



Perancangan rute pergerakan *material handling crane* pada operasional gudang barang jadi menggunakan *ant colony optimization*

Yusraini Muharni^{a,b,*}, Lely Herlina^{a,b}, Bobby Kurniawan^{a,b}, M. Adha Ilhami^{a,b}, Kulsum^{a,b}, Evi Febiantia^{a,b}, Ade Irman^{a,b}, Hartono^c

^a Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

^b Mechatronics and System Modelling Laboratory, Center of Excellence, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

^c Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

ARTICLE INFO

Keywords:

Operasional gudang
Minimasi biaya *material handling*
Ant colony optimization
Metaheuristic

ABSTRACT

Gudang barang jadi merupakan area transit produk, tempat di mana produk yang telah selesai diproduksi menunggu penarikan dari pelanggan. Penarikan produk dari gudang yang tidak pasti dapat berakibat pada produk ditarik pada waktu yang bersamaan sehingga menimbulkan antrian dan waktu penanganan yang lebih lama. Di samping itu, rute pergerakan *material handling* menjadi tidak efisien, karena terlalu sering melalui rute bolak-balik yang seharusnya tidak perlu. Pada penelitian ini digunakan metode *ant colony optimization* untuk merancang rute pergerakan *material handling* yang efektif dan efisien untuk meminimasi biaya pemindahan *material handling*. Biaya pemindahan *material handling* terkecil dicapai pada seting parameter $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$, dan $\rho = 0.5$.

1. Pendahuluan

Perancangan tata letak gudang memiliki fungsi untuk memaksimalkan utilisasi ruang yang ada untuk menyimpan produk dengan baik. Perancangan tata letak gudang yang baik mendapatkan keuntungan diantaranya mempermudah proses penyimpanan dan pengeluaran produk, meminimalisir kerusakan produk, mempermudah proses pencarian produk [1], [2]. Terdapat beberapa aktivitas penting yang berlangsung digudang antara lain penarikan atau penjemputan order, penyimpanan, pembelian, proses distribusi, pengiriman dan pengantaran [3], [4], [5]. Di antara aktivitas-aktivitas tersebut, penarikan adalah aktivitas kunci yang dapat memunculkan biaya operasional lebih tinggi [6].

Penelitian ini dilakukan pada PT X (nama disamarkan) yang merupakan perusahaan manufaktur yang memproduksi komponen jembatan berbahan baku baja. PT X sendiri berlokasi di daerah Cilegon dan telah beroperasi sejak tahun 2005. Saat ini produk dan jasa yang dilakukan adalah stokis besi dan baja, fabrikasi struktur baja, konstruksi jembatan, dan alat berat. PT X mampu melaksanakan dengan profesional proyek-proyek yang berskala besar dan kompleks, dengan didukung oleh pengalaman, *resources*, dan keterampilan yang dimiliki perusahaan. PT X melayani proyek ke seluruh Indonesia, seperti jembatan ataupun pipa gas. Jika ditinjau dari karakter produksi PT X, maka dapat dikategorikan ke dalam *hybrid* MTO/MTS (*make to order/make to order*). Karakter MTO adalah ketika berproduksi berdasarkan pesanan yang masuk dalam catatan pembelian (*make to order*) sehingga muncul tuntutan untuk siap memenuhi pesanan customer yang bervariasi jenis dan dimensinya. Adapun karakter MTS dilakukan untuk menjaga keberlangsungan produksi, perusahaan juga berproduksi ketika tidak ada pesanan yang harus dikerjakan. Seperti yang

sudah disebutkan sebelumnya perusahaan ini membuat produk jembatan dan pipa gas. Pesanan yang bervariasi tersebut membuat perusahaan membutuhkan tempat penyimpanan barang yang besar, baik untuk penyimpanan material ataupun barang jadi. PT X mempunyai area fabrikasi sebesar 5000 meter persegi dan gudang barang jadi dengan luas 3000 meter persegi. Area gudang yang dimilikinya adalah area gudang terbuka dengan karakter produk yang memiliki dimensi sangat besar dan memerlukan alat berat untuk mempermudah proses penyimpanan dan perpindahan produk.

Dalam proses perpindahan dari *fabrication area* ke *storage area* menggunakan *forklift*. Penyimpanan yang tidak tersusun sesuai jenis dan penempatannya menjadi kendala yang harus diselesaikan karena memiliki peran penting untuk memudahkan pemindahan dan penyimpanan produk pada gudang. Selain itu proses penarikan produk jadi oleh pelanggan mengandung ketidakpastian dalam hal waktu. Sering kali permintaan penarikan produk datang pada waktu yang bersamaan dan berakibat pada lamanya waktu penanganan produk, juga arah pergerakan *material handling* yang tidak efisien. Penanganan material yang tidak direncanakan dengan baik dapat menyebabkan pergerakan alat material handling melalui lintasan bolak-balik dan bisa dikategorikan ke dalam pemborosan transportasi, selain menambah jarak perpindahan, waktu dan ongkos material handling juga meningkat [7], [8], [9]. Studi dalam upaya minimasi biaya operasional gudang telah banyak dilakukan oleh para peneliti, antara lain dengan pendekatan metode metaheuristik dalam operasional gudang untuk meminimasi jarak, waktu maupun biaya [10], [11], [12].

Penyelesaian persoalan rute terpendek atau *short path* dengan metode *ant colony optimization* telah banyak dilakukan oleh para peneliti dan mempunyai keunggulan dimana waktu komputasi yang lebih cepat [13], [14], [15]. Selain itu, metode

* Corresponding author.

Email: bundamia1974@gmail.com

Received: 15 Maret 2022; Revision: 11 April 2022;

Accepted: 15 April 2022; Available online: 16 April 2022

<http://dx.doi.org/10.36055/jiss.v7i2.14468>



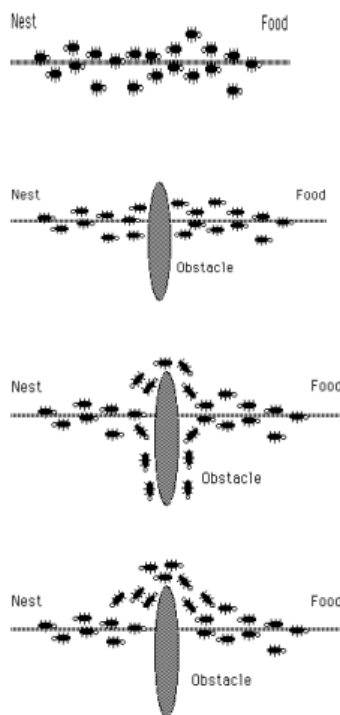
ant colony optimization juga mampu menghasilkan hasil yang kompetitif dibandingkan dengan metode lain [16], [17], [18].

Berdasarkan masalah yang telah dijabarkan di atas maka perlu merancang rute pergerakan material handling yaitu crane, agak dapat meminimasi waktu penanganan produk jadi. Dalam penelitian ini, akan diterapkan metode ant colony optimization, dengan tujuan memperoleh rute pergerakan crane yang efisien. Penerapan metode ant colony optimization sebagai salah satu pendekatan metaheuristik dalam memecahkan persoalan optimasi tata letak fasilitas telah banyak dipublikasikan [18], [19], [20], [21]. Metaheuristik lain yang umum digunakan adalah particle swarm optimisation [22], [23]; algoritma genetik [24], [25]; bee colont algorithm [26]; dan variable neighborhood search [27].

Penelitian ini berkontribusi bagi perusahaan dalam meminimumkan biaya pemindahan crane. Dari sisi keilmuan, penelitian ini mengkaji implementasi ant colony optimization dalam memecahkan masalah pemindahan material menggunakan crane, yang sedikit sekali dikaji oleh peneliti lain.

2. Metode dan material

Ant colony optimization (ACO) termasuk kedalam kelompok swarm intelegence, yang merupakan salah satu jenis pengembangan paradigma yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dimana inspirasi yang digunakan untuk memecahkan masalah tersebut berasal dari perilaku kumpulan atau (swarm) serangga [28]. Seperti cara hidup yang diterapkan oleh semut, algoritma ini meniru cara hidup semut bagaimana tiap semut mencari makanan ke tempat sumber yang berbeda dan menentukan jalur atau rute terpendek dengan sarang nya untuk membawa makanan dengan meninggalkan pheromone sebagai tanda jejak untuk semut lain. Pheromone merupakan zat kimia yang khusus yang hanya dapat di kenali oleh mahluk hidup yang sejenis. Oleh sebab itu pheromone tidak hanya untuk tanda sebagai jejak pulang semut namun juga sebagai cara atau alat komunikasi semut dengan sesama semut atau koloni nya.



Gambar 1. Proses semut menemukan sumber makanan [29]

Pheromone yang ditinggalkan sebagai tanda jejak menjadi sebuah sinyal untuk semut lain sehingga jalur terpendek akan meninggalkan pheromone yang sangat pekat dan akan dilalui oleh banyak semut. Hal ini terjadi karena pheromone yang dilalui oleh banyak semut akan lebih lama menguap begitupun sebaliknya. Setelah inialisasi setiap semut untuk pengisian elemen pertama tabu list serta elemen tersebut berisikan indeks kota tertentu. Maka aturan transisi status dilakukan sebagai langkah penyusunan rute kunjungan setiap semut ke setiap kota. Menurut [30], aturan transisi status random proportional rule dapat dinyatakan sebagai persamaan (1).

$$P_{rs}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{rs}]^\alpha \cdot [\eta_{rs}]^\beta}{\sum_{u \in J_r^k} [\tau_{rs}]^\alpha \cdot [\eta_{rs}]^\beta}, & \text{untuk } s \in J_r^k \\ 0, & \text{untuk lainnya} \end{cases} \quad (1)$$

di mana τ_{rs} adalah jumlah pheromone yang terdapat pada edge antara titik r dan titik s , $\eta_{rs} = \frac{1}{d_{rs}}$ adalah visibility (invers jarak d_{rs}), dan d_{rs} adalah jarak titik r ke titik s . Parameter pada ant colony optimization adalah α (parameter yang mengontrol bobot (weight) relatif dari pheromone, β (parameter pengendali jarak), dan J_r^k adalah himpunan titik yang akan dikunjungi semut k yang berada pada titik r .

Semut yang sudah menyebar pada tiap kota akan melakukan perjalanan dari kota pertama masing-masing semut sebagai kota asal dan kota lainnya sebagai kota tujuan. Lalu pada kota kedua masing-masing, semut tersebut akan melanjutkan pada kota selanjutnya namun memilih kota yang tidak terdapat pada tabu sebagai kota selanjutnya. Begitu seterusnya sampai semua kota telah dikunjungi atau telah kembali pada kota asal. Oleh sebab itu dengan persamaan (1) diatas maka kita dapat memilih edge yang pendek nemun memiliki jumlah pheromone yang besar untuk menentukan kota tujuan. Setelah setiap semut secara keseluruhan telah menyelesaikan tugas nya maka pheromone diperbaharui. Aturan pembaruan pheromone global dapat dilihat pada persamaan (2).

$$\tau_{rs} \leftarrow \begin{cases} 1 - \rho \tau_{rs} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{rs}^k & \\ \frac{1}{C^k} & \text{jika } r, s \text{ tour yang dilakukan oleh semut} \end{cases} \quad (2)$$

di mana C^k adalah panjang tour yang dilalui oleh semut k , ρ adalah parameter tingkat evaporasi pheromone ($0 < \rho \leq 1$), dan m adalah jumlah semut.

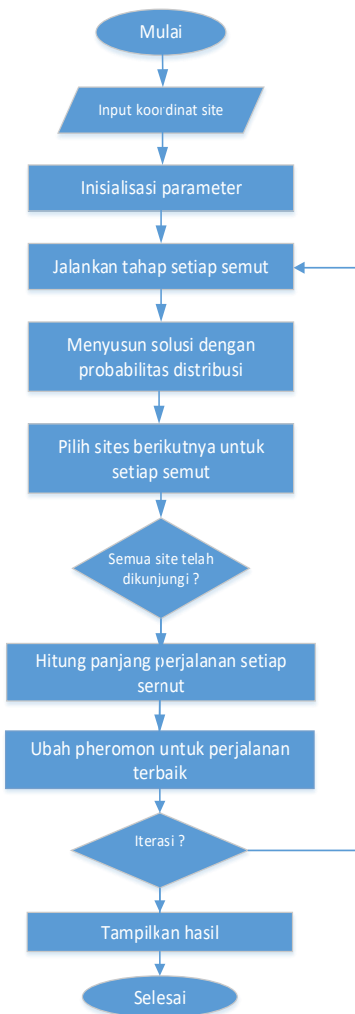
Parameter ρ menjadi parameter tingkat penguapan dimana penurunan jumlah pheromone pada tahap ekplorasi memberikan kemungkinan lintasan atau rute yang berbeda. Hal ini pun dapat memberikan kesempatan pembatasan kemungkinan terpilihnya lintasan yang kurang tepat. Oleh sebab itu masing-masing semut diberikan daftar tabu yang dapat menyimpan titik-titik yang telah dilalui oleh semut sehingga semut tak dapat mengunjungi kembali titik-titik tersebut sebelum menyelesaikan tour. Ketika sebuah tur selesai maka tabu list pun dapat digunakan untuk menghitung solusi yang ditemukan semut pada tour tersebut. Penerapan ACO akan dibedakan pada tiga setting parameter yang tersaji pada Tabel 1, dengan tujuan mencari hasil yang paling optimum.

Tabel 1. Setting parameter pada metode ACO

Parameter	Setting		
	1	2	3
α	1.0	0.9	0.5
β	1.0	0.9	0.5
ρ	0.5	0.9	0.9

Tabel 2.
Data operasional material handling gantry crane

Data Operasional	Nilai
Operator (orang)	2
Gaji Operator (Rp/bulan)	4,246,081
Harga (Rp/Unit)	279.235.200
Persentase Depresiasi	6,25%
Biaya Listrik (Rp/kWh)	1.175
Biaya Maintenance (Rp/bulan)	2.000.000
Pemakaian Listrik (kWh/hari)	80
Tahun Dibeli	2019
Umur Ekonomis (tahun)	10



Gambar 2. Flowchart ACO

Diagram alur atau *flowchart* algoritma *ant colony optimization* yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 2. *Pseudocode* dari ACO ditampilkan pada Lampiran.

3. Hasil dan pembahasan

Agar dapat menghitung biaya operasional dari pergerakan material handling, perlu diidentifikasi komponen biaya yang terlibat. Uraian biaya operasional dari material handling untuk tempat penyimpanan yang digunakan pada PT X ditampilkan pada Tabel 2. Data operasional akan digunakan untuk menghitung biaya material handling pada gudang barang jadi untuk pelayanan pengiriman produk. Sebanyak 27 item produk yang dilayani untuk dikirimkan kepada pelanggan.

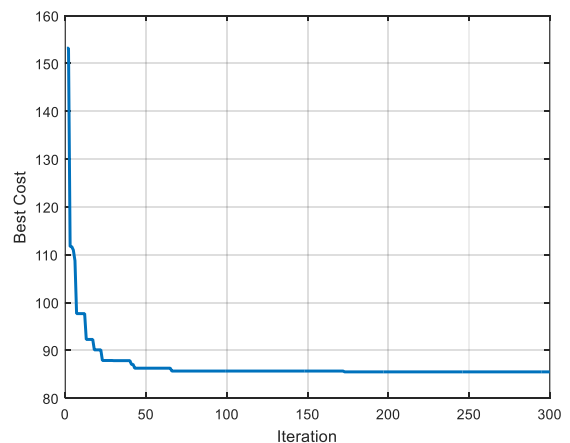
Tabel 3.
Data pengiriman

No	Komponen	Rata-rata Pengiriman (Kg)	Rata-rata Pengiriman (Unit)
1	Top Bracing	4588.155	33
2	Cross Grider	17441.06	13
3	End Portal	1116.06	2
4	Diagonal Chord	27980.64	48
5	Pipe Railing	1426.08	48
6	Top Chord	19426.33	22
7	Stringer	14250.6	84
8	Bottom Chord	16938.72	24
9	Expantion Joint	359.2	8
10	Plate Top	7261.44	48
11	Buhul Bawah	3965	26
12	Spilce Flange	4444	400
13	Plate Deck	6987.6	360
14	Bearing Post	1037	4
15	Pipe Drain	105.36	24
16	Lateral Stop	149.72	2
17	Plate	114.84	4
18	Filler Plate	120	96
19	Expaintion Trotoa	21.52	4
20	Cover	576.8	8
21	Splice Web	2048.76	84
22	Anchor Bearing	36.28	4
23	Plate Bracing	716.22	46
24	Cleat Stringer	1655.64	504
25	Clamp Railing	48.96	96
26	Socket Pipe	38.28	44
27	End Cup	9.36	8

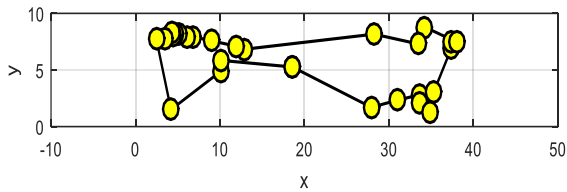
Dengan menetapkan proses iterasi selama 300 kali, metode ACO dengan seting parameter yang berbeda menunjukkan hasil yang juga berbeda. Dari Tabel 4, dapat dicermati bahwa tingkat konvergensi dari berbagai seting juga berbeda. Pada setting 1, konvergensi baru dimulai pada iterasi ke 173 namun rute ini memberikan nilai *cost* yang paling rendah.

Tabel 4.
Hasil terbaik

Parameter	Setting		
	1	2	3
Best cost	1.0	0.9	0.5
Converge (iteration)	1.0	0.9	0.5
Total iteration	0.5	0.9	0.9



Gambar 3. Hasil yang optimum dicapai saat grafik menunjukkan konvergensi



Gambar 4. Rute pergerakan crane dengan ACO

4. Kesimpulan

Perancangan rute pergerakan *crane* dengan meminimasi biaya *material handling* pada penelitian ini dilakukan dengan metode *ant colony optimization*. Biaya yang paling rendah diperoleh menggunakan seting parameter $\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$, dan $\rho = 0.5$. Penelitian selanjutnya adalah membandingkan ACO dengan metode-metode lain.

Acknowledgement

Penulis mengucapkan terima kasih kepada saudara Yogi Noviansyah dan PT. Sentra Utama Mandiri Cilegon untuk penyediaan data penelitian ini.

References

- [1] S. S. Heragu, *Facilities design*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [2] R. S. Liggett, "Automated facilities layout: past, present and future," *Automation in Construction*, vol. 9, no. 2, pp. 197–215, Mar. 2000, doi: [10.1016/S0926-5805\(99\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00005-9).
- [3] N. T. Putri and L. S. Dona, "Application of lean manufacturing concept for redesigning facilities layout in Indonesian home-food industry: A case study," *The TQM Journal*, vol. 31, no. 5, pp. 815–830, Jan. 2019, doi: [10.1108/TQM-02-2019-0033](https://doi.org/10.1108/TQM-02-2019-0033).
- [4] A. R. S. Amaral, "A parallel ordering problem in facilities layout," *Computers & Operations Research*, vol. 40, no. 12, pp. 2930–2939, Dec. 2013, doi: [10.1016/j.cor.2013.07.003](https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.003).
- [5] H. Hosseini-Nasab, S. Fereidouni, S. M. T. Fatemi Ghomi, and M. B. Fakhrazad, "Classification of facility layout problems: a review study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, no. 1, pp. 957–977, Jan. 2018, doi: [10.1007/s00170-017-0895-8](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8).
- [6] C.-Y. Cheng, Y.-Y. Chen, T.-L. Chen, and J. Jung-Woon Yoo, "Using a hybrid approach based on the particle swarm optimization and ant colony optimization to solve a joint order batching and picker routing problem," *International Journal of Production Economics*, vol. 170, pp. 805–814, Dec. 2015, doi: [10.1016/j.ijpe.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.021).
- [7] R. De Santis, R. Montanari, G. Vignali, and E. Bottani, "An adapted ant colony optimization algorithm for the minimization of the travel distance of pickers in manual warehouses," *European Journal of Operational Research*, vol. 267, no. 1, pp. 120–137, May 2018, doi: [10.1016/j.ejor.2017.11.017](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.017).
- [8] E. Ardjmand, I. Ghalekhondabi, W. A. Young II, A. Sadeghi, G. R. Weckman, and H. Shakeri, "A hybrid artificial neural network, genetic algorithm and column generation heuristic for minimizing makespan in manual order picking operations," *Expert Systems with Applications*, vol. 159, p. 113566, Nov. 2020, doi: [10.1016/j.eswa.2020.113566](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113566).
- [9] A. Gupta and S. Srivastava, "Comparative Analysis of Ant Colony and Particle Swarm Optimization Algorithms for Distance Optimization," *Procedia Computer Science*, vol. 173, pp. 245–253, Jan. 2020, doi: [10.1016/j.procs.2020.06.029](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.029).
- [10] E. Bottani, G. Casella, and T. Murino, "A hybrid metaheuristic routing algorithm for low-level picker-to-part systems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 160, p. 107540, Oct. 2021, doi: [10.1016/j.cie.2021.107540](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107540).
- [11] M. Neroni, "Ant colony optimization with warm-up," *Algorithms*, vol. 14, no. 10, p. 295, Oct. 2021, doi: [10.3390/a14100295](https://doi.org/10.3390/a14100295).
- [12] A. Aboelfotoh, M. Singh, and G. Suer, "Order batching optimization for warehouses with cluster-picking," *Procedia Manufacturing*, vol. 39, pp. 1464–1473, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.promfg.2020.01.302](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.302).
- [13] F. Chen, H. Wang, C. Qi, and Y. Xie, "An ant colony optimization routing algorithm for two order pickers with congestion consideration," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 77–85, Sep. 2013, doi: [10.1016/j.cie.2013.06.013](https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.06.013).
- [14] A. R. McKendall and J. Shang, "Hybrid ant systems for the dynamic facility layout problem," *Computers & Operations Research*, vol. 33, no. 3, pp. 790–803, Mar. 2006, doi: [10.1016/j.cor.2004.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.08.008).
- [15] D. Di Caprio, A. Ebrahimnejad, H. Alrezaamiri, and F. J. Santos-Arteaga, "A novel ant colony algorithm for solving shortest path problems with fuzzy arc weights," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 5, pp. 3403–3415, May 2022, doi: [10.1016/j.aej.2021.08.058](https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.058).
- [16] C.-T. Yen and M.-F. Cheng, "A study of fuzzy control with ant colony algorithm used in mobile robot for shortest path planning and obstacle avoidance," *Microsystem Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 125–135, Jan. 2018, doi: [10.1007/s00542-016-3192-9](https://doi.org/10.1007/s00542-016-3192-9).
- [17] A. Lissovoi and C. Witt, "Runtime analysis of ant colony optimization on dynamic shortest path problems," *Theoretical Computer Science*, vol. 561, pp. 73–85, Jan. 2015, doi: [10.1016/j.tcs.2014.06.035](https://doi.org/10.1016/j.tcs.2014.06.035).
- [18] F. Chen, H. Wang, Y. Xie, and C. Qi, "An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, no. 2, pp. 389–408, Apr. 2016, doi: [10.1007/s10845-014-0871-1](https://doi.org/10.1007/s10845-014-0871-1).
- [19] V. Risqiyanti, H. Yasin, and R. Santoso, "Pencarian jalur terpendek menggunakan metode algoritma "ant colony optimization" pada GUI MATLAB (Studi kasus: PT Distriversa Buana Mas cabang Purwokerto)," *Jurnal Gaussian*, vol. 8, no. 2, pp. 272–284, May. 2019. doi: [10.14710/j.gauss.v8i2.26671](https://doi.org/10.14710/j.gauss.v8i2.26671).
- [20] J.-A. Sicilia, B. Royo, E. Larrodé, and A. Fraile, "A Decision Support System for a Long-distance Routing Problem based on the Ant Colony Optimization Metaheuristic," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 1035–1044, Feb. 2014, doi: [10.1016/j.sbspro.2014.01.138](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.138).
- [21] Y.-C. Ho and J.-W. Lin, "Improving order-picking performance by converting a sequential zone-picking line into a zone-picking network," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 113, pp. 241–255, Nov. 2017, doi: [10.1016/j.cie.2017.09.014](https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.014).
- [22] Y. Muharni, Kulsum, and M. Khoirunnisa, "Warehouse layout designing of slab using dedicated storage and particle swarm optimization," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 532, no. 1, p. 12003, May 2019, doi: [10.1088/1757-899X/532/1/012003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/532/1/012003).
- [23] Y. Muharni, A. I. S. M, and Y. Noviansyah, "Perancangan tata letak gudang barang jadi menggunakan kebijakan class-based storage dan particle swarm optimization di PT XYZ," *JURNAL TEKNIK INDUSTRI*, vol. 10, no. 3, pp. 200–209, Nov. 2020, doi: [10.25105/jti.v10i3.8405](https://doi.org/10.25105/jti.v10i3.8405).
- [24] J. C.-H. Pan, P.-H. Shih, M.-H. Wu, and J.-H. Lin, "A storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 81, pp. 1–13, Mar. 2015, doi: [10.1016/j.cie.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.010).
- [25] A. H. Azadnia, S. Taheri, P. Ghadimi, M. Z. Mat Saman, and K. Y. Wong, "Order Batching in warehouses by minimizing total tardiness: A hybrid approach of weighted association rule mining and genetic algorithms," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, p. e246578, Jun. 2013, doi: [10.1155/2013/246578](https://doi.org/10.1155/2013/246578).
- [26] P.-Y. Yin and Y.-L. Chuang, "Adaptive memory artificial bee colony algorithm for green vehicle routing with cross-docking," *Applied*

- Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 21, pp. 9302–9315, Nov. 2016, doi: [10.1016/j.apm.2016.06.013](https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.013).
- [27] O. Polat, C. B. Kalayci, O. Kulak, and H.-O. Günther, "A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery with time limit," *European Journal of Operational Research*, vol. 242, no. 2, pp. 369–382, Apr. 2015, doi: [10.1016/j.ejor.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.010).
- [28] O. Polat, C. B. Kalayci, O. Kulak, and H.-O. Günther, "A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery with time limit," *European Journal of Operational Research*, vol. 242, no. 2, pp. 369–382, Apr. 2015, doi: [10.1016/j.ejor.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.010).
- [29] M. Dorigo and K. Socha, *An Introduction to Ant Colony Optimization*. 2 ed., new York: Chapman and Hall/CRC: 2018.
- [30] T. Liao, T. Stützle, M. A. Montes de Oca, and M. Dorigo, "A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 234, no. 3, pp. 597–609, May 2014, doi: [10.1016/j.ejor.2013.10.024](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.024).

Lampiran

```

Algoritma ACO untuk rute pergerakan crane

Output : Rute Terbaik, Jarak Total, Biaya omh
Penentuan Parameter Awal
Input  : Jumlah Semut, Jumlah spot, Matriks jarak
antar spot, Iterasi Maksimum, alpha, beta,
koefisien evaporasi
Inisialisasi
Generating Visibility Matrix
  eta = 1./matriks jarak antar spot
Generating Pheromone Matrix
  tau = tau0*ones(Jumlah spot, Jumlah spot)
Perhitungan Probabilitas
for i=1:Jumlah iterasi maksimum
Semua semut mulai dari spot 1
for k = 1:Jumlah semut
  for l = 2:Jumlah spot
    i = ant(k).Tour(end);
    P = tau(i; :).^alpha.*eta(i; :).^beta
    P = P/sum(P)
Membangkitkan bilangan random
Gunakan Aturan roulette wheel selection untuk
memilih spot selanjutnya
  C = cumsum(P)
  j = find(r<= C, 1, 'first')
Menghitung jarak total hasil rute semua semut
tour = [tour tour(1)]
L = 0
for i = 1 : jumlah spot
  L = L+model.D(tour(i),tour(i+1))
end
end
end
Updating pheromone
for k = 1:Jumlah semut
  for l = i:Jumlah spot
    i = tour(l)
    j = tour(l+1)
    tau(i, j) = tau(i, j)+Q/ant(k).Cost
  end
end
Untuk pheromone yang tidak dilalui semut
tau = (1-rho)*tau
Mendapatkan rute terbaik
if ant(k).Cost<BestSol.Cost
  BestSol = ant(k);
end

```

Pseudocode ACO