadi selisih se-besar 2,94 hari, maka penghematan terdapat pada metode TOC	4	1,22	Terjadi selisih sebesar 2,78 hari, maka penghematan terdapat pada metode TOC (terjadi karena terdapat keterlambatan pada order X9 selama 1,96 hari pada metode FCFS)

KESIMPULAN

Melalui algoritma penjadwalan dengan pendekatan TOC menunjukkan adanya perbaikan dalam utilisasi stasiun konstrain dibandingkan dengan sistem penjadwalan FCFS, hal ini dapat dibuktikan dengan *makespan* yang lebih rendah bila menggunakan penjadwalan dengan menggunakan pendekatan TOC yaitu 16,02 hari dibandingkan dengan *makespan* yang dihasilkan bila menggunakan pendekatan FCFS yaitu 18,96 hari (selisih 2,94 hari).

Pada penjadwalan dengan pendekatan TOC urutan order yang diperoleh adalah X7 - X5 - X6 - X8 - X9 dengan jumlah total waktu *setup* selama 1,22 hari dan urutan order dengan penjadwalan FCFS adalah X6 - X5 - X7 - X8 - X9 dengan jumlah total waktu *setup* selama 4 hari. Terjadinya selisih waktu *setup* antara kedua jenis penjadwalan yang dilakukan, dikarenakan penjadwalan dengan FCFS mengalami keterlambatan untuk order X9 selama 1,96 hari.

Hasil penjadwalan yang dilakukan menunjukkan bahwa rata-rata waktu tinggal dengan menggunakan penjadwalan TOC yang diusulkan lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan penjadwalan FCFS, yaitu terjadi penurunan selama 2,78 hari untuk waktu tinggal dan 0,82 hari untuk waktu tinggal aktual, penurunan waktu tinggal menyebabkan terjadinya penurunan *Work In Process* (WIP) yang merupakan salah satu kriteria performansi sistem penjadwalan yang menggunakan pendekatan TOC. Penyebab terjadi penurunan waktu tinggal aktual pada penjadwalan TOC adalah saat *release* setiap order yang disesuaikan dengan kebutuhan di stasiun konstrain, sehingga tidak terjadi antrian yang cukup besar di stasiun konstrain.

DAFTAR PUSTAKA

- Arya, H, S., 2004, *Optimasi Common Due Date pada Kasus General Flow Shop Single Machine Sequences Independent Setup Time dengan Algoritma Genetik*, Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Aswita, E, S., 2003, *Penjadwalan Produksi Flow Shop Untuk Mengoptimalkan Lead Time Manufaktur Pada Lingkungan Manufaktur Repetitive Make To Order*, Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Charthy, M, 1993, *Addressing the Gap in Scheduling Research: a review of Optimization Heuristic Methods in Production Scheduling*, International Journal of Production Research, Vol. 31 hal 59-79.
- Fogarty, Donald W., Hoffman R. Thomas, Stonebraker Peter W, *Production And Operation Management*, Cincinnati South Westrn Publishing Co, 1998.
- Goldratt, E, M., 1997, *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*.
- Halim, A, H., et al., 1993, *Batch Scheduling, for Production System Under Just In Time Environment*.
- Suryati, E, 2000, *Penentuan Aturan Dispatching Terbaik Pada Proses Produksi Penjadwalan Job Shop "Side Wall" dengan Pendekatan Algoritma Genetik* Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Toha, I, S., Taroepratjeka, H, 1997, *Optimasi Penentuan Waktu Manufaktur Produk pada Sistem Manufaktur Make to Order Job Shop*, Jurnal Teknik Management Industri, Vol. 17 (2).
- Umble, M, M., Srikanth, M, L., 1996, *Synchronous Manufacturing: Principles of World Class Excellen*, The Spectrum Publishing Company Inc.,
- Zijm, W, H, M., 1997, *Capacity Planning, Lead Time Managemen, and Shop Floor Scheduling*.