

PENGEMBANGAN ALGORITMA PENJADWALAN DAN MAINTENANCE MESIN

DIAN RETNO SARI DEWI DAN DINI ENDAH

Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

E-mail: dianretnosd@yahoo.com

ABSTRAK

PT "X" adalah perusahaan yang bergerak di bidang wood adhesive. Penelitian ini dilakukan di pabrik adhesive yang memiliki 10 mesin reaktor kimia dalam proses produksinya. Mesin reaktor kimia memiliki kapasitas produksi yang berbeda. Penelitian ini mengembangkan model algoritma penjadwalan produksi yang terintegrasi dengan pemeliharaan mesin. Obyek yang akan dipertahankan adalah komponen penting dari gearbox reaktor kimia sebagai propeller drive. Pemilihan komponen kritis dilakukan melalui analisis diagram pareto. Dari analisis diagram pareto diperoleh bahwa komponen penting dari setiap reaktor kimia adalah bearing. Interval waktu pemeliharaan yang optimal diturunkan berdasarkan perhitungan optimal-C (tp). Interval waktu yang optimal untuk setiap reaktor kimia dari no. 1 sampai 10 adalah masing-masing 1870, 1200, 1132, 1899, 1901, 1610, 1586, 2600, 2071, dan 1932 (jam). Interval waktu perawatan tersebut dialokasikan untuk penjadwalan produksi. Penjadwalan produksi dilakukan dengan memberikan aturan urutan pekerjaan sesuai dengan slack time. Aturan ini dimaksudkan untuk mungkin menetapkan prioritas pesanan produksi yang harus dikerjakan pada prioritas pertama berdasarkan urutan. Penjadwalan job yang terintegrasi dengan pemeliharaan pada contoh numerik bisa memberikan efisiensi total biaya keterlambatan sebesar 15,38% dan 9,4% untuk algoritma dengan penyisipan order.

Kata kunci: $C(tp)$, Penjadwalan job, slack time

ABSTRACT

PT "X" is a company which engaged in wood adhesive. This research was conducted in adhesive plant which have 10 chemical reactor machines in production process. Those chemical reactor machines have different production capacity. This research developed the algorithm model of production scheduling integrated with machine maintenance. The object to be maintained is critical component of gearbox of chemical reactor as propeller drive. Critical component selection was done through pareto chart analysis. From the analysis of pareto chart it was obtained that the critical component of each chemical reactors is bearing. The optimal interval time of maintenance is derived based on optimal-C (tp) calculation. The optimal interval time for each chemical reactors from no. 1 to 10 are respectively 1870, 1200, 1132, 1899, 1901, 1610, 1586, 2600, 2071, and 1932 (hour). The interval time of maintenance is allocated to production scheduling. Production scheduling was conducted by giving the rule of job sequence in accordance with slack time. This rule was intended to probably assign the priority of production order which should be produced at the first priority based on the sequence. Integrated job scheduling with maintenance at the numerical example could take the efficiency of total tardiness cost as 15,38% and 9,4% if only there is insertion between production order.

Key words: $C(tp)$, job scheduling, slack time

PENDAHULUAN

Penjadwalan produksi mempunyai dua manfaat utama, yaitu: mengalokasikan sejumlah sumber daya untuk pengerjaan beberapa pengerjaan dan juga mempunyai fungsi perencanaan internal seperti pengadaan material, perawatan preventif dan rencana distribusi ke konsumen (Blank, 2004). Biasanya penjadwalan produksi akan dilakukan tersendiri dan terpisah dengan penjadwalan perawatan mesin, dikarenakan seringkali asumsi dalam penjadwalan produksi adalah mesin memiliki tingkat keandalan sempurna padahal permasalahan

real hampir dipastikan tidak akan terjadi (Baker, 1970). Dalam karya tulis ini akan dikembangkan algoritma penjadwalan yang terintegrasi dengan jadwal perawatan mesin.

Secara umum, perawatan mesin dikategorikan menjadi dua: perawatan preventif dan perawatan korektif. Perawatan korektif akan membutuhkan biaya yang lebih besar karena mesin sudah terlanjur rusak dan kerusakan komponen yang satu dapat menyebabkan kerusakan komponen yang lain (Ramakumar,1993). Perawatan preventif adalah mencegah sebelum kerusakan terjadi dengan

menentukan interval perawatan dengan kriteria tertentu.

Model penjadwalan produksi terintegrasi dengan penjadwalan perawatan yang dikembangkan akan diaplikasikan pada perusahaan yang bergerak di bidang *wood adhesive* (Staudacher, 2000). Perusahaan ini memiliki 19 macam varian produk *adhesive* yang menggunakan sepuluh reaktor kimia dengan kapasitas produksi yang berbeda-beda dalam proses produksinya. Banyaknya varian produk yang harus diproduksi dan kapasitas produksi yang terbatas membuat perusahaan ini seringkali mengalami keterlambatan (*tardiness*) dan sulit untuk menentukan prioritas dalam memenuhi permintaan konsumen. Selama ini pesanan atau *job* yang pertama kali diterima akan diproses terlebih dahulu (*first come first serve*). Hal ini menyebabkan biaya *tardiness* menjadi besar.

Banyak hambatan yang dapat mempengaruhi kelancaran proses produksi untuk dapat memenuhi target produksi, misalnya terjadi kerusakan mesin yang dapat menyebabkan proses produksi menjadi terhambat dan berhenti. Perusahaan telah melakukan perawatan mesin, namun perawatan mesin yang dilakukan hanya berupa perawatan korektif yaitu melakukan perbaikan atau mengganti komponen jika terjadi kerusakan. Tanpa disadari tindakan tersebut justru meningkatkan biaya produksi jika penggantian komponen dilakukan pada saat proses produksi sedang berlangsung (Asano, 1999).

Karya tulis ini mengembangkan penjadwalan produksi yang terintegrasi dengan penjadwalan perawatan mesin. Penjadwalan produksi dilakukan dengan memberikan urutan pengerjaan berdasarkan aturan *slack time*. Aturan ini untuk dapat memberikan prioritas pada *order* produksi yang harus diproduksi terlebih dahulu sesuai dengan urutan prioritasnya untuk mesin paralel dengan kapasitas yang berbeda. Pengembangan algoritma penjadwalan terintegrasi dengan penjadwalan perawatan mesin juga mampu mengakomodasikan order (Jardine, 2006).

METODE

Penentuan Komponen Kritis

Pembuatan penjadwalan perawatan mesin terlebih dilakukan terlebih dahulu sebelum mengintegrasikan dengan penjadwalan produksi. Untuk membuat sistem penjadwalan perawatan mesin, yang harus dilakukan adalah melakukan penentuan komponen kritis dengan menggunakan analisis pareto. Analisis pareto ini berdasarkan atas jumlah kerusakan terbesar yang terjadi selama tiga tahun (tahun 2006–2008).

Uji Distribusi Waktu antar Kerusakan Komponen Kritis

Pada tahap ini dilakukan penetapan distribusi dari waktu antar kerusakan untuk tiap komponen kritis. Uji distribusi ini menggunakan *software* Minitab 14. Dari hasil *software* ini dapat diketahui parameter-parameter beserta distribusi yang paling cocok untuk mewakili waktu antar kerusakan untuk tiap komponen pada tiap mesin yang berbeda.

Penghitungan MTTF

Langkah selanjutnya adalah dilakukan penghitungan *mean time to failure* (MTTF). MTTF digunakan untuk menyatakan rata-rata waktu pemakaian komponen sampai komponen tersebut rusak atau nilai harapan (ekspektasi) lama sebuah komponen dapat digunakan sampai mengalami kerusakan atau kegagalan.

Penghitungan Biaya Perawatan Komponen Kritis

Perhitungan biaya perawatan untuk komponen kritis ini dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah biaya perawatan untuk satu kali pencegahan sedangkan bagian kedua merupakan biaya perbaikan satu kali kerusakan. Biaya perawatan ini meliputi biaya penggantian komponen serta *opportunity cost* akibat dari adanya perawatan mesin.

Penghitungan Interval Waktu Perawatan Mesin yang Optimal

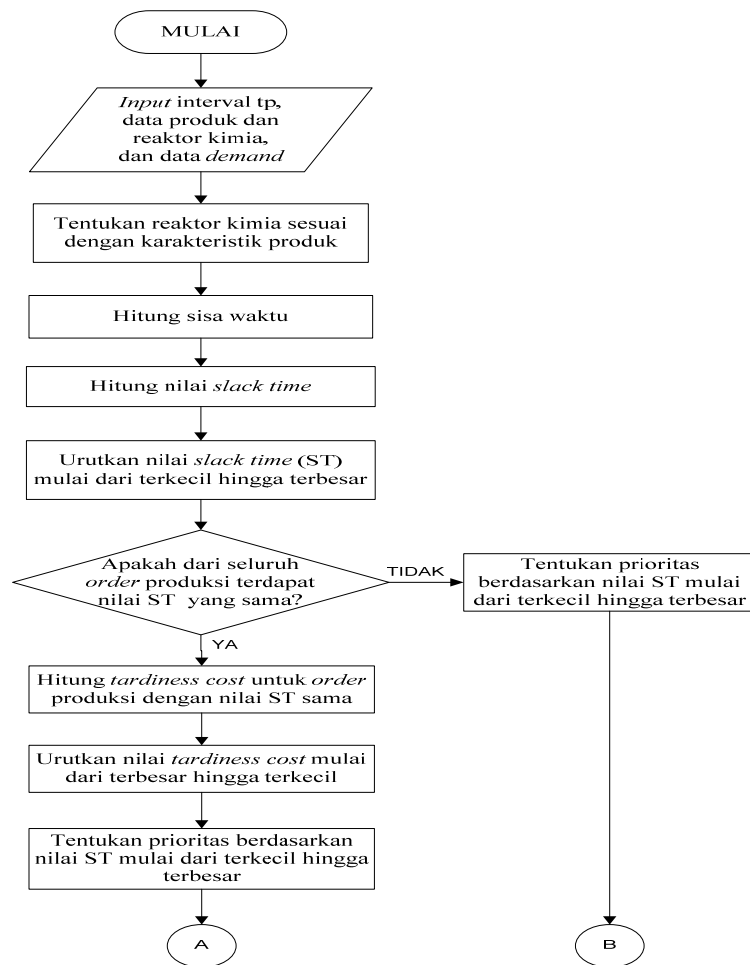
Pada bagian ini dilakukan penghitungan penjadwalan perawatan yang paling optimal untuk komponen kritis pada tiap mesin reaktor. Pada bagian ini ditentukan pola *maintenance* yang optimal dengan mencari keseimbangan antara biaya perawatan dan biaya kerusakan pada *total cost* yang terkecil (optimal).

Pembuatan Algoritma

Berikut merupakan serta algoritma penjadwalan produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin. *Flowchart* untuk algoritma ini disajikan pada Gambar 1.

Algoritma Penjadwalan Produksi dengan Mengintegrasikan Perawatan Mesin

Inputkan data sebagai berikut: Masukkan data interval waktu perawatan mesin yang telah ditetapkan (tp), masukkan data produk berupa nama produk, warna produk, waktu produksi dalam satuan jam, dan *tardiness cost* dalam satuan per kilogram



Gambar 1. Flowchart Algoritma Penjadwalan Produksi dengan Mengintegrasikan Perawatan Mesin

dan hari, masukkan data reaktor kimia berupa jumlah reaktor kimia yang tersedia beserta kapasitas reaktor kimia dan paralel reaktor kimia berdasarkan produk serta masukkan data permintaan konsumen atau *order* produksi berupa nama produk yang dipesan, jumlah permintaan dalam satuan kilogram, dan waktu jatuh tempo (*due date*), hitung nilai *slack time* dengan langkah-langkah sebagai berikut: hitung sisa waktu antara waktu jatuh tempo dan waktu sekarang dalam satuan jam. Sisa waktu ini dapat dinotasikan sebagai berikut:

Sisa waktu = waktu jatuh tempo – waktu sekarang

Kemudian tentukan reaktor kimia yang sesuai dengan karakteristik produk., lalu hitung nilai *slack time* dari *order* produksi yang telah dimasukkan dengan rumus sebagai berikut (Fogarty, 1991).

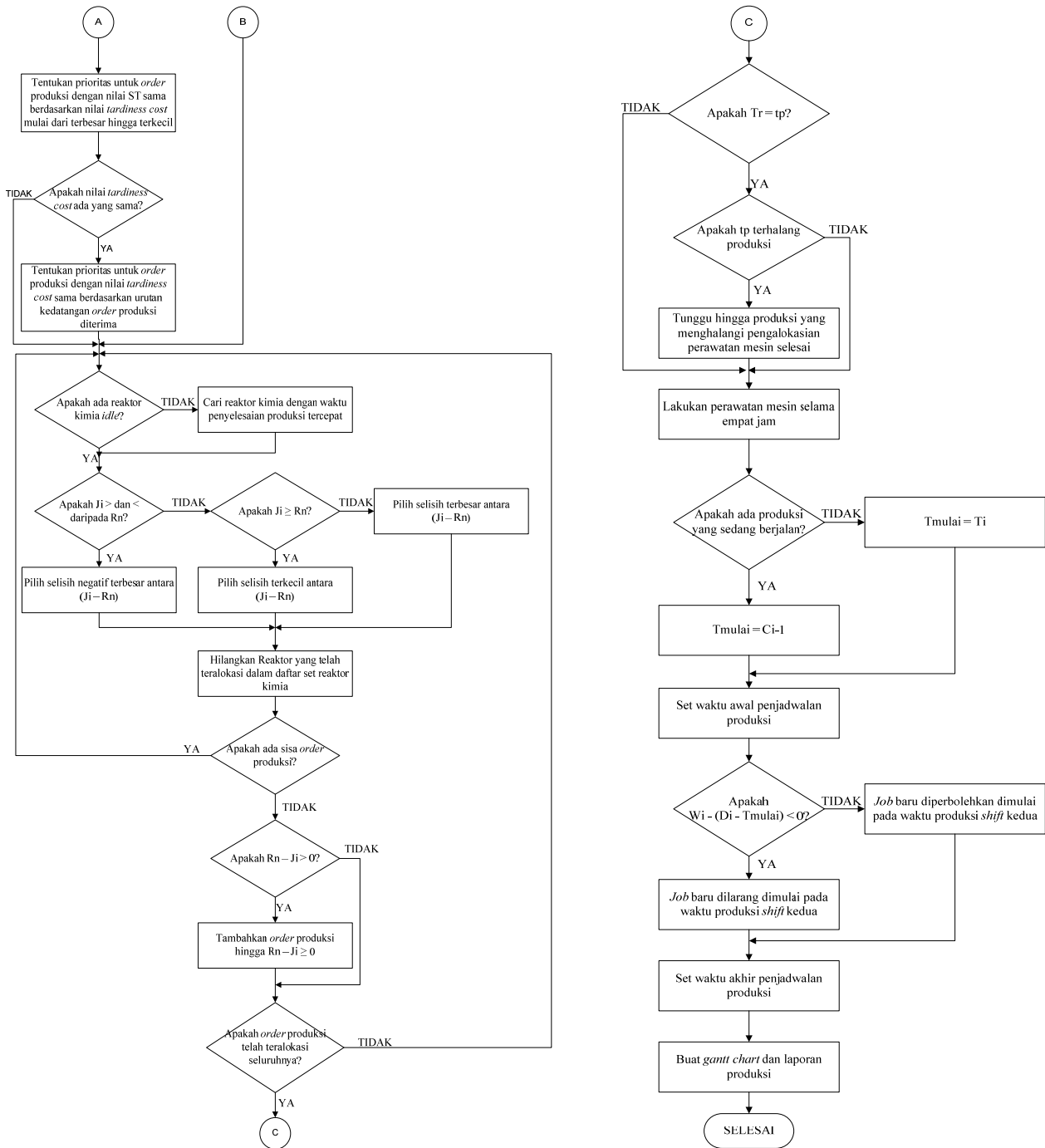
Slack time = *due date* – *present date* – *processing time remaining*

Terakhir urutkan nilai *slack time* yang telah dihitung mulai dari yang terkecil hingga yang terbesar.

Jika dari nilai *slack time order* produksi yang telah dihitung tidak ada yang bernilai sama, lanjutkan ke langkah 4. Tetapi jika dari nilai *slack time order* produksi yang telah dihitung ada yang bernilai sama, lanjutkan ke langkah 5. Tentukan prioritas *order* produksi berdasarkan nilai *slack time*. *Order* produksi dengan nilai *slack time* terkecil akan mendapatkan prioritas pertama untuk dijadwalkan, kemudian lanjutkan ke langkah 6. Hitung *tardiness cost per demand* khusus untuk *order* produksi dengan nilai *slack time* sama dengan rumus sebagai berikut:

Tardiness cost per demand = *tardiness cost* (Rp/kg) × *demand* (kg)

Kemudian urutkan nilai *tardiness cost per demand* mulai dari terbesar hingga terkecil dan kemudian tentukan prioritas *order* produksi berdasarkan nilai *slack time*. *Order* produksi dengan nilai *slack time* terkecil mendapatkan prioritas pertama untuk dijadwalkan. Lalu tentukan prioritas *order* produksi yang memiliki nilai *slack time* sama



Gambar 2. Flowchart algoritma penjadwalan produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin (lanjutan) tp adalah interval waktu perawatan mesin (dalam satuan jam), ST adalah: *slack time* (dalam satuan jam), J_i adalah jumlah *order* produksi ke- i (dalam satuan kilogram), R_n adalah kapasitas reaktor kimia nomer n (dalam satuan kilogram), T_r adalah waktu pemakaian reaktor kimia (dalam satuan jam), T_{mulai} adalah waktu tunggu hingga *job* ke- i diproses., C_{i-1} adalah *completion time job* ke- $i-1$ W_i adalah waktu produksi *job* ke- i (dalam satuan jam), D_i adalah waktu jatuh tempo *job* ke- i (dalam satuan jam).

berdasarkan nilai *tardiness cost per demand*. *Order* produksi dengan nilai *tardiness cost per demand* terbesar mendapatkan prioritas lebih besar daripada *order* produksi lainnya yang memiliki nilai *slack time* sama. Penentuan prioritas ini dilakukan pada

tiap kelompok *order* produksi dengan nilai *slack time* sama. Jika dari nilai *tardiness cost* yang telah dihitung tidak ada yang bernilai sama, lanjutkan ke langkah 6. Jika dari nilai *tardiness cost* yang telah dihitung ada yang bernilai sama, tentukan prioritas

berdasarkan urutan kedatangan *order* produksi. *Order* produksi yang pertama kali diterima akan mendapatkan prioritas lebih besar daripada *order* produksi lainnya yang memiliki nilai *tardiness cost* sama.

Alokasikan *order* produksi ke reaktor kimia sesuai dengan urutan prioritasnya dengan langkah-langkah sebagai berikut: Cek reaktor kimia yang sedang tidak beroperasi (*idle*). Namun jika semua reaktor kimia sedang beroperasi, cek reaktor kimia yang memiliki waktu penyelesaian produksi tercepat. Jika jumlah *order* produksi ada yang lebih besar dan lebih kecil daripada kapasitas reaktor kimia yang tersedia, maka pilih selisih negatif terbesar antara jumlah *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang tersedia ($J_i - R_n$). Kemudian lanjutkan ke langkah 7. Namun jika jumlah *order* produksi lebih besar daripada kapasitas reaktor kimia yang tersedia, maka pilih selisih terkecil antara jumlah *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang tersedia ($J_i - R_n$). Kemudian lanjutkan ke langkah 7. **Jika jumlah *order* produksi lebih kecil daripada kapasitas reaktor kimia yang tersedia, maka pilih selisih terbesar antara jumlah *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang tersedia ($J_i - R_n$).** Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya

Hilangkan reaktor kimia yang telah teralokasi dari daftar set reaktor kimia. Cek sisa *order* produksi. Jika terdapat sisa *order* produksi yang belum teralokasi, lakukan kembali langkah sebelumnya. Namun **jika tidak terdapat sisa *order* produksi yang belum teralokasi, lanjutkan ke langkah berikutnya** Cek selisih antara *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang teralokasi. Jika terdapat selisih antara *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang teralokasi, lakukan penambahan *order* produksi hingga kapasitas maksimum reaktor kimia yang teralokasi (bersifat pilihan). Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya. Jika tidak terdapat selisih antara *order* produksi dengan kapasitas reaktor kimia yang teralokasi, lanjutkan ke langkah berikutnya **Cek pengalokasian seluruh *order* produksi.** Jika terdapat *order* produksi yang belum teralokasi, lakukan kembali langkah sebelumnya. Namun jika seluruh *order* produksi telah teralokasi, lanjutkan ke langkah berikutnya **Cek waktu pemakaian reaktor kimia.** Jika waktu pemakaian reaktor kimia telah sama dengan interval waktu perawatan, lanjutkan ke langkah berikutnya. Namun **jika waktu pemakaian reaktor kimia tidak sama dengan interval waktu perawatan, lanjutkan ke dua langkah berikutnya.** Cek jadwal perawatan mesin apakah terhalang oleh produksi yang sedang berjalan atau tidak. Jika jadwal perawatan mesin terhalang oleh proses

produksi yang sedang berlangsung, alokasikan interval waktu perawatan mesin setelah proses produksi yang menghalangi jadwal perawatan mesin tersebut selesai, kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya. Namun jika jadwal perawatan mesin tidak terhalang oleh proses produksi yang sedang berlangsung, alokasikan interval waktu perawatan mesin sesuai dengan interval waktu perawatan yang telah ditentukan. Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya.

Tentukan waktu mulai produksi dengan pertimbangan sebagai berikut: Jika pada saat mulai melakukan produksi terdapat sisa produksi yang belum selesai dikerjakan, maka waktu mulai produksi untuk *order* produksi baru yang akan dijadwalkan adalah waktu sekarang ditambah dengan waktu sisa operasi produksi pada penjadwalan sebelumnya. Secara matematis dapat dinotasikan sebagai:

$$T_{\text{mulai}} = C_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, i$$

Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya.

Jika pada saat mulai melakukan produksi terdapat sisa produksi yang belum selesai dikerjakan, maka waktu mulai produksi untuk *order* produksi baru yang akan dijadwalkan adalah waktu sekarang. Secara matematis dapat dinotasikan sebagai:

$$T_{\text{mulai}} = T_i \quad i = 1, 2, \dots, i$$

Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya.

Minimalkan penggunaan waktu produksi *shift* kedua pada penjadwalan produksi dengan pertimbangan sebagai berikut: Jika waktu produksi mencukupi untuk memenuhi *order* produksi dari waktu jatuh tempo atau secara matematis dapat dinotasikan dengan $W_i - (D_i - T_{\text{mulai}}) < 0$, maka penggunaan waktu produksi pada *shift* kedua tidak diperbolehkan untuk memulai produksi *job* baru. Namun waktu produksi *shift* kedua hanya digunakan untuk melanjutkan produksi dari *shift* pertama dan ketiga yang belum selesai. Kemudian lanjutkan ke langkah 15. Jika waktu produksi tidak mencukupi untuk memenuhi *order* produksi dari waktu jatuh tempo atau secara matematis dapat dinotasikan dengan $W_i - (D_i - T_{\text{mulai}}) \geq 0$, maka penggunaan waktu produksi pada *shift* kedua untuk memulai produksi *job* baru dan melanjutkan produksi dari *shift* pertama dan ketiga yang belum selesai. Kemudian lanjutkan ke langkah berikutnya.

Set waktu akhir penjadwalan produksi untuk tiap *order* produksi dan perawatan mesin. Buat *gant chart* penjadwalan produksi dan perawatan mesin beserta laporan produksi. Proses penjadwalan produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin telah selesai.

Algoritma Penyisipan Order Produksi (Insert Job)

Insert job ini merupakan penyisipan *order* produksi pada rentang waktu penjadwalan produksi utama sedang berjalan. *Insert job* ini mengantisipasi masalah jika ada *order* produksi yang datang tiba-tiba dan mendesak untuk segera diproduksi. Berikut merupakan langkah-langkah jika terdapat *insert job*: Masukkan data permintaan (*demand* berupa nama produk yang dipesan, jumlah permintaan dalam satuan kilogram, dan waktu jatuh tempo (*due date*). Kemudian tentukan *order* produksi yang belum berjalan pada penjadwalan produksi utama. Lakukan langkah 3 algoritma penjadwalan produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin.

Pembuatan Contoh Numerik dan Program Aplikasi Penjadwalan Produksi dengan Mengintegrasikan Jadwal Perawatan Mesin

Setelah selesai membuat algoritma, langkah berikutnya adalah membuat contoh numerik dari algoritma yang telah dibuat. Contoh numerik ini bertujuan untuk menunjukkan sistem penjadwalan produksi untuk meminimalkan total biaya keterlambatan (*total tardiness cost*) dan menentukan prioritas *order* produksi dalam memenuhi permintaan konsumen. Penjadwalan produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin ini diaplikasikan dalam bahasa pemrograman Borland Delphi 7.

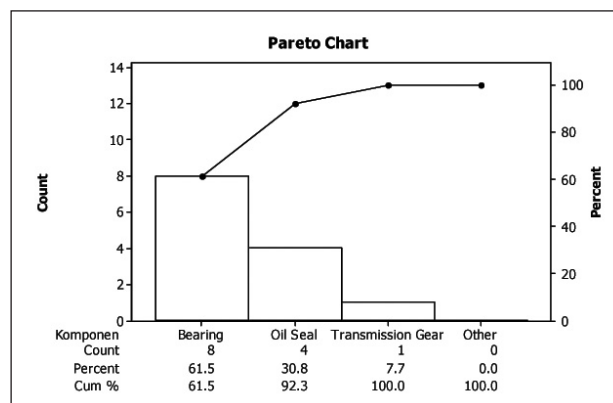
Analisis Penjadwalan Perawatan Mesin dan Penjadwalan Produksi

Langkah berikutnya adalah membuat analisis berdasarkan atas data yang telah dikumpulkan dan diolah. Analisis perawatan mesin dilakukan dengan mengukur tingkat keandalan interval perawatan yang telah ditetapkan dan interval perawatan yang jatuh pada waktu produksi sedang berjalan. Analisis perawatan mesin juga ditinjau dari tingkat efisiensi antara total biaya perawatan pencegahan dan kerusakan. Sedangkan analisis penjadwalan produksi berdasarkan pada contoh numerik dengan dilakukan perbandingan total biaya keterlambatan (*total tardiness cost*) dengan metode usulan dan metode perusahaan yaitu *first come first serve* (FCFS) untuk mengetahui tingkat penghematan (efisiensi) metode usulan terhadap metode perusahaan. Analisis penjadwalan produksi juga ditinjau dari total biaya keterlambatan (*total tardiness cost*) dengan metode usulan dan metode perusahaan jika terjadi penyisipan *order* produksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Komponen Kritis

Penentuan komponen kritis *gearbox* dilakukan dengan menggunakan analisis pareto yang berdasarkan jumlah kerusakan tertinggi selama tiga tahun (tahun 2006 sampai dengan tahun 2008). Contoh analisis pareto dari reaktor kimia nomer 1 digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis pareto dari reaktor kimia nomer 1

Berdasarkan analisis pareto yang telah dilakukan seperti pada gambar 3 menunjukkan bahwa komponen *bearing* merupakan komponen yang paling sering mengalami kerusakan. Oleh karena itu, untuk penentuan komponen kritis dari *gearbox* reaktor kimia nomer 1 ditetapkan adalah komponen *bearing*. Sedangkan untuk reaktor kimia nomer 2 sampai dengan nomer 10 ditetapkan komponen *bearing* sebagai komponen kritis berdasarkan analisis pareto dengan cara yang sama pada reaktor kimia nomer 1.

Data Waktu Antar Kerusakan Komponen Kritis Gearbox (Bearing)

Komponen kritis *gearbox* untuk tiap reaktor kimia adalah komponen *bearing*. Waktu antar kerusakan komponen adalah waktu pada saat komponen mengalami kerusakan dan dilakukan perbaikan atau penggantian komponen dengan komponen baru hingga komponen tersebut rusak kembali.

Penghitungan Mean Time to Failure (MTTF)

Mean time to failure merupakan rata-rata waktu ekspektasi terjadinya kerusakan komponen atau waktu pemakaian komponen hingga komponen tersebut mengalami kerusakan.

Tabel 1. Distribusi Waktu Antar Kerusakan Komponen *Gearbox (Bearing)*

Mesin	Distribusi	Parameter
Reaktor 1	Lognormal	7,87766; 0,27892 (Location; Scale)
Reaktor 2	Weibull	4,40492; 1742,35495 (Shape; Scale)
Reaktor 3	Lognormal	7,40811; 0,32386 (Location; Scale)
Reaktor 4	Normal	2387,25; 288,56232 (Location; Scale)
Reaktor 5	3-Parameter Weibull	0,43059; 282,88665; 1700,8299 (Shape; Scale; Threshold)
Reaktor 6	Lognormal	7,73599; 0,2862 (Location; Scale)
Reaktor 7	Lognormal	7,72902; 0,31408 (Location; Scale)
Reaktor 8	Normal	3012,17; 216,774 (Location; Scale)
Reaktor 9	Normal	2586,42857; 309,75897 (Location; Scale)
Reaktor 10	Lognormal	7,75185; 0,31597 (Location; Scale)

Tabel 2. MTTF komponen kritis *bearing* dalam satuan jam

Mesin	MTTF
Reaktor 1	2828,71
Reaktor 2	1585,33
Reaktor 3	1729,64
Reaktor 4	2387,25
Reaktor 5	2251,5
Reaktor 6	2371,63
Reaktor 7	2371,5
Reaktor 8	3012,17
Reaktor 9	2586,43
Reaktor 10	2428,57

Trade off Interval Waktu Perawatan dan Total Cost Minimum

Interval waktu perawatan mesin yang paling optimal dapat ditentukan dengan cara melakukan *tradeoff* antara interval waktu perawatan dengan total biaya perawatan mesin hingga diketahui interval waktu perawatan dengan total biaya perawatan yang minimum. Contoh perhitungan interval perawatan mesin yang paling optimal untuk reaktor kimia nomer 5 ditampilkan pada Tabel 5.

Perhitungan Biaya Satu Kali Perawatan Pencegahan *Bearing* (Cp)

Tabel 3. Rekapitulasi total biaya perawatan pencegahan *bearing* (Cp)

Reaktor	WktPerawtn	KapReaktor	RataProfit	HrgKomp	JumlhKomp	BiayaOp	BiayaTotal
1	4	30,000	7,500	6,500,000	1	60,000	106,560
2	4	24,000	7,500	5,800,000	1	60,000	85,860
3	4	12,500	7,500	3,210,000	1	60,000	44,936,667
4	4	14,500	7,500	3,600,000	1	60,000	51,993,333
5	4	17,500	7,500	4,000,000	1	60,000	62,393,333
6	4	5,400	7,500	1,750,000	1	60,000	19,810,000
7	4	18,000	7,500	4,000,000	1	60,000	64,060,000
8	4	2,500	7,500	905,000	1	60,000	9,298,333
9	4	3,000	7,500	1,200,000	1	60,000	11,260,000
10	4	600	7,500	700,000	1	60,000	2,760,000

Perhitungan biaya perbaikan kerusakan komponen *bearing*

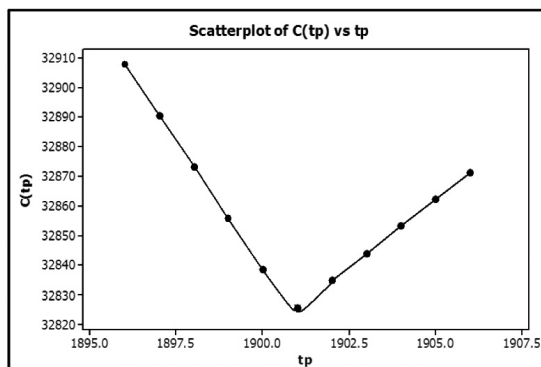
Tabel 4. Rekapitulasi total biaya perbaikan

Reaktor	WktPerbaikan	KapReaktor	RataProfit	HrgKomp	JumlhKomp	BiayaOp	BiayaTotal
1	6	30,000	7,500	6,500,000	1	90,000	156,590
2	6	24,000	7,500	5,800,000	1	90,000	125,890
3	6	12,500	7,500	3,210,000	1	90,000	65,800
4	6	14,500	7,500	3,600,000	1	90,000	76,190
5	6	17,500	7,500	4,000,000	1	90,000	91,590
6	6	5,400	7,500	1,750,000	1	90,000	28,840
7	6	18,000	7,500	4,000,000	1	90,000	94,090
8	6	2,500	7,500	905,000	1	90,000	13,495
9	6	3,000	7,500	1,200,000	1	90,000	16,290
10	6	600	7,500	700,000	1	90,000	3,790

Tabel 5. Perhitungan interval waktu perawatan reaktor kimia 5

tp	Cp	Cf	H(tp)	C(tp)
1896	62.393.333	91.590.000	0	32.907,88
1897	62.393.333	91.590.000	0	32.890,53
1898	62.393.333	91.590.000	0	32.873,20
1899	62.393.333	91.590.000	0	32.855,89
1900	62.393.333	91.590.000	0	32.838,60
1901	62.393.333	91.590.000	0,00009323	32.825,81
1902	62.393.333	91.590.000	0,0006412	32.834,94
1903	62.393.333	91.590.000	0,001189	32.844,05
1904	62.393.333	91.590.000	0,001737	32.853,16
1905	62.393.333	91.590.000	0,002284	32.862,22
1906	62.393.333	91.590.000	0,002831	32.871,26

Berdasarkan perhitungan dapat dilihat bahwa *tradeoff* biaya perawatan mesin yang terendah terletak pada interval waktu perawatan 1901 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa komponen *bearing* pada *gearbox* reaktor kimia nomer 5 harus dilakukan penggantian komponen *bearing* setelah mesin beroperasi selama 1901 jam dan dilakukan perawatan mesin selama empat jam.



Gambar 4. Hubungan antara C(tp) dengan tp reaktor kimia nomer 5

Tabel 6. Data produk dan reaktor kimia

No	Produk	Warna	Waktu Produksi (jam)	Tardiness cost (per kg dan hari)
1	UL-155	Milky White	8	Rp 40,00
2	UL-170	Milky White	8	Rp 40,00
3	UL-171	Milky White	8	Rp 40,00
4	UL-180	Milky White	8	Rp 40,00
5	UL-166	Milky White	8	Rp 40,00
6	ML-250	Milky White	8	Rp 57,50
7	ML-270	Milky White	8	Rp 57,50
8	XT-650	Milky White	8	Rp 57,50
9	XT-625	Milky White	8	Rp 57,50
10	PL-60	Reddish Brown	10	Rp 72,50
11	PL-101	Reddish Brown	10	Rp 72,50
12	SBVU-30 MS	White Viscous Liquid	6	Rp 87,50
13	SBVU-50 MS	White Viscous Liquid	6	Rp 87,50
14	SBVU-134	White Viscous Liquid	6	Rp 87,50
15	SB-1124	White Emulsion	6	Rp 87,50
16	SBPB-1	Milky Viscous	12	Rp 90,00
17	HOFFMAN-150 A	Clear	12	Rp 115,00
18	HOFFMAN-520 B	Clear/Slightly Yellow	12	Rp 115,00
19	HOPELON-3150 B	Clear	12	Rp 115,00

Berikut merupakan rekapitulasi interval waktu perawatan tiap reaktor kimia untuk komponen *bearing* di dalam *gearbox*: Reaktor 1. 1870 jam, Reaktor 2. 1200 jam, Reaktor 3. 1132 jam, Reaktor 4. 1899 jam, Reaktor 5. 1901 jam, Reaktor 6. 1610 jam, Reaktor 7. 1586 jam, Reaktor 8. 2600 jam, Reaktor 9. 2071 jam, Reaktor 10. 1932 jam

Kapasitas reaktor 1,2,..10 berturut turut adalah sebagai berikut (dalam ton): 30,24, 12.5, 14.5,17.5, 5.4, 18, 2.5, 3, dan 0.6.

Reaktor kimia dapat bersifat mesin paralel yang artinya suatu produk dapat diproduksi dengan menggunakan beberapa pilihan reaktor kimia. Reaktor kimia yang bersifat mesin paralel ini adalah reaktor kimia nomer 1, 2, 4, 5, 6, 9, dan 10 yang memproduksi *wood adhesive* jenis uloid (UL) dan melamine (ML dan XT). Sedangkan reaktor kimia nomer 3 khusus untuk memproduksi *wood adhesive* jenis PL, reaktor nomer 7 khusus untuk memproduksi *adhesive* jenis *paper resin* (hopelon dan hoffman), dan reaktor kimia nomer 8 khusus untuk memproduksi *wood adhesive* jenis *struct bond* (SB).

Tabel 7. Data permintaan produk

Order ID	Produk	Tanggal Due Date		Demand (kg)
		Tanggal	Waktu	
08060901	XT-650	08/06/2009	16:00	3500
08060902	UL-155	09/06/2009	00:00	20000
08060903	ML-270	08/06/2009	18:00	13500
08060904	UL-171	07/06/2009	21:00	65000
08060905	PL-101	10/06/2009	13:00	20000
08060906	SBVU-50 MS	09/06/2009	03:00	1500
08060907	SB-1124	09/06/2009	03:00	3900
08060908	SBPB-1	08/06/2009	14:00	2600
08060909	HOFFMAN-150 A	08/06/2009	13:00	18000

Misalkan ada sejumlah permintaan atas beberapa jenis produk seperti pada tabel di atas. Data permintaan ini diterima di bagian produksi pada tanggal 8 Juni 2009 pukul 09.00. Produk UL-171 memiliki *demand* sebanyak 65.000 kg dan memiliki prioritas pertama untuk dijadwalkan. Oleh karena itu UL-171 bebas untuk dialokasikan di reaktor manapun yang sesuai dengan karakteristiknya pertama kali. *Demand* sebanyak 65.000 kg dialokasikan pertama kali ke reaktor kimia dengan selisih terkecil antara jumlah *demand* dengan kapasitas reaktor kimia yaitu reaktor kimia nomer 1 dengan kapasitas 30.000 kg. Sedangkan untuk sisa *demand* 11.000 kg dialokasikan ke reaktor kimia nomer 4 berdasarkan selisih negatif terbesar. Berikut merupakan gantt chart pengalokasian *order* produksi dengan mengintegrasikan perawatan mesin.

Perbandingan Total Tardiness Cost Antara Metode Usulan dengan Metode Perusahaan

Perbandingan biaya keterlambatan (*total tardiness cost*) ini dilakukan pada contoh numerik

antara metode usulan dengan metode yang digunakan oleh perusahaan (*first come first serve*). Berikut merupakan perbandingan total biaya keterlambatan antara metode usulan dan metode *first come first serve* (FCFS) yang digunakan oleh perusahaan.

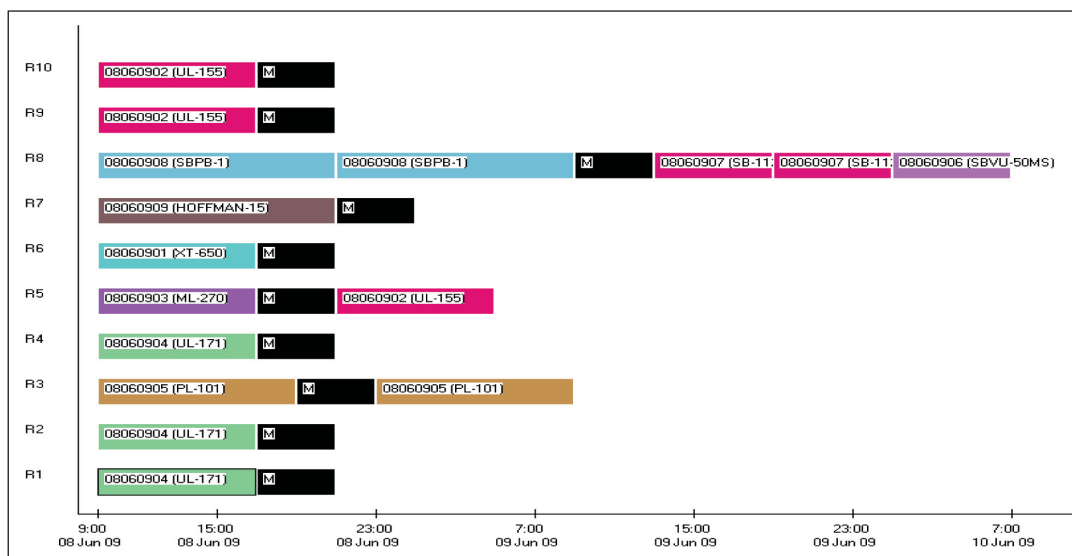
Berdasarkan perbandingan total biaya keterlambatan antara metode usulan dengan metode FCFS yang digunakan oleh perusahaan pada tabel 22 dan 23, total biaya keterlambatan metode FCFS lebih besar Rp881.895,83,- daripada metode usulan. Metode usulan penjadwalan produksi ini dapat menghemat total biaya keterlambatan (*total tardiness cost*) sebesar 15,38%.

Perbandingan Total Tardiness Cost antara Metode Usulan dengan Metode Perusahaan dengan Adanya Insert Job

Perbandingan total biaya keterlambatan pada contoh numerik ini untuk mengetahui tingkat efisiensi biaya keterlambatan jika ada penyisipan *order* produksi pada rentang waktu penjadwalan

Tabel 8. Penentuan prioritas *order* produksi

Order ID	Produk	Demand (kg)	Sisa Waktu (jam)	WP (jam)	ST (jam)	Tardiness Cost (per kg)	Tardiness Cost (per demand)	Prioritas	Reaktor Kimia
08060904	UL-171	65000	-12	8	-20	-	-	1	
08060901	XT-650	3500	7	8	-1	-	-	2	Mesin Paralel
08060903	ML-270	13500	9	8	1	-	-	3	
08060902	UL-155	20000	15	8	7	-	-	4	
08060905	PL-101	20000	52	10	42	-	-	1	3
08060909	HOFFMAN-150 A	18000	4	12	-8	-	-	1	7
08060908	SBPB-1	2600	5	12	-7	-	-	1	
08060907	SB-1124	3900	18	6	12	Rp 87,50	Rp 341,250,00	2	8
08060906	SBVU-50 MS	1500	18	6	12	Rp 87,50	Rp 131,250,00	3	



Gambar 5. Gantt chart pengalokasian *order* produksi

Tabel 9. Total biaya keterlambatan metode usulan

Order ID	Produk	Demand (Kg)	Tardiness Cost (per Kg dan hari)	Waktu Due Date		Waktu Selesai		Tardiness (hari)	Total Tardiness Cost
				Tanggal	Pukul	Tanggal	Pukul		
08060901	XT-650	3500	Rp 57,50	08/06/2009	16:00	08/06/2009	17:00	0.04	Rp 8.385,42
08060902	UL-155	20000	Rp 40,00	09/06/2009	00:00	09/06/2009	01:00	0.04	Rp 33.333,33
08060903	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	18:00	08/06/2009	17:00	0.00	Rp 0,00
08060904	UL-171	65000	Rp 40,00	07/06/2009	21:00	08/06/2009	17:00	0.83	Rp 2.166.666,67
08060905	PL-101	20000	Rp 72,50	10/06/2009	13:00	09/06/2009	09:00	0.00	Rp 0,00
08060906	SBVU-50 MS	1500	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	10/06/2009	03:00	1.00	Rp 131.250,00
08060907	SB-1124	3900	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	09/06/2009	21:00	0.75	Rp 255.937,50
08060908	SBPB-1	2600	Rp 90,00	08/06/2009	14:00	09/06/2009	09:00	0.79	Rp 185.250,00
08060909	HOFFMAN-150 A	18000	Rp 115,00	08/06/2009	13:00	09/06/2009	21:00	1.33	Rp 2.760.000,00
TOTAL									Rp 5.540.822,92

Tabel 10. Total biaya keterlambatan metode perusahaan

Order ID	Produk	Demand (Kg)	Tardiness Cost (per Kg dan hari)	Waktu Due Date		Waktu Selesai		Tardiness (hari)	Total Tardiness Cost
				Tanggal	Pukul	Tanggal	Pukul		
08060901	XT-650	3500	Rp 57,50	08/06/2009	16:00	09/06/2009	17:00	0.63	Rp 125.781,25
08060902	UL-155	20000	Rp 40,00	09/06/2009	00:00	08/06/2009	17:00	0.00	Rp 0,00
08060903	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	18:00	09/06/2009	07:00	0.54	Rp 420.468,75
08060904	UL-171	65000	Rp 40,00	07/06/2009	21:00	08/06/2009	17:00	0.83	Rp 2.166.666,67
08060905	PL-101	20000	Rp 72,50	10/06/2009	13:00	09/06/2009	05:00	0.00	Rp 0,00
08060906	SBVU-50 MS	1500	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	08/06/2009	15:00	0.00	Rp 0,00
08060907	SB-1124	3900	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	09/06/2009	03:00	0.00	Rp 0,00
08060908	SBPB-1	2600	Rp 90,00	08/06/2009	14:00	10/06/2009	03:00	1.54	Rp 360.750,00
08060909	HOFFMAN-150 A	18000	Rp 115,00	08/06/2009	13:00	09/06/2009	21:00	1.33	Rp 2.760.000,00
TOTAL									Rp 5.833.666,67

Tabel 11. Total biaya keterlambatan metode usulan dengan *insert job*

Order ID	Produk	Demand (Kg)	Tardiness Cost (per Kg dan hari)	Waktu Due Date		Waktu Selesai		Tardiness (hari)	Total Tardiness Cost
				Tanggal	Pukul	Tanggal	Pukul		
08060901	XT-650	3500	Rp 57,50	08/06/2009	16:00	08/06/2009	17:00	0.04	Rp 8.385,42
08060902	UL-155	20000	Rp 40,00	09/06/2009	00:00	09/06/2009	01:00	0.04	Rp 33.333,33
08060903	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	18:00	08/06/2009	17:00	0.00	Rp 0,00
08060904	UL-171	65000	Rp 40,00	07/06/2009	21:00	08/06/2009	17:00	0.83	Rp 2.166.666,67
08060905	PL-101	20000	Rp 72,50	10/06/2009	13:00	10/06/2009	15:00	0.08	Rp 120.833,33
08060906	SBVU-50 MS	1500	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	10/06/2009	19:00	1.67	Rp 218.750,00
08060907	SB-1124	3900	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	10/06/2009	13:00	1.42	Rp 483.437,50
08060908	SBPB-1	2600	Rp 90,00	08/06/2009	16:00	11/06/2009	07:00	2.71	Rp 633.750,00
08060909	HOFFMAN-150 A	18000	Rp 115,00	08/06/2009	13:00	08/06/2009	21:00	0.33	Rp 690.000,00
080609010	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	03:00	09/06/2009	03:00	1.00	Rp 776.250,00
080609011	PL-60	20000	Rp 72,50	09/06/2009	13:00	10/06/2009	05:00	0.67	Rp 966.666,67
080609012	SBPB-1	5000	Rp 87,50	08/06/2009	20:00	10/06/2009	01:00	1.21	Rp 528.645,83
080609013	HOPELON-3150B	18000	Rp 115,50	07/06/2009	16:00	09/06/2009	13:00	1.88	Rp 3.881.250,00
TOTAL									Rp 10.507.968,75

produksi utama sedang berjalan. Berikut merupakan perbandingan total biaya keterlambatan antara metode usulan dengan metode perusahaan.

Berdasarkan perbandingan total biaya keterlambatan antara metode usulan dengan metode FCFS yang digunakan oleh perusahaan pada Tabel 8 dan 9 pada contoh numerik, total biaya keterlambatan metode FCFS lebih besar Rp987.875,- daripada metode usulan. Metode usulan penjadwalan produksi ini dapat memberikan tingkat efisiensi *total tardiness cost* sebesar 9,4% jika terdapat penyisipan

order produksi pada rentang waktu penjadwalan produksi utama.

SIMPULAN

Dihasilkan pengembangan algoritma penjadwalan produksi yang terintegrasi dengan penjadwalan perawatan mesin. Penjadwalan produksi dilakukan dengan memberikan urutan pengerjaan berdasarkan aturan *slack time*. Aturan ini untuk dapat memberikan prioritas pada *order* produksi yang harus diproduksi terlebih dahulu sesuai dengan

Tabel 12. Total biaya keterlambatan metode perusahaan dengan *insert job*

Order ID	Produk	Demand (Kg)	Tardiness Cost (per Kg dan hari)	Waktu Due Date		Waktu Selesai		Tardiness (hari)	Total Tardiness Cost
				Tanggal	Pukul	Tanggal	Pukul		
08060901	XT-650	3500	Rp 57,50	08/06/2009	16:00	08/06/2009	17:00	0.04	Rp 8.385,42
08060902	UL-155	20000	Rp 40,00	09/06/2009	00:00	09/06/2009	05:00	0.21	Rp 166.666,67
08060903	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	18:00	08/06/2009	17:00	0.00	Rp 0,00
08060904	UL-171	65000	Rp 40,00	07/06/2009	21:00	09/06/2009	05:00	1.33	Rp 3.466.666,67
08060905	PL-101	20000	Rp 72,50	10/06/2009	13:00	09/06/2009	09:00	0.00	Rp 0,00
08060906	SBVU-50 MS	1500	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	08/06/2009	15:00	0.00	Rp 0,00
08060907	SB-1124	3900	Rp 87,50	09/06/2009	03:00	09/06/2009	03:00	0.00	Rp 0,00
08060908	SBPB-1	2600	Rp 90,00	08/06/2009	16:00	10/06/2009	07:00	1.71	Rp 399.750,00
08060909	HOFFMAN-150 A	18000	Rp 115,00	08/06/2009	13:00	08/06/2009	21:00	0.33	Rp 690.000,00
08060910	ML-270	13500	Rp 57,50	08/06/2009	03:00	09/06/2009	05:00	1.08	Rp 840.937,50
08060911	PL-60	20000	Rp 72,50	09/06/2009	13:00	10/06/2009	05:00	0.67	Rp 966.666,67
08060912	SBPB-1	5000	Rp 87,50	08/06/2009	20:00	11/06/2009	07:00	2.46	Rp 1.075.520,83
08060913	HOPELON-3150B	18000	Rp 115,50	07/06/2009	16:00	09/06/2009	13:00	1.88	Rp 3.881.250,00
TOTAL									Rp 11.495.843,75

urutan prioritasnya untuk mesin paralel dengan kapasitas yang berbeda beda. Algoritma juga dapat mengakomodasikan penyesisipan order. Algoritma yang dikembangkan mampu menghasilkan penghematan total biaya keterlambatan sebesar 15,3858% dan 9,4% untuk algoritma dengan penyesisipan order.

DAFTAR PUSTAKA

- Asano, M., 1999. Scheduling with shutdown and sequence dependent set-up times, *IJPR*. 37(7): 1661–1676.
- Baker, K.R., 1970. Introduction to Sequencing and Scheduling. hlm 1. Parthmouth College.
- Blank, R., 2004. The Basics of Reliability, Productivity Press, hlm 34, New York.
- Fogarty, D.W., et al., 1991. Production and Inventory Management, hlm 102–105. 2nd edition. South Western Publishing Co, Ohio.
- Jardine, A.K.S. dan Tsang, A.H.C., 2006. Maintenance, Replacement, and Reliability Theory and Applications. hlm 27–52, Taylor and Francis Group. Bocaraton.
- Kuo, W. dan Zuo, M.J., 2003. Optimal Reliability Modeling, hlm 63–67, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Ramakumar, R., 1993. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications hlm 50–65 Prentice Hall, New Jersey.
- Staudacher, P., 2000. ISTS: A new procedure for the integrated scheduling of multi-stage system, *IJPR*. 38(11): 2489–2514.