

## PENGGUNAAN MEMETIC ALGORITHM PADA PENJADWALAN MESIN UNTUK MEMINIMUMKAN EMISI KARBON

### AN APPLICATION OF MEMETIC ALGORITHM IN MACHINE SCHEDULING TO MINIMIZE CARBON EMISSION

FERDINAN RINALDO TAMPUBOLON<sup>1</sup>, RISCHA DEVITA<sup>2</sup>, SINTA MARITO SIAGIAN<sup>3</sup>,  
SAMARIA CHRISNA HS<sup>4</sup>, SWITAMY ANGNITHA PURBA<sup>5</sup>, ANNA ANGELA SITINJAK<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Medan  
Jalan Almamater No.1 USU Medan

<sup>2,3</sup>Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Medan  
Jalan Almamater No.1 USU Medan

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan  
Jalan Almamater No.1 USU Medan

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Teknologi Kimia Industri  
Jalan Medan Tenggara No. VII, Medan Tenggara, Medan

<sup>6</sup>Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Teknologi Kimia Industri  
Jalan Medan Tenggara No. VII, Medan Tenggara, Medan

email: <sup>1</sup>ferdinantampubolon@polmed.ac.id, <sup>2</sup>rischadevita@polmed.ac.id, <sup>3</sup>sintamarito@polmed.ac.id, <sup>4</sup>samariachrisna@polmed.ac.id, <sup>5</sup>switamy@kemenperin.go.id, <sup>6</sup>annaangelasitinjak@kemenperin.go.id

#### Abstrak

Isu lingkungan merupakan topik penelitian yang sering dilakukan akhir-akhir ini, salah satu isu tersebut adalah emisi karbon. Salah satu gas emisi karbon terbesar muncul dari tindakan-tindakan manusia seperti transportasi, pertambangan, aktifitas konstruksi dan industri. Dari sisi operasional, strategi penjadwalan terbukti secara signifikan mengurangi emisi karbon. Strategi ini dianggap lebih efektif dan rendah biaya. Flexible Job Shop adalah salah satu jenis penjadwalan mesin pada industri dan merupakan pengembangan dari Job Shop. Kebanyakan penelitian terkait Flexible Job Shop menggunakan waktu pemrosesan bilangan *crisp*, pada kenyataannya faktor keterlibatan manusia, kerusakan mesin, maupun penurunan kinerja mesin mengakibatkan adanya ketidakpastian pada waktu pemrosesan pekerjaan, penelitian ini akan menyelesaikan Penjadwalan Flexible Job Shop dimana waktu pemrosesan dalam bentuk bilangan grey dengan dua fungsi tujuan yaitu makespan dan emisi karbon. Memetic Algorithm yaitu kombinasi algoritma NSGA-II dan Tabu Search digunakan untuk menyelesaikan kasus ini, hasil yang diperoleh kombinasi algoritma ini memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu algoritma.

**Kata kunci** : NSGA-II, Flexible Job Shop, Emisi Karbon, Tabu

#### Abstract

Environmental issues are a common topic of research these days, one such issue is carbon emissions. One of the largest carbon emission gases emerges from human actions such as transportation, mining, construction activities and industry. From an operational perspective, scheduling strategies are proven to significantly reduce carbon emissions. This strategy is regarded as more effective and low cost. Flexible Job Shop is a type of machine scheduling in industry and is an advancement of Job Shop. Most research related to Flexible Job Shop uses crisp number of processing time, in reality the factor of human involvement, machine damage, and decreased machine performance results in uncertainty in job processing time, this research will solve Flexible Job Shop Scheduling where processing time is in the form of grey numbers with two objective objectives, which are makespan and carbon emissions. Memetic Algorithm that is a combination of NSGA-II and Tabu Search algorithms is used to solve this problem, the results obtained by this combination of algorithms produce better results than the use of a single algorithm.

**Key Words** : NSGA-II, Flexible Job Shop, Emisi Karbon, Tabu

#### Pendahuluan

Isu lingkungan merupakan topik penelitian yang sering dilakukan akhir-akhir ini, salah satu isu tersebut adalah emisi karbon yang mana dapat menyebabkan pemanasan suhu ekstrim, bencana alam, naiknya permukaan air laut dan lain-lain[1]. CO<sub>2</sub> yang mana merupakan salah satu gas emisi karbon terbesar muncul dari tindakan-tindakan manusia seperti transportasi, pertambangan, aktifitas konstruksi dan

industri[2]. Salah satu langkah untuk mengurangi emisi karbon adalah dengan mengembangkan inovasi pada peralatan dan mesin industri. Akan tetapi hal ini tentu akan membutuhkan biaya yang sangat besar sehingga kurang tepat digunakan untuk perusahaan industri dengan skala sedang. Dari sisi operasional, strategi penjadwalan terbukti secara signifikan mengurangi emisi karbon. Strategi ini dianggap lebih efektif dan rendah biaya[3].

Flexible Job Shop adalah salah satu jenis penjadwalan mesin pada industri dan merupakan pengembangan dari Job Shop dimana terdapat mesin serbaguna multi-purpose machine sehingga dapat memproses lebih dari satu jenis pekerjaan[4]. Pada Penjadwalan Flexible Job Shop pengambil keputusan tidak hanya dihadapkan pada bagaimana memilih urutan pekerjaan akan tetapi juga memilih mesin yang akan digunakan pada tiap pekerjaan. Fungsi tujuan klasik dari Flexible Job Shop adalah penjadwalan yang meminimumkan waktu pemrosesan keseluruhan pekerjaan (makespan), keterlambatan, beban kerja, mesin, earliness, tardiness dan lainnya[5]. meski demikian akhir-akhir ini peneliti banyak berfokus kepada aspek lingkungan seperti konsumsi energi, emisi karbon maupun tingkat kebisingan mesin[6]. Beberapa penelitian menggabungkan fungsi tujuan klasik dan aspek lingkungan (Multi-Objektif) sehingga penjadwalan tersebut menghasilkan keuntungan bagi perusahaan tanpa merusak lingkungan[7].

Kebanyakan penelitian terkait Flexible Job Shop mengasumsikan waktu pemrosesan pekerjaan yang pasti oleh mesin (*crisp number*), pada kenyataannya faktor keterlibatan manusia, kerusakan mesin, maupun penurunan kinerja mesin mengakibatkan adanya ketidakpastian pada waktu pemrosesan pekerjaan. Untuk mengakomodir hal tersebut terdapat dua teori himpunan yang cukup terkemuka yaitu himpunan fuzzy dan himpunan grey. [8, 9]. Himpunan fuzzy membutuhkan lebih banyak informasi terkait fungsi keanggotaan, dimana pada kasus tertentu informasi yang diperoleh tidak lengkap, dalam hal ini himpunan grey lebih tepat digunakan karena hanya membutuhkan perkiraan rentang waktu yaitu batas atas dan batas bawah. Penggunaan bilangan grey untuk Flexible Job Shop, akan tetapi penelitian tersebut tidak melibatkan emisi karbon dengan demikian penelitian yang diusulkan akan berfokus untuk menyelesaikan Flexible Job Shop dengan fungsi tujuan ganda makespan dan emisi karbon[10].

Metode untuk penyelesaian Flexible Job Shop dibagi menjadi dua yaitu metode eksak dan metode heuristik. Metode heuristik lebih dipilih karena dapat mencari solusi yang lebih baik dengan waktu komputasi yang lebih sedikit[11]. Metode heuristik terbagi lagi menjadi pencarian dengan skala yang luas (Global) seperti Algoritma Genetika [12, 13], Particle Swarm Optimization [14, 15], Ant Colony [16]. Sementara itu pencarian lokal mencari solusi dengan skala yang lebih sempit (ketetanggan) seperti Simulated Annealing [17] dan Tabu Search [18]. Penelitian menunjukkan penggunaan gabungan metode memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan satu metode. Memetic Algorithm pada dasarnya adalah penggabungan dari metode Global search dan Local Search[19]. Dalam penelitian ini metode NSGA-II digunakan sebagai metode Global Search. Metode ini dipilih karena sangat efektif digunakan untuk kasus lebih dari satu fungsi tujuan. Sementara untuk *local search* akan menggunakan metode Tabu Search. Gabungan kedua metode ini diharapkan memberikan solusi yang lebih optimal.

## Metode Penelitian

### Flexible Job Shop

Flexible Job Shop dapat didefinisikan sebagai berikut: suatu himpunan  $n$  pekerjaan  $j = \{j_1, j_2, j_3 \dots j_n\}$  mesin yang akan diproses oleh sejumlah  $m = \{m_1, m_2, m_3 \dots m_m\}$  himpunan mesin tiap pekerjaan terdiri dari sub-pekerjaan (operasi)  $O = \{O_{11}, O_{12}, O_{13} \dots J_{no}\}$ . Dengan aturan-aturan sebagai berikut: 1. Tiap operasi dapat dikerjakan oleh beberapa mesin tapi tidak lebih dari satu mesin secara bersamaan 2. Tiap operasi dalam suatu pekerjaan harus diselesaikan secara berurutan 3. Tiap mesin hanya dapat mengerjakan satu operasi dalam suatu waktu 4. Pemrosesan suatu operasi tidak dapat diinterupsi [20]. Contoh Kasus Flexible Job Shop seperti pada Tabel 2.1.

**Tabel 1.** Flexible Job Shop

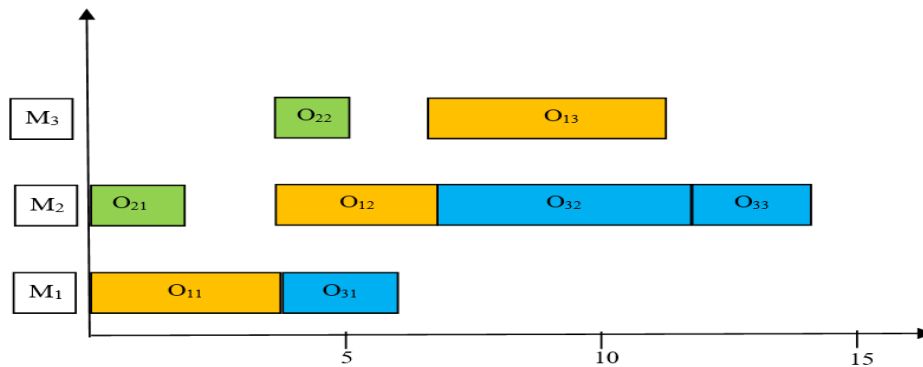
Job	Operation	Machine		
		$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	$O_{11}$	4	2	6
	$O_{12}$	2	3	-
	$O_{13}$	2	3	5
2	$O_{21}$	1	2	4
	$O_{22}$	2	3	1
3	$O_{31}$	2	3	6
	$O_{32}$	2	5	4
	$O_{33}$	-	2	3

Tabel tersebut menunjukkan suatu pekerjaan J1, operasi O11 dapat diselesaikan oleh Mesin-1 dengan waktu pemrosesan sebesar 4 satuan waktu.

Misalkan suatu urutan penjadwalan mesin yang digunakan sebagai berikut:

$$M_1: O_{31} \rightarrow O_{11}; M_2: O_{21} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{33}; M_3: O_{22} \rightarrow O_{13}$$

Maka hasil diagram Gannt seperti pada Gambar1



Gambar 1. Diagram Gannt

### Emisi Karbon

Emisi karbon dapat dihasilkan dari penggunaan energi oleh mesin. Secara umum emisi karbon pada mesin dapat dibagi menjadi dua, yaitu emisi karbon saat mesin memproses suatu pekerjaan dan emisi karbon saat mesin dalam keadaan standby (idle). Pada saat mesin memproses suatu pekerjaan maka emisi karbon yang dihasilkan (Kg CO<sub>2</sub>e) sebagai berikut:

$$CE_p = \alpha_e W_p \tag{1}$$

dimana  $\alpha_e$  adalah faktor emisi karbon dari penggunaan listrik,  $W_p$  menunjukkan total konsumsi energi mesin pada saat pemrosesan suatu pekerjaan.

$$W_p = \sum_{j=1}^n p_j t_j \tag{2}$$

Dimana  $P_j$  menunjukkan daya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan suatu pekerjaan dan  $t_j$  menunjukkan waktu yang digunakan mesin tersebut untuk memproses pekerjaan. Formula yang sama digunakan untuk menghitung emisi karbon pada saat mesin dalam keadaan idle. [21]

### Grey Number

Grey Number merujuk pada suatu bilangan yang tidak dapat ditentukan secara pasti, dimana nilainya dapat berada pada suatu interval maupun pada suatu himpunan bilangan. Grey Number secara umum direpresentasikan dengan simbol  $\otimes$ . Terdapat beberapa jenis Grey Number yaitu:

1. Grey Number yang hanya punya batas bawah,  $\otimes \in [\underline{a}, \infty)$ . Dimana  $\underline{a}$  menunjukkan bilangan pasti
2. Grey Number dengan batas atas  $\otimes \in (-\infty, \bar{a}]$
3. Interval Grey Number: yaitu mempunyai batas bawah  $\underline{a}$  dan batas atas  $\bar{a}$

Operasi-operasi pada Grey Number sebagai berikut:

- ❖ Aturan Penjumlahan: jika  $\otimes_1 \in [a, b], a < b; \otimes_2 \in [c, d], c < d$  maka:  

$$\otimes_1 + \otimes_2 \in [a + c, b + d]$$
- ❖ Aturan Pengurangan: jika  $\otimes_1 \in [a, b], a < b; \otimes_2 \in [c, d], c < d$  maka:  

$$\otimes_1 - \otimes_2 \in [a + d, b - c]$$
- ❖ Aturan Perkalian: jika  $\otimes_1 \in [a, b], a < b; \otimes_2 \in [c, d], c < d$  maka:  

$$\otimes_1 \cdot \otimes_2 \in [\min\{a \cdot c, a \cdot d, b \cdot c, b \cdot d\}, \max\{a \cdot c, a \cdot d, b \cdot c, b \cdot d\}]$$
- ❖ Aturan Pembagian: jika  $\otimes_1 \in [a, b], a < b; \otimes_2 \in [c, d], c < d$  maka:  

$$\otimes_1 / \otimes_2 \in \left[ \min \left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\}, \max \left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\} \right]$$

### Memetic Algorithm

Memetic Algorithm merupakan algoritma yang meniru evolusi pada manusia. Algoritma ini menggabungkan pencarian global dan pencarian lokal. Memetic Algorithm memiliki kemiripan dengan Algoritma Genetika tetapi adanya pergantian mutasi dengan pencarian metode-metode pencarian lokal seperti *simulated annealing* dan *tabu search*.

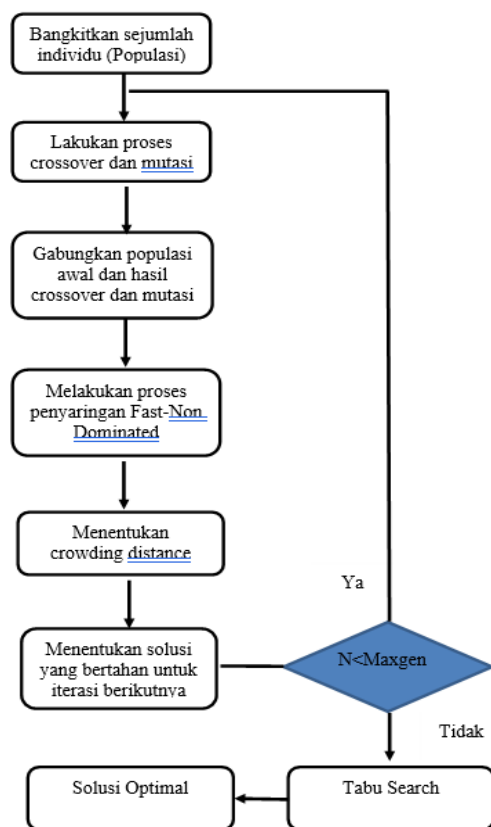
### NSGA-II

NSGA-II memiliki empat struktur dasar yaitu:

- *Non Dominated Sorting*: dimana tiap-tiap solusi dikategorikan ke dalam tiap-tiap *pareto front*
- *Elite-Preserving Operator*: dimana solusi yang terbaik akan disimpan dan dimasukkan ke iterasi selanjutnya
- *Crowding Distance*: digunakan untuk mengukur kepadatan suatu solusi
- Evaluasi: yaitu operator yang digunakan untuk solusi yang bertahan dan akan dibawa untuk iterasi berikutnya

### Tabu Search

*Tabu search* digunakan untuk pencarian lokal. Langkah-langkah *tabu search* sebagai berikut: 1. Tentukan solusi awal, 2. Melakukan pencarian solusi ketetanggaan dengan melakukan mutasi 3. Menghitung nilai fitness dari solusi ketetanggaan tersebut 4. Menentukan kondisi solusi ketetanggaan dengan sesuai dengan *tabu rules*, untuk melihat apakah solusi ketetanggaan tersebut dilarang dalam *tabu rules*, 5. Memperbarui *tabu list* (yaitu pergerakan mutasi maupun solusi yang dilarang), 6. Berhenti ketika jumlah iterasi tercapai. Gambar 2 menunjukkan gabungan algoritma yang diusulkan.



Gambar 2. Algoritma NSGA-II dan Tabu Search

### Hasil Penelitian dan Pembahasan

#### Hasil Penelitian

Untuk menguji algoritma yang sudah dibuat, penelitian [10] digunakan sebagai benchmark untuk dua kasus yaitu kasus 1 dengan 4 Job dengan 3 Mesin dan Kasus 2 dengan 10 Job dan 5 Mesin. Kasus 1 seperti pada Table 2.

**Tabel 2. Kasus 1**

Job	Operation	Interval	Machine		
			$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	1	0	[6,8]	[2,5]	[7,8]
	2	[5,9]	-	[4,8]	[4,8]
	3	[5,8]	[7,10]	[6,8]	-
2	1	0	[3,4]	[8,11]	[6,7]
	2	[6,9]	[6,8]	-	[2,5]
	3	[6,7]	[7,11]	[6,7]	-
3	1	0	[2,3]	[7,8]	[2,4]
4	1	0	-	[3,7]	-
	2	[6,8]	[6,10]	-	[8,12]

Kolom pertama pada Tabel 2 menunjukkan pekerjaan, kolom berikutnya menunjukkan operasi-operasi pada tabel yang harus dikerjakan secara berurut. Kolom interval menunjukkan waktu persiapan untuk melanjutkan ke operasi berikutnya, kolom mesin menunjukkan waktu pemrosesan pekerjaan oleh tiap mesin dalam bentuk bilangan grey, sebagai contoh untuk nilai [6,8] maka operasi pertama pada pekerjaan pertama dapat diproses dengan dalam rentang 6~8 satuan waktu.

Dikarenakan permasalahan tersebut merupakan kasus Flexible Job Shop dengan satu fungsi tujuan yaitu makespan, sementara algoritma yang diusulkan merupakan algoritma untuk lebih dari satu fungsi tujuan maka ditambahkan emisi karbon pada tiap mesin dengan membangkitkan bilangan acak dengan distribusi seragam (0,01-0,03) untuk emisi karbon mesin dalam keadaan idle dan bilangan acak (0,1-0,3) untuk emisi karbon saat mesin bekerja. Kemudian algoritma dijalankan dengan parameter sebagai berikut:

- Jumlah Populasi : 50-100
- Jumlah Iterasi NSGA-II : 100-200
- Probabilitas Crossover : 0,5-0,8
- Probabilitas Mutasi : 0,3-0,7
- Jumlah Iterasi Tabu Search : 100-200
- Jumlah Tabu Tenure : 5-10

**Tabel 3. Solusi yang diperoleh dengan NSGA-II dan Tabu Search**

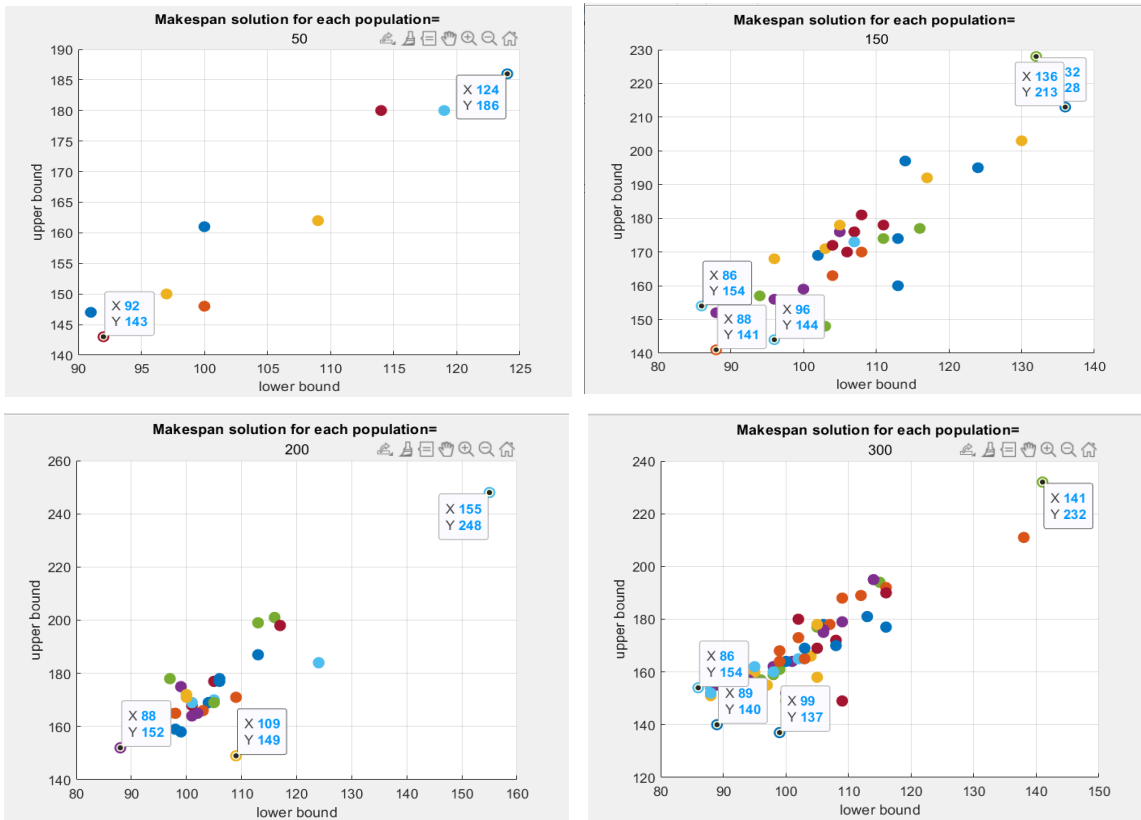
	Penelitian	NSGA+Tabu Search	
		Makespan	Carbon Emission
Kasus 1	[22,38]	[29,40]	[6.0,11]
		[24,40]	[8.3,13.3]
		[22,38]	[8.5,14.22]
Kasus 2	[493,562]	[493,562]	[288,326,8]
		[533,610]	[278.7,318.1]

Selanjutnya dibangkitkan 8 buah kasus dengan ukuran pekerjaan dan mesin sebagai berikut: 3x2, 5x3, 10 x 8, 10 x 10, 15 x 8, 20 x 5, 25 x 10, 35 x 15 dengan ketentuan sebagai berikut: jumlah operasi untuk tiap pekerjaan adalah bilangan acak dengan himpunan {1,2, ... 5}, nilai interval adalah bilangan grey  $I^{\otimes} = [p, p + q]$  dimana  $p$  dan  $q$  masing-masing variabel acak berdistribusi uniform dari 2-10, and 3-5, waktu pemrosesan adalah bilangan grey  $P^{\otimes} = [r, r + s]$  dimana  $r$  dan  $s$  masing-masing variabel acak berdistribusi uniform 5-30, and 5-10. Emisi karbon untuk tiap-tiap mesin dengan pada saat machine idle adalah bilangan acak berdistribusi normal 0.01-0.03 dan 0,1-0,3 saat mesin bekerja. Selanjutnya peforma algoritma dibandingkan dengan NSGA-II dan Tabu Search secara terpisah.

**Tabel 4. Perbandingan Hasil**

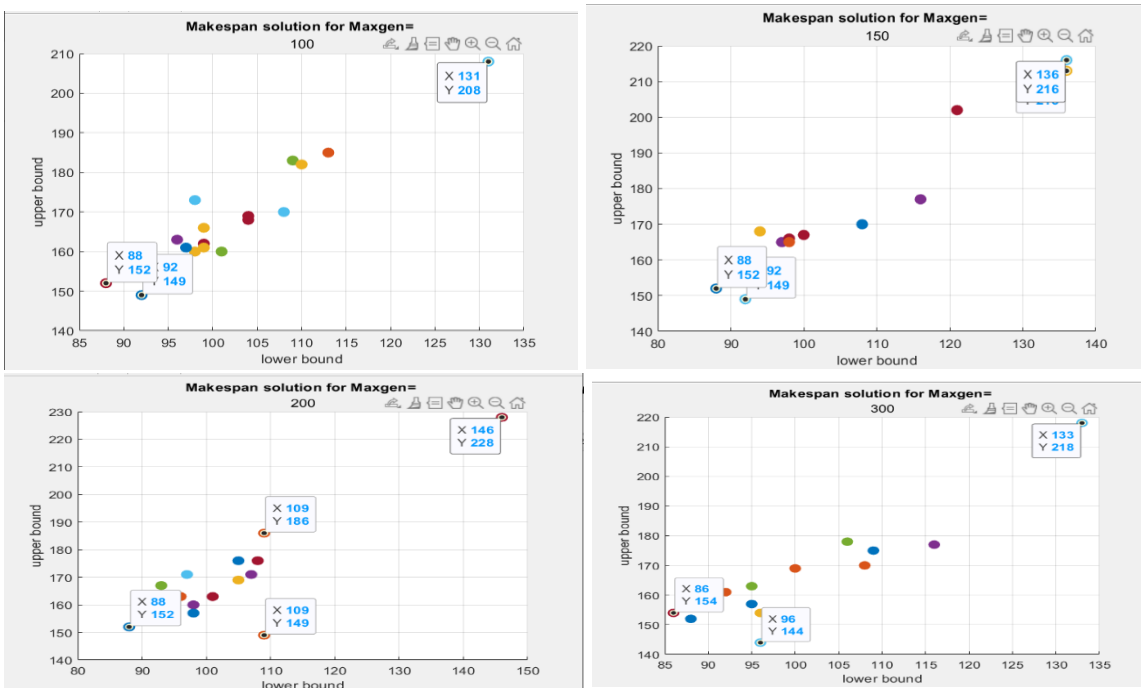
Job	Machine	NSGA-II-Tabu		NSGA-II		Tabu Search	
		M	E	M	E	M	E
3	2	[105,152]	[27.2,41]	[128,187]	[25.6,37.9]	[121,182]	[26.3,39.2]
5	3	[113,181]	[28.2,43.5]	[114,164]	[31.1,47.2]	[144.212]	[41.2,60]
		[123,183]	[26.7,41.1]				
10	8	[67,114]	[48,79.2]	[69,106]	[49.7,81.6]	[93,137]	[70.2,104]
10	10	[89,152]	[66.9,110.9]	[82,144]	[68.2,115]	[158,230]	[107.7,159.8]
15	8	[86,144]	[60.1,92.7]	[86,144]	[61.3,95.6]	[119,163]	[89.5,133]
20	5	[199,304]	[126.5,198.4]	[170,261]	[128.9,203.6]	[278,389]	[170.4,248.5]
25	10	[100,159]	[134,220.5]	[102,153]	[148.7,235.9]	[238,360]	[213,310.8]
35	15	[124,209]	[247.8,394,3]	[127,185]	[257.4,400.8]	[306,433]	[391.4,551.8]

Tabel 4 menunjukkan hasil makespan dan emsi karbon untuk ketiga algoritma yaitu NSGA-II+Tabu Search, dan Tabu Search. Untuk melihat pengaruh parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian terhadap hasil yang diperoleh, digunakan hasil makespan untuk beberapa populasi seperti pada Gambar 3.

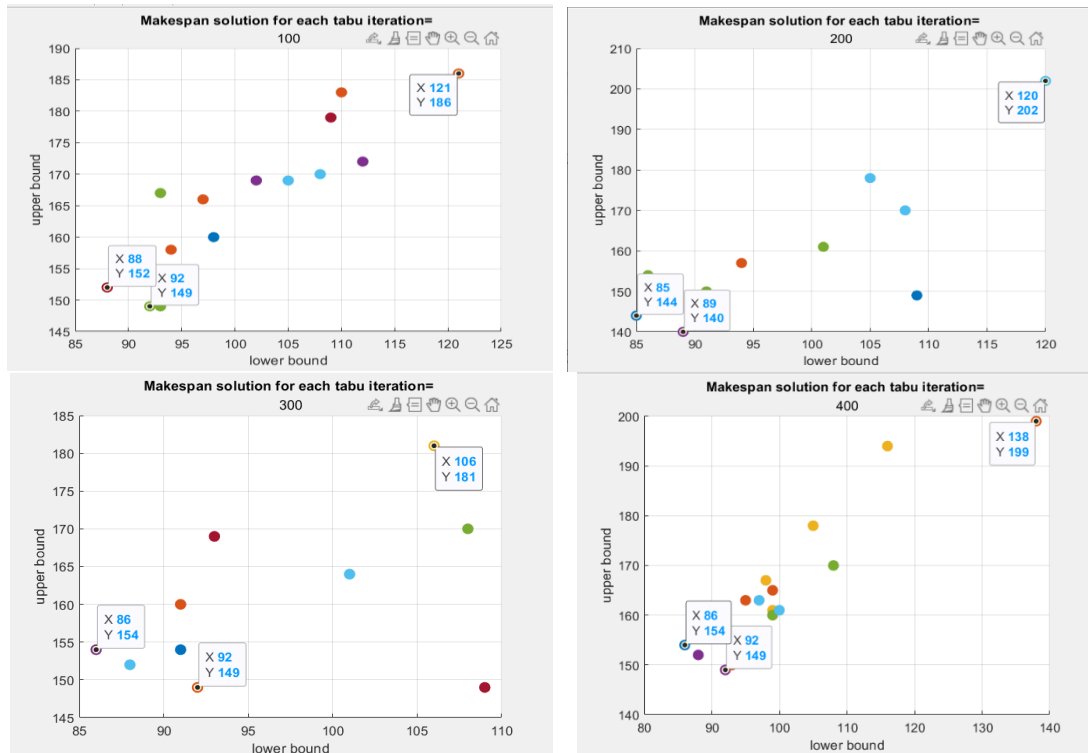


Gambar 3. Solusi batas bawah makespan yang diperoleh untuk setiap populasi

Nilai [x,y] masing-masing menunjukkan batas bawah dan batas atas bilangan grey untuk makespan.



Gambar 4. Solusi makespan untuk untuk tiap maxgen



**Gambar 5.** Solusi makespan untuk tiap iterasi tabu

Gambar 4 dan 5 menunjukkan solusi-solusi yang dihasilkan untuk beberapa iterasi NSGA-II dan iterasi pada Tabu masing-masing untuk maksimum iterasi 100,200,300 dan 400.

## Pembahasan

Terlihat pada Tabel4, memetic algorithm (NSGA-II + Tabu Search) memberikan hasil yang lebih minimum baik untuk makespan maupun emisi karbon, kecuali pada kasus pertama dimana NSGA-II terlihat memiliki emisi karbon yang lebih kecil yaitu [27.2,41] pada NSGA-II berbanding [25.6,37.9], meskipun memetic algorithm mempunyai hasil makespan yang lebih kecil akan tetapi solusi tersebut tidak dapat dikatakan lebih baik dibandingkan pada NSGA-II.Semakin besar jumlah pekerjaan dan jumlah mesin maka hasil prolehan dari memetic algorithm semakin menjauh dibandingkan dengan perolehan dari NSGA-II maupun Tabu Search.Hal ini dikarenakan pencarian solusi yang lebih luas dengan penggunaan memetic algorithm.

Sementara itu untuk parameter yang paling mempengaruhi terkait dengan jumlah populasi, jumlah iterasi maupun jumlah iterasi tabu, dari Gambar 3 terlihat semakin bertambahnya populasi hasil makespan yang diperoleh semakin baik, akan tetapi tidak terlalu signifikan, dikarenakan masih ditemukannya solusi yang lebih buruk pada jumlah populasi yang lebih banyak, hal yang sama juga terlihat pada semakin bertambahnya jumlah iterasi tabu pada Gambar 5. Sementara itu dari Gambar 4 terlihat penambahan jumlah iterasi secara signifikan meminimumkan jumlah makespan, semakin bertambahnya jumlah iterasi terlihat hasil makespan yang diperoleh semakin minimum.

## Kesimpulan

Algoritma yang diusulkan memberikan hasil penjadwalan yang optimal mempertimbangkan makespan dan konsumsi energi. Algoritma NSGA-II memberikan beberapa solusi yang tidak didominasi oleh solusi lainnya. Sementara itu Algoritma tabu search melakukan pencarian lokal untuk memperoleh hasil yang lebih minimum. Penambahan jumlah iterasi menjadi salah satu parameter yang paling mempengaruhi terhadap hasil yang diperoleh. Penambahan iterasi memberikan nilai makespan maupun konsumsi energi yang lebih minimum dibandingkan perubahan pada jumlah populasi maupun jumlah iterasi Tabu.

**Daftar Pustaka**

- [1] C. Destouet, H. Tlahig, B. Bettayeb, and B. Mazari, "Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 67, pp. 155-173, 2023.
- [2] B. Dong *et al.*, "Carbon emissions, the industrial structure and economic growth: Evidence from heterogeneous industries in China," *Environmental Pollution*, vol. 262, p. 114322, 2020.
- [3] H. Piroozfard, K. Y. Wong, and W. P. Wong, "Minimizing total carbon footprint and total late work criterion in flexible job shop scheduling by using an improved multi-objective genetic algorithm," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 128, pp. 267-283, 2018.
- [4] R. Buddala and S. S. Mahapatra, "An integrated approach for scheduling flexible job-shop using teaching-learning-based optimization method," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 15, no. 1, pp. 181-192, 2019.
- [5] P. Wojakowski, "Research study of state-of-the-art algorithms for flexible job-shop scheduling problem," *Czasopismo Techniczne*, vol. 2013, no. Mechanika Zeszyt 1-M (5) 2013, pp. 381-388, 2013.
- [6] M. Hassanchokami, A. Vital-Soto, and J. Olivares-Aguila, "The Role of Environmental Factors in the Flexible Job-Shop Scheduling Problem: A Literature Review," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 175-180, 2022.
- [7] W. Xu, Y. Hu, W. Luo, L. Wang, and R. Wu, "A multi-objective scheduling method for distributed and flexible job shop based on hybrid genetic algorithm and tabu search considering operation outsourcing and carbon emission," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 157, p. 107318, 2021.
- [8] J. J. Palacios, M. A. González, C. R. Vela, I. González-Rodríguez, and J. Puente, "Genetic tabu search for the fuzzy flexible job shop problem," *Computers & Operations Research*, vol. 54, pp. 74-89, 2015.
- [9] A. S. Khuman, "The similarities and divergences between grey and fuzzy theory," *Expert Systems with Applications*, vol. 186, p. 115812, 2021.
- [10] N. Xie and N. Chen, "Flexible job shop scheduling problem with interval grey processing time," *Applied Soft Computing*, vol. 70, pp. 513-524, 2018.
- [11] X. Kong, Y. Yao, W. Yang, Z. Yang, and J. Su, "Solving the flexible job shop scheduling problem using a discrete improved grey wolf optimization algorithm," *Machines*, vol. 10, no. 11, p. 1100, 2022.
- [12] L. Yin, X. Li, L. Gao, C. Lu, and Z. Zhang, "A novel mathematical model and multi-objective method for the low-carbon flexible job shop scheduling problem," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 13, pp. 15-30, 2017.
- [13] G. Zhang, L. Gao, and Y. Shi, "An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 3563-3573, 2011.
- [14] R. Zarrouk, I. E. Bennour, and A. Jemai, "A two-level particle swarm optimization algorithm for the flexible job shop scheduling problem," *Swarm Intelligence*, vol. 13, pp. 145-168, 2019.
- [15] B. Girish and N. Jawahar, "A particle swarm optimization algorithm for flexible job shop scheduling problem," in *2009 IEEE international conference on automation science and engineering*, 2009, pp. 298-303: IEEE.
- [16] L.-N. Xing, Y.-W. Chen, P. Wang, Q.-S. Zhao, and J. Xiong, "A knowledge-based ant colony optimization for flexible job shop scheduling problems," *Applied Soft Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 888-896, 2010.
- [17] K. C. W. Lim, L.-P. Wong, and J. F. Chin, "Simulated-annealing-based hyper-heuristic for flexible job-shop scheduling," *Engineering Optimization*, vol. 55, no. 10, pp. 1635-1651, 2023.
- [18] M. Saidi-Mehrabad and P. Fattahi, "Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms," *The international journal of Advanced Manufacturing technology*, vol. 32, pp. 563-570, 2007.
- [19] G. Zhang, J. Sun, X. Lu, and H. Zhang, "An improved memetic algorithm for the flexible job shop scheduling problem with transportation times," *Measurement and Control*, vol. 53, no. 7-8, pp. 1518-1528, 2020.
- [20] J. Xie, L. Gao, K. Peng, X. Li, and H. Li, "Review on flexible job shop scheduling," *IET collaborative intelligent manufacturing*, vol. 1, no. 3, pp. 67-77, 2019.
- [21] S. Wang, J. Li, H. Tang, and J. Wang, "CEA-FJSP: Carbon emission-aware flexible job-shop scheduling based on deep reinforcement learning," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, p. 1059451, 2022.