

Penjadwalan *Job Shop* Dengan Pendekatan Algoritma *Artificial Immune System*

Riven Nasution*, Annisa Kesya Garside, Dana Marsetiya Utama

Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang
Jl. Raya Tlogomas No.246 Malang, Jawa Timur, Phone: +62 341 464 318, Fax: +62 341 460 435
*Surel: rivennasution@gmail.com

Abstract

Production scheduling is an important activity in manufacturing. Optimal scheduling affects the time of completion of the work. PT. Interpack is a company that produces packaging machines. The job schedule of the product spare part still uses the random priority rules. Use of random rules makes a lot of time delay. Delay causes operator and machine idle. Delay also causes the total time of completion of the work (makespan) and delay the greater. So it needs to be rescheduled to work on the spare part of product. Job scheduling using the Artificial Immune System (AIS) algorithm. AIS was developed by Farmer et al. The AIS algorithm refers to the human immune system. The stages of the AIS algorithm begin with random initialization, antibody representation and gene classification, clone breeding, selection of donor antibodies, germ-line construction, gene fragmentation redesign, and ending with diversification of antibodies. AIS algorithm scheduling resulted in a more optimal new schedule. AIS algorithm scheduling generates a future of 6483.91 minutes. Company scheduling generates makespan of 7059.99 minutes. AIS Schedule finishes algorithm 4 days of the due date. AIS algorithm schedule increase machine utility by 1%.

Keywords: *artificial immune system, job shop, scheduling*

Abstrak

Penjadwalan produksi merupakan aktivitas penting di manufaktur. Penjadwalan yang optimal mempengaruhi waktu penyelesaian pekerjaan. PT. Interpack merupakan perusahaan yang memproduksi mesin pengemas. Jadwal pengerjaan spare part produk masih menggunakan aturan prioritas random. Penggunaan aturan random membuat banyak waktu delay. Delay menyebabkan operator dan mesin menganggur. Delay juga menyebabkan total waktu penyelesaian pekerjaan (makespan) dan keterlambatan semakin besar. Sehingga perlu dilakukan penjadwalan ulang untuk pengerjaan spare part produk. Penjadwalan usulan menggunakan algoritma Artificial Immune System (AIS). AIS dikembangkan oleh Farmer dan kawan-kawan. Algoritma AIS mengacu pada sistem kekebalan tubuh manusia. Tahapan algoritma AIS dimulai dengan inialisasi acak, representasi antibodi dan klasifikasi gen, pengembangbiakan clone, seleksi antibodi-antibodi donor, konstruksi germ-line, pengaturan ulang fragmen gen, dan diakhiri dengan diversifikasi antibodi. Penjadwalan algoritma AIS menghasilkan jadwal baru yang lebih optimal. Penjadwalan algoritma AIS menghasilkan makespan sebesar 6483,91 menit. Penjadwalan perusahaan menghasilkan makespan sebesar 7059,99 menit. Jadwal algoritma AIS menyelesaikan lebih cepat 4 hari dari due date dan mampu meningkatkan utilitas mesin sebesar 1 %.

Kata kunci: *artificial immune system, job shop, penjadwalan*

1. Pendahuluan

Penjadwalan adalah kegiatan pengalokasian sumber-sumber atau mesin-mesin yang ada untuk menjalankan sekumpulan tugas dalam jangka waktu tertentu [1]. Penjadwalan juga bisa diartikan proses pengurutan pembuatan produk secara menyeluruh pada beberapa mesin [2]. Penjadwalan yang terperinci akan memerlukan

informasi yang lebih banyak daripada tipe informasi yang diperlukan untuk membuat rencana produksi [3]. Hal ini perlu untuk mengetahui kemampuan dari setiap mesin, setiap pengikat, setiap operator, setiap departemen, dan lain-lain. Dengan demikian masalah *sequencing* senantiasa melibatkan pengerjaan sejumlah komponen yang sering disebut dengan istilah 'job'. *Job* sendiri masih merupakan komposisi dari sejumlah elemen-elemen dasar yang disebut aktivitas atau operasi.

Menyusun semua operasi dari semua *job* yang memiliki pola aliran berbeda-beda pada tiap mesin, sehingga keseluruhan *job* dapat diproses menurut urutan pengerjaannya merupakan masalah dari penjadwalan *job shop* [4]. Pada penjadwalan produksi terdapat beberapa kriteria performa, salah satunya adalah minimalisasi *makespan*. *Makespan* adalah total waktu proses yang dibutuhkan untuk menyelesaikan kumpulan tugas (*job*). Meminimasi *makespan*, dimaksudkan untuk meraih utilisasi yang tinggi dari peralatan dan sumber daya dengan cara menyelesaikan *job* secepatnya [5-7].

PT. Interpack Packaging and Processing Manufacturers merupakan perusahaan manufaktur yang memproduksi mesin pengemasan produk (*packaging machine*) dengan aliran *job shop*. Produk yang dihasilkan berbagai macam tipe, sesuai dengan jenis produk yang akan dikemas. Perusahaan ini bertipe produksi *make to order* dan *make to stock*. *Make to order*, perusahaan dapat melayani pembuatan mesin sesuai permintaan dan jenis produk. *Make to stock*, perusahaan selalu membuat persediaan yang disesuaikan permintaan pasar pada periode berikutnya. Perusahaan memiliki fasilitas kerja yang lengkap dan dapat memproduksi part sendiri (*make*) untuk komponen-komponen perakitanannya.

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan di PT. Interpack Packaging and Processing Manufacturers. Jadwal pengerjaan *spare part* produk masih dilakukan dengan sistem aturan prioritas *random* (setiap pekerjaan yang akan dikerjakan diurutkan secara acak), sehingga urutan pengerjaan produk yang sama dengan pemesanan berbeda memiliki urutan pengerjaan yang berbeda. Sedangkan untuk memproduksi ada yang membutuhkan waktu lama untuk setiap prosesnya dan ada yang membutuhkan waktu singkat untuk tiap prosesnya, sehingga akan membuat banyak waktu *delay* yang akan menyebabkan operator dan mesin menganggur serta memperlama total waktu penyelesaian pekerjaan (*makespan*) dan terlambatnya penyelesaian *spare part*.

Dari permasalahan tersebut, perlu dilakukan penjadwalan produksi untuk pengerjaan *spare part* produk. Produk dijadwalkan menggunakan algoritma *Artificial Immune System* (AIS), seperti penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Astuti yang menggunakan algoritma ini untuk meminimalkan waktu keseluruhan (*makespan*) [8]. Imunologi adalah ilmu baru yang asal-usulnya dikaitkan dengan Edward Jenner pada tahun 1796, lalu pada tahun 1986 *artificial immune system* (AIS) dikembangkan oleh Farmer dan kawan-kawan, yang terinspirasi oleh sistem kekebalan tubuh manusia [9]. Algoritma AIS meniru perilaku dan sifat sel-sel kekebalan, khususnya sel B, sel T, dan antigen. Sama dengan sistem kekebalan biologis algoritma *immune* memiliki kapabilitas pencarian solusi optimal dengan memelihara level tinggi diversitas pada ruang pencarian. Pada masalah optimasi, *antigen* (A_{gk}) dan antibodi (A_b) bekerja sebagai tujuan (f) dan solusi yang terkait (x) pada model komputasi, dan diekspresikan sebagai berikut [10]. Kelebihan algoritma AIS dibandingkan algoritma lain adalah penggunaan populasi, seleksi dan mutasi sehingga bisa bekerja secara paralel untuk banyak solusi sekaligus dan tidak memerlukan banyak parameter yang diperlukan. Metode AIS diharapkan dapat meminimalisasi *makespan* pembuatan *spare part* mesin dan meningkatkan *utilitas* mesin produksi.

2. Metodologi

Dalam penjadwalan job shop menggunakan algoritma AIS ada tujuh langkah, langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut [9]:

Tahap 1. Inialisasi acak dari populasi antibodi

Serupa dengan algoritma-algoritma genetik yang digunakan di dalam *job shop scheduling problem*, rangkaian integer awal yang menyandikan populasi antibodi dihasilkan secara acak yang melambangkan *job* dengan proses awal sesuai jadwal yang ada sebelumnya.

Tahap 2. Representasi antibodi dan klasifikasi gen

Untuk j pekerjaan dan m mesin, suatu antibodi berisi $j \times m$ gen. Setiap pekerjaan muncul berulang pada antibodi tersebut m kali, dan setiap pengulangan gen (bilangan integer) tidak mengindikasikan suatu operasi yang kongkret dari suatu pekerjaan, tetapi mengacu kepada suatu operasi yang unik.

Elemen waktu merupakan nilai yang menunjukkan total waktu pengerjaan dari semua job. Untuk penentuan rantai dilakukan dengan melihat proporsi gen rantai ringan (L) terhadap gen rantai berat (H).

Tahap 3. Pengembang biakan *clone*

Hal ini memerhatikan gen-gen ringan yang ada pada mutasi awal, karena hipermutasi hanya dapat terjadi di dalam gen-gen rantai ringan. Di mana gen rantai ringan terdapat setiap pekerjaan akhir pada mesin-mesin berbeda. Untuk itu dapat dilakukan pengembangbiakan *clone* yang mengambil mutasi bilangan acak di mana *job* pada bilangan baru memiliki *job* yang sama.

Tahap 4. Seleksi untuk antibodi-antibodi donor

Untuk antibodi-antibodi donor diambil beberapa sampel yang dirasa (diasumsikan) dapat menggantikan gen rantai ringan yang ada pada *job* sebelumnya. Semakin banyak *job* yang ada terhadap daftar urutan pengerjaan mesin maka semakin banyak pula donor yang bisa dihasilkan.

Tahap 5. Konstruksi *germ-line*

Merupakan pembentukan garis yang dianggap memenuhi asumsi dari perhitungan *job* yang ada. Sebagai asumsi diambil perbaikan pada *job* yang mengalami penggunaan mesin terbanyak. Sehingga rangkaian yang didapat adalah pembentukan antibodi baru berdasarkan donor yang diujikan.

Tahap 6. Pengaturan ulang fragmen gen

Untuk pengaturan ulang gen dilakukan berdasarkan pengaturan yang berbasis mesin, dengan melihat mesin mana yang memiliki *delay* dan memungkinkan untuk dilakukan pengaturan ulang.

Tahap 7. Diversifikasi antibodi

Pada bagian ini hanya beberapa mekanisme yang dapat diterapkan berdasarkan urutan pekerjaan terhadap mesin yang digunakan. Hal ini karena adanya *job-job* yang tidak dapat dilakukan mekanisme antibodi tanpa melihat urutan pengerjaan seharusnya dari pekerjaan yang telah ditetapkan. Sehingga diperlukan perhatian pada

saat menerapkan mekanisme-mekanisme untuk mendapatkan jadwal yang diinginkan. Adapun mekanisme yang dilakukan antara lain dalam upaya meminimalisasi *makespan*:

- a. Mutasi titik somatis
 Dilakukan dengan asumsi mesin yang memiliki proses terpanjang dilakukan belakangan.
- b. Rekombinasi somatis
 Merupakan proses pemilihan satu atau lebih fragmen gen rantai berat dengan panjang yang sama untuk dilakukan pertukaran yang parsial diantara dua fragmen tersebut.

Setelah semua tahap penjadwalan dilakukan maka selanjutnya dilakukan perhitungan waktu *lateness* dan utilitas mesin.

- *Lateness* , yaitu penyimpangan waktu penyelesaian due date [1].

$$Lateness = Completion\ time - Due\ date \quad \text{Pers (1)}$$

Jika: $L_i < 0$, maka saat penyelesaian *job* sebelum *due date* (*early*).

$L_i = 0$, maka saat penyelesaian *job* tepat sesuai *due date*.

$L_i > 0$, maka saat penyelesaian *job* setelah *due date* (*tardy*).

- Utilitas mesin (U_m), merupakan rasio dari seluruh waktu proses yang dibebankan pada mesin dengan rentang waktu untuk menyelesaikan seluruh tugas pada mesin tersebut [9].

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{F_{max}} \quad \text{Pers (2)}$$

Setelah semua tahap pengolahan data selesai maka tahap yang terakhir adalah melakukan perbandingan hasil dari penjadwalan tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

Data permintaan mesin *packaging* pada bulan Maret 2016 adalah mesin SH28R dan mesin SH38R, detail permintaan dapat dilihat pada Tabel 1. Data due date Jadwal yang dikumpulkan pada penelitian ini adalah pada bulan Maret 2016 yang dapat dilihat pada Tabel 2. waktu setiap proses dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 1 Data *Spare Part* Mesin SH28R

Mesin	Tanggal dan Jumlah Pemesanan	
SH28R	4 Maret (2 unit)	18 Maret (1 unit)
SH38R	11 Maret (2 unit)	

Tabel 2 Data *Due Date Spare* Permintaan

No	Produk	Qty	Tanggal Permintaan	<i>Due Date</i> Produk
1	SH28R	2	4 Maret	25 Maret
2	SH38R	2	11 Maret	29 Maret
3	SH28R	1	18 Maret	30 Maret

Tabel 3 Waktu Proses

<i>Job</i>	Operasi	Waktu Proses (menit)	<i>Job</i>	Operasi	Waktu roses (menit)
J1	O1.1.2	40	J11	O11.1.4	49.67
	O1.2.8	60		O11.2.3	5
J2	O2.1.2	25		O11.3.6	20.5
	O2.2.8	10		O11.4.10	45.33
	O2.3.12	12.58	J12	O12.1.1	3
	O2.4.13	21		O12.2.5	29.77
J3	O3.1.1	3.92	J13	O13.1.1	4
	O3.2.8	35		O13.2.5	30.33
	O3.3.9	25	J14	O14.1.1	3.00
	O3.4.7	50		O14.2.5	20.07
	O3.5.12	15.25	J15	O15.1.15	95
	O3.6.14	30		O15.2.6	29.25
J4	O4.1.1	2.83		O15.3.3	15
	O4.2.5	14.67	J15	O15.4.12	30.5
	O4.3.8	10		O15.5.13	39.92
J5	O5.1.2	30	J16	O16.1.1	10.67
	O5.2.8	50		O16.2.6	10.83
J6	O6.1.2	10		O16.3.11	9.67
	O6.2.8	20		O16.4.12	15
J7	O7.1.1	15.08		O16.5.13	20.5
	O7.2.5	30.17	J17	O17.1.4	15.08
	O7.3.7	45		O17.2.6	9.83
	O7.4.12	15.21		O17.3.3	5.33
	O7.5.14	30	J18	O18.1.1	3
J8	O8.1.15	40		O18.2.5	24.67
	O8.2.6	30.67	J19	O19.1.1	3
J8	O8.3.12	30		O19.2.5	24.5
	O8.4.13	20	J20	O20.1.7	20
J9	O9.1.15	20		O20.2.12	15
	O9.2.6	15.83		O20.3.13	20.33
	O9.3.12	15	J21	O21.1.1	1
	O9.4.13	19.67		O21.2.6	5.08
J10	O10.1.15	420		O21.3.3	1.5
	O10.2.16	188.25	J22	O22.1.1	3
	O10.3.3	24.67		O22.2.5	14.83
	O10.4.11	485.25			
	O10.5.12	35.5			

O10.6.13 112.83

3.1 Jadwal Awal Perusahaan

Data jadwal yang diambil adalah jadwal pada bulan Maret 2016 untuk *spare part* SH28R. Notasi yang digunakan pada penelitian ini adalah notasi *triplet* yang digunakan pada tiap blok (i, j, k), dengan i menunjukkan nomor *job*, j menyatakan urutan *proses*, dan k mewakili mesin yang diperlukan. Jadwal tersebut dapat dilihat pada [Tabel 4](#).

Tabel 4 Jadwal Perusahaan dengan aturan random

Order	Urutan
4 Maret	O10.1.15 - O3.1.1 - O1.1.2 - O4.1.1 - O21.1.1 - O3.2.8 - O4.2.5 - O11.1.4 - O1.2.8 - O21.2.6 - O3.3.9 - O16.1.1 - O2.1.2 - O21.3.3 - O11.2.3 - O3.4.7 - O4.3.8 - O10.2.16 - O15.1.15 - O2.2.8 - O18.1.1 - O17.1.4 - O16.2.6 - O11.3.6 - O3.5.12 - O2.3.12 - O10.3.3 - O15.2.6 - O9.1.15 - O18.2.5 - O17.2.6 - O2.4.13 - O3.6.14 - O7.1.1 - O8.1.15 - O9.2.6 - O6.1.2 - O10.4.11 - O7.2.5 - O12.1.1 - O15.3.3 - O8.2.6 - O6.2.8 - O5.1.2 - O10.5.12 - O11.4.10 - O12.2.5 - O15.4.12 - O22.1.1 - O20.1.7 - O7.3.7 - O5.2.8 - O9.3.12 - O8.3.12 - O9.4.13 - O13.1.1 - O10.6.13 - O7.4.12 - O19.1.1 - O22.2.5 - O13.2.5 - O15.5.13 - O19.2.5 - O8.4.13 - O14.1.1 - O16.3.11 - O17.3.3 - O20.2.12 - O7.5.14 - O16.4.12 - O14.2.5 - O16.5.13 - O20.3.13
11 Maret	O10.1.15 - O1.1.2 - O7.1.1 - O3.1.1 - O1.2.8 - O15.1.2 - O7.2.5 - O3.2.8 - O16.1.1 - O4.1.1 - O15.2.6 - O11.1.4 - O3.3.9 - O10.2.16 - O8.1.15 - O11.2.3 - O13.1.1 - O4.2.5 - O17.1.4 - O16.2.6 - O10.3.3 - O19.1.1 - O15.3.3 - O8.2.6 - O9.1.15 - O3.4.7 - O4.3.8 - O11.3.6 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O15.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O19.2.5 - O10.5.12 - O17.2.6 - O2.2.8 - O21.1.1 - O3.5.12 - O7.3.7 - O11.4.10 - O10.6.13 - O8.4.13 - O17.3.3 - O22.1.1 - O9.3.12 - O3.6.14 - O21.2.6 - O2.3.12 - O5.1.2 - O7.4.12 - O12.1.1 - O22.2.5 - O16.3.11 - O18.1.1 - O9.4.13 - O5.2.8 - O6.1.2 - O21.3.3 - O7.5.14 - O20.1.7 - O12.2.5 - O13.2.5 - O14.1.1 - O2.4.13 - O16.4.12 - O6.2.8 - O20.2.12 - O18.2.5 - O16.5.13 - O14.2.5 - O20.3.13
18 Maret	O10.1.15 - O3.1.1 - O1.1.2 - O7.1.1 - O1.2.8 - O3.2.8 - O15.1.2 - O11.1.4 - O7.2.5 - O16.1.1 - O3.3.9 - O4.1.1 - O15.2.6 - O10.2.16 - O11.2.3 - O3.4.7 - O8.1.15 - O13.1.1 - O4.2.5 - O17.1.4 - O16.2.6 - O10.3.3 - O19.1.1 - O11.3.6 - O3.5.12 - O15.3.3 - O8.2.6 - O4.3.8 - O9.1.15 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O3.6.14 - O10.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O4.3.8 - O9.1.15 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O3.6.14 - O10.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O19.2.5 - O10.6.12 - O17.2.6 - O2.2.8 - O21.1.1 - O7.3.7 - O8.4.13 - O15.5.13 - O17.3.3 - O11.4.10 - O22.1.1 - O21.2.6 - O20.1.7 - O2.3.12 - O5.1.2 - O7.4.12 - O9.3.12 - O12.1.1 - O22.2.5 - O16.3.11 - O18.1.1 - O5.2.8 - O6.1.2 - O21.3.3 - O7.5.14 - O2.4.13 - O12.2.5 - O13.2.5 - O14.1.1 - O9.4.13 - O16.4.12 - O20.2.12 - O6.2.8 - O18.2.5 - O20.3.13 - O16.5.13 - O14.2.5.
18 Maret	O10.1.15 - O3.1.1 - O1.1.2 - O7.1.1 - O1.2.8 - O3.2.8 - O15.1.2 - O11.1.4 - O7.2.5 - O16.1.1 - O3.3.9 - O4.1.1 - O15.2.6 - O10.2.16 - O11.2.3 - O3.4.7 - O8.1.15 - O13.1.1 - O4.2.5 - O17.1.4 - O16.2.6 - O10.3.3 - O19.1.1 - O11.3.6 - O3.5.12 - O15.3.3 - O8.2.6 - O4.3.8 - O9.1.15 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O3.6.14 - O10.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O4.3.8 - O9.1.15 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O3.6.14 - O10.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O19.2.5 - O10.6.12 - O17.2.6 - O2.2.8 - O21.1.1 - O7.3.7 - O8.4.13 - O15.5.13 - O17.3.3 - O11.4.10 - O22.1.1 - O21.2.6 - O20.1.7 - O2.3.12 - O5.1.2 - O7.4.12 - O9.3.12 - O12.1.1 - O22.2.5 - O16.3.11 - O18.1.1 - O5.2.8 - O6.1.2 - O21.3.3 - O7.5.14 - O2.4.13 - O12.2.5 - O13.2.5 - O14.1.1 - O9.4.13 - O16.4.12 - O20.2.12 - O6.2.8 - O18.2.5 - O20.3.13 - O16.5.13 - O14.2.5.

Keseluruhan jadwal dari perusahaan tersebut menghasilkan *makespan* sebesar 7059,99 menit.

3.2 Penjadwalan dengan Algoritma AIS

Proses penjadwalan pertama dilakukan untuk order 4 Maret. Itu dikarenakan order tersebut datang pertama, langk-langkah penjadwalan dengan Algoritma AIS adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi acak dari populasi antibodi

Pada proses dilakukan pembuatan rangkaian awal yang diambil dari jadwal perusahaan yang sudah didapatkan dengan *makespan* 3045,68 menit (50,76 jam).

2. Representasi antibodi dan klasifikasi gen

Pada proses ini rantai ringan ditunjukkan oleh mesin yang berada pada akhir suatu pekerjaan. Hasil penentuan jenis rantai dapat dilihat pada [Tabel 5](#).

Tabel 5 Penentuan Jenis Rantai (*Order 4* Maret)

No	Antibodi	Mesin	Waktu	Rantai	No	Antibodi	Mesin	Waktu	Rantai
1	O10.1.15	15	840	H	38	O10.4.11	11	970,5	H
2	O3.1.1	1	15,68	H	39	O7.2.5	5	241,36	H
3	O1.1.2	2	160	H	40	O12.1.1	1	42	H
4	O4.1.1	1	11,32	H	41	O15.3.3	3	60	H
5	O21.1.1	1	8	H	42	O8.2.6	6	122,68	H
6	O3.2.8	8	140	H	43	O6.2.8	8	40	L
7	O4.2.5	5	58,68	H	44	O5.1.2	2	60	H
8	O11.1.4	4	99,34	H	45	O10.5.12	12	71	H
9	O1.2.8	8	240	L	46	O11.4.10	10	90,66	L
10	O21.2.6	6	40,64	H	47	O12.2.5	5	416,78	L
11	O3.3.9	9	100	H	48	O15.4.12	12	122	H
12	O16.1.1	1	21,34	H	49	O22.1.1	1	6	H
13	O2.1.2	2	100	H	50	O20.1.7	7	40	H
14	O21.3.3	3	12	L	51	O7.3.7	7	360	H
15	O11.2.3	3	10	H	52	O5.2.8	8	100	L
16	O3.4.7	7	200	H	53	O9.3.12	12	30	H
17	O4.3.8	8	40	L	54	O8.3.12	12	120	H
18	O10.2.16	16	376,5	H	55	O9.4.13	13	39,34	L
19	O15.1.15	15	380	H	56	O13.1.1	1	8	H
20	O2.2.8	8	40	H	57	O10.6.13	13	225,66	L
21	O18.1.1	1	6	H	58	O7.4.12	12	121,68	H
22	O17.1.4	4	60,32	H	59	O19.1.1	1	6	H
23	O16.2.6	6	21,66	H	60	O22.2.5	5	29,66	L
24	O11.3.6	6	41	H	61	O13.2.5	5	60,66	L
25	O3.5.12	12	61	H	62	O15.5.13	13	159,68	L
26	O2.3.12	12	50,32	H	63	O19.2.5	5	49	L
27	O10.3.3	3	49,34	H	64	O8.4.13	13	80	L
28	O15.2.6	6	117	H	65	O14.1.1	1	42	H
29	O9.1.15	15	40	H	66	O16.3.11	11	19,34	H
30	O18.2.5	5	49,34	L	67	O17.3.3	3	21,32	L
31	O17.2.6	6	39,32	H	68	O20.2.12	12	30	H
32	O2.4.13	13	84	L	69	O7.5.14	14	240	L
33	O3.6.14	14	120	L	70	O16.4.12	12	30	H
34	O7.1.1	1	120,64	H	71	O14.2.5	5	280,98	L
35	O8.1.15	15	160	H	72	O16.5.13	13	41	L
36	O9.2.6	6	31,66	H	73	O20.3.13	13	40,66	L
37	O6.1.2	2	20	H					

3. Pengembangbiakan *clone*

Pada tahap ini dilakukan pembuatan rangkaian baru dengan mengurutkan semua *job* Hasil dari pembuatan rangkaian baru tersebut dapat dilihat pada [Tabel 6](#).

4. Seleksi untuk antibodi-antibodi donor

Pada tahap ini penggantian tidak boleh mendahului proses sebelumnya pada *job* tersebut. Tanda panah dengan angka 1 menunjukkan penukaran antara O1.2.8 dari

benih yang digantikan dengan O4.3.8 dari donor, begitu juga seterusnya. Contoh dari penggantian rantai tersebut dapat dilihat pada [Tabel 7](#).

Tabel 6 Rangkaian Pendonor (*Order* 4 Maret)

No	Donor	Mesin	Rantai	No	Donor	Mesin	Rantai
1	O1.1.2	2	H	38	O10.6.13	13	L
2	O1.2.8	8	L	39	O11.1.4	4	H
3	O2.1.2	2	H	40	O11.2.3	3	H
4	O2.2.8	8	H	41	O11.3.6	6	H
5	O2.3.12	12	H	42	O11.4.10	10	L
6	O2.4.13	3	L	43	O12.1.1	1	H
7	O3.1.1	1	H	44	O12.2.5	5	L
8	O3.2.8	8	H	60	O17.2.6	6	H
9	O3.3.9	9	H	61	O17.3.3	3	L
10	O3.4.7	7	H	62	O18.1.1	1	H
11	O3.5.12	12	H	63	O18.2.5	5	L
12	O3.6.14	14	L	64	O19.1.1	1	H
13	O4.1.1	1	H	65	O19.2.5	5	L
14	O4.2.5	5	H	66	O20.1.7	7	H
15	O4.3.8	8	L	67	O20.2.12	12	H
16	O5.1.2	2	H	68	O20.3.13	13	L
17	O5.2.8	8	L	69	O21.1.1	1	H
18	O6.1.2	2	H	70	O21.2.6	6	H
19	O6.2.8	8	L	71	O21.3.3	3	L
20	O7.1.1	1	H	72	O22.1.1	1	H
21	O7.2.5	5	H	73	O22.2.5	5	L
22	O7.3.7	7	H	45	O13.1.1	1	H
23	O7.4.12	12	H	46	O13.2.5	5	L
24	O7.5.14	14	L	47	O14.1.1	1	H
25	O8.1.15	15	H	48	O14.2.5	5	L
26	O8.2.6	6	H	49	O15.1.15	15	H
27	O8.3.12	12	H	50	O15.2.6	6	H
28	O8.4.13	13	L	51	O15.3.3	3	H
29	O9.1.15	15	H	52	O15.4.12	12	H
30	O9.2.6	6	H	53	O15.5.13	13	L
31	O9.3.12	12	H	54	O16.1.1	1	H
32	O9.4.13	13	L	55	O16.2.6	6	H
33	O10.1.15	15	H	56	O16.3.11	11	H
34	O10.2.16	16	H	57	O16.4.12	12	H
35	O10.3.3	3	H	58	O16.5.13	13	L
36	O10.4.11	11	H	59	O17.1.4	4	H
37	O10.5.12	12	H				

5. Konstruksi *germ-line*

Pada tahap ini dilakukan pembentukan garis yang dianggap memenuhi asumsi dari perhitungan *job* yang ada. Sebagai asumsi diambil perbaikan pada *job* yang mengalami penggunaan mesin terbanyak, yaitu mesin 13. Sehingga rangkaian baru yang dihasilkan dapat dilihat pada [Tabel 8](#).

Tabel 7 Contoh Pencarian Antibodi untuk Perbaikan Benih (*Order 4* Maret)

Benih	Mesin	Rantai		Donor	Mesin	Rantai	Antibodi	Mesin	Rantai
O10.1.15	15	H		O1.1.2	2	H	O10.1.15	15	H
O3.1.1	1	H	3▶	O1.2.8	8	L	O3.1.1	1	H
O1.1.2	2	H		O2.1.2	2	H	O1.1.2	2	H
O4.1.1	1	H		O2.2.8	8	H	O4.1.1	1	H
O21.1.1	1	H		O2.3.12	12	H	O21.1.1	1	H
O3.2.8	8	H	5▶	O2.4.13	13	L	O3.2.8	8	H
O4.2.5	5	H		O3.1.1	1	H	O4.2.5	5	H
O11.1.4	4	H		O3.2.8	8	H	O11.1.4	4	H
O1.2.8	8	L	◀1	O3.3.9	9	H	O4.3.8	8	H
O21.2.6	6	H		O3.4.7	7	H	O21.2.6	6	H
O3.3.9	9	H		O3.5.12	12	H	O3.3.9	9	H
O16.1.1	1	H		O3.6.14	14	L	O16.1.1	1	H
O2.1.2	2	H		O4.1.1	1	H	O2.1.2	2	H
O21.3.3	3	L	◀2	O4.2.5	5	H	O21.3.3	3	H
O11.2.3	3	H	1▶	O4.3.8	8	L	O11.2.3	3	H

Tabel 8 Konstruksi *Germ-line* yang Baru (*Order 4* Maret)

No	Antibodi	Mesin	Rantai	No	Antibodi	Mesin	Rantai
1	O10.1.15	15	H	38	O10.4.11	11	H
2	O3.1.1	1	H	39	O7.2.5	5	H
3	O1.1.2	2	H	40	O12.1.1	1	H
4	O4.1.1	1	H	41	O15.3.3	3	H
5	O21.1.1	1	H	42	O8.2.6	6	H
6	O3.2.8	8	H	43	O6.2.8	8	L
7	O4.2.5	5	H	44	O5.1.2	2	H
8	O11.1.4	4	H	45	O10.5.12	12	H
9	O1.2.8	8	L	46	O11.4.10	10	L
10	O21.2.6	6	H	47	O12.2.5	5	L
11	O3.3.9	9	H	48	O15.4.12	12	H
12	O16.1.1	1	H	49	O22.1.1	1	H
13	O2.1.2	2	H	50	O20.1.7	7	H
14	O21.3.3	3	L	51	O7.3.7	7	H
15	O11.2.3	3	H	52	O5.2.8	8	L
16	O3.4.7	7	H	53	O9.3.12	12	H
17	O4.3.8	8	L	54	O8.3.12	12	H
18	O10.2.16	16	H	55	O10.6.13	13	H
19	O15.1.15	15	H	56	O13.1.1	1	H
20	O2.2.8	8	H	57	O15.5.13	13	H
21	O18.1.1	1	H	58	O7.4.12	12	H
22	O17.1.4	4	H	59	O19.1.1	1	H
23	O16.2.6	6	H	60	O22.2.5	5	L
24	O11.3.6	6	H	61	O13.2.5	5	L
25	O3.5.12	12	H	62	O9.4.13	13	H
26	O2.3.12	12	H	63	O19.2.5	5	L
27	O10.3.3	3	H	64	O8.4.13	13	L
28	O15.2.6	6	H	65	O14.1.1	1	H
29	O9.1.15	15	H	66	O16.3.11	11	H
30	O18.2.5	5	L	67	O17.3.3	3	L
31	O17.2.6	6	H	68	O20.2.12	12	H
32	O2.4.13	13	L	69	O7.5.14	14	L
33	O3.6.14	14	L	70	O16.4.12	12	H
34	O7.1.1	1	H	71	O14.2.5	5	L
35	O8.1.15	15	H	72	O20.3.13	13	H
36	O9.2.6	6	H	73	O16.5.13	13	H
37	O6.1.2	2	H				

6. Pengaturan ulang fragmen gen

Pengaturan ulang gen tidak dilakukan, karena perbaikan pada penjadwalan mesin 13 sudah meminimalisasi dari *makespan* sebelumnya yaitu 2941,02 menit (49,02 jam).

7. Diversifikasi antibody

- Mutasi titik somatis

Pada proses ini dilakukan pengaturan dengan mesin yang memiliki waktu proses terlama dilakukan pada akhir proses produksi. Didapatkan dari pengamatan bahwa *job* 10 (970,5 menit) memiliki waktu proses terlama, tetapi mekanisme tersebut menghasilkan *makespan* yang lebih besar dari rangkaian awal, begitu juga dengan waktu proses kedua terlama. Sehingga waktu proses ketiga yang paling lama adalah *job* 15 (380 menit) yang terpilih karena menghasilkan *makespan* yang lebih kecil dari rangkaian awal. Contoh dari proses mutasi titik somatis dapat dilihat pada [Tabel 9](#).

Tabel 9 Contoh Pencarian Antibodi Baru dengan Mutasi Titik Somatis (*Order* 4 Maret)

Antibodi	Mesin		Donor	Mesin	Antibodi Baru	Mesin
O17.2.6	6	3▶	O9.3.12	12	O17.2.6	6
O2.4.13	13	4▶	O9.4.13	13	O2.4.13	13
O3.6.14	14		O10.1.15	15	O3.6.14	14
O7.1.1	1		O10.2.16	16	O7.1.1	1
O8.1.15	15		O10.3.3	3	O8.1.15	15
O9.2.6	6		O10.4.11	11	O9.2.6	6
O6.1.2	2		O10.5.12	12	O6.1.2	2
O10.4.11	11		O10.6.13	13	O10.4.11	11
O7.2.5	5		O11.1.4	4	O7.2.5	5
O12.1.1	1		O11.2.3	3	O12.1.1	1
O15.3.3	3	◀3	O11.3.6	6	O9.3.12	12

- Rekombinasi somatis

Pada proses ini dilakukan pengaturan dengan pemilihan satu atau lebih fragmen gen rantai tebal (H) dengan panjang yang sama. Tanda panah dengan angka 1 menunjukkan penukaran antara O10.5.12 – O11.4.10 dengan O15.1.15 – O8.3.12, begitu juga seterusnya. Contoh dari proses mutasi titik somatis dapat dilihat pada [Tabel 10](#).

Tabel 10 Contoh Pencarian Antibodi Baru dengan Rekombinasi Somatis (*Order* 4 Maret)

Antibodi	Mesin		Antibodi	Mesin	Antibodi Baru	Mesin
O6.2.8	8		O6.2.8	8	O6.2.8	8
O5.1.2	2		O5.1.2	2	O5.1.2	2
O10.5.12	12	}◀1	O10.5.12	12	O15.1.15	15
O11.4.10	10	2▶{	O11.4.10	10	O8.3.12	12
O12.2.5	5		O12.2.5	5	O12.2.5	5
O9.4.13	13		O9.4.13	13	O9.4.13	13
O22.1.1	1		O22.1.1	1	O22.1.1	1
O20.3.13	13		O20.3.13	13	O20.3.13	13
O7.3.7	7		O7.3.7	7	O7.3.7	7
O5.2.8	8		O5.2.8	8	O5.2.8	8
O15.1.15	15	}◀2	O15.1.15	15	O10.5.12	12
O8.3.12	12	1▶{	O8.3.12	12	O11.4.10	10
O10.6.13	13		O10.6.13	13	O10.6.13	13

Untuk penjadwalan *order* 11 dan 12 Maret sama seperti penjadwalan *order* 4 Maret, sehingga didapatkan jadwal untuk masing-masing *order* yang dapat dilihat pada [Tabel 11](#).

Tabel 11 Jadwal Algoritma AIS

Order	Urutan
4 Maret	O10.1.15 - O3.1.1 - O1.1.2 - O4.1.1 - O21.1.1 - O3.2.8 - O4.2.5 - O11.1.4 - O1.2.8 - O21.2.6 - O3.3.9 - O16.1.1 - O2.1.2 - O21.3.3 - O11.2.3 - O3.4.7 - O4.3.8 - O10.2.16 - O20.1.7 - O2.2.8 - O18.1.1 - O17.1.4 - O16.2.6 - O11.3.6 - O3.5.12 - O2.3.12 - O10.3.3 - O20.2.12 - O9.1.15 - O18.2.5 - O17.2.6 - O2.4.13 - O3.6.14 - O7.1.1 - O8.1.15 - O9.2.6 - O6.1.2 - O10.4.11 - O7.2.5 - O12.1.1 - O9.3.12 - O8.2.6 - O6.2.8 - O5.1.2 - O15.1.15 - O8.3.12 - O12.2.5 - O9.4.13 - O22.1.1 - O20.3.13 - O7.3.7 - O5.2.8 - O10.5.12 - O11.4.10 - O10.6.13 - O13.1.1 - O15.2.6 - O7.4.12 - O19.1.1 - O22.2.5 - O13.2.5 - O15.3.3 - O19.2.5 - O8.4.13 - O14.1.1 - O16.3.11 - O17.3.3 - O15.4.12 - O7.5.14 - O16.4.12 - O14.2.5 - O15.5.13 - O16.5.13
11 Maret	O10.1.15 - O2.1.2 - O7.1.1 - O3.1.1 - O1.1.2 - O20.1.7 - O7.2.5 - O3.2.8 - O16.1.1 - O4.1.1 - O20.2.12 - O11.1.4 - O3.3.9 - O10.2.16 - O8.1.15 - O11.2.3 - O13.1.1 - O4.2.5 - O17.1.4 - O7.3.7 - O10.3.3 - O19.1.1 - O20.3.13 - O8.2.6 - O9.1.15 - O3.4.7 - O3.5.12 - O11.3.6 - O7.4.12 - O10.4.11 - O2.2.8 - O2.3.12 - O8.3.12 - O9.2.6 - O9.3.12 - O10.5.12 - O17.2.6 - O1.2.8 - O21.1.1 - O4.3.8 - O14.1.1 - O11.4.10 - O8.4.13 - O18.1.1 - O2.4.13 - O22.1.1 - O19.2.5 - O3.6.14 - O21.2.6 - O14.2.5 - O5.1.2 - O16.2.6 - O12.1.1 - O22.2.5 - O16.3.11 - O10.6.13 - O17.3.3 - O5.2.8 - O6.1.2 - O21.3.3 - O7.5.14 - O15.1.15 - O12.2.5 - O13.2.5 - O15.2.6 - O9.4.13 - O16.4.12 - O6.2.8 - O15.3.3 - O18.2.5 - O15.4.12 - O15.5.13 - O16.5.13
18 Maret	O10.1.15 - O3.1.1 - O1.1.2 - O7.1.1 - O1.2.8 - O3.2.8 - O15.1.15 - O11.1.4 - O7.2.5 - O16.1.1 - O3.3.9 - O4.1.1 - O15.2.6 - O10.2.16 - O11.2.3 - O3.4.7 - O8.1.15 - O13.1.1 - O4.2.5 - O17.1.4 - O16.2.6 - O10.3.3 - O19.1.1 - O11.3.6 - O3.5.12 - O15.3.3 - O8.2.6 - O4.3.8 - O9.1.15 - O15.4.12 - O10.4.11 - O2.1.2 - O3.6.14 - O15.5.13 - O8.3.12 - O9.2.6 - O19.2.5 - O10.5.12 - O17.2.6 - O2.2.8 - O21.1.1 - O7.3.7 - O14.1.1 - O8.4.13 - O17.3.3 - O11.4.10 - O22.1.1 - O21.2.6 - O20.1.7 - O2.3.12 - O5.1.2 - O7.4.12 - O9.3.12 - O20.2.12 - O9.4.13 - O20.3.13 - O18.1.1 - O5.2.8 - O6.1.2 - O2.4.13 - O7.5.14 - O22.2.5 - O16.3.11 - O13.2.5 - O10.6.13 - O21.3.3 - O16.4.12 - O12.1.1 - O6.2.8 - O18.2.5 - O16.5.13 - O12.2.5 - O14.2.5

Keseluruhan jadwal dari algoritma AIS tersebut menghasilkan *makespan* 6483,91 menit.

3.3 Waktu Keterlambatan

Setelah penjadwalan selesai, maka selanjutnya dilakukan perhitungan waktu keterlambatan untuk mengetahui penyelesaian produk tersebut terlambat atau tidak. Lama waktu *assembly* untuk produk SH28R dan SH38R adalah 3 hari untuk 1 unit. Sehingga perhitungan untuk waktu keterlambatan pembuatan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Completion time order 1} &= \text{Tanggal bisa dimulai assembly} + \text{lama assembly} + \text{hari libur} \\
 &= 17 + 6 + 2 \\
 &= 25 \text{ Maret}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung *latness* dari jadwal dilakukan menggunakan [Pers \(1\)](#), untuk contoh perhitungannya sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Latness order 1} &= 25 - 25 \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan waktu keterlambatan untuk semua jadwal dapat dilihat pada [Tabel 12](#)

Tabel 12 Hasil Perhitungan Waktu Keterlambatan

Jadwal	Perusahaan			Algoritma AIS		
	Order 1	Order 2	Order 3	Order 1	Order 2	Order 3
Tanggal Permintaan	4 Maret	11 Maret	18 Maret	4 Maret	11 Maret	18 Maret
Due Date Produk	25 Maret	29 Maret	30 Maret	25 Maret	29 Maret	30 Maret
Tanggal Dimulai Assembly	17 Maret	22 Maret	24 Maret	17 Maret	21 Maret	23 Maret
Lama Assembly	6 Hari	6 Hari	3 Hari	6 Hari	6 Hari	3 Hari
Hari Libur	2 Hari	2 Hari	2 Hari	2 Hari	2 Hari	0 Hari
Lateness	0	1	-1	0	0	-4

Tabel 13 Hasil Perhitungan Total Waktu Proses

Mesin		Total Waktu	Utilitas	Utilitas
		Proses (menit)	Perusahaan	Algoritma AIS
M1		817,77	0,12	0,13
M2		850	0,12	0,13
M3		393,65	0,06	0,06
M4	1	298,02	0,04	0,05
	2	180,96	0,03	0,03
M5	1	590,4	0,08	0,09
	2	467,68	0,07	0,07
	3	816,61	0,12	0,13
	4	461,27	0,07	0,07
	5	773,91	0,11	0,12
	6	236,98	0,03	0,04
M6	1	378,14	0,05	0,06
	2	246,39	0,03	0,04
	3	200,01	0,03	0,03
	4	251	0,04	0,04
M7	1	500	0,07	0,08
	2	760	0,11	0,12
	3	460	0,07	0,07
M8	1	500	0,07	0,08
	2	450	0,06	0,07
	3	100	0,01	0,02
	4	100	0,01	0,02
	5	190	0,03	0,03
	6	160	0,02	0,02
M9		250	0,04	0,04
M10		226,65	0,03	0,03
M11	1	2426,25	0,34	0,37
	2	48,35	0,01	0,01
M12		1680,84	0,24	0,26
M13		1716,51	0,24	0,26
M14		1020	0,14	0,16
M15		3550	0,50	0,55
M16		941,25	0,13	0,15
Rata-rata			0,09	0,10

Pekerjaan selesai tepat pada waktunya jika memiliki hasil *latness* 0 dan melebihi *due date* jika memiliki hasil *latness* positif, sedangkan negatif menandakan pekerjaan tersebut selesai sebelum *due date*. Seperti hasil perhitungan *latness* pada *order* 1 untuk jadwal perusahaan dengan hasil 1, menandakan bahwa produk diselesaikan satu hari setelah *due date*. Sedangkan pada *order* 1 untuk jadwal dengan algoritma AIS didapatkan hasil -4, menandakan bahwa produk diselesaikan 4 hari sebelum *due date*.

3.4 Utilitas Mesin

Dari tahap penjadwalan yang telah dilakukan, didapatkan *makespan* jadwal perusahaan (7059,99 menit) dan *makespan* jadwal algoritma AIS (6483,91 menit) yang selanjutnya digunakan untuk menghitung utilitas mesin menggunakan [Pers \(2\)](#). untuk contoh perhitungannya sebagai berikut:

$$U_1 = \frac{817,77}{7055,8}$$

$$U_1 = 0,12$$

Contoh perhitungan utilitas diambil dari mesin 1 (*ban saw*) untuk utilitas perusahaan. Untuk hasil dari perhitungan utilitas mesin dapat dilihat pada [Tabel 13](#).

Semakin besar utilitas dari suatu mesin semakin bagus, itu dikarenakan jika utilitas mesin itu besar menandakan bahwa mesin tersebut semakin sibuk. Dari hasil utilitas pada [Tabel 5](#) dapat dilihat bahwa mesin yang paling sibuk adalah *order* 1 dan *order* 3 M15 (*Gas Cutting*) pada algoritma AIS dengan utilitas sebesar 0,55 (55%).

Rendahnya utilitas pada tiap mesin disebabkan proses pembuatan *spare part* yang melewati banyak mesin dengan waktu proses yang kecil, sehingga terjadi banyak waktu menunggu untuk proses selanjutnya yang menyebabkan waktu *delay* yang besar.

4. Simpulan

Penjadwalan menggunakan algoritma *Artificial Immune System* (AIS) yang dilakukan pada PT. Interpack Packaging and Processing Manufacturers diperoleh *makespan* yang lebih kecil yaitu sebesar 6483,91 menit, sedangkan *makespan* dari jadwal perusahaan yaitu sebesar 7059,99 menit. Jadwal algoritma AIS mampu menyelesaikan lebih cepat 4 hari dari *due date*. Jadwal algoritma AIS meningkatkan utilitas sebesar 1%.

Daftar notasi

Um = Utilitas mesin

ti = Waktu Proses

Fmax = Maksimal keseluruhan waktu penyelesaian job yang ada

Referensi

- [1] K. R. Baker and D. Trietsch, Principles of sequencing and scheduling: John Wiley & Sons, 2013.
- [2] R. W. Conway, W. L. Maxwell, and L. W. Miller, Theory of scheduling: Courier Corporation, 2003.
- [3] J. E. Biegel, Pengendalian produksi suatu pendekatan kuantitatif. Jakarta: Akademika Pressindo, 1992.

- [4] M. Husen, I. Masudin, and D. M. Utama, "Penjadwalan Job Shop Statik Dengan Metode Simulated Annealing Untuk Meminimasi Waktu Makespan," *Spektrum Industri*, vol. 13, 2015.
- [5] M. Firdaus, I. Masudin, and D. M. Utama, "Penjadwalan Flowshop Dengan Menggunakan Simulated Annealing," *Spektrum Industri*, vol. 13, 2015.
- [6] I. Masudin, D. M. Utama, and F. Susastro, "Penjadwalan Flowshop Menggunakan Algoritma Nawaz Enscore HAM," 2014.
- [7] S. Harto, A. K. Garside, and D. M. Utama, "penjadwalan produksi menggunakan algoritma jadwal non delay untuk meminimalkan makespan studi kasus di cv. Bima mebel," *Spektrum Industri*, vol. 14, 2016.
- [8] M. Astuti, "Studi penjadwalan job shop untuk meminimalkan waktu keseluruhan menggunakan pendekatan algoritma artificial immune system," *Jurnal Angkasa*, vol. 5, pp. 19-28, 2013.
- [9] L. N. De Castro and J. Timmis, *Artificial immune systems: a new computational intelligence approach*: Springer Science & Business Media, 2002.
- [10] I. Berlianty and M. Arifin, *Teknik-teknik optimasi heuristik*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.