

Perancangan Penjadwalan *Flow Shop* dengan Metode *Drum Buffer Rope* untuk Meminimasi *Makespan* pada Proses Percetakan Buku Teks Pelajaran di PT Thursina Mediana Utama

1st Gita Fitri Auliya
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

gitafitri@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dida Diyah Damayanti
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

didadih@telkomuniversity.ac.id

3rd Pratya Poeri Suryadhini
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

pratya@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — PT Thursina Mediana Utama merupakan perusahaan penerbitan dan percetakan. Salah satu produk yang diterbitkan oleh perusahaan adalah buku teks pelajaran. Terjadi permasalahan keterlambatan penyelesaian produksi buku teks Pelajaran yang disebabkan tidak lancarnya aliran produksi karena adanya *bottleneck* di mesin web karena *input* yang diterima melebihi kapasitas mesin dan perusahaan tidak memiliki prioritas pesanan yang didahulukan. Metode *drum buffer rope* diterapkan pada permasalahan tersebut dengan menjadikan mesin web sebagai *drum* yaitu titik kendali dalam penjadwalan, lalu *rope* yaitu *forward scheduling* pada operasi setelah mesin web dan *backward scheduling* pada operasi sebelum mesin dengan melakukan *lot splitting* berdasarkan kapasitas mesin web. Hasil urutan pekerjaan dibantu dengan menggunakan algoritma *Nawaz, Ensore, and Ham (NEH)*. Penjadwalan tersebut menghasilkan penurunan *makespan* pada *job* periode Bulan Maret menjadi 3012,51 menit, turun sebesar 4% dari kondisi aktual yaitu 3136,84 menit dan untuk *job* periode Bulan April menjadi 4246,60 menit, turun sebesar 14% dari kondisi aktual yaitu 4956,12 menit. Lalu penurunan *manufacturing lead time* untuk *job* periode Bulan Maret menjadi 364,86 menit, turun sebesar 68% dari kondisi aktual yaitu 1139,04 menit dan untuk *job* periode Bulan April menjadi 1192,89 menit, turun sebesar 57% dari kondisi aktual yaitu 2768,19 menit. Kemudian penurunan *queue time* sebesar 100% untuk keseluruhan *job*.

Kata kunci — Percetakan, *flow shop scheduling*, *bottleneck*, *drum buffer rope*, *lot splitting*, algoritma NEH

I. PENDAHULUAN

PT Thursina mediana Utama merupakan perusahaan penerbitan dan percetakan dengan salah satu produk yang diterbitkan adalah buku-buku teks pelajaran mulai dari jenjang PAUD hingga SMA. Dalam memenuhi permintaan pelanggan, PT Thursina mediana Utama menerapkan *make to order* dan *pull system* karena produk yang dihasilkan diperoleh berdasarkan spesifikasi yang diinginkan oleh pelanggan dan perusahaan hanya akan memulai proses produksi ketika menerima pesanan masuk dari pelanggan [1], [2]. Permintaan buku teks pelajaran biasanya meningkat

di akhir semester genap maupun ganjil untuk memenuhi buku teks pelajaran di tahun ajaran baru. Berdasarkan data histori produksi buku teks pelajaran Bulan Maret-April 2022, terdapat pesanan yang mengalami keterlambatan waktu selesai produksinya terhadap *due date* yang telah disepakati oleh perusahaan dan pelanggan.

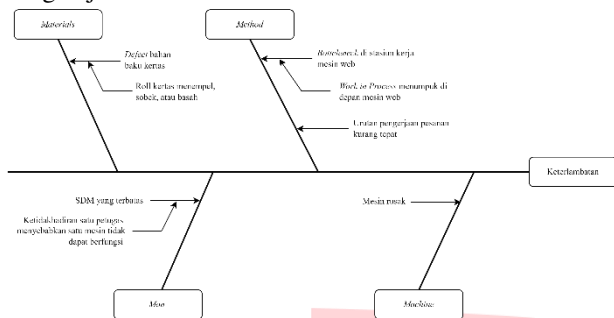
TABEL 1

Data produksi buku teks pelajaran Bulan Maret-April 2022 (PT Thursina mediana Utama, 2022)

	Code Pesanan	Tanggal Mulai Produksi	Due Date	Tanggal Aktual Selesai Produksi	Keterangan
1	BS.PA.UD4501	24/03/2022	25/03/2022	25/03/2022	Tepat waktu
2	BS.PA.UD4502	24/03/2022	25/03/2022	25/03/2022	Tepat waktu
3	BS.PA.UD4503	24/03/2022	25/03/2022	25/03/2022	Tepat waktu
4	BS.PA.UD4504	24/03/2022	25/03/2022	25/03/2022	Tepat waktu
5	BS.PA.UD4505	24/03/2022	25/03/2022	26/03/2022	Terlambat 1 hari
6	BS.PA.UD4506	24/03/2022	25/03/2022	26/03/2022	Terlambat 1 hari
7	BS.PA.UD4507	24/03/2022	25/03/2022	26/03/2022	Terlambat 1 hari
8	BS.PA.UD4508	24/03/2022	25/03/2022	26/03/2022	Terlambat 1 hari
9	BS.PA.UD5601	24/03/2022	25/03/2022	27/03/2022	Terlambat 2 hari
10	BS.PA.UD5602	24/03/2022	25/03/2022	27/03/2022	Terlambat 2 hari
11	BS.PA.UD5603	24/03/2022	25/03/2022	27/03/2022	Terlambat 2 hari
12	BS.PA.UD5604	24/03/2022	25/03/2022	27/03/2022	Terlambat 2 hari
13	BS.PA.UD5605	24/03/2022	25/03/2022	28/03/2022	Terlambat 3 hari
14	BS.PA.UD5606	24/03/2022	25/03/2022	28/03/2022	Terlambat 3 hari
15	BS.PA.UD5607	24/03/2022	25/03/2022	28/03/2022	Terlambat 3 hari
16	BS.PA.UD5608	24/03/2022	25/03/2022	28/03/2022	Terlambat 3 hari
17	BS.0101	04/04/2022	05/04/2022	07/04/2022	Terlambat 2 hari
18	BS.0103	04/04/2022	05/04/2022	08/04/2022	Terlambat 3 hari
19	BS.0102	04/04/2022	05/04/2022	09/04/2022	Terlambat 4 hari
20	BS.0104	04/04/2022	05/04/2022	10/04/2022	Terlambat 5 hari

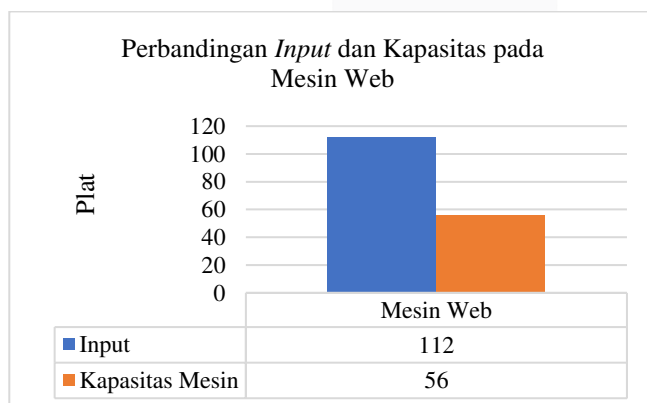
Berdasarkan hasil wawancara dengan *supervisor* di bagian produksi dan observasi lapangan, keterlambatan disebabkan dari beberapa faktor yang dapat dilihat pada Gambar 2. Faktor mesin adalah mesin rusak sehingga proses perbaikan dapat berlangsung maksimal selama tiga hari tergantung pada tingkat kerusakan mesin, lalu adanya faktor Sumber Daya Manusia (SDM) yaitu keterbatasan SDM. Faktor material disebabkan bahan baku kertas berbentuk *roll* yang digunakan *defect* seperti gulungan menempel, sobek, atau basah sehingga operator maupun *helper* perlu membuka gulungan hingga menemukan lembaran yang

tidak mengalami *defect*. Faktor metode yang menjadi kendala adalah urutan pengerjaan pesanan yang dilakukan oleh perusahaan kurang tepat sehingga menyebabkan *bottleneck* yang berujung pada penumpukan barang setengah jadi.



GAMBAR 1
Fishbone diagram

Stasiun kerja yang mengalami *bottleneck* adalah mesin web berupa penumpukan plat. Selama satu *shift* normal (08.00-16.00) atau selama 7 jam mesin baking (operasi sebelum mesin web) dapat menghasilkan 112 plat, sementara *input* yang dapat diterima oleh mesin web selama satu *shift* adalah 56 plat. Untuk ilustrasi secara mendetail mengenai *input* yang diterima dan kapasitas dari mesin web dapat dilihat pada Gambar 3. Lalu, penyebab lain dalam faktor metode adalah perusahaan tidak memiliki prioritas pesanan yang akan dikerjakan terlebih dahulu sehingga pesanan dikerjakan berdasarkan proses *editing* format buku teks pelajaran yang selesai paling cepat.



GAMBAR 2
Input dengan kapasitas mesin yang mengalami *bottleneck*

Penumpukan plat di depan mesin web dan tidak adanya prioritas pesanan yang akan dikerjakan terlebih dahulu menyebabkan *makespan* menjadi lama karena melebihi *due date* yang sudah ditentukan sebelumnya atau pesanan mengalami keterlambatan penyelesaian produksinya. *Makespan* merupakan waktu penyelesaian dari pekerjaan (*job*) pertama hingga *job* terakhir [3]. Berdasarkan permasalahan yang terjadi, dibutuhkan penjadwalan terhadap pesanan buku teks pelajaran dengan tujuan meminimasi *makespan* agar waktu proses dari keseluruhan *job* dapat diselesaikan lebih cepat dengan menentukan urutan *job* yang tepat dan mempertimbangkan permasalahan *bottleneck* yang terjadi pada mesin web.

II. KAJIAN TEORI

A. Theory of constraint

Theory of Constraint (TOC) adalah *body of knowledge* yang menangani segala sesuatu yang membatasi atau adanya kendala pada kemampuan sebuah proses untuk mencapai tujuannya [4]. Terdapat lima langkah untuk mengenali dan mengelola keterbatasan dalam TOC [5]:

1. Identifikasi sumber daya yang menjadi hambatan dalam proses operasi.
2. Mengeksplorasi sumber daya yang menjadi kendala.
3. Melakukan subordinasi sumber daya lainnya ke sumber daya batasan.
4. Menentukan solusi atau cara untuk mengatasi hambatan atau menghilangkannya secara keseluruhan.
5. Ketika kendala sudah teratasi, kembali ke langkah pertama untuk mengidentifikasi kendala yang baru.

B. Drum buffer rope

Metode *Drum buffer rope* merupakan sistem penjadwalan pengembangan dari TOC yang memiliki pendekatan secara spesifik. Metode *Drum buffer rope* cukup erat kaitannya dengan *pull system* [6]. Berikut langkah-langkah penjadwalan dalam pengimplementasian *Drum buffer rope* [7]:

1. Menjadwalkan operasi di sumber daya yang mengalami *bottleneck* terlebih dahulu.
2. Melakukan penjadwalan *backward* di operasi sebelum operasi *bottleneck* hingga operasi pertama.
3. Melakukan penjadwalan *forward* di operasi setelah operasi *bottleneck* hingga operasi terakhir.
4. Menentukan *buffer time* di sumber daya yang mengalami *bottleneck*.

Melakukan penjadwalan dengan berbagai ukuran *batch* merupakan metode *drum buffer rope* yang dikembangkan agar memperoleh *output* terbesar dari operasi yang mengalami hambatan. Terdapat dua istilah *batch* yang digunakan, yaitu *Process batch* adalah lot dasar yang digunakan untuk diproduksi pada suatu pekerjaan dan *Transfer batch* adalah lot yang dikirim dari satu operasi ke operasi lainnya untuk meningkatkan performansi operasi yang mengalami hambatan.

Penggunaan *batch* pada penjadwalan ini mengakibatkan operasi yang dapat dipecah menjadi dua bagian atau lebih dan mengurangi waktu tunggu di operasi yang mengalami hambatan [5].

C. Algoritma Nawaz, Enscore, and Ham (NEH)

Tahapan dari algoritma NEH adalah dimulai dari menghitung total waktu proses pada setiap *job* lalu mengurutkan *job* dengan total waktu proses paling lama hingga paling singkat. Kemudian mengambil dua *job* paling atas dalam urutan dan menghitung *makespan* lalu memilih urutan *job* dengan *makespan* terkecil. Sisipkan *job* selanjutnya dalam urutan, hitung kembali *makespan*, dan pilih *makespan* terkecil. Lakukan langkah tersebut hingga seluruh *job* selesai dihitung [8].

D. Pengukuran Waktu Kerja

Dalam melakukan pengukuran waktu kerja, terdapat beberapa metode, salah satunya adalah *time study* [9]. Setelah melakukan pengamatan terhadap waktu siklus

sebanyak 30 kali, dilakukan uji terhadap hasil pengamatan berikut.

1. Uji keseragaman data

Uji keseragaman data dilakukan untuk menguji bahwa data yang dikumpulkan berasal dari sistem yang sama [10].

2. Uji kecukupan data

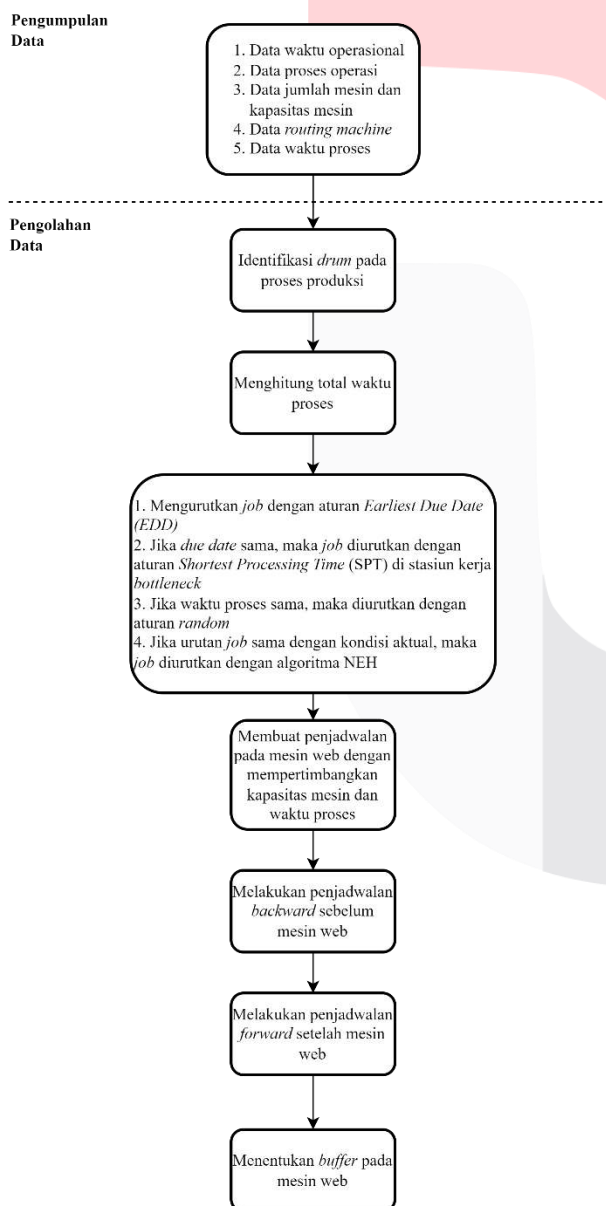
Pengujian kecukupan data bertujuan untuk menentukan apakah jumlah data hasil pengamatan sudah mencukupi untuk diolah dalam penelitian. Banyaknya pengamatan yang dilakukan dalam proses pengambilan data pengamatan dipengaruhi oleh dua faktor yaitu tingkat ketelitian dan tingkat kepercayaan [11].

3. Uji normalitas

Uji normalitas dilakukan dengan tujuan mengetahui apakah data yang digunakan berdistribusi normal atau tidak [12].

III. METODE

Berikut merupakan metodologi penyelesaian masalah.



Gambar 3

Metodologi penyelesaian masalah

A. Tahap pengumpulan data

Data-data yang dikumpulkan pada tahap ini diantaranya adalah data waktu operasional, data proses operasi, data jumlah dan kapasitas mesin, data *routing machine*, dan data waktu proses pada proses percetakan buku teks pelajaran ukuran A4.

B. Persamaan

1. Menjadwalkan operasi di *constraint system* atau *drum* pada proses produksi

1) Menghitung *Manufacturing Lead Time* (MLT) setelah operasi kendala

$$\text{MLT setelah operasi kendala} = \sum (\text{total time} + \text{MT operasi setelah } i) \quad \text{III.1}$$

2) Menghitung *lastest finish* (LF) pada stasiun kerja kendala

$$\text{LF kendala kode job}_i = \text{LF akhir job} - \text{MLT setelah operasi kendala} \quad \text{III.2}$$

3) Menghitung waktu selesai atau *earliest finish* (EF) pada operasi kendala

$$\text{EF kendala kode job}_i = \text{LF kendala kode job}_i - \text{space time} \quad \text{III.3}$$

4) Menghitung waktu mulai atau *earliest start* (ES) di operasi kendala

$$\text{ES kendala kode job}_i = \text{EF kendala kode job}_i - \text{total time} \quad \text{III.4}$$

2. Melakukan simulasi pada stasiun kerja *non-constraint*

1) Melakukan *forward scheduling* di operasi setelah *constraint system*

ES (waktu mulai) operasi berikutnya diperoleh dengan cara:

$$\text{ES}_{(i+1)} = \text{EF}_i + \text{Moving Time} \quad \text{III.5}$$

EF (waktu selesai) *job* pada setiap operasi diperoleh dengan cara:

$$\text{EF}_i = \text{ES}_i + \text{Total Time}_i \quad \text{III.6}$$

2) Melakukan *backward scheduling* di operasi sebelum *constraint system*

EF operasi sebelum *workstation* yang menjadi titik kendali (i) untuk penjadwalan mundur diperoleh dengan cara:

$$\text{EF operasi ke}_{i-1} = \text{ES operasi}_i - \text{Moving Time}_{i-1} \quad \text{III.7}$$

ES operasi sebelum *workstation* yang menjadi titik kendali (i) untuk penjadwalan mundur diperoleh dengan cara:

$$\text{ES operasi ke}_{i-1} = \text{EF operasi ke}_{i-1} - \text{Total Time}_{i-1} \quad \text{III.8}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi *drum* atau *constraint system* pada proses produksi

Pada penelitian ini, stasiun kerja yang menjadi hambatan terdapat pada stasiun kerja mesin web dikarenakan *input* yang diterima melebihi kapasitas yang dimiliki oleh mesin sehingga terdapat penumpukan *work in process* (WIP) yang menyebabkan mesin web adalah stasiun kerja yang mengalami *bottleneck* sehingga mesin web diidentifikasi sebagai *drum* pada proses produksi.

B. Menghitung total waktu proses

Waktu proses didapat setelah melakukan pengamatan waktu siklus. Untuk mesin dengan waktu proses yang dipengaruhi oleh banyaknya plat yang digunakan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$P_i = CT \times Qty \quad IV.1$$

P_i = Waktu proses CT = *Cycle time* Qty = *Quantity*

Selain penggunaan plat, waktu proses pada proses percetakan juga dapat bervariasi berdasarkan jumlah ekslembar yang dicetak. Waktu siklus di mesin TSK adalah 85,08 menit untuk 4000 ekslembar, sehingga satu ekslembar adalah $85,08/4000 = 0,21$ menit. Selanjutnya 0,21 menit dikalikan dengan jumlah ekslembar per *job*

C. Mengurutkan *job* dengan aturan EDD, SPT, *random*, dan algoritma NEH

Batas keterlambatan atau *due date* setiap *order* ditetapkan ketika produksi buku teks pelajaran yang sedang diproses di lantai produksi tidak selesai pada hari itu dan buku teks pelajaran selesai diproses melebihi waktu kerja efektif dalam satu hari tersebut. Dengan demikian, *due date* setiap buku teks pelajaran sama karena waktu kerja efektif untuk setiap buku teks pelajaran adalah sama. Dikarenakan keseluruhan *job* memiliki *due date* yang sama, maka dilanjutkan pada aturan berikutnya yaitu menentukan urutan *job* menggunakan aturan SPT di mesin web.

Untuk *job* periode Bulan April terdapat perubahan urutan *job* karena waktu proses di mesin web berbeda-beda dengan hasil urutan sebagai berikut.

TABEL 2
Urutan pengerjaan *job* dengan aturan SPT

Periode (Bulan)	Job	Total Time Mesin Web (menit)	Urutan Pengerjaan
Maret	J01	177,11	1
	J02	177,11	2
	J03	177,11	3
	J04	177,11	4
	J05	177,11	5
	J06	177,11	6
	J07	177,11	7
	J08	177,11	8
	J09	177,11	9
	J10	177,11	10
	J11	177,11	11
	J12	177,11	12
	J13	177,11	13
	J14	177,11	14
	J15	177,11	15
	J16	177,11	16
April	J18	885,56	1
	J17	929,83	2
	J20	1062,67	3
	J19	1151,22	4

Periode Bulan Maret memiliki waktu proses dan *due date* yang sama, jika diurutkan secara *random* menyebabkan urutan pekerjaan tetap sama dengan kondisi aktual. Untuk mendapatkan urutan *job* yang lebih baik dari kondisi aktual dapat menggunakan algoritma NEH. Iterasi pada algoritma NEH dilakukan hingga seluruh *job* sudah masuk kedalam urutan penjadwalan. Rangkuman iterasi dan hasil dari pengurutan *job* dengan algoritma NEH dapat dilihat pada Tabel 3.

TABEL 3
Rangkuman NEH

Iterasi Ke-	Urutan Job	Makespan (menit)	Mean Flow Time (menit)
1	J06-J07 J07-J06	642,84 721,01	
2	J05-J06-J07 J06-J05-J07 J06-J07-J05	731,94 730,07 818,87	
3	J08-J06-J05-J07 J06-J08-J05-J07 J06-J05-J08-J07 J06-J05-J07-J08	907,18 907,18 907,18 907,18	714,23 713,76 713,76 691,56
4	J16-J06-J05-J07-J08 J06- J16-J05-J07-J08 J06-J05-J16-J07-J08 J06-J05-J07-J16-J08 J06-J05-J07-J08-J16	1260,91 1084,29 1084,29 1084,29 1083,21	
5	J15-J06-J05-J07-J08-J16 J06-J15-J05-J07-J08-J16 J06-J05-J05-J15-J08-J16 J06-J05-J07-J08-J15-J16 J06-J05-J07-J08-J16-J15	1337,69 1260,32 1260,32 1260,32 1259,81	
6	J04-J06-J05-J07-J08-J16-J15 J06-J04-J05-J07-J08-J16-J15 J06-J05-J04-J07-J08-J16-J15 J06-J05-J07-J04-J08-J16-J15 J06-J05-J07-J08-J04-J16-J15 J06-J05-J07-J08-J16-J04-J15 J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04	1436,92 1436,92 1436,92 1436,92 1436,92 1436,92 1343,88	
7	J14-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04 J06-J14-J05-J07-J08-J16-J15-J04 J06-J05-J14-J07-J08-J16-J15-J04 J06-J05-J07-J14-J08-J16-J15-J04 J06-J05-J07-J08-J14-J16-J15-J04 J06-J05-J07-J08-J16-J14-J15-J04 J06-J05-J07-J08-J16-J15-J14-J04 J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14	1689,36 1611,99 1611,99 1611,99 1611,99 1611,99 1611,99 1611,54	

Iterasi Ke-	Urutan Job	Makespan (menit)	Mean Flow Time (menit)	Iterasi Ke-	Urutan Job	Makespan (menit)	Mean Flow Time (menit)
8	J10-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14	1788,65		10	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J12-J10-J13	2141,36	
	J06-J10-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14	1788,65			J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J12-J13	2141,36	
	J06-J05-J10-J07-J08-J16-J15-J04-J14	1788,65		J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2138,53		
	J06-J05-J07-J10-J08-J16-J15-J04-J14	1788,65		J03-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2939,02		
	J06-J05-J07-J08-J10-J16-J15-J04-J14	1788,65		J06-J03-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
	J06-J05-J07-J08-J16-J10-J15-J04-J14	1788,65		J06-J05-J03-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J10-J04-J14	1788,65		J06-J05-J07-J03-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J10-J14	1788,65		J06-J05-J07-J03-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10	1787,86		J06-J05-J07-J08-J03-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
	J13-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10	2042,35		J06-J05-J07-J08-J03-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65		
J06-J13-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J03-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J13-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J03-J15-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J13-J08-J16-J15-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J03-J04-J14-J10-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J08-J13-J16-J15-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J03-J14-J10-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J08-J16-J13-J15-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J03-J10-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J13-J04-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J03-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J13-J14-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J03-J13-J12	2315,65				
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2312,80				
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98		12	J11-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2567,28		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98			J06-J11-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98			J06-J05-J11-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98			J06-J05-J07-J11-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J13-J10	1694,98						

Iterasi Ke-	Urutan <i>Job</i>	<i>Makespan</i> (menit)	<i>Mean Flow Time</i> (menit)	
12	J06-J05-J07-J08-J11-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J11-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J11-J04-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J11-J14-J10-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J11-J10-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J11-J13-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J11-J12-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J11-J03	2489,91		
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11	2488,80		
	13	J02-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2743,29
J06-J02-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J02-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J02-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J08-J02-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J02-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J02-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J02-J14-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		
J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J02-J10-J13-J12-J03-J11		2665,91		

Iterasi Ke-	Urutan <i>Job</i>	<i>Makespan</i> (menit)	<i>Mean Flow Time</i> (menit)
13	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J02-J13-J12-J03-J11	2665,91	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J02-J12-J03-J11	2665,91	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J02-J03-J11	2665,91	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J02-J11	2665,91	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2664,91	
14	J01-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2919,38	
	J06-J01-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J01-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J01-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J01-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J01-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J01-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J01-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J01-J10-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J01-J13-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J01-J12-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J01-J03-J11-J02	2842,00	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J01-J11-J02	2842,00	

Iterasi Ke-	Urutan Job	Makespan (menit)	Mean Flow Time (menit)
14	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J01-J02 J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	2842,00 2840,34	
15	J09-J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3094,83	
	J06-J09-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J09-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J09-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J09-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J09-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J09-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J09-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J09-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J09-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01	3017,45	
	J06-J05-J07-J08-J16-J15-J04-J14-J10-J13-J12-J03-J11-J02-J01-J09	3013,86	

Setelah melakukan *sequencing* pada *job* yang akan dijadwalkan, maka hasil urutan *job* adalah sebagai berikut.

TABEL 4
Hasil Urutan *job*

Periode (bulan)	Urutan Job
Maret	J06 – J05 – J07 – J08 – J16 – J15 – J04 – J14 – J10 – J13 – J12 – J03 – J11 – J02 – J01 – J09
April	J18 – J17 – J19 – J20

D. Melakukan penjadwalan di mesin web

Menjadwalkan operasi di *constraint system* atau *drum* pada proses produksi

- Menghitung MLT setelah operasi kendala
Dengan menggunakan persamaan III.1, maka
MLT $(35,32 + 39,89 + 88,56 + 17,66 + 19,65 + 71,47 + 107,27) + (0,11 + 0,12 + 0,11 + 3,54 + 6,82) = 390,80$ menit
Maka MLT setelah mesin web pada J06 adalah 390,80 menit.
 - Menghitung *lastest finish* (LF) pada stasiun kerja kendala
Dengan menggunakan persamaan III.2, didapat perhitungan berikut.
LF operasi mesin web $= 1290 - 390,80 = 899,20$ menit
Maka LF operasi mesin web pada J06 adalah 899,20 menit.
 - Menghitung waktu selesai (EF) pada operasi kendala
Dengan menggunakan persamaan III.3, didapat perhitungan berikut.
EF operasi mesin web J06 $= 1126,01 - 899,20 = 163,99$ menit
Maka EF operasi mesin web untuk J06 adalah 163,99 menit.
 - Menghitung waktu mulai (ES) di operasi kendala
Dengan menggunakan persamaan III.4, didapat perhitungan berikut.
ES operasi mesin web J06 $= 163,99 - 88,56 = 75,44$ menit
Maka ES operasi mesin web untuk J06 adalah 75,44 menit.
- E. Membuat penjadwalan pada mesin web dengan mempertimbangkan kapasitas mesin dan waktu proses
Alur proses produksi pada penjadwalan kondisi usulan memiliki alur yang berbeda dengan penjadwalan kondisi aktual, yaitu terjadi operasi sebanyak dua kali atau lebih dari stasiun kerja mesin CTP, mesin baking, dan mesin web tergantung kebutuhan plat yang digunakan untuk masing-masing *job* yang dijadwalkan. Contohnya untuk *job* yang menggunakan 16 plat maka operasi pada mesin CTP, mesin baking, dan mesin web dilakukan sebanyak dua kali karena mesin web hanya memiliki kapasitas sebanyak 8 plat untuk sekali siklus operasi.
- F. Melakukan *penjadwalan forward* di operasi sebelum mesin web
Dengan menggunakan persamaan III.5, didapat perhitungan berikut.
ES operasi mesin web J06 operasi kedua $= 163,99 + 0 = 163,99$ menit
Maka ES di operasi kedua mesin web bagi J06 adalah 163,99 menit.

G. Melakukan *penjadwalan backward* di operasi setelah mesin web

Dengan menggunakan persamaan III.7, didapat perhitungan berikut.

EF operasi mesin baking J06 operasi pertama = $75,44 - 0,12 = 75,32$ menit

Maka EF di operasi mesin baking J06 untuk operasi pertama adalah 75,32 menit.

Lalu untuk mengetahui waktu mulai mesin baking dapat menggunakan persamaan III.8, didapat perhitungan berikut.

ES operasi mesin baking J06 operasi pertama = $75,32 - 39,89 = 35,43$ menit

Maka ES di operasi mesin baking J06 untuk operasi pertama adalah 35,43 menit.

H. Menentukan *buffer time* pada mesin web

Setelah melakukan penjadwalan dengan mempertimbangkan kapasitas dari mesin web, melakukan *forward* dan *backward scheduling*, didapat hasil dari penjadwalan tersebut bahwa tidak ada waktu antrian di depan mesin web atau dengan kata lain tidak ada plat yang menunggu untuk digunakan di depan mesin web sehingga *queue time* = 0. Hal tersebut menandakan bahwa pada proses operasi ini tidak lagi memerlukan *buffer time* karena tidak ada plat yang menunggu di depan mesin web maka *buffer time* = 0.

I. Menghitung performansi penjadwalan usulan

1. *Manufacturing Lead Time*

Manufacturing Lead Time (MLT) merupakan interval waktu dari sebuah *job* mulai diproses di lantai produksi hingga pengiriman ke gudang atau proses selanjutnya [13].

$MLT_{job_i} =$

EF operasi akhir job_i - ES operasi awal job_i IV.1

2. *Queue Time*

Waktu antrian pada *job* yang menunggu untuk diproses pada sebuah mesin yang masih memproses *job* lainnya [7].

$Queue\ time =$

ES job_i mesin_i - EF job_i mesin_i - *moving time* IV.2

3. *Makespan*

Makespan merupakan waktu penyelesaian dari *job* pertama hingga *job* terakhir [3]. *Makespan* didapat dari melihat waktu akhir ketika seluruh *job* selesai diproses pada penjadwalan yang dibuat.

J. Evaluasi Hasil Rancangan

Penjadwalan kondisi aktual yang hanya melakukan *forward scheduling* tanpa mempertimbangkan kapasitas mesin menyebabkan adanya penumpukan plat di depan mesin web sehingga terdapat *queue time* dan *makespan* yang dihasilkan pun menjadi lama, begitu pula dengan MLT pada setiap *job*.

TABEL 5
Evaluasi hasil rancangan

Performansi	Penjadwalan Kondisi Aktual		Penjadwalan Kondisi Usulan	
	Maret	April	Maret	April
Rata-rata MLT	1137,84	2768,19	364,86	1192,89
Rata-rata <i>queue time</i>	580,48	720,73	0,00	0,00

<i>Makespan</i>	3136,84	4956,12	3012,51	4246,60
-----------------	---------	---------	---------	---------

Perancangan penjadwalan menggunakan konsep *theory of constraint* dan metode penjadwalan *drum buffer rope* dapat meningkatkan performansi di stasiun kerja *bottleneck* dan mengatasi permasalahan yang ada. Berdasarkan tahapan pada metodologi penyelesaian masalah, penjadwalan usulan menghasilkan penurunan MLT sebesar 772,98 menit untuk *job* periode Bulan Maret dan 1575,30 menit untuk *job* periode Bulan April, tidak adanya waktu antrian di depan mesin web untuk *job* di kedua periode, dan penurunan *makespan* sebesar 124,33 menit untuk *job* periode Bulan Maret dan 709,52 menit untuk *job* periode Bulan April.

V. KESIMPULAN

Pada kondisi aktual, terdapat permasalahan *bottleneck* pada mesin web yang menyebabkan keterlambatan penyelesaian proses percetakan buku teks pelajaran sehingga melebihi *due date* yang ditetapkan. Perusahaan juga tidak memiliki prioritas pesanan yang dikerjakan terlebih dahulu atau pesanan dikerjakan secara acak berdasarkan pesanan yang menyelesaikan proses *editing* paling cepat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan penjadwalan dengan menggunakan metode *drum buffer rope* yang berfokus pada permasalahan *bottleneck* dan algoritma NEH untuk menentukan urutan pesanan yang dikerjakan lebih dahulu.

Setelah melakukan penjadwalan usulan, didapat hasil berupa penurunan *makespan* untuk *job* periode Bulan Maret menjadi 3012,51 menit, turun sebesar 4% dari kondisi aktual yaitu 3136,84 menit dan untuk *job* periode Bulan April menjadi 4246,60 menit, turun sebesar 14% dari kondisi aktual yaitu 4956,12 menit. Lalu penurunan MLT untuk *job* periode Bulan Maret menjadi 364,86 menit, turun sebesar 68% dari kondisi aktual yaitu 1137,84 menit dan untuk *job* periode Bulan April menjadi 1192,89 menit, turun sebesar 57% dari kondisi aktual yaitu 2768,19 menit. Kemudian penurunan *queue time* sebesar 100% untuk keseluruhan *job* di kedua periode.

REFERENSI

- [1] T. Mclean, "On Time, In Full Achieving Perfect Delivery with Lean Thinking in Purchasing, Supply Chain, and Production Planning," 2017.
- [2] D. R. Sule, "Production Planning and Industrial Scheduling Examples, Case Studies and Applications, Second Edition," 2008.
- [3] R. Ginting, Penjadwalan Mesin. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2009.
- [4] J. Heizer, B. Render, and C. Munson, *Operations management: sustainability and supply chain management, Twelfth Edition*. United States of America: Pearson Education, Inc, 2017.
- [5] W. J. Stevenson, *Operations management*. McGraw-Hill/Irwin, 2012.
- [6] S. N. Chapman, *The fundamentals of production planning and control*. Pearson/Prentice Hall, 2006.

- [7] A. S. Viady, P. P. Suryadhini, and M. Rendra, "Flowshop Scheduling with Drum-Buffer-Rope and CDS Algorithm to Minimize Lateness and Work in Process at PT. AKS," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/528/1/012059.
- [8] D. M. Utama, "Pengembangan Algoritma NEH dan CDS untuk Meminimasi Consumption Energy pada Penjadwalan Flow Shop," 2018.
- [9] S. Wignjosuebrot, *Ergonomi, Studi Gerak, dan Waktu*. Surabaya: Guna Widya, 2000.
- [10] E. M. Sari and Darmawan Muchtar, "Pengukuran Waktu Baku dan Analisis Beban Kerja pada Proses Filling dan Packing Produk Lulur Mandi di PT.Gloria Origita Cosmetics," *ASIIMETRIK: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, vol. 2, no. 1, 2020, Accessed: Aug. 06, 2023. [Online]. Available: <https://journal.univpancasila.ac.id/index.php/asiimetrik/article/view/1253/831>
- [11] M. A. Rafian and A. Muhsin, "Analisis Beban Kerja Mekanik pada Departemen Plant dengan Metode Work Sampling (Studi Kasus Pada PT XYZ)," vol. 10, 2017.
- [12] A. A. Muis *et al.*, "Rancangan Meja Pengatur Ketinggian Otomatis Menggunakan Pendekatan Antropometri Dengan Metode Quality Function Deployment (QFD)," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 1, pp. 114–122, 2022.
- [13] R. Rieswien, P. P. Suryadhini, and W. Juliani, "Perancangan Sistem *Scheduling Job* Menggunakan *Drum Buffer Rope* Untuk Meminimasi Keterlambatan Order dan Manufacturing Lead Time pada Bagian Machining MPM di PT. Dirgantara Indonesia," *Jurnal Rekayasa Sistem & Industri*, 2014.