



PAPER – OPEN ACCESS

Penjadwalan Mesin dengan Algoritma Semut

Author : Supranata, dan Windy Wijayanti
DOI : 10.32734/ee.v6i1.1899
Electronic ISSN : 2654-7031
Print ISSN : 2654-7031

Volume 6 Issue 1 – 2023 TALENTA Conference Series: Energy and Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).
Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Penjadwalan Mesin dengan Algoritma Semut

(Machine Scheduling with Ant Algorithm)

Supranata, Windy Wijayanti

Magister Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
wusupranata@gmail.com, windywijayanti8@gmail.com

Abstrak

Penjadwalan mesin merupakan proses penting dalam industri manufaktur karena dapat memastikan produksi berjalan secara optimal dan mencegah terjadinya kelebihan produksi yang tidak diperlukan. Namun, menemukan solusi optimal untuk masalah penjadwalan mesin yang kompleks membutuhkan waktu dan sumber daya yang besar. Untuk mengatasi masalah ini, salah satu teknik optimisasi yang dapat digunakan adalah algoritma semut. Algoritma semut dirancang berdasarkan bagaimana koloni semut berperilaku dan telah terbukti efektif dalam menyelesaikan berbagai masalah optimasi, termasuk masalah penjadwalan mesin. Langkah algoritma semut terdiri dari penentuan *pheromone* awal, penentuan visibilitas, penentuan intensitas parameter *ant colony*, penentuan perhitungan probabilitas elemen kerja, dan melakukan updating *pheromone*. Berdasarkan hasil algoritma semut dapat memberikan performance baik untuk meminimasi terjadinya keterlambatan. *Makespan* terendah adalah algoritma semut untuk menjadi alternatif dalam mengatasi keterlambatan.

Kata Kunci: Penjadwalan Mesin; Algoritma Semut; Elemen Kerja; Urutan; Sumber Daya

Abstract

Machine scheduling is an important process in the manufacturing industry because it ensures optimal production and prevents unnecessary overproduction. However, finding the optimal solution to a complex machine scheduling problem requires a large amount of time and resources. To overcome this problem, one optimization technique that can be used is the ant algorithm. The ant algorithm is inspired from the behavior of ant colonies and has proven effective in solving various optimization problems, including machine scheduling problems. The steps of the ant algorithm consist of imitating the initial pheromone, provoking visibility, increasing the intensity of the ant colony parameter, describing a description of the working elements, and updating the pheromone. Based on the results of the ant algorithm can provide good performance to minimize delays. The lowest makespan is the ant algorithm to be an alternative in overcoming delays.

Keywords: Machine Scheduling; Ant Algorithm; Work Element; Sequence; Resources.

1. Pendahuluan

Penjadwalan merupakan suatu prosedur pengambilan keputusan yang secara rutin diterapkan di berbagai industri manufaktur dalam hal pengalokasian sumber daya untuk tugas-tugas selama periode waktu tertentu dengan tujuan untuk mencapai optimasi dari satu atau lebih tujuan tersebut [1].

Penjadwalan *flowshop* adalah suatu teknik penjadwalan produksi dimana sejumlah tugas atau operasi harus diselesaikan dalam urutan tertentu, menggunakan beberapa mesin secara berurutan. Dalam penjadwalan *flowshop*, setiap produk yang diproduksi harus melewati setiap mesin dalam urutan yang sama, tanpa adanya pengulangan

operasi pada mesin yang sama sebelum semua operasi diselesaikan pada mesin sebelumnya. Sebagai contoh, di industri manufaktur, pembuatan mobil dapat dijadikan sebagai contoh penjadwalan *flowshop*, di mana setiap tahapan produksi seperti pengelasan, perakitan bodi, dan pengecatan harus dilakukan secara berurutan pada mesin yang berbeda. Tujuan dari penjadwalan *flowshop* adalah untuk mencapai efisiensi produksi yang optimal, meminimalkan waktu tunggu dan biaya produksi, serta memaksimalkan penggunaan mesin dan sumber daya manusia yang tersedia. Penjadwalan *flowshop* dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti menggunakan algoritma genetika, algoritma semut, atau algoritma *greedy* untuk mencapai hasil yang terbaik [2].

Penjadwalan mesin seri adalah sebuah metode dalam penjadwalan mesin di mana mesin-mesin yang terlibat dalam proses produksi disusun secara berurutan atau saling terhubung. Dalam metode ini, setiap produk harus melewati mesin pertama terlebih dahulu sebelum diproses di mesin berikutnya, dan tidak ada operasi yang diulang di mesin yang sama sebelum semua operasi diselesaikan pada mesin sebelumnya [3].

Industri manufaktur sering menghadapi masalah penjadwalan mesin yang kompleks. Beberapa masalah yang sering terjadi meliputi beragam jenis mesin dengan kapasitas yang berbeda sehingga sulit menentukan alokasi mesin yang tepat untuk setiap produk yang akan diproduksi. Selain itu, ketidakpastian permintaan pasar membuat sulit untuk memperkirakan jumlah produk yang akan diproduksi dalam jangka waktu tertentu. [4]

Waktu persiapan mesin yang lama juga menjadi masalah karena sulit untuk mengoptimalkan penggunaan mesin dan menghindari waktu tunggu yang tidak perlu. Selain itu, ketatnya waktu pengiriman membuat sulit untuk menentukan jadwal produksi yang tepat agar produk dapat dikirim tepat waktu. Terakhir, ketidakpastian dalam ketersediaan bahan baku dan sumber daya manusia dapat mempengaruhi proses produksi secara signifikan. Semua masalah ini dapat mempengaruhi efisiensi produksi, biaya produksi, dan kualitas produk akhir. Oleh karena itu, menyelesaikan masalah penjadwalan mesin yang tepat dan efektif sangat penting bagi keberhasilan bisnis manufaktur. [5]

Dalam konteks manufaktur, tujuan penjadwalan mesin adalah untuk mencapai produksi yang optimal dan efisien. Penjadwalan mesin bertujuan untuk meminimalkan waktu tunggu, waktu pengiriman, dan biaya produksi, serta untuk memaksimalkan penggunaan mesin dan kapasitas produksi. Selain itu, penjadwalan mesin juga bertujuan untuk menghindari produksi berlebih yang tidak diperlukan dan memperhatikan agar bahan baku dan tenaga kerja yang diperlukan untuk operasional produksi tersedia dengan lancar. Dengan mencapai tujuan-tujuan ini, perusahaan dapat meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya produksi, dan meningkatkan kualitas produk akhir. [6]

Penjadwalan mesin merupakan proses penting dalam industri manufaktur karena dapat memastikan produksi berjalan secara optimal dan mencegah terjadinya kelebihan produksi yang tidak diperlukan. Namun, menemukan solusi optimal untuk masalah penjadwalan mesin yang kompleks membutuhkan waktu dan sumber daya yang besar. Untuk mengatasi masalah ini, salah satu teknik optimisasi yang dapat digunakan adalah algoritma semut. [7]

Algoritma semut dirancang berdasarkan bagaimana koloni semut berperilaku dan telah terbukti efektif dalam menyelesaikan berbagai masalah optimasi, termasuk masalah penjadwalan mesin. Ketika penjadwalan mesin tidak optimal, hal ini dapat menghasilkan biaya yang tinggi, menghambat efisiensi produksi, dan bahkan dapat mempengaruhi kualitas produk akhir. Oleh karena itu, penting untuk menemukan solusi penjadwalan mesin yang efektif dan efisien untuk meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya produksi [8].

Algoritma semut bertujuan untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan menemukan solusi terbaik dari berbagai kemungkinan solusi yang ada. Metode ini didasarkan pada strategi yang dipakai oleh semut ketika mencari jalur tercepat dari sarangnya menuju sumber makanan. Dalam proses optimasi, algoritma semut menghasilkan solusi optimal melalui proses iteratif dimana semut-semut palsu berjalan diatas graf atau jaringan yang merepresentasikan ruang solusi. Algoritma semut bekerja dengan mengatur *pheromone*, yaitu zat kimia yang digunakan semut untuk memberi tahu semut lain tentang jalur yang telah mereka lewati. Algoritma ini menggunakan *pheromone* untuk

menentukan jalur solusi yang lebih baik. Tujuan akhir algoritma semut adalah menemukan jalur solusi terbaik dari kemungkinan

yang ada, dan dapat diterapkan dalam berbagai konteks termasuk dalam bidang penjadwalan mesin dalam industri manufaktur [9]. Penerapan algoritma semut dalam penjadwalan mesin dapat membantu perusahaan untuk mencapai tujuan ini. Dengan demikian, penelitian lebih lanjut tentang penerapan algoritma semut dalam penjadwalan mesin menjadi penting untuk membantu industri manufaktur meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya produksi [10].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini masuk ke dalam kategori penelitian deskriptif, yang berarti penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan suatu permasalahan secara teratur, berdasarkan fakta, dan akurat sesuai dengan karakteristik yang ada [11]. Variabel penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Variabel Independen

Variabel independen merujuk kepada sebuah variabel yang digunakan sebagai penyebab atau faktor yang mempengaruhi variabel lain dalam suatu eksperimen atau penelitian. [12]

a. Permintaan produk pada periode bulanan. [13]

Permintaan produk pada periode bulanan adalah jumlah produk yang diminta oleh konsumen selama periode bulanan dalam satu tahun.

b. Kapasitas stasiun kerja. [14]

Kapasitas stasiun kerja adalah jumlah maksimum unit produk yang dapat diproses oleh stasiun kerja dalam satuan waktu tertentu.

c. Waktu proses pada masing-masing stasiun. [15]

Waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proses pada setiap stasiun.

2. Variabel Dependen

Variabel independen adalah variabel yang diperlakukan sebagai penyebab atau pengaruh pada variabel lain dalam suatu percobaan atau studi. [16]

a. Visibilitas tiap elemen kerja. [17]

Visibilitas dari setiap elemen kerja merujuk pada kemampuan untuk secara mudah dan jelas melihat dan mengawasi tahap atau proses produksi atau layanan pada setiap elemen.

b. Probabilitas kumulatif perjalanan semut. [18]

Probabilitas kumulatif perjalanan semut merujuk pada probabilitas total bahwa suatu semut akan memilih suatu jalur tertentu dalam proses pencarian solusi melalui penggunaan algoritma semut.

c. Stasiun kerja hasil *updating pheromone*. [19]

Stasiun kerja hasil *updating pheromone* mengacu pada stasiun kerja dalam proses produksi atau layanan yang telah mengalami perubahan nilai *pheromone* setelah proses *updating pheromone* dilakukan.

Data yang dipergunakan dalam penelitian terdiri dari data yang diperoleh langsung dari lapangan (data primer) dan data yang dikumpulkan dari sumber-sumber lain (data sekunder).

1. Data Primer

Data primer adalah data yang dikumpulkan atau diperoleh langsung dari sumber pertama, misalnya melalui pengamatan, wawancara, kuesioner, atau eksperimen. Data primer dalam studi ini adalah jumlah waktu yang dibutuhkan oleh suatu unit produksi untuk menyelesaikan produksi dari setiap tahapan dalam proses produksi tersebut. [20]

2. Data Sekunder

Data sekunder adalah informasi yang telah dikumpulkan dan diolah sebelumnya oleh pihak lain untuk suatu tujuan tertentu, dan dapat digunakan oleh orang lain untuk tujuan analisis dan penelitian lain. Data sekunder dalam penelitian ini adalah waktu operasi dan rencana produksi. [21]

Metode yang dipergunakan dalam riset ini adalah metode algoritma semut. Cara-cara untuk menjelaskan algoritma semut adalah sebagai berikut.

1. Penentuan *Pheromone* Awal. [22]

Algoritma semut adalah heuristik baik dalam menginisialisasi jejak *pheromone*. Tingkat *pheromone* awal, solusi awal diperoleh dari metode bobot posisi peringkat (RPWM). Langkah pertama perhitungan waktu elemen dalam *precedence diagram*. Semua bobot diberi peringkat dalam urutan besar sampai kecil. Oleh karena itu, level *pheromone* awal dihitung menggunakan RPWM sebagai berikut.

$$\tau_{ij} = \tau_0 = \frac{k}{L_{PW}}$$

2. Penentuan Visibilitas. [23]

Visibilitas dalam algoritma semut memberikan informasi heuristik. Informasi heuristik mengarahkan semut untuk menemukan jalan atau solusi. Bobot digunakan dalam membangun informasi heuristik.

$$\eta_{ij} = \frac{Pw_i}{\sum_{i=1}^M Pw_i}$$

$$Pw_i = T_i + \sum T_j$$

3. Penentuan Intensitas Parameter *Ant colony*. [1]

Ketetapan parameter algoritma semut dapat dilihat pada Tabel 1. Ketetapan parameter algoritma semut dianggap memberikan hasil terbaik bagi algoritma semut. Parameter pengendali visibilitas (β) dianggap memiliki hasil terbaik dari *range* 2-5 perlu dilakukan pengujian probabilitas paling optimal diantara *range* 2 sampai 5.

Tabel 1. Parameter Algoritma Semut

Parameter	Nilai
α	1
β	2-5
ρ	0,5

Sumber: Ginting, Rosnani. 2023. *Penjadwalan Mesin*. Medan: USU Press.

4. Penentuan Probabilitas Elemen Kerja. [1]

Perhitungan probabilitas semut dilakukan untuk mendapat probabilitas kumulatif. Rumus probabilitas pada setiap elemen kerja dapat dilihat dengan rumus berikut

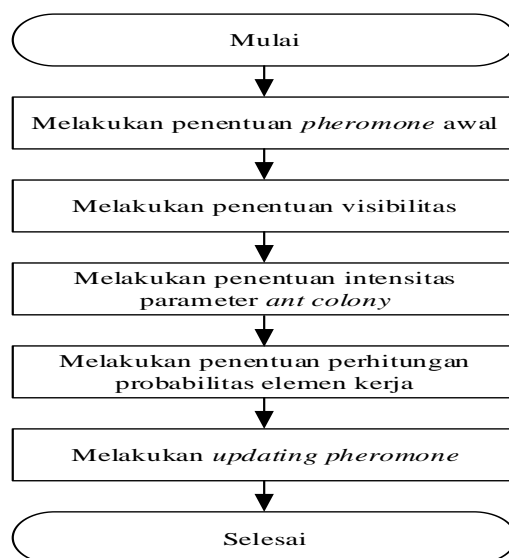
$$P_{ij}^k = \left\{ \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{c|j \in N} \tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta} \right\}$$

5. *Updating Pheromone*. [1]

Koloni semut yang melakukan perjalanan pasti akan meninggalkan jejak *pheromone* pada setiap jalan dilalui. *Pheromone* awal (τ_0) akan mengalami penguapan sebesar value $\rho = 0.5$ sebelum dilakukan penambahan *pheromone* pada setiap jalan dilalui. Solusi rumus penguapan *pheromone*, yaitu

$$\tau_{p8} = (1-\rho) \cdot \tau_0 + \tau_0 * \Delta T_5$$

Flowchart langkah penyelesaian dengan menggunakan algoritma semut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Langkah Penyelesaian dengan Algoritma Semut

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Data Elemen Kerja

Data elemen kerja dan waktu pada elemen kerja sebagai berikut.

Tabel 2. Data Elemen Kerja dan Waktu Elemen Kerja

Elemen Kerja	Waktu (detik)
1	30
2	30
3	10
4	10
5	10
6	10
7	10
8	10
9	10
10	30
11	10
12	30
13	10

Elemen Kerja	Waktu (detik)
14	10
15	10
16	30

3.2. Penentuan Pheromone Awal

Tingkat *pheromone* awal, solusi awal diperoleh dari metode bobot posisi peringkat (RPWM). Semua bobot diberi peringkat dalam urutan besar sampai kecil. Oleh karena itu, level *pheromone* awal dihitung menggunakan RPWM sebagai berikut.

$$\tau_{ij} = \tau_o = \frac{k}{L_{PW}}$$

$$= \frac{16}{260} = 0,061538462$$

3.3. Penentuan Visibilitas

Bobot digunakan dalam membangun informasi heuristik. Formulasi ini digunakan untuk perhitungan visibilitas pada elemen kerja pertama

$$Pw1 = T1 + \sum T2 = 30 + 30 = 60$$

$$\eta^1 = \frac{Pw1}{\sum_{i=1}^n Pw1} = \frac{60}{260} = 0,23076923$$

Rekapitulasi nilai visibilitas pada tiap elemen kerja sebagai berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi Nilai Visibilitas Tiap Elemen Kerja

Elemen Kerja	Visibilitas
1	0,23076923
2	0,15384615
3	0,07692308
4	0,07692308
5	0,07692308
6	0,07692308
7	0,07692308
8	0,07692308
9	0,15384615
10	0,15384615
11	0,15384615
12	0,15384615
13	0,07692308
14	0,07692308
15	0,15384615

Elemen Kerja	Visibilitas
16	0,11538462

3.4. Penentuan Intensitas Parameter Ant Colony

Pengujian parameter pengendali visibilitas dengan parameter α dan β sebesar 1 dan 2 pada elemen kerja 1 dapat digunakan rumus sebagai berikut

$$[\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}] =$$

$$0,061538462^1 \times 0,23076923^2 = 0,003277196$$

Perhitungan dilakukan untuk Visibilitas I, Visibilitas II, Visibilitas III, dan Visibilitas IV. Rekapitulasi dari pengujian parameter visibilitas dapat dilihat bahwa parameter α dan β sebesar 1 dan 2 memiliki nilai yang paling besar dari keempat pengujian. Rekapitulasi hasil pengujian sebagai berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Visibilitas

Pengendalian Visibilitas	Total
2	0,015748748
3	0,0024193831
4	0,0004095149
5	0,0000746818

3.5. Penentuan Probabilitas Elemen Kerja

Perhitungan probabilitas pada elemen kerja 1 sebagai berikut

$$P_{ij}^k = \left\{ \frac{0,061538462^1 \times 0,2307^2}{0,015748748} \right\} = 0,208092486$$

Rekapitulasi dari probabilitas tiap elemen kerja sebagai berikut.

Tabel 6. Rekapitulasi Probabilitas

Elemen Kerja	Hasil Probabilitas
1	0,208092486
2	0,092485549
3	0,023121387
4	0,023121387
5	0,023121387
6	0,023121387
7	0,023121387
8	0,023121387
9	0,092485549

Elemen Kerja	Hasil Probabilitas
10	0,092485549
11	0,092485549
12	0,092485549
13	0,023121387
14	0,023121387
15	0,092485549
16	0,052023121

Perhitungan probabilitas kumulatif untuk menyesuaikan hasil dari bilangan random agar memilih elemen kerja untuk dialokasikan.

$$\begin{aligned} \text{Probabilitas elemen kerja 2} &= \text{Hasil Probabilitas 1} + \text{Hasil probabilitas 2} \\ &= 0,208092486 + 0,092485549 = 0,300578035 \end{aligned}$$

Rekapitulasi probabilitas kumulatif sebagai berikut.

Tabel 7. Rekapitulasi Probabilitas Kumulatif

Elemen Kerja	Probabilitas Kumulatif
1	0,208092486
2	0,300578035
3	0,323699422
4	0,346820809
5	0,369942197
6	0,393063584
7	0,416184971
8	0,439306358
9	0,531791908
10	0,624277457
11	0,716763006
12	0,809248555
13	0,832369942
14	0,855491329
15	0,947976879
16	1

Pembangkitkan bilangan random bertujuan memilih elemen kerja akan dilalui oleh semut dengan menggunakan distribusi uniform dari interval (0,1). Bilangan random yang memiliki nilai terdekat pada elemen kerja 6. Hasil bilangan random sebagai berikut.

Tabel 8. Hasil Bilangan *Random*

Elemen Kerja	Bilangan Random
1	0,419976501
2	0,93267861
3	0,324475234
4	0,802789392
5	0,822556841
6	0,360870998
7	0,291971496
8	0,84142674
9	0,443354289
10	0,196663106
11	0,999624622
12	0,372692038
13	0,706472976
14	0,590227973
15	0,331542711
16	0,626071963

Perjalanan semut akan disesuaikan hasil bilangan random yang mendekati dengan hasil probabilitas kumulatif pada setiap elemen kerja. Perjalanan semut sebagai berikut.

Tabel 9. Perjalanan Semut

Elemen Kerja	Probabilitas Kumulatif
7	0,419976501
15	0,93267861
3	0,324475234
12	0,802789392
13	0,822556841
5	0,360870998
2	0,291971496
14	0,84142674
8	0,443354289
1	0,196663106
16	0,999624622
6	0,372692038
11	0,706472976
9	0,590227973
4	0,331542711
10	0,626071963

3.6. Updating Pheromone

Pheromone awal (τ_0) akan mengalami penguapan sebesar *value* $\rho = 0.5$ sebelum dilakukan penambahan *pheromone* pada setiap jalan dilalui. Rekapitulasi dari hasil perhitungan updating *pheromone* sebagai berikut.

Tabel 10. Hasil Rekapitulasi *Updating Pheromone*

Perjalanan	<i>Updating Pheromone</i>
1	0,326495726
2	0,696153846
3	2,692307692
4	2,692307692
5	2,692307692
6	2,692307692
7	2,692307692
8	2,692307692
9	0,696153846
10	0,696153846
11	0,696153846
12	0,696153846
13	2,692307692
14	2,692307692
15	0,696153846
16	1,213675214

Stasiun kerja *updating pheromone* dialokasikan elemen kerja ke 3. Pengalokasian dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Stasiun Kerja *Updating Pheromone*

Stasiun Kerja	Elemen Kerja	Mesin	Waktu Standar (detik)	Waktu <i>Setup</i> (detik)	Waktu Total (detik)
I	1	Mesin <i>Cutting</i>	30		35
	2	Mesin <i>Cutting</i>	30	5	30
	3	Mesin <i>Cutting</i>	10		10
II	4	Mesin Lens	10		15
	5	Mesin Lens	10	5	10
	6	Mesin Lens	10		10
	7	Mesin Lens	10		10
III	8	Mesin CNC	10		15
	9	Mesin CNC	10		10
	10	Mesin CNC	30	5	30
	11	Mesin CNC	10		10
	12	Mesin CNC	30		30
	13	Mesin CNC	10		10

Stasiun Kerja	Elemen Kerja	Mesin	Waktu Standar (detik)	Waktu <i>Setup</i> (detik)	Waktu Total (detik)
	14	Mesin CNC	10		10
	15	Mesin CNC	10		10
	16	Mesin CNC	30		30

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan penurunan *makespan* produk Senter LED dengan menggunakan metode algoritma semut menjadi 275 detik. Pengukuran kinerja perbandingan metode adalah sebagai berikut

$$EI = \frac{\text{Makespan SPT}}{\text{Makespan Algoritma Semut}} = \frac{385}{275} = 1,4$$

$EI > 1$ menunjukkan bahwa metode usukan dapat memberikan *performance* baik untuk meminimasi terjadinya keterlambatan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data berdasarkan algoritma semut didapatkan stasiun kerja *updating pheromone* dialokasikan ke elemen kerja 3 dengan tiga stasiun kerja. Metode algoritma semut dapat memberikan *performance* baik untuk meminimasi terjadinya keterlambatan. *Makespan* terendah adalah algoritma semut untuk menjadi alternatif dalam mengatasi keterlambatan

Referensi

- [1] R. Ginting, *Penjadwalan Mesin*. Medan, 2023.
- [2] G. M. Komaki, S. Sheikh, and B. Malakooti, "Flow shop scheduling problems with assembly operations: a review and new trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, no. 10, 2019.
- [3] M. Fajardo-Pruna, L. López-Estrada, H. Pérez, E. Diez, and A. Vizán, "Analysis of a single-edge micro cutting process in a hybrid parallel-serial machine tool," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 151, 2019.
- [4] I. Kucukkoc, "MILP models to minimise *makespan* in additive manufacturing machine scheduling problems," *Comput. Oper. Res.*, vol. 105, 2019.
- [5] G. Bektur and T. Saraç, "A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server," *Comput. Oper. Res.*, vol. 103, 2019.
- [6] X. Wu and A. Che, "A memetic differential evolution algorithm for energy-efficient parallel machine scheduling," *Omega (United Kingdom)*, vol. 82, 2019.
- [7] K. Chen, T. C. E. Cheng, H. Huang, M. Ji, and D. Yao, "Single-machine scheduling with autonomous and induced learning to minimize total weighted number of tardy jobs," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 309, 2023.
- [8] William and Rosnani Ginting, "Penjadwalan Produksi dengan Algoritma Semut," *Talent. Conf. Ser. Energy Eng.*, vol. 2, no. 3, 2019.
- [9] S. Rubaiee and M. B. Yildirim, "An energy-aware multiobjective *ant colony* algorithm to minimize total completion time and energy cost on a single-machine preemptive scheduling," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, 2019.
- [10] A. A. Qamhan, A. Ahmed, I. M. Al-Harkan, A. Badwelan, A. M. Al-Samhan, and L. Hidri, "An Exact Method and *Ant colony* Optimization for Single Machine Scheduling Problem with Time Window Periodic Maintenance," *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [11] S. Sinulingga, *Metode Penelitian*. Medan: USU Press, 2021.
- [12] Sugiyono, *Metode Penelitian*. Bandung: Alfabeta, 2018.
- [13] C. Faller, S. Podjawerschek, A. Co, M. Dannehl, M. P. Heimbach, and S. Ibrahima Nadiaye, "Demand Response Model for Optimized Use of Renewable Energies in Production," *TH Wildau Eng. Nat. Sci. Proc.*, vol. 1, 2021.
- [14] S. Permana, M. Andriani, and D. Dewiyana, "Production Capacity Requirements Planning Using The Capacity Method Requirement Planning," *Int. J. Eng. Sci. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 4, 2021.
- [15] K. Ding, F. T. S. Chan, X. Zhang, G. Zhou, and F. Zhang, "Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, no. 20, 2019.
- [16] A. Fauzi and dkk, *Metodologi Penelitian*. 2022.
- [17] A. S. Bin Shahadat, M. A. H. Akhand, and M. A. S. Kamal, "Visibility Adaptation in *Ant colony* Optimization for Solving Traveling Salesman Problem," *Mathematics*, vol. 10, no. 14, 2022.

- [18] X. Xie, Z. Tang, and J. Cai, "The multi-objective inspection path-planning in radioactive environment based on an improved *ant colony* optimization algorithm," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 144, 2022.
- [19] H. Zhao, C. Zhang, X. Zheng, C. Zhang, and B. Zhang, "A decomposition-based many-objective *ant colony* optimization algorithm with adaptive solution construction and selection approaches," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 68, 2022.
- [20] I. Paprocka, D. Krenczyk, and A. Burduk, "The method of production scheduling with uncertainties using the ants colony optimisation," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [21] M. Ghaleb, H. Zolfagharinia, and S. Taghipour, "Real-time production scheduling in the Industry-4.0 context: Addressing uncertainties in job arrivals and machine breakdowns," *Comput. Oper. Res.*, vol. 123, 2020.
- [22] R. Ginting and A. Lumongga Nst, "Optimizing Production Line Using the Rank Positional Weight (RPW) Method at PT. X," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1003, no. 1, 2020.
- [23] Asril Habib Panjaitan and Rosnani Ginting, "Usulan Penjadwalan Produksi Dengan Algoritma *Ant colony* (Studi Kasus PT. KLM Medan)," *Talent. Conf. Ser. Energy Eng.*, vol. 2, no. 3, 2019.