

Penjadwalan *Flexible Flowshop* untuk Penurunan Jumlah Keterlambatan pada Produksi *Industrial Glass*

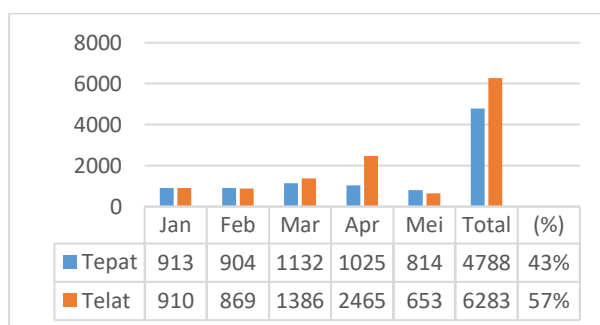
Steffen Fang Nyoto¹, I Gede Agus Widyadana²

Abstract: PT. X is a company that has long been engaged in the glass manufacturing business and has several production plants. One of the plants of PT. X., which produces industrial glass have been had delivery lateness around 57% of all orders that have been received during January to May 2021. One of the factors that made lateness in delivery was came from the lack ability from Production Department to fulfil orders because the schedule for each machine did not made regularly. This research wishes to be able to give a scheduling improvement that can lower the rate of delivery lateness. The actual scheduling condition in that plant is done by manually moving the prioritized items with Microsoft Excel program. This research will discuss the proposed Flexible Flowshop scheduling using Microsoft Excel VBA program with the objective function of minimizing the total weighted number of tardy jobs. The results of the proposed scheduling with the Microsoft Excel VBA program have a 25% better solution than the actual method. In addition, this method can shorten the working time of PPIC staff in generating scheduling for each machine.

Keywords: production scheduling; flexible flowshop; lateness reduction; minimizing weighted number of tardy jobs

Pendahuluan

PT. X merupakan salah satu perusahaan yang telah lama bergerak dalam bidang industri kaca. Persaingan yang semakin ketat menyebabkan PT. X harus mampu membangun dan mempertahankan kepercayaan pelanggan, salah satu faktor pendukungnya adalah tingkat pemenuhan pengiriman. Salah satu *plant* PT. X yaitu *Plant I* yang berfokus memproduksi *industrial glass* dan *retail glass* memiliki tingkat keterlambatan pengiriman sebesar 57% berdasarkan data Gambar 1. pemenuhan pengiriman sejak Januari – Mei 2021.



Gambar 1. Tingkat pengiriman *order Plant I* bulan Januari hingga Mei tahun 2021

Proses produksi pada *Plant I* sering mengalami kendala pemenuhan *order* karena hanya menggunakan jadwal secara global, tanpa adanya jadwal pada setiap mesin yang dibuat secara berkala. *Order* pada PT. X menggunakan tipe *job-order* dengan setiap *order* memiliki spesifikasi yang berbeda-beda. Maka dari itu PT. X mengaplikasikan strategi produksi *make-to-order (MTO)* dan penjadwalan produksi memegang peranan yang penting. *Plant I* memiliki tipe penjadwalan *flexible flowshop* yang mana terdapat urutan proses produksi yang tidak dapat dilanggar. Penelitian ini akan memberikan usulan penjadwalan yang mampu menurunkan keterlambatan produksi dengan metode *sequencing Earliest Due Date (EDD)* untuk meminimasi *total weighted number of tardy jobs*.

Metode Penelitian

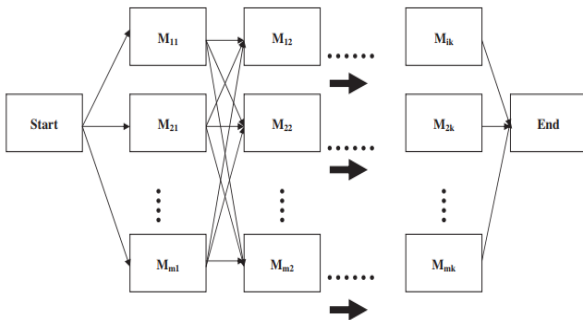
Masalah pada penelitian ini dapat diselesaikan dengan mengacu pada beberapa metode, antara lain:

Flexible Flowshop

Flexible Flowshop (FFS) merupakan salah satu bentuk *flowshop* dengan syarat memiliki “k” *stage* yang mana pada setiap *stage*-nya terdapat minimal 1 mesin dan terdapat salah satu *stage* yang memiliki mesin paralel (Jungwattanakit et al. [1]). Alur pengerjaan setiap job pada kasus *flexible flowshop* setidaknya dapat diproses pada salah satu *stage* dan dapat memiliki alur *skip flowshop* dari *stage 1* hingga *stage “k”*. Setiap job “j” tidak harus melewati urutan

^{1,2} Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Industri, Universitas Kristen Petra. Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Email: sfamgnjoto21@gmail.com, gede@petra.ac.id

mesin yang sama, tetapi urutan pengerjaan dan *flow* dari mesin satu ke mesin lainnya tidak bisa melanggar aturan dari *flow precedence* (Pinedo [2]).



Gambar 2. Layout umum *Flexible Flowshop Scheduling* (Kahraman et al. [3])

Alur pengerjaan pada Gambar 2 menandakan setiap *job* yang dikerjakan sebuah mesin pada *stage* “k” tidak akan memiliki alur pada mesin yang memiliki kemampuan proses sama. menandakan tidak adanya alur *backward* yaitu pengerjaan dari *stage* “k” menuju *stage* “k-1”, karena hal tersebut akan melanggar aturan *flow precedence*

Weighted Number of Tardy Jobs

Setiap industri memiliki *order* dengan tingkat kepentingan yang berbeda-beda, pada kasus *job-order* terkadang dapat ditemui adanya pelanggan, jenis *order*, maupun *item* yang harus diprioritaskan. Penjadwalan produksi yang memerlukan prioritas pengerjaan dapat diselesaikan dengan persamaan yang mengikutkan variabel pembobotan (*weighted*).

Weighted number of tardy jobs memiliki tujuan untuk meminimasi total bobot *job* yang terlambat. keberadaan parameter *weighted* akan menambah tingkat kesulitan dalam pencarian solusi optimal tetapi akan mengindikasikan solusi tersebut lebih *robust* dibandingkan metode *unweighted* (M’Hallah dan Bulfin [4]). penjadwalan dengan *minimum weighted number of tardy jobs* maupun *maximum number of on-time jobs* mampu mendapatkan fungsi tujuan yang cukup konsisten (Baker [5]). Pernyataan tersebut menunjukkan bahwa terdapat 2 persamaan yang dapat digunakan dalam merumuskan fungsi tujuan *weighted number of tardy jobs*.

Dependent Set-up Time

Set-up time yang akan ditemui pada setiap situasi produksi akan memiliki waktu yang relatif berbeda. *Set-up time* merupakan suatu kegiatan tidak

produktif yang wajib untuk dilakukan pada mesin guna mengerjakan produk selanjutnya (Naderi [6]). *Dependent set-up time* adalah waktu *set-up* yang mendahului pengerjaan *job* dengan kriteria pengerjaan yang berbeda di suatu mesin, yang mana lamanya waktu *set-up* akan dipengaruhi dari *job* sebelumnya (Rubin dan Ragatz [7]). Maka dari itu *dependent set-up time* merupakan waktu tidak produktif yang diperlukan untuk mempersiapkan pengerjaan dengan spesifikasi berbeda pada *job* selanjutnya.

Hasil dan Pembahasan

Penjadwalan Aktual

Departemen *Production Planning and Inventory Control (PPIC) Plant I* menggunakan 2 tipe penjadwalan yaitu jadwal global dan jadwal per-proses. Jadwal global diperbarui setiap beberapa jam sekali pada papan pencatatan *order*, kemudian digunakan sebagai *controlling order* tanpa adanya urutan pengerjaan. Jadwal per-roses dibuat ketika terjadi penumpukan tipe *order* pada suatu proses.

Metode pembuatan jadwal per-proses diawali dengan pengambilan data *Finish Goods Control Report (FGCR)* perusahaan yang di-*update* otomatis setiap 30 menit. Data FGCR kemudian digunakan untuk mengambil seluruh *order* dengan proses yang akan dijadwalkan. Data tersebut kemudian diurutkan berdasar metode *earliest due date (EDD)* serta memperhatikan pelanggan prioritas.

Metode penjadwalan aktual per-proses ini perlu diperbaiki karena dapat menyebabkan Departemen *PPIC* tidak mempunyai acuan *controlling* pada tiap mesin guna mencegah keterlambatan produksi. Penjadwalan tersebut tidak mampu memberi urutan waktu pengerjaan yang optimal karena tidak memperkirakan waktu proses, *ready time*, serta *completion time* dari masing-masing *job*.

Penjadwalan Usulan

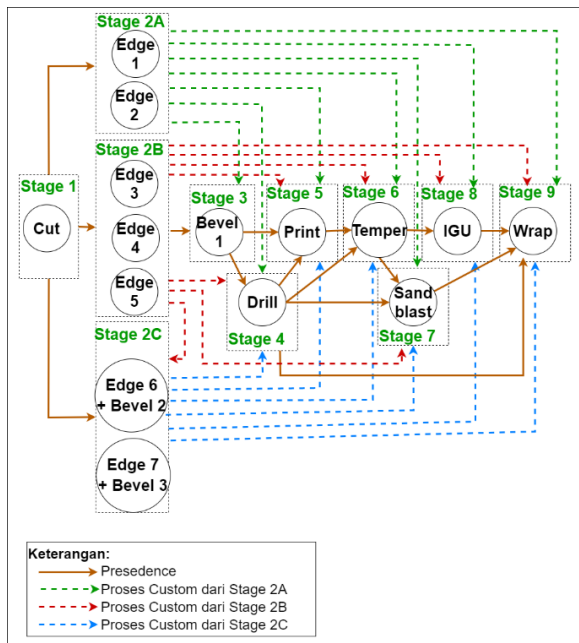
Metode penjadwalan usulan didapatkan dengan mengembangkan proses penjadwalan aktual menjadi penjadwalan yang tersistem menggunakan *software Microsoft Excel* dengan pemrograman *VBA*. Pembuatan penjadwalan usulan dilakukan setiap 2-3 hari sekali secara berkala. Penjadwalan usulan ini dapat digunakan sebagai *controlling* keterlambatan

Data yang digunakan pada metode usulan juga berasal dari *FGCR*. Data tersebut kemudian diolah

untuk mengeluarkan *order* yang tidak perlu dijadwalkan kemudian mengganti tanggal pengiriman sesuai pengiriman aktual. Data olahan *FGCR* lalu akan dijadwalkan dengan menggunakan program *Microsoft Excel VBA*. Setiap mesin akan diurutkan sesuai keperluan pengerjaannya hingga hasil program memunculkan *printout* penjadwalan dalam beberapa hari ke depan. *Printout* ini akan digunakan Departemen Produksi sebagai urutan pengerjaan pada masing-masing mesin.

Pemahaman Proses Produksi *Plant I*

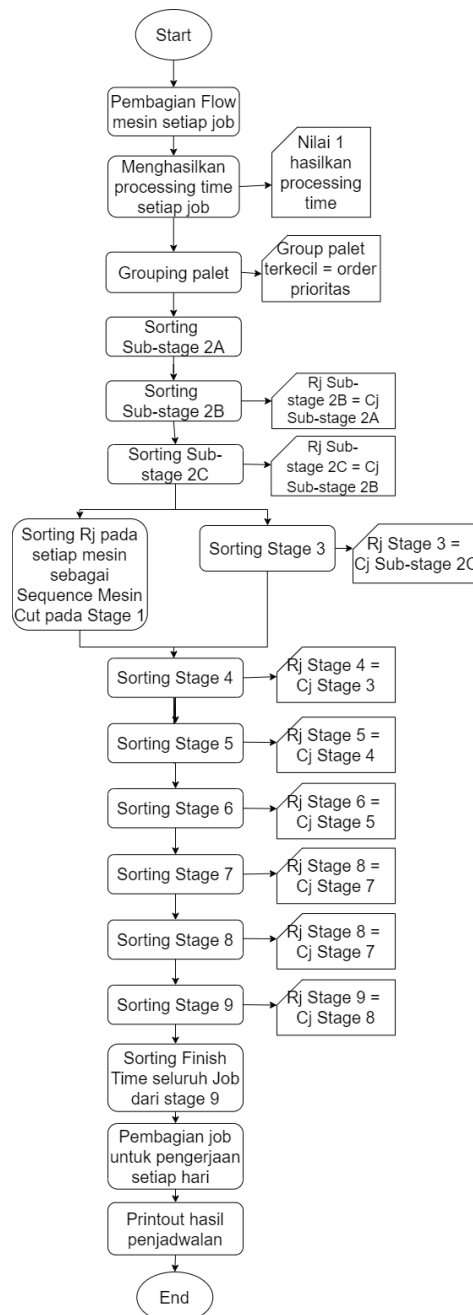
Plant I melakukan proses produksi dengan sistem 3 *shift* untuk setiap hari. Senin hingga Jumat memiliki 7 jam produksi/ *shift*, pada hari Sabtu memiliki 5 jam produksi/ *shift*. *Plant I* memiliki 6 tipe produk yaitu *fresh cut (PC)*, *pre-process (PP)*, *flat tempered (PT)*, *flat printed (VLT)*, *flat insulated (PI)*, *flat tempered insulated (PTTI)*. Urutan proses yang terdapat pada *Plant I* untuk memproduksi setiap jenis produk memiliki dasar *flowshop*, yang mana setiap proses memiliki urutan *station* yang tidak dapat dilanggar dalam pengerjaannya. Proses produksi *Plant I* sesuai Gambar 3 terdiri dari 9 urutan proses yang akan digunakan sebagai acuan pembagian *multi-stage flexible flowshop* dengan 4 proses *custom* pada *station Bevel, Drill, Sandblast, dan Wrapping*. Urutan precedence *Plant I* diawali dengan proses *Cutting, Edging, Beveling, Drilling, Printing, Tempering, Sandblast, IGU, dan Wrapping*.



Gambar 3. Alur penjadwalan *multi-stage* proses produksi pada *Plant I*

Plant I memiliki total 15 mesin. *Station Cut, Bevel, Drill, Print, Temper, Sandblast, IGU, dan Wrap*

memiliki 1 mesin pada masing-masing *station*. *Station Edge* pada *Plant I* merupakan jenis parallel mesin dengan total 7 mesin. *Station Edge* dapat dikelompokkan dalam 3 *group* mesin yaitu *group 1* dengan 2 mesin serupa, *group 2* dengan 3 mesin non-identik, dan *group 3* dengan 2 mesin identik. masing-masing *group* pada *station Edge* juga memiliki kapasitas pengerjaan tersendiri berdasarkan tipe gosok, bentuk, ukuran, serta ketebalan kaca.



Gambar 4. Flowchart usulan algoritma penjadwalan pada *Plant I*

Penjadwalan *flexible flowshop multi-stage* metode usulan ini memiliki metode *sequencing* yang berbeda-beda pada setiap *stage*-nya. Setiap *job* akan melewati semua *stage* sebanyak 1 kali, yang mana *flow process*

pada setiap *job* didasari dari pada pembagian *flow* mesin. Pemahaman konsep algoritma penjadwalan ini dapat diilustrasikan pada Gambar 4.

Algoritma ini diawali dengan proses pembagian *flow* mesin untuk masing-masing *job*, pembagian ini didasari dari spesifikasi serta *station* terakhir masing-masing *job*. *Flow* mesin yang memunculkan angka 1 akan memiliki *processing time* pada mesin yang bersangkutan dalam satuan jam. *Processing time* masing-masing *job* didapatkan dengan membuat persamaan waktu sesuai dengan kemampuan masing-masing mesin.

Metode penentuan *grouping* palet diurutkan berdasar *order* yang memiliki due date antara 1-3 hari, kemudian berdasarkan bobot (*weighted*) masing-masing *job* yang diklasifikasikan sesuai Tabel 1, setelah itu pengurutan berdasar *Earliest Due Date (EDD)*, dan sisa perses terkecil. *Grouping* ini didasari dari pengalaman perusahaan bahwa sebagian besar *SO* dengan nomor yang sama akan berada dalam 1 palet yang sama. Hasil *grouping* palet tersebut akan mendapatkan nomor palet terkecil dengan bobot urgensi terpenting dan *due date* terdekat.

Tabel 1. Penentuan bobot urgensi setiap *job*

| Status | Normal | | Urgent | |
|-------------|--------|-----|--------|-----|
| | Ind | Rtl | Ind | Rtl |
| Accepted | 7 | 8 | 17 | 18 |
| Released | 5 | 6 | 15 | 16 |
| Rejected | 13 | 14 | 13 | 14 |
| Release | 3 | 4 | 10 | 12 |
| Acknowledge | 1 | 2 | 9 | 11 |

Penjadwalan untuk setiap mesin kemudian akan memperhatikan *completion time* dari *stage* sebelumnya sebagai *ready time stage* tersebut. Hasil akhir pada *stage* 9 digunakan untuk mendapatkan *number of tardy jobs* serta *weighted number of tardy jobs*. Kedua parameter ini akan digunakan sebagai evaluasi hasil metode. Setelah itu hasil penjadwalan pada setiap mesin akan dibagi ke dalam kapasitas produksi per hari. Hasil tersebut digunakan sebagai *printout* penjadwalan.

Persamaan Matematika

Index

- i = index mesin; $i \in \{1, \dots, m_k\}$
- j = index *job*; $j \in \{1, \dots, n\}$
- k = index *stages*; $k \in \{1, \dots, 9\}$
- l = index *batch*; $l \in \{1, \dots, b\}$
- x = index banyak proses; $x \in \{1, \dots, x\}$
- ω = index *weighted*, $\omega \in \{1, \dots, 18\}$
- m = total mesin pada setiap *stage* k

- n = total *job*
- b = total *batch*

Parameter:

- U_j = banyak *job* j yang terlambat
- M_{ijk} = assign *job* j pada mesin i *stage* k
- P_{ijk} = waktu proses *job* j mesin i *stage* k
- A_{ijk} = available machine time *job* j mesin i *stage* k
- R_{ijk} = ready time *job* j mesin i *stage* k
- C_{ijk} = completion time *job* j mesin i *stage* k
- D_j = Due date *job* j

Fungsi Tujuan

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^n \omega_j U_j \tag{1}$$

Constrain

$$\sum_{j=1}^n X_{ijk} = 1; \forall i, j, k \tag{2}$$

$$M_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; \forall j \tag{3}$$

$$P_{ijk} = \begin{cases} > 0 \\ 0 \end{cases}; \forall j \tag{4}$$

$$R_{ijk} = 0 + P_{ij(k-1)}; \forall j; k \in \{2\}; i \in \{1,2\} \tag{5}$$

$$R_{ijk} = C_{ij(k-1)}; \forall j; k \in \{2\}; i \in \{3, \dots, 7\} \tag{6}$$

$$R_{ijk} = C_{ij(k-1)}; \forall j; k \in \{3, \dots, 9\}; \forall i \tag{7}$$

$$A_{ijk} = C_{i(j-1)k}; \forall j; k \in \{2\}; i \in \{1,2\} \tag{8}$$

$$A_{ijk} = \max(C_{i(j-1)k}, R_{ijk}); \forall j \tag{9}$$

$$C_{ijk} = A_{ijk} + P_{ijk}; \forall j \tag{10}$$

$$C_{ijk} = R_{ij(k+1)}; \forall j; k \in \{1\}; i \in \{1\} \tag{11}$$

$$R_{ijk} = C_{ijk} - P_{ijk}; \forall j; k \in \{1\}; i \in \{1\} \tag{12}$$

Penjadwalan produksi usulan pada *Plant* I memerlukan beberapa persamaan dalam menghasilkan logika berpikir yang akan di-input-kan pada program *Microsoft Excel VBA*. Persamaan (1) merupakan fungsi tujuan minimasi total *weighted number of tardy jobs*, persamaan (2) adalah syarat setiap *job* akan melewati setiap *stage* sebanyak 1 kali, persamaan (3) untuk membagi *flow* mesin yang spesifikasi setiap *job*, persamaan (4) untuk menghasilkan *processing time* bila persamaan (3) bernilai 1.

Setiap *stage* akan menggunakan persamaan (5) hingga (12). Pada persamaan (5) *Ready time stage* 2 didapatkan dari *processing time* masing-masing *job*. Syarat (6) dan (7) digunakan untuk mendapatkan *ready time* pada perpindahan dari setiap *stage* untuk masing-masing *job*. Model (8) dan (9) digunakan untuk mendapatkan *available machine time* suatu *job* pada masing-masing *stage*. Persamaan (10) dan (11) merupakan *completion time* setiap *job* pada masing-masing

Tabel 2. Data order

| Job | SO | Ln | TS | KOFG | W | H | T | QTY | Status | Station | Urg | Gosok |
|-----|----------|----|------------|------|-------|-------|---|------|----------|----------|-----|-------|
| 1 | 21-09384 | 1 | 04/06/2021 | VLT | 457 | 457 | 6 | 400 | Accepted | F2-EDGE1 | 0 | fp |
| 2 | 21-09328 | 2 | 04/06/2021 | VLT | 1,157 | 557 | 6 | 500 | Accepted | F2-BYS | 0 | fp |
| 3 | 21-13174 | 1 | 04/06/2021 | PT | 429 | 232 | 3 | 200 | Released | 0 | 0 | fg |
| 4 | 21-13584 | 1 | 04/06/2021 | PP | 646 | 1,739 | 5 | 400 | Accepted | F2-BYS | 0 | se |
| 5 | 21-13575 | 14 | 05/06/2021 | PP | 835 | 355 | 5 | 1400 | Release | 0 | 0 | fp |

Tabel 3. Pembagian *flow* mesin

| Job | Cut | Edge 1 | Edge 2 | Edge 3 | Edge 4 | Edge 5 | Edge 6 | Edge 7 | Bevel | Drill | Print | Temp | SandB | IGU | Wrap | Lt. St. |
|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-------|-----|------|---------|
| 1 | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | | | EDGE1 |
| 2 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | CUT |
| 3 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | 1 | | |
| 4 | | | 1 | | | | | | | | 1 | | | | | 1 CUT |
| 5 | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | | | | | |

stage. Persamaan (12) untuk menghitung *ready time* masing-masing *job* pada *stage* 1.

Hasil Penjadwalan

Konsep algoritma yang dibentuk dapat dipahami dengan simulasi 5 data yang tertera pada Tabel 2. Data yang digunakan merupakan data *dummy* berdasarkan referensi data perusahaan. Data order tersebut akan diolah guna menyesuaikan keperluan data untuk dijalankan pada program. Data *kind of finish goods* (KOFG) dan keperluan proses custom sesuai FGCR digunakan sebagai acuan penentuan *flow* mesin. Tabel 3. menunjukkan keperluan mesin dari seluruh *job*, kolom *Last station (Lt. St.)* berfungsi sebagai penanda *WIP* pada masing-masing *job* dan akan menghilangkan keperluan mesin di *station* tersebut serta *station* sebelumnya.

Tabel 4. Grouping palet

| Job | Due | w | <3 hari | Group | S. Proses |
|-----|-----|---|---------|-------|-----------|
| 1 | 21 | 8 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 21 | 8 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 21 | 8 | 1 | 3 | 3 |
| 3 | 21 | 6 | 1 | 4 | 5 |
| 5 | 36 | 4 | 2 | 5 | 3 |

Grouping palet pada Tabel 4 menggunakan urutan *sequencing* berdasar *order* yang tersisa 1-3 hari, *weighted*, *due date*, serta sisa proses. *Job* yang memiliki *due date* diantara 1-3 hari akan lebih diutamakan karena untuk mengantisipasi agar tidak terjadi keterlambatan yang didapatkan dari jam produksi yang tersisa antara tanggal produksi dengan tanggal pengiriman. Contoh penjadwalan ini menggunakan data tanggal 3 Juni 2021 yang mana target kirim pada contoh *order* adalah tanggal 4 dan 5 Juni 2021. Maka dari itu *due date* yang dihasilkan adalah 21 jam dan 36 jam dikarenakan

tanggal 5 Juni 2021 merupakan hari Sabtu. Pembobotan *job* dihasilkan sesuai dengan penentuan Tabel 1. Kriteria sisa proses diambil dari banyak proses yang diperlukan suatu *job*.

Sub-stage 2A Tabel 5 diurutkan berdasar *job* yang memerlukan proses *Sub-stage* 2A, *estimaste completion time*, dan *group* palet. Penentuan nilai *estimate completion time* digunakan untuk menyesuaikan *job* bila terdapat *order* dengan *wighted* prioritas yang belum tersedia sebagai *WIP* pada *sub-stage* 2A. Kriteria *group* akan menentukan *job* prioritas berdasarkan palet terpenting. Assign *job* pada mesin Edge 1 dengan Edge 2 ditentukan berdasar Tabel 3 *flow mesin* yang didasari dari kemampuan masing-masing mesin.

Tabel 5. Penjadwalan *sub-stage* 2A

| Job | Due | W | Edg | Grp | Est | Edge 1 | | | Edge 2 | | |
|-----|-----|---|-----|-----|-----|--------|---|---|--------|------|-------|
| | | | | | | P | A | C | P | A | C |
| 4 | 21 | 8 | 1 | 3 | 0 | | | | 7.41 | 0 | 7.41 |
| 5 | 36 | 4 | 1 | 5 | 2 | | | | 27.83 | 7.41 | 35.24 |

Hasil *completion time* dan *available time sub-stage* 2A digunakan pada *sub-stage* 2B sebagai *ready time*. Tabel 6 merupakan penjadwalan pada *sub-stage* 2B.

Tabel 6. Penjadwalan *sub-stage* 2B

| Job | CNC | Grp | Est | Edge 3 | | | Edge 4 | | | Edge 5 | | |
|-----|-----|-----|-----|--------|---|---|--------|---|---|--------|---|---|
| | | | | P | A | C | P | A | C | P | A | C |
| 2 | 1 | 2 | 0 | | | | | | | | | |
| 1 | | 1 | 0 | | | | | | | | | |
| 4 | | 3 | 0 | | | | | | | | | |
| 3 | | 4 | 0 | | | | | | | | | |
| 5 | | 5 | 0 | | | | | | | | | |

Sequence Sub-stage 2B didasari dari kriteria *job* yang dapat dikerjakan pada *Sub-stage* 2B, *estimate completion time*, *group* serta *ready time*. *Sub-stage* 2B

terdiri dari 3 *non-identical parallel machine*. Metode *assign* pada ketiga mesin ini diurutkan dari Edge 5, Edge 4, lalu Edge 3 dikarenakan Edge 5 memiliki performa terbaik. Setiap *group* palet yang sama akan dikerjakan pada salah satu mesin Edge yang sama pula. Ketiga mesin yang telah terisi dengan masing-masing *job*, akan mendapatkan *assign job* selanjutnya berdasarkan *available machine time* tercepat

Tabel 7. Penjadwalan *sub-stage 2C*

| Job | Rij2C | SB | Grp | Est | Edge 6 | | | Edge 7 | | |
|-----|-------|----|-----|-----|--------|------|-----|--------|---|---|
| | | | | | P | A | C | P | A | C |
| 3 | 0.01 | 1 | 4 | 1 | 2.74 | 0.06 | 2.8 | | | |
| 1 | 0 | | 1 | 0 | | | | | | |
| 4 | 7.41 | | 3 | 0 | | | | | | |
| 2 | 28.68 | | 2 | | | | | | | |
| 5 | 35.24 | | 5 | | | | | | | |

Completion time *Sub-stage 2B* menjadi *ready time Sub-stage 2C* dan *available machine time Sub-Stage 2B* digunakan sebagai *ready time Stage 2*. Sequence *Sub-stage 2C* diurutkan berdasar kriteria *job* yang memerlukan proses pada *Sub-stage 2C*, *estimate completion time*, *grouping palet*, dan *ready time Sub-stage 2C*. *Sub-stage 2C* terdiri dari 2 *identical parallel machine*. Metode *assign* pada kedua mesin ini diurutkan dari Edge 6 lalu Edge 7.

Stage 1 menggunakan *ready time* pada *Stage 2* sebagai *completion time* dari setiap *job* yang memerlukan pengerjaan pada *Stage 1* sesuai pada Tabel 8.

Tabel 8. Penjadwalan *stage 1*

| Job | C | R | Cut |
|-----|------|------|-----|
| 3 | 0.01 | 0 | 1 |
| 5 | 7.41 | 6.08 | 1 |
| 1 | 0 | | |
| 4 | 0 | | |
| 2 | 0 | | |

Ready time Stage 2 digunakan sebagai *completion time Stage 1*, kemudian *completion time Stage 1* dikurangi dengan *processing time* masing-masing *job* dan didapatkan *ready time* masing-masing *job* pada *Stage 1*. Sequence *Stage 1* diurutkan berdasarkan mesin yang memerlukan *stage 1* serta *ready time* tercepat. Hasil akhir penjadwalan pada *Stage 1* digunakan sebagai acuan Departemen *PPIC* untuk membuatkan bon bahan agar setiap *item* yang harus dikerjakan pada *Stage 2* selalu tersedia.

Penjadwalan pada *Stage 3* memiliki *sequence* berdasarkan *job* yang memerlukan proses pada

Stage 3, *General Ready time (GR time)*, ketebalan, serta *ready time* tercepat. Penjadwalan *Stage 3* pada Tabel 9 memerlukan perhitungan *General Ready time (GR time)* dikarenakan mesin pada *stage* ini mampu mengerjakan produk secara *batch* sesuai dengan ketebalan yang sama. *GR time* didasari dari pengelompokan *ready time* masing-masing *job* dalam kelipatan 7.

Tabel 9. Penjadwalan *stage 3*

| Job | RIj3 | GRj3 | T | Bvl | Ql | Btc | P | A | C |
|-----|-------|------|---|-----|----|-----|-------|-------|-------|
| 5 | 35.24 | 35 | 5 | 1 | 11 | 126 | 53.59 | 35.24 | 88.93 |
| 3 | 2.8 | 0 | 3 | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 6 | | | | | | |
| 4 | 7.41 | 7 | 5 | | | | | | |
| 2 | 28.68 | 28 | 6 | | | | | | |

Penentuan *processing time* pada *stage* ini didasari dari jumlah *batch* pada setiap *job*. *Job* Setiap pengerjaan dengan ketebalan yang berbeda akan memunculkan *set-up time*. Pembagian *batch* ditentukan dari kapasitas *loading quantity* mampu dikerjakan mesin pada *stage* ini, *loading quantity* didapatkan dengan memperhitungkan kapasitas keliling yang mampu dikerjakan mesin dengan ukuran panjang dan lebar setiap *job*

Sequencing pada *Stage 4* sesuai dengan hasil Tabel 10 ditentukan berdasarkan *job* yang memerlukan *Stage 4*, *ready time*, serta *group palet*. Penentuan kriteria pengurutan ini didasari dari kemampuan mesin yang mengerjakan setiap *pieces* kaca sera memperhatikan *ready time* setiap *order* agar mesin tidak akan mengalami *idle*. *Completion time* dari *Stage 4* kemudian akan digunakan untuk menjadi *ready time* pada *Stage 5*.

Tabel 10. Penjadwalan *stage 4*

| Job | RIj4 | w | Grp | WJ | P | A | C |
|-----|-------|---|-----|----|-------|-------|-------|
| 5 | 2.8 | 6 | 4 | 1 | 16.67 | 2.8 | 19.47 |
| 3 | 7.41 | 8 | 3 | 1 | 33.33 | 19.47 | 52.8 |
| 4 | 0 | 8 | 1 | | | | |
| 1 | 28.68 | 8 | 2 | | | | |
| 2 | 88.93 | 4 | 5 | | | | |

Metode *sequencing* pada *Stage 4* akan digunakan juga untuk metode *sequencing Stage 7,8*, dan 9. Kesamaan metode ini didasari dari kemampuan mesin yang dapat mengerjakan per *pieces* kaca. Selain itu 4 *stage* ini merupakan proses yang tidak wajib dilewati oleh setiap *job*. *Stage 5* dan 6 mampu memproduksi dalam sistem *batch*. *Batch Stage 5* dipengaruhi warna tinta, sedangkan *batch Stage 6* dipengaruhi oleh

ketebalan, *kind of finish goods (KOFG)*, serta *kind of glass (KOG)*. *Processing time* setiap *job* pada mesin ini dipengaruhi oleh banyak *batch* serta banyaknya pergantian *batch* pengerjaan yang mempengaruhi *set-up time*. *Batch* pengerjaan dibagi berdasarkan kuantitas kaca dalam sekali *loading* sesuai dengan luas *loading space* tiap mesin. *Set-up time* akan disertakan dalam *processing time* ketika terjadi pergantian pengerjaan *batch* yang berbeda.

Hasil penjadwalan Tabel 11 didapatkan berdasarkan kriteria pengurutan *job* yang memerlukan proses pada *Stage 5*, bobot masing-masing *job*, waktu tunggu untuk memproses *batch job* yang sama, serta kode tinta. Setiap *job* yang selesai dikerjakan pada *Stage 5* memiliki flow proses yang akan memerlukan *Stage 6*. *Completion time* pada *Stage 5* kemudian akan digunakan sebagai *ready time* untuk *Stage 6*.

Tabel 11. Penjadwalan *stage 5*

| <i>Job</i> | <i>Rj5</i> | <i>w</i> | <i>Tin</i> | <i>Prt</i> | <i>Wt</i> | <i>Ql</i> | <i>Btc</i> | <i>P</i> | <i>A</i> | <i>C</i> |
|------------|------------|----------|------------|------------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 8 | B; | 1 | 0 | 11 | 35 | 3.5 | 0 | 3.5 |
| 2 | 28.68 | 8 | B; | 1 | 28 | 3 | 166 | 15 | 28.68 | 43.69 |
| 3 | 19.47 | 6 | | | 14 | | | | | |
| 4 | 52.8 | 8 | CC | | 49 | | | | | |
| 5 | 88.93 | 4 | | | 84 | | | | | |

Penjadwalan pada Tabel 12 diurutkan dengan memperhatikan kriteria yang memerlukan mesin *Stage 6*, *general ready time*, waktu tunggu, produk VLT atau normal *temper*, jenis raw glass, ketebalan, serta *ready time* tercepat. Kriteria *raw glass* didapatkan dari *kind of glass* kaca yang dibagi ke dalam beberapa kategori yaitu kaca *clear*, kaca *tinted*, dan kaca *non-tinted*. Kriteria pengurutan berikutnya berdasarkan dari ketebalan yang sama dan pada setiap ketebalan yang sama kemudian akan diurutkan berdasarkan *ready time* tercepat

Tabel 12. Penjadwalan *stage 6*

| <i>Job</i> | <i>GR</i> | <i>w</i> | <i>T</i> | <i>Tmp</i> | <i>RG</i> | <i>FG</i> | <i>Wt</i> | <i>Btc</i> | <i>P</i> | <i>A</i> | <i>C</i> |
|------------|-----------|----------|----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| 1 | 3 | 8 | 6 | 1 | 1 | VLT | 0 | 20 | 3.5 | 3.5 | 7 |
| 2 | 3 | 8 | 6 | 1 | 1 | VLT | 0 | 10 | 1.02 | 19.47 | 20.49 |
| 3 | 3 | 6 | 3 | 1 | 1 | T | 0 | 82 | 13.14 | 43.69 | 56.83 |
| 4 | 0 | 8 | 5 | | 1 | | | | | | |
| 5 | 0 | 4 | 5 | | 4 | | | | | | |

Hasil pengurutan serta *completion time* dari *Stage 6* kemudian akan digunakan sebagai *ready time Stage 7*, begitu juga seterusnya hingga *Stage 9*. Hasil *sequencing* pada *stage 9* kemudian akan diurutkan berdasarkan *completion time* tercepat yang berfungsi untuk mengetahui

urutan perencanaan suatu *job* dapat diselesaikan.

Tabel 13. Hasil akhir urutan seluruh *finsih job*

| <i>Job</i> | <i>Cj</i> | <i>Dj</i> | <i>Lj</i> | <i>Tj</i> | <i>wj</i> | <i>wjUj</i> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 7 | 21 | -14 | | 8 | |
| 3 | 20.75 | 21 | -0.25 | | 6 | |
| 2 | 56.83 | 21 | 35.83 | 35.83 | 8 | 8 |
| 4 | 72.8 | 21 | 51.8 | 51.78 | 8 | 8 |
| 5 | 88.93 | 36 | 52.93 | 52.93 | 4 | 4 |

Hasil akhir dari pengurutan yang ditunjukkan pada Tabel 13 dapat digunakan untuk menarik kesimpulan yang mana urutan *job* yang akan selesai terlebih dahulu didasari dari *job* dengan *completion time* tercepat. Hasil akhir tersebut kemudian akan digunakan kembali untuk mendapatkan banyak *job* yang terlambat yang ditunjukkan pada Tabel 14. Penjadwalan dengan 5 *job* ini didapati akan menghasilkan 3 *job* yang terlambat dengan total $w_j U_j$ sebesar 20 dari 34..

Tabel 14. Hasil parameter penjadwalan

| Parameter | U_j | n | $U_j(\%)$ | $w_j U_j$ | w_j | $w_j U_j(\%)$ |
|-----------|-------|-----|-----------|-----------|-------|---------------|
| Nilai | 3 | 5 | 60% | 20 | 34 | 59% |

Verifikasi dan Validasi

Proses verifikasi algoritma dilakukan dengan cara melakukan *running* program menggunakan data *dummy* pada Subab Hasil Penjadwalan, dan kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan *manual* yang akan disajikan dalam bentuk *Gantt Chart*. Kesamaan hasil akhir antara kedua metode tersebut akan menunjukkan bahwa pembuatan program algoritma telah terverifikasi. Tahap verifikasi ini menggunakan 20 data yang didapatkan dari beberapa referensi data asli perusahaan.

Tahap validasi dilakukan dengan mewawancarai staf *PPIC* yang bertanggung jawab membuat penjadwalan produksi. Program usulan penjadwalan pada penelitian mampu mengklasifikasikan *flow* mesin pada setiap *job* sesuai dengan di lantai produksi, selain itu metode pengerjaan telah sesuai dengan harapan dengan pengurutan pengerjaan yang seharusnya.

Perbandingan Metode Aktual dan Usulan

Metode aktual yang dikerjakan pada perusahaan akan dikerjakan secara manual dengan cara melakukan sorting berdasarkan due date terdekat dan kemudian customer prioritas. Dalam perbandingan ini digunakan hasil *running* 3 set data asli perusahaan yang dibuat pada tanggal 4 Mei 2021, 4 Juni 2021, dan 9 Juni 2021

Tabel 15. Perbandingan hasil perhitungan penjadwalan aktual dan usulan

| | | Uj | n | Uj(%) | wjUj | wj | wjUj(%) |
|-----------|---------|-----|-----|-------|------|------|---------|
| 4 Mei | Aktual | 592 | 830 | 71.3% | 3419 | 3751 | 91.1% |
| | Usulan | 422 | 830 | 50.8% | 2351 | 3751 | 62.7% |
| | Selisih | 170 | | 20.5% | 1068 | | 28.5% |
| 4 Jun | Aktual | 591 | 724 | 81.6% | 3897 | 4180 | 93.2% |
| | Usulan | 402 | 724 | 55.5% | 2545 | 4180 | 60.9% |
| | Selisih | 189 | | 26.1% | 1352 | | 32.3% |
| 9 Jun | Aktual | 567 | 690 | 82.2% | 3741 | 4086 | 91.6% |
| | Usulan | 370 | 690 | 53.6% | 2388 | 4086 | 58.4% |
| | Selisih | 197 | | 28.6% | 1353 | | 33.1% |
| Rata-rata | Aktual | | | 78.4% | | | 92.0% |
| | Usulan | | | 53.3% | | | 60.7% |
| | Selisih | | | 25.0% | | | 31.3% |

Hasil perbandingan pada rata-rata Tabel 15 menunjukkan bahwa metode usulan mampu menghasilkan jadwal dengan tingkat *job* terlambat sebesar 53.3%, sedangkan metode aktual sebesar 78.4%. Maka dapat disimpulkan bahwa metode usulan mampu menurunkan tingkat keterlambatan produksi kurang lebih sebesar 25% dibandingkan dengan metode aktual. Selain itu metode usulan mampu menghasilkan persentase bobot *job* yang terlambat sebesar 31.3% lebih baik daripada metode aktual.

Simpulan

Kondisi aktual perusahaan dengan metode penjadwalan yang selama ini dijalankan menghasilkan keterlambatan pengiriman sebesar 57% dari total keseluruhan *order*. Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan tingkat keterlambatan pengiriman tersebut dengan perbaikan pada metode penjadwalan.

Metode usulan penjadwalan yang dapat diberikan adalah dengan membuat program penjadwalan *flexible flowshop* pada *Microsoft Excel VBA*. Usulan penjadwalan yang diberikan mampu memberikan jadwal produksi untuk setiap mesin serta dapat dikerjakan dalam waktu yang lebih cepat dibandingkan metode aktual.

Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini adalah program penjadwalan usulan mampu menurunkan tingkat keterlambatan produksi sebesar 25% *job* dibanding penjadwalan aktual. Tingkat keterlambatan produksi yang menurun akan mempengaruhi tingkat keterlambatan

pengiriman, yang mana pada Januari - Mei 2021 terdapat keterlambatan pengiriman sebesar 57% diperkirakan dengan pengaplikasian metode usulan dapat diturunkan hingga tersisa 32% keterlambatan pengiriman.

Saran untuk *Plant I* PT. X memerlukan *controlling* pada sistem penjadwalan usulan yang telah dibuat, selain itu input *target shipped date* pada *order* parsial bisa terbaca melalui data FGCR agar hasil penjadwalan akan lebih aktual. Penelitian selanjutnya disarankan dapat memodelkan waktu proses setiap mesin secara aktual serta *transportation time* untuk masing-masing palet. Selain itu untuk *order* kaca industri dapat dilakukan penelitian untuk pembagian *batch* produksi agar dapat memperkirakan jadwal produksi yang lebih akurat pada seluruh *order*.

Daftar Pustaka

- Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse P., and Werner, F., An Evaluation of Sequencing Heuristics for Flexible Flowshop Scheduling Problems with Unrelated Parallel Machines and Dual Criteria, *Otto-von-Guericke-University*, 28(5) 2005, pp. 1–23.
- Pinedo, M. L., *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, 5th ed., Springer, New York, 2016.
- Kahraman, C., Engin, O., Kaya, I., and Öztürk, R. E., Multiprocessor Task Scheduling in Multistage Hybrid Flow-shops: A Parallel Greedy Algorithm Approach. *Journal of Applied Soft Computing*, 10(4), 2010, pp. 1293–1300.
- M'Hallah, R., and Bulfin, R. L., Minimizing The Weighted Number of Tardy Jobs on A Single Machine with Release Dates. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 2007, pp. 727–744.
- Baker, K. R., and Trietsch, D., *Principles of Sequencing and Scheduling*, 2nd ed., Wiley Series in Operations Research and Management Science, Hoboken, 2018.
- Naderi, B., Ruiz, R., and Zandieh, M., Algorithms for A Realistic Variant of Flowshop Scheduling. *Computers and Operations Research*, 37(2), 2009, pp. 236–246.
- Rubin, P. A., and Ragatz, G. L., Scheduling in A Sequence Dependent Setup Environment with Genetic Search. *Computers and Operations Research*, 22(1), 1995, pp. 85–99.