



## Algoritma *memetic* untuk penjadwalan multi-tujuan *flow-shop* memperhitungkan konsumsi energi

Bobby Kurniawan<sup>a\*</sup>, Atia Sonda<sup>a</sup>, Ade Irman<sup>a</sup>, Evi Febiantia<sup>a</sup>, Kulsum<sup>a</sup>, Lely Herlina<sup>a</sup>, Muhammad Adha Ilhami<sup>a</sup>, Yusraini Muharni<sup>a</sup>, Fellek Getu Tadesse<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Jurusan Teknik Industri, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jend. Sudirman KM 3, Cilegon 42435, Banten, Indonesia

<sup>b</sup>School of Mechanical and industrial Engineering, Ethiopian Institute of Technology-Mekelle, Ethiopia

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Algoritma *memetic*  
Multi-tujuan  
*Flow shop*

### ABSTRACT

Energi sudah menjadi kebutuhan yang tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan manusia. Saat ini, sumber energi masih didominasi oleh sumber daya yang tidak dapat diperbaharui (*unrenewable resources*) yang dapat habis seiring dengan waktu. Industri manufaktur, sebagai salah satu sektor yang mengkonsumsi energi dalam jumlah besar, dituntut untuk dapat melakukan konservasi energi dalam kegiatan operasionalnya. Penjadwalan dapat digunakan sebagai metode konservasi energi. Penelitian ini membahas penjadwalan banyak tujuan *flow-shop* untuk meminimasi biaya pemakaian listrik dan *total tardiness*. Kecepatan mesin dapat diubah untuk mengurangi atau menambah waktu proses sebuah *job*. Apabila waktu proses sebuah *job* dikurangi, maka *job* dapat selesai lebih cepat. Akan tetapi, mengurangi waktu proses sebuah *job* memerlukan energi yang lebih banyak. Oleh karena itu, akan muncul *trade-off* antara *total tardiness* dan konsumsi energi. Algoritma *memetic* multi-obyektif (MOMA) dikembangkan untuk memecahkan masalah multi-tujuan. Percobaan numerik dilakukan untuk mengevaluasi performansi MOMA menggunakan masalah yang dibangkitkan secara acak. Hasil dari percobaan numerik menunjukkan bahwa MOMA efektif dalam menyelesaikan masalah penjadwalan multi-tujuan *flow-shop*.

## 1. Pendahuluan

Energi telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia. Seluruh aktivitas manusia tidak terlepas dari penggunaan energi. Berdasarkan laporan yang dibuat oleh Energy Information Administration (EIA), konsumsi energi dunia akan meningkatkan sekitar 50% dari tahun 2018 sampai dengan 2050 [1]. Sektor industri menjadi konsumen terbesar dengan total konsumsi sebesar 50% dari seluruh konsumsi global [2]. Energi yang dikonsumsi merupakan hasil konversi dari sumber daya yang tidak dapat diperbaharui (*non-renewable resources*). Selain itu, gas karbon dioksida hasil pembakaran yang dihasilkan sektor industri juga menimbulkan efek yang berbahaya bagi lingkungan [3-6]. Dengan demikian, pertumbuhan kebutuhan energi yang meningkat akan menimbulkan masalah kelangkaan energi di masa mendatang dan juga masalah lingkungan [7], [8].

Untuk mengantisipasi masalah tersebut, pemerintah di berbagai negara telah mengeluarkan berbagai kebijakan ramah lingkungan, antara lain *real time pricing*, *critical time pricing*, dan *time-of-use* [9]. Kebijakan-kebijakan tersebut ditunjukkan untuk pengguna energi, terutama sektor industri sebagai pengguna energi terbesar. Industri manufaktur sebagai bagian dari sektor industri dapat mendukung kebijakan ramah lingkungan ini dengan penggunaan mesin dan peralatan yang hemat energi [10]. Akan tetapi pendekatan ini membutuhkan biaya investasi yang besar dan penuh resiko. Oleh karena itu, sektor manufaktur mencari pendekatan alternatif dengan biaya dan resiko yang lebih kecil. Pendekatan alternatif ini antara lain dengan penjadwalan produksi yang efektif [11-16].

Pentingnya energi disadari oleh para peneliti dengan banyaknya penelitian di bidang penggunaan energi secara efisien dan ramah lingkungan [17]. Adapun penelitian dalam bidang penjadwalan dengan mempertimbangkan faktor energi dan lingkungan adalah sebagai berikut. Yildirim dan Mouzou mengembangkan penjadwalan mesin tunggal dengan mekanisme menyalakan mesin apabila digunakan untuk memproses *job* dan mematikan mesin apabila tidak digunakan [18]. Mereka berpendapat bahwa mematikan mesin apabila mesin dalam keadaan idle akan menghemat energi. Akan tetapi, biaya *setup* akan timbul apabila mesin dinyalakan dari keadaan mati. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan adalah biaya *setup* dan biaya *idle*. Shrouf *et al.* mengembangkan model penjadwalan mesin tunggal dengan mempertimbangkan konsumsi listrik [17]. Konsumsi listrik mengikuti pola waktu pemakaian di mana tarif listrik di suatu periode berbeda dengan tarif di periode lain. Penjadwalan *job-shop* multi-obyektif dengan biaya listrik mengikuti skema harga tersebut dianalisa oleh Kurniawan *et al.* [19].

Penelitian penjadwalan *flow shop* yang mempertimbangkan konsumsi energi dilakukan oleh [20], [21]. Sebuah algoritma *multi-level optimization* dikembangkan untuk memecahkan masalah penjadwalan multi-tujuan *flow-shop* dengan mengasumsikan energi pada saat *idle*, *stand by*, dan waktu operasi [20]. Sebuah algoritma heuristik dikembangkan untuk memecahkan masalah penjadwalan *flow-shop* dengan *trade-off* antara konsumsi energi dan *makespan* [21]. Sedangkan masalah penjadwalan pada *stu* mesin yang mempertimbangkan konsumsi energi dilakukan oleh [22], [23]. Masalah penjadwalan pada mesin paralel diselidiki oleh [24], [25].

\* Corresponding author.

Email: [b.kurniawan@untirta.ac.id](mailto:b.kurniawan@untirta.ac.id)

Received: 16 Februari 2022; Revision: 23 Maret 2022;

Accepted: 23 Maret 2022; Available online: 29 April 2022

<http://dx.doi.org/10.36055/jiss.v7i2.14211>



Pendekatan lain untuk mereduksi pemakaian energi adalah dengan cara mengatur kecepatan mesin. Apabila mesin bekerja dengan laju yang cepat, waktu proses *job* akan menjadi singkat sehingga *job* dapat diselesaikan dengan cepat. Akan tetapi, energi yang dibutuhkan juga menjadi lebih besar dibandingkan dengan mesin yang bekerja dalam kecepatan normal. Apabila mesin beroperasi dengan laju yang lambat, maka waktu proses *job* akan menjadi lebih lama. Energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan mesin lebih sedikit dibandingkan apabila mesin beroperasi dalam laju normal. Dengan demikian, *trade-offs* terjadi antara konsumsi energi dengan waktu penyelesaian. Dari jumlah fungsi tujuan, model penjadwalan ini merupakan optimisasi multi-obyektif. Pendekatan ini diimplementasikan dalam penjadwalan *flexible job-shop* dan *job-shop* untuk meminimasi *makespan* dan konsumsi listrik [26]. Selain itu, pengaturan kecepatan mesin sesuai dengan *trade-off* antara daya dengan produktivitas dilakukan oleh [27-30].

Terinspirasi oleh pentingnya penelitian dalam bidang energi dan penjadwalan sebagai pendekatan untuk meminimumkan konsumsi energi, penelitian ini membahas penjadwalan *flow-shop* multi-obyektif untuk meminimasi konsumsi energi dan *total tardiness*. Kecepatan mesin dapat diubah sesuai dengan laju mode mesin: normal, cepat, dan lambat. Mesin hanya dapat menggunakan satu mode dalam memproses sebuah *job*.

Waktu proses *job* tergantung dengan mode yang digunakan. Waktu proses *job* apabila diproses oleh mesin dalam laju normal lebih besar dari waktu apabila diproses oleh mesin dalam laju cepat. Penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya dari sisi model penjadwalan (penjadwalan *flow-shop* vs *job-shop*) dan obyektif (energi dan total tardiness vs energi dan *makespan*). Algoritma *memetic* multi-obyektif (MOMA) dikembangkan untuk mencari himpunan solusi tidak didominasi.

Kontribusi teoritis penelitian ini adalah pengembangan algoritma *memetic* yang digunakan untuk memecahkan masalah penjadwalan multi-tujuan *flow-shop* yang mempertimbangkan konsumsi energi yang dipengaruhi oleh kecepatan mesin. Adapun kontribusi praktis penelitian ini adalah algoritma yang dikembangkan dapat digunakan oleh perusahaan-perusahaan manufaktur sebagai metode konservasi energi.

## 2. Formulasi masalah

Adapun masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut. Sebuah pabrik memiliki  $N$  buah *job*,  $j = 1, 2, \dots, N$ , yang harus diproses oleh  $M$  mesin,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Urutan pengerjaan *job* di setiap mesin adalah identik. Setiap *job* hanya dapat diproses oleh satu mesin dan setiap mesin hanya dapat memproses *job* dalam satu waktu.

Setiap *job* memiliki waktu tenggat  $d_j$ . Setiap mesin memiliki mode laju  $v$ : lambat, normal, cepat. Setiap mesin hanya dapat beroperasi menggunakan satu mode untuk memproses sebuah *job*. Mesin dapat menggunakan mode yang berbeda untuk *job* yang berbeda. Waktu proses *job* tergantung dengan mode mesin yang memprosesnya  $p_{ijv}$ . Energi yang dibutuhkan untuk mesin dalam mode  $v$  dinotasikan sebagai  $e_v$ .

Sebagai contoh, mesin 1 dapat beroperasi pada mode normal untuk *job* 1, mode cepat untuk *job* 2, dan mode lambat untuk *job* 3. Ilustrasi lain, mesin 1 tidak dapat menggunakan mode normal dan cepat untuk memproses *job* 2. Dua buah kriteria dalam model penjadwalan ini: konsumsi energi dan *total tardiness*. Metode optimisasi multi-obyektif (MOMA) digunakan untuk menentukan himpunan solusi yang tidak didominasi (*non-dominated solutions* atau *Pareto front*).

Adapun asumsi-asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- *Job non-preemption*. Apabila mesin memproses sebuah *job*, *job* harus diproses sampai selesai.
- Seluruh *job* dan mesin siap untuk digunakan produksi pada waktu 0.
- Tidak terjadi kerusakan mesin selama proses penjadwalan.
- Tidak ada kegiatan perawatan mesin selama proses penjadwalan.
- Data-data bersifat deterministik.

## 3. Metode usulan

Algoritma memetik merupakan penyempurnaan dari algoritma genetik. Selain proses seleksi, *crossover*, dan mutasi, algoritma *memetik* menggunakan proses *learning* atau *local search* untuk mencegah terjadinya kekonvergenan yang prematur. Pada penelitian ini, setiap individu dalam populasi dipetakan atau dibagi berdasarkan *rank* dan lokasi individu berada.

Berdasarkan atribut *rank* dan lokasi, seleksi individual untuk melakukan *crossover* dilakukan berdasarkan suatu aturan tertentu. Selanjutnya, *local search* dilakukan berdasarkan atribut individual. Proses secara detail akan dijabarkan berikut.

### 3.1. Skema pengkodean

Sebuah individu dikodekan oleh sebuah *array* (larik) berisi  $N(M + 1)$  elemen. Sebanyak  $N$  elemen pertama merepresentasikan *job*. Sejumlah  $MN$  elemen selanjutnya merepresentasikan mode laju mesin 1 sampai dengan mesin  $M$ . **Tabel 1** menggambarkan data waktu proses dari 3 buah *job* dan 2 mesin. Waktu proses *job* 1 apabila diproses mesin 1 dengan laju normal adalah 8. Apabila menggunakan mode cepat, maka waktu proses *job* 1 adalah 5. **Tabel 2** menampilkan konsumsi energi dari setiap mesin untuk setiap mode.

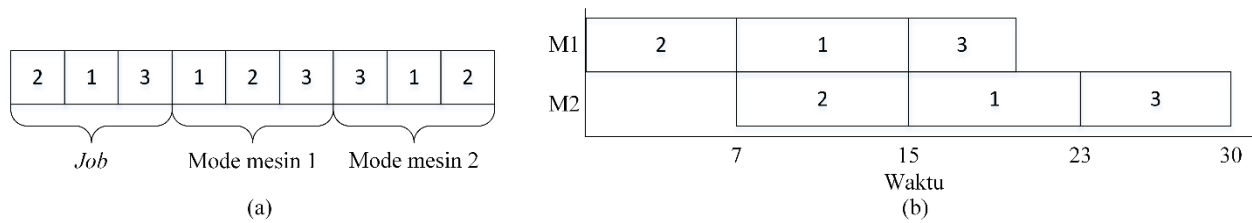
Data pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** digunakan untuk mengilustrasikan proses pengodean dan jadwal hasil pendekodean. **Gambar 1** mengilustrasikan skema pengodean dari sebuah individu beserta jadwal yang dihasilkan. Urutan pengerjaan *job* pada setiap mesin adalah 2-1-3. Pada **Gambar 1(a)**, *job* 2 diproses pada mesin 1 menggunakan mode 1 (lambat) dan pada mesin 2 menggunakan mode 3 (cepat). Berdasarkan **Tabel 1**, waktu proses *job* 2 berdasarkan mode mesin yang digunakan adalah 7 dan 8. Proses yang sama dilakukan untuk *job* 1 dan *job* 3. Jadwal yang didapat dari hasil pendekodean individu ditampilkan pada **Gambar 1(b)**.

**Tabel 1.**  
Data waktu proses

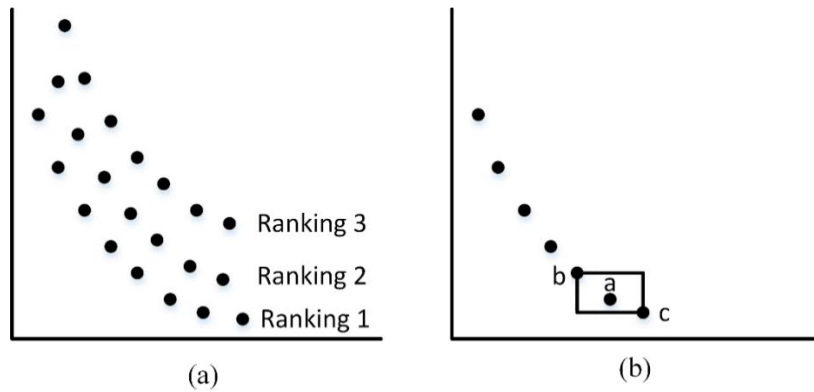
Job	Mode laju mesin 1			Mode laju mesin 2		
	1	2	3	1	2	3
1	10	8	5	8	6	4
2	7	5	4	15	10	8
3	12	7	5	12	7	5

**Tabel 2.**  
Konsumsi energi (kWh)

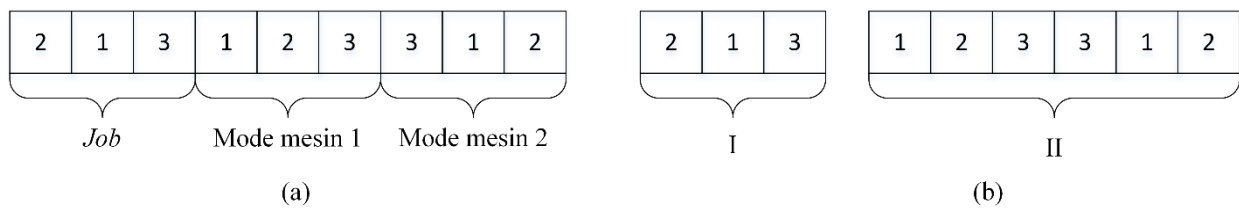
Mesin	Mode laju mesin		
	Lambat (1)	Normal (2)	Cepat (3)
1	10	8	5
2	7	5	4



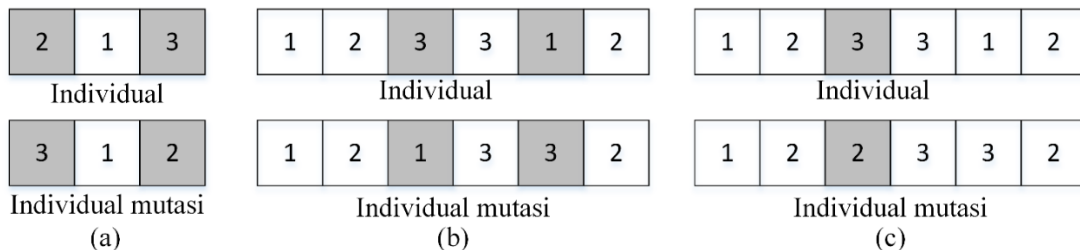
Gambar 1. Skema pengodean: (a) individu, (b) jadwal



Gambar 2. Atribut individual: (a) ranking, (b) crowding distance



Gambar 3. Proses pemisahan sebuah kromosom: (a) kromosom awal, (b) kromosom dipisah menjadi dua bagian, job (bagian I) dan laju mesin (bagian II)



Gambar 4. Proses mutasi: (a) pertukaran job, (b) pertukaran mode mesin, (c) perubahan laju mesin

3.2. Ranking dan crowding distance

Kualitas individu dalam populasi ditentukan oleh atribut ranking dan crowding distance. Penentuan ranking dilakukan berdasarkan algoritma pengurutan oleh Deb et al. Sekumpulan individu yang tidak didominasi oleh individu lain diberikan ranking 1. Individu-individu diberikan ranking 2 apabila individu-individu tersebut hanya didominasi oleh individu-individu ranking 1. Gambar 2(a) menampilkan contoh sebuah populasi yang terdiri dari 3 ranking. Individu-individu pada ranking 1 tidak didominasi oleh individu lain. Individu-individu yang memiliki ranking 2 hanya didominasi oleh individu-individu ranking 1.

Atribut lain yang digunakan dalam penentuan kualitas sebuah individu adalah crowding distance. Gambar 2(b) melukiskan cara penentuan crowding distance dari sebuah individu a. Nilai crowding distance individu a dinyatakan

sebagai jarak Euclidian dari dua buah individu terdekat a.

3.3. Operator genetik

Tournaments biner digunakan untuk memilih individu yang akan melakukan proses crossover. Proses crossover dilakukan secara terpisah antara gen yang mengandung elemen job dan gen yang mengandung laju mesin. Gambar 3 digunakan sebagai ilustrasi pemisahan kromosom. Pada Gambar 3(b), kromosom telah terpisah menjadi dua bagian, job (bagian I) dan mesin (bagian II). Selanjutnya, single point crossover dilakukan pada setiap bagian (I dan II) secara terpisah. Mutasi dilakukan pada individu yang dipilih secara acak. Mutasi dilakukan pada bagian job dan mesin seperti pada Gambar 3(b). Pertukaran job secara acak dilakukan pada job (bagian I). Untuk mesin (bagian II), mutasi dilakukan dengan dua cara. Cara pertama adalah dengan pertukaran mesin, sedangkan cara kedua adalah dengan

mengubah mode mesin. Ilustrasi mutasi ditampilkan pada Gambar 4. Gambar 4(a) mengilustrasikan proses mutasi pada pertukaran job. Urutan pengerjaan job 2 dirubah dengan job 3. Pada Gambar 4(b), mode 3 ditukar dengan mode 1. Pada Gambar 4(c), mode 3 dirubah menjadi mode 1.

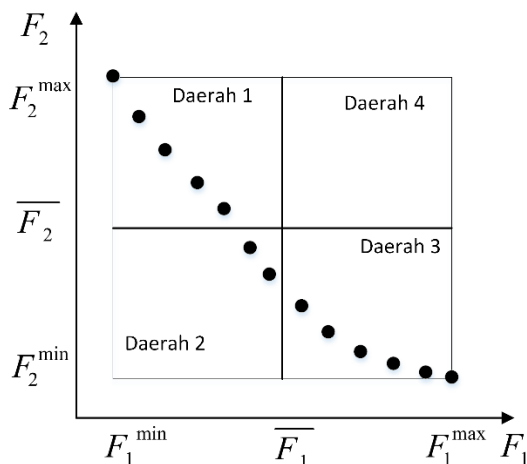
### 3.4. Local search

Local search dilakukan berdasarkan kepadatan daerah yang didiami oleh para individu elit yang memiliki ranking 1. Langkah pertama adalah mengidentifikasi daerah yang didiami oleh para individu elit. Berdasarkan nilai terbaik ( $F_1^{min}$  dan  $F_2^{min}$ ) dan terburuk ( $F_1^{max}$  dan  $F_2^{max}$ ) dari masing-masing obyektif, empat buah daerah dapat dibentuk oleh individu elit. Daerah 4 tidak ditempati oleh individu elit karena tidak ada individu elit yang menempati daerah 4. Setelah terbentuk penyebaran elit, langkah selanjutnya adalah menghitung kepadatan setiap daerah.

Kepadatan dari suatu daerah dihitung berdasarkan jumlah individu elit yang mendiami suatu daerah. Sebagai contoh pada Gambar 5, kepadatan daerah 1 adalah 6. Setelah kepadatan setiap daerah telah ditentukan, pilih daerah daerah yang memiliki kepadatan terendah. Menggunakan contoh Gambar 5, maka daerah yang terpilih adalah daerah 2. Dari daerah 2, pilih individu elit yang memiliki nilai crowding distance terbesar. Hal ini dikarenakan individu yang memiliki crowding distance terbesar menempati daerah yang tidak padat.

Setelah individu tersebut terpilih, maka langkah selanjutnya adalah menentukan jenis gangguan (perturbation) pada individu yang telah terpilih. Penentuan jenis gangguan juga berdasarkan dari daerah yang ditempati oleh individu terpilih. Dua jenis gangguan yang dilakukan adalah pertukaran job ( $\Gamma_1$ ) dan perubahan kecepatan mesin ( $\Gamma_2$ ). Adapun aturan penentuan jenis gangguan adalah menggunakan aturan sebagai berikut:

1. Apabila individu terpilih menempati daerah 1, maka tetapkan probabilitas  $\Gamma_1$  terpilih adalah 0.75 dan  $\Gamma_2$  terpilih adalah 0.25.
2. Apabila individu terpilih menempati daerah 2, maka tetapkan probabilitas  $\Gamma_1$  terpilih adalah 0.5 dan  $\Gamma_2$  terpilih adalah 0.5.
3. Apabila individu terpilih menempati daerah 3, maka tetapkan probabilitas  $\Gamma_1$  terpilih adalah 0.25 dan  $\Gamma_2$  terpilih adalah 0.75.



Gambar 5. Identifikasi daerah yang ditempati oleh individu elit

Sebagai contoh, karena individu yang terpilih menempati daerah 2, maka probabilitas gangguan  $\Gamma_1$  dan  $\Gamma_2$  terpilih adalah sama. Misalkan bilangan acak yang dibangkitkan adalah 0.3, maka individual yang terpilih akan dikenakan gangguan  $\Gamma_1$ . Sedangkan apabila bilangan acak yang dibangkitkan adalah 0.51, maka individual tersebut akan dikenakan gangguan  $\Gamma_2$ .

### 3.5. Keseluruhan metode

Berdasarkan uraian-uraian di atas, maka prosedur keseluruhan dari metode usulan secara keseluruhan adalah sebagai berikut. Pertama-tama, populasi  $P$  sebanyak  $popSize$  dibangkitkan secara acak. Setelah itu, setiap individu dalam populasi diberikan ranking dan crowding distance. Langkah selanjutnya adalah seleksi individu untuk melakukan crossover. Hasil dari crossover adalah offspring  $P_{cross}$ . Setelah crossover dilakukan, mutasi dilakukan pada individu yang dipilih secara acak menghasilkan  $P_{mutasi}$ . Local search dilakukan untuk menghasilkan  $P_{ls}$ .

Selanjutnya, seluruh individu-individu yang dihasilkan dari hasil crossover, mutasi, dan local search digabung dengan  $P$ . Hasil dari penggabungan tersebut kemudian diurutkan berdasarkan ranking dan crowding distance. Individu-individu sebanyak  $popSize$  yang akan bertahan untuk melanjutkan evolusi selanjutnya. Secara sistematis, seluruh proses ini dinyatakan dalam Algoritma 1.

#### Algoritma 1: Prosedur algoritma memetic multi-obyektif

Input : Populasi  $P$

Output : Himpunan solusi tidak didominasi

begin

    inisialisasi:  $t \leftarrow 0$ ;

    bangkitkan populasi awal  $P_t$  secara acak;

    while kondisi terminasi belum terpenuhi do

        pilih individu-individu untuk crossover menggunakan turnamen biner;

        lakukan proses crossover terhadap individu-individu yang terpilih untuk mendapatkan  $P_{cross}$ ;

        lakukan mutasi untuk mendapatkan  $P_{mutasi}$ ;

        lakukan local search untuk mendapatkan  $P_{ls}$ ;

        gabung seluruh populasi menjadi populasi baru

$P_{t+1} = P_t + P_{cross} + P_{mutasi} + P_{ls}$ ;

        urutkan  $P_{t+1}$  berdasarkan ranking dan crowding distance dan pilih sebanyak  $popSize$  sebagai populasi generasi selanjutnya;

    end while

end

### 4. Percobaan numerik

Untuk mengevaluasi performansi dari metode usulan, percobaan numerik dilakukan pada beberapa masalah yang dibangkitkan secara acak. Algoritma usulan diimplementasikan melalui program JAVA. Percobaan dilakukan pada 8 GB RAM komputer. Sebanyak 12 buah masalah dibuat berdasarkan kombinasi dari job dan mesin,  $N = \{3, 5, 10, 15\}$  dan  $M = \{2, 3, 5\}$ . Waktu proses setiap job dibangkitkan melalui bilangan acak seragam antara 1 dan 10. Tiga mode kecepatan digunakan: lambat, normal, dan cepat. Setelah waktu proses dibangkitkan, waktu tenggat dari sebuah job dihitung sebagai  $d_j = h * \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{v=1}^V p_{ijv}}{MV} \right]$ , di mana  $V$  adalah jumlah mode laju setiap mesin dan  $h$  adalah faktor waktu tenggat. Konsumsi energi setiap mesin dibangkitkan secara acak distribusi seragam [5, 15].

Parameter yang digunakan oleh metode usulan adalah sebagai berikut. Jumlah populasi  $popSize = 50$ . Laju  $crossover \alpha$  adalah 0,75. Laju mutasi  $\beta$  ditetapkan sebesar 0,1. Sedangkan jumlah iterasi  $local search$  adalah 8. Satu kali eksekusi dilakukan selama 100 detik. Metode usulan dieksekusi sebanyak 10 kali untuk setiap masalah.

Dua buah metrik performansi (*performance metric*) digunakan untuk mengevaluasi performansi metode usulan. Yang pertama adalah jumlah solusi tidak didominasi ( $NS$ ) yang berhasil ditemukan oleh metode usulan. Metrik kedua adalah *generational distance* ( $GD$ ) yang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut

$$GD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \Delta_k}{K}} \tag{1}$$

dengan  $K$  adalah jumlah solusi tak didominasi yang berhasil ditemukan oleh algoritma,  $k$  adalah indeks dari solusi tak didominasi, dan  $\Delta$  adalah jarak Euclidian terdekat dari solusi ke- $k$  dengan sebuah solusi dari himpunan referensi.

Suatu algoritma yang menghasilkan  $NS$  yang banyak mengindikasikan kemampuan algoritma tersebut dalam mengeksplorasi solusi. Sedangkan semakin kecil nilai  $GD$  semakin baik algoritma tersebut dalam menghasilkan solusi.

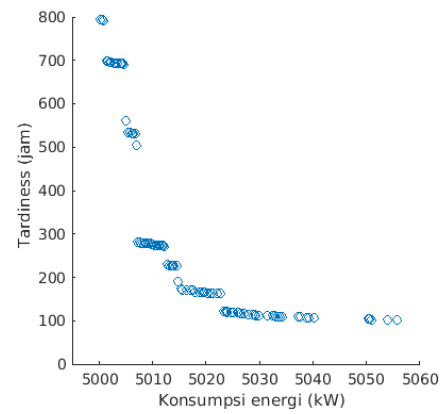
Tabel 3 menampilkan hasil percobaan eksperimen untuk faktor waktu tenggat sebesar 1,3. Dari hasil tersebut, didapatkan rata-rata 119,75 solusi tidak didominasi didapatkan oleh metode usulan dalam satu kali eksekusi. Sedangkan untuk metrik  $GD$ , didapatkan rata-rata 18,12 di mana nilai ini cukup kecil. Oleh karena itu, dapat disimpulkan untuk faktor waktu tenggat sebesar 1,3 algoritma usulan cukup baik dalam menghasilkan solusi yang banyak dan konvergen.

Gambar 6 menampilkan sebaran dari himpunan solusi tidak didominasi untuk masalah nomor 8 (10 *job* dan 5 mesin). Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa algoritma usulan dieksekusi sebanyak 10 kali untuk 10 masalah. Oleh karena itu, yang ditampilkan pada Gambar 6 adalah hasil yang memiliki nilai  $GD$  terkecil untuk masalah nomor 8.

Dari sisi waktu komputasi, semakin besar masalah penjadwalan, semakin lama waktu yang dibutuhkan algoritma untuk menyelesaikan masalah. Dari Tabel 3 juga dapat dilihat bahwa waktu rata-rata untuk menyelesaikan masalah penjadwalan menggunakan algoritma *memetic* usulan adalah sekitar 11,95 detik. Hal ini tentu saja sangat praktis digunakan dibandingkan dengan penggunaan metode eksak yang secara teoritis membutuhkan waktu yang lebih lama dan tidak praktis dalam penggunaannya.

**Tabel 3**  
Hasil percobaan eksperimen untuk  $h = 1.3$

No	Masalah ( $N \times M$ )	$\overline{GD}$	$\overline{NS}$	Waktu komputasi (detik)
1	3×2	0.62	71	0.2
2	3×3	6.15	87	1.1
3	3×5	2.75	110	1.4
4	5×2	4.62	108	2.9
5	5×3	7.54	117	3.1
6	5×5	15.21	120	3.8
7	10×2	8.67	154	7.8
8	10×3	16.54	102	9.2
9	10×5	43.21	117	15.3
10	15×2	53.02	110	26.3
11	15×3	25.48	122	33.4
12	15×5	33.65	127	38.9
Rata-rata		18.12	119.75	11.95



**Gambar 6.** Penyebaran solusi tidak didominasi untuk masalah 10 *jobs* dan 5 mesin

### 5. Kesimpulan

Penelitian ini membahas penjadwalan multi-obyektif *flow-shop* dengan mempertimbangkan konsumsi energi. Konsumsi energi merupakan fungsi dari kecepatan mesin yang digunakan. Mesin dapat dioperasikan pada laju cepat untuk mempersingkat waktu proses *job*, akan tetapi membutuhkan jumlah daya yang lebih besar dibandingkan dengan laju normal. *Trade-off* yang terjadi adalah pemilihan kecepatan mesin (yang berdampak pada *total tardiness*) dengan konsumsi energi. Algoritma *memetic* diusulkan untuk mendapatkan himpunan solusi yang tidak didominasi. Berdasarkan percobaan numerik, algoritma yang diusulkan menghasilkan himpunan solusi yang banyak dan konvergen. Selain itu, algoritma yang diusulkan sangat praktis dibandingkan dengan pendekatan eksak. Sehingga, industri manufaktur dapat menggunakan algoritma ini sebagai metode konservasi energi.

Penelitian ini dapat dilanjutkan pada berbagai konfigurasi rantai produksi (*open shop*, mesin paralel) atau dengan mempertimbangkan mekanisme *on/off*.

### Acknowledgement

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada para penelaah yang telah memberikan banyak masukan untuk kesempurnaan artikel ini.

### References

- [1] Energy Information Administration, "International energy outlook 2019 with projections to 2050," Washington DC, 2019.
- [2] S. Okajima and H. Okajima, "Analysis of energy intensity in Japan.," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 574–586, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.05.117.
- [3] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, and G. Chen, "Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact," *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 694–704, May 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.04.022.
- [4] K. Kellens, R. Mertens, D. Paraskevas, W. Dewulf, and J. R. Duflou, "Environmental impact of additive manufacturing processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?," *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 582–587, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.153.
- [5] Y. Tang, K. Mak, and Y. F. Zhao, "A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1560–1572, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.037.
- [6] J. P. Seclen-Luna, P. Moya-Fernández, and Á. Pereira, "Exploring

- the effects of innovation strategies and size on manufacturing firms' productivity and environmental impact," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3289, Jan. 2021, doi: [10.3390/su13063289](https://doi.org/10.3390/su13063289).
- [7] P. K. Halder, N. Paul, M. U. H. Joardder, and M. Sarker, "Energy scarcity and potential of renewable energy in Bangladesh," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1636–1649, Nov. 2015, doi: [10.1016/j.rser.2015.07.069](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.069).
- [8] G. Bridge, "Energy (in)security: world-making in an age of scarcity," *The Geographical Journal*, vol. 181, no. 4, pp. 328–339, 2015, doi: [10.1111/geoj.12114](https://doi.org/10.1111/geoj.12114).
- [9] B. Kurniawan, A. A. Gozali, W. Weng, and S. Fujimura, "A genetic algorithm for unrelated parallel machine scheduling minimizing makespan cost and electricity cost under time-of-use (TOU) tariffs with job delay mechanism," in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management*, Dec. 2018, pp. 583–587, doi: [10.1109/IEEM.2017.8289958](https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289958).
- [10] G. Mouzon and M. B. Yildirim, "A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 105–116, 2008, doi: [10.1080/19397030802257236](https://doi.org/10.1080/19397030802257236).
- [11] S. Rubaiee, S. Cinar, and M. B. Yildirim, "An Energy-Aware Multiobjective Optimization Framework to Minimize Total Tardiness and Energy Cost on a Single-Machine Nonpreemptive Scheduling," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 66, no. 4, pp. 699–714, Nov. 2019, doi: [10.1109/TEM.2018.2846627](https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2846627).
- [12] S. Gürel, H. Gultekin, and V. E. Akhlaghi, "Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 58, pp. 97–108, Aug. 2019, doi: [10.1016/j.rcim.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.002).
- [13] Y. Lu, J. Lu, and T. Jiang, "Energy-conscious scheduling problem in a flexible job shop using a discrete water wave optimization algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101561–101574, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2930281](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930281).
- [14] L. Meng, C. Zhang, X. Shao, Y. Ren, and C. Ren, "Mathematical modelling and optimisation of energy-conscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines," *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 4, pp. 1119–1145, Feb. 2019, doi: [10.1080/00207543.2018.1501166](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1501166).
- [15] B. Zhou, Q. Yi, X. Li, and Y. Zhu, "Synergetic energy-conscious scheduling optimization of part feeding systems via a novel chaotic reference-guided policy," *Engineering Computations*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, Jan. 2022, doi: [10.1108/EC-06-2021-0337](https://doi.org/10.1108/EC-06-2021-0337).
- [16] L. Meng, C. Zhang, B. Zhang, and Y. Ren, "Mathematical modeling and optimization of energy-conscious flexible job shop scheduling problem with worker flexibility," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 68043–68059, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2916468](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916468).
- [17] F. Shrouf, J. Ordieres-Meré, A. García-Sánchez, and M. Ortega-Mier, "Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs," *J. Clean. Prod.*, vol. 67, pp. 197–207, 2014, doi: [10.1016/j.jclepro.2013.12.024](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.024).
- [18] M. B. Yildirim and G. Mouzon, "Single-machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 59, no. 4, pp. 585–597, 2012, doi: [10.1109/TEM.2011.2171055](https://doi.org/10.1109/TEM.2011.2171055).
- [19] B. Kurniawan, W. Song, W. Weng, and S. Fujimura, "Distributed-elite local search based on a genetic algorithm for bi-objective job-shop scheduling under time-of-use tariffs," *Evol. Intell.*, 2020, doi: [10.1007/s12065-020-00426-4](https://doi.org/10.1007/s12065-020-00426-4).
- [20] J. Yan, L. Li, F. Zhao, F. Zhang, and Q. Zhao, "A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1543–1552, Nov. 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.06.161](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.161).
- [21] S. A. Mansouri, E. Aktas, and U. Besikci, "Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption," *European Journal of Operational Research*, vol. 248, no. 3, pp. 772–788, Feb. 2016, doi: [10.1016/j.ejor.2015.08.064](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.064).
- [22] M. Aghelnejad, Y. Ouazene, and A. Yalaoui, "Complexity analysis of energy-efficient single machine scheduling problems," *Operations Research Perspectives*, vol. 6, p. 100105, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.orp.2019.100105](https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100105).
- [23] B. Kurniawan et al., "Solving Just-in-Time Single Machine Scheduling with Variable Discrete Speed Machine using Hybrid NSGA-II," *Jurnal Teknik Industri*, vol. 22, no. 2, pp. 211–223, Aug. 2021, doi: [10.22219/JTIUMM.Vol22.No2.211-223](https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol22.No2.211-223).
- [24] J.-Y. Moon, K. Shin, and J. Park, "Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 523–535, Sep. 2013, doi: [10.1007/s00170-013-4749-8](https://doi.org/10.1007/s00170-013-4749-8).
- [25] A. Antoniadis, N. Garg, G. Kumar, and N. Kumar, "Parallel machine scheduling to minimize energy consumption," in *Proceedings of the Thirty-First Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, USA, 2020, pp. 2758–2769.
- [26] L. Shena, S. Dauzère-Péres, and J. S. Neufeldt, "Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 265, pp. 503–516, 2018, doi: [10.1016/j.ejor.2017.08.021](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.021).
- [27] Y. Zeng, A. Che, and X. Wu, "Bi-objective scheduling on uniform parallel machines considering electricity cost," *Engineering Optimization*, vol. 50, no. 1, pp. 19–36, Jan. 2018, doi: [10.1080/0305215X.2017.1296437](https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1296437).
- [28] M. Rabbani, S. Sadeghsa, M. Vaez-Alaei, and H. Farrokhi-Asl, "Robust and sustainable full-shipment routing and scheduling problem considering variable speed: A real case study," *Scientia Iranica*, vol. 26, no. 3, pp. 1881–1897, Jun. 2019, doi: [10.24200/sci.2018.5106.1100](https://doi.org/10.24200/sci.2018.5106.1100).
- [29] X. Xin, X. Wang, X. Tian, Z. Chen, and K. Chen, "Green scheduling model of shuttle tanker fleet considering carbon tax and variable speed factor," *Journal of Cleaner Production*, vol. 234, pp. 1134–1143, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.jclepro.2019.06.275](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.275).
- [30] R. Kumar and A. Kumar, "Optimal scheduling of variable speed pumped storage, solar and wind energy system," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, Mar. 2021, doi: [10.1080/15567036.2021.1892243](https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1892243).