



Pemecahan *Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (ACVRPTW)* dengan Algoritma *Sequential Insertion (SI)* dan *Ant Colony Optimization (ACO)*

Reynaldi Arifin¹, David Try Liputra²

^{1,2} Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Industri, Universitas Kristen Maranatha
Jl. Prof. drg. Surya Sumantri, M.P.H. No. 65, Bandung 40164
Email: david.tl@eng.maranatha.edu²

Abstract

One of the main aspects that determines the successful of managing a supply chain system or supply chain management (SCM) is transportation planning. The problem of determining vehicle routes or commonly known as the vehicle routing problem (VRP) is one of the important studies in transportation planning at the operational level. Determining the right vehicle routes can increase the effectiveness and efficiency of a transportation system and related supply chain systems. This research focuses on the asymmetric capacitated vehicle routing problem with time windows (ACVRPTW), which is a vehicle routing problem that takes into account vehicle capacity, asymmetric return distances between customers, and delivery time constraints. A mathematical model is formulated based on the research objective to be achieved, i.e. minimizing the total shipping costs consisting of travel costs, overtime delivery costs, late delivery compensation costs, and re-delivery costs. Two alternative solution algorithms are developed, namely sequential insertion (SI) and ant colony optimization (ACO). A numerical example is provided to present the results of research on a clothing convection industry, where the ACO algorithm is proven to be able to produce better solutions than the SI algorithm.

Keywords: *vehicle routing problem, shipping cost, sequential insertion, ant colony optimization*

Abstrak

Salah satu aspek utama yang menentukan keberhasilan pengelolaan suatu sistem rantai pasokan atau *supply chain management (SCM)* adalah perencanaan transportasi. Permasalahan tentang penentuan rute kendaraan atau yang biasa dikenal dengan *vehicle routing problem (VRP)* merupakan salah satu kajian penting dalam perencanaan transportasi pada tingkat operasional. Penentuan rute kendaraan yang tepat dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi dari sebuah sistem transportasi maupun sistem rantai pasokan yang terkait. Penelitian ini berfokus pada *asymmetric capacitated vehicle routing problem with time windows (ACVRPTW)*, yaitu masalah rute kendaraan yang mempertimbangkan kapasitas kendaraan, jarak bolak-balik antar pelanggan yang tidak simetris, dan batasan waktu pengiriman. Sebuah model matematis dirumuskan dengan berbasis pada tujuan penelitian yang ingin dicapai, yaitu meminimumkan total biaya pengiriman yang terdiri dari biaya perjalanan, biaya lembur pengiriman, biaya kompensasi keterlambatan pengiriman, dan biaya pengiriman kembali. Terdapat dua alternatif algoritma solusi yang dikembangkan, yaitu *sequential insertion (SI)* dan *ant colony optimization (ACO)*. Sebuah contoh numerik diberikan untuk menunjukkan hasil penelitian pada sebuah industri konveksi pakaian, dimana algoritma ACO terbukti mampu menghasilkan solusi yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma SI.

Kata kunci: *masalah rute kendaraan, biaya pengiriman, sequential insertion, ant colony optimization*

Pendahuluan

Menurut Marinakis & Migdalas (2002), terdapat empat keputusan utama dalam *supply*

chain management (SCM), yaitu terkait: (1) lokasi, (2) produksi, (3) persediaan, dan (4) transportasi-distribusi. Area keputusan yang

terakhir seringkali menjadi elemen paling signifikan dalam biaya logistik untuk sebagian besar perusahaan. *The Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) mendefinisikan manajemen logistik sebagai “bagian dari SCM yang merencanakan, mengimplementasikan, dan mengendalikan aliran maju dan aliran balik serta penyimpanan yang efisien dan efektif dari barang, layanan, dan informasi terkait antara titik asal dan titik konsumsi dalam rangka untuk memenuhi kebutuhan pelanggan” (CSCMP, 2023).

Kemampuan dari rantai pasokan dalam mengirimkan suatu produk kepada pelanggan pada waktu yang tepat, jumlah yang tepat, dan kondisi yang tepat akan menentukan apakah produk tersebut akan dapat bersaing di pasar atau tidak (Pujawan & Mahendrawathi, 2010). Oleh karena itu, terlihat bahwa perencanaan transportasi merupakan salah satu aspek penting yang menentukan efektivitas dan efisiensi SCM (Liputra et al., 2015).

Level perencanaan transportasi dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok, yaitu: (1) level strategis, (2) level taktis, dan (3) level operasional, yang masing-masing melibatkan keputusan yang berdampak jangka panjang, jangka menengah, dan jangka pendek (Simchi-Levi et al., 2009). Penelitian ini berfokus pada masalah terkait penentuan rute kendaraan atau *vehicle routing problem* (VRP) sebagai salah satu masalah operasional utama dalam perencanaan transportasi.

Penelitian terdahulu yang membahas tentang berbagai varian VRP dan algoritma solusinya sudah banyak dilakukan, seperti dapat dilihat pada Cordeau et al. (2007), Kumar & Panneerselvam (2012), dan Archetti & Speranza (2014). Penelitian ini membahas tentang salah satu varian VRP, yaitu *the asymmetric capacitated vehicle routing problem with time windows* (ACVRPTW), yaitu masalah rute kendaraan dengan pertimbangan kapasitas kendaraan, jarak bolak-balik antar pelanggan yang tidak simetris, dan batasan waktu pengiriman.

Beberapa penelitian terkait sebelumnya, antara lain: Herrero et al. (2014), Leggieri & Haouari (2016), dan Togatorop et al. (2022) tentang ACVRP serta Li et al. (2019) tentang AVRPTW dengan multi-depot, atau dikenal dengan AMDVRPTW. Selain itu, Ilin et al. (2018) membahas mengenai pemecahan

ACVRPTW dengan total jarak pengiriman yang minimum menggunakan CPLEX solver.

Penelitian ini membahas tentang masalah penentuan rute pengiriman di sebuah industri konveksi pakaian. Pada kondisi aktual, pengiriman produk dilakukan menggunakan kendaraan yang homogen kapasitasnya dengan batasan waktu jam kerja (reguler maupun lembur), dimana terdapat jarak bolak-balik antar pelanggan yang tidak simetris. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan model ACVRPTW untuk memecahkan masalah tersebut dengan berbasis pada tujuan untuk meminimumkan total biaya pengiriman.

Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah sistematis sebagai berikut:

(1) penelitian pendahuluan, (2) peninjauan pustaka, (3) perumusan model matematis, (4) pengembangan metode/algoritma solusi, (5) pengumpulan data, (6) pengolahan data dan analisis, dan (7) penarikan kesimpulan.

Secara garis besar, formulasi model ACVRPTW yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada notasi matematis di Tabel 1. Fungsi tujuannya adalah meminimumkan total biaya pengiriman, yang terdiri dari biaya perjalanan, biaya lembur pengiriman, biaya kompensasi keterlambatan pengiriman, dan biaya pengiriman kembali.

Algoritma solusi yang diusulkan pada penelitian ini ada dua, yaitu: (1) *sequential insertion* (SI), sebuah algoritma heuristik yang dimodifikasi dari Liputra et al. (2016) dan (2) *ant colony optimization* (ACO), sebuah algoritma metaheuristik yang dimodifikasi dari Santosa & Ai (2017). Hal ini bertujuan untuk menguji keefektifan pencarian solusi optimal dari metode metaheuristik jika dibandingkan dengan metode heuristik dalam pemecahan ACVRPTW yang tergolong dalam masalah *combinatorial optimization*. Modifikasi yang dilakukan terkait dengan pelibatan batasan-batasan yang sesuai dengan formulasi model ACVRPTW yang harus dipertimbangkan dalam prosedur algoritma yang digunakan.

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan teknik observasi dan wawancara dengan pihak perusahaan. Hasil pengolahan data untuk kondisi aktual dan usulan lalu dibandingkan untuk memperoleh kesimpulan penelitian.

Tabel 1. Notasi model matematis ACVRPTW

Indeks	
i	Indeks untuk <i>node</i> awal, $i = \{0, 1, 2, \dots, I\}$
j	Indeks untuk <i>node</i> tujuan, $j = \{0, 1, 2, \dots, J\}$
k	Indeks untuk <i>node</i> pengiriman kembali, $k = \{1, 2, \dots, K\}$
v	Indeks untuk kendaraan, $v = \{1, 2, \dots, V\}$
r	Indeks untuk rute, $r = \{1, 2, \dots, R\}$
Parameter	
f	Kebutuhan bahan bakar kendaraan per kilometer
c^f	Biaya bahan bakar per liter
d_{ijvr}	Jarak dari pelanggan i ke pelanggan j untuk kendaraan v pada rute r
c^o	Biaya lembur per menit
t^n	<i>Time window</i> reguler
t^h	Waktu istirahat kendaraan
t_{ijvr}^d	Waktu perjalanan dari pelanggan i ke pelanggan j untuk kendaraan v pada rute r
t_{ivr}^s	Waktu pelayanan di pelanggan i untuk kendaraan v pada rute r
p	Harga produk per unit
b	Persentase kompensasi
q_{ivr}^l	Jumlah permintaan produk yang terlambat di pelanggan i untuk kendaraan v pada rute r
d_{jkvr}	Jarak dari pelanggan j ke pelanggan k untuk kendaraan v pada rute r
d_{kivr}	Jarak dari pelanggan k ke pelanggan i untuk kendaraan v pada rute r
q_{ivr}	Jumlah permintaan produk pelanggan i untuk kendaraan v pada rute r
q^c	Kapasitas kendaraan
t^e	<i>Time window</i> pelanggan
t^o	<i>Time window</i> lembur
Variabel	
C_{vr}	Total biaya pengiriman untuk kendaraan v pada rute r
C_{vr}^d	Total biaya perjalanan untuk kendaraan v pada rute r
C_{vr}^o	Total biaya lembur pengiriman untuk kendaraan v pada rute r
C_{vr}^b	Total biaya kompensasi keterlambatan pengiriman untuk kendaraan v pada rute r
C_{vr}^l	Total biaya pengiriman kembali untuk kendaraan v pada rute r
D_{vr}	Total jarak untuk kendaraan v pada rute r
T_{vr}^o	Total waktu lembur untuk kendaraan v pada rute r
T_{vr}^w	Total waktu pengiriman untuk kendaraan v pada rute r hingga kembali ke gudang
T_{vr}^d	Total waktu perjalanan untuk kendaraan v pada rute r
T_{vr}^s	Total waktu pelayanan untuk kendaraan v pada rute r
Q_{vr}^l	Total permintaan pelanggan yang terlambat untuk kendaraan v pada rute r
D_{vr}^l	Total jarak pengiriman kembali untuk kendaraan v pada rute r
T_{vr}^e	Total waktu perjalanan untuk kendaraan v pada rute r hingga pelanggan terakhir
Variabel keputusan	
X_{vr}	$= 1$, jika kendaraan v ditugaskan pada rute r $= 0$, jika tidak (lainnya)

Hasil dan Pembahasan

Persamaan-persamaan matematis yang diformulasikan untuk membentuk model ACVRPTW yang dikaji pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Total biaya perjalanan:

$$C_{vr}^d = D_{vr} \cdot f \cdot c^f \quad \text{Pers. 1}$$

dimana:

$$D_{vr} = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J d_{ijvr} ; \forall v \in V, \forall r \in R \quad \text{Pers. 2}$$

Total biaya lembur pengiriman:

$$C_{vr}^o = T_{vr}^o \cdot c^o \quad \text{Pers. 3}$$

dimana:

$$T_{vr}^o = T_{vr}^w - t^n \quad \text{Pers. 4}$$

$$T_{vr}^o = \begin{cases} 0, & \text{if } (T_{vr}^w - t^n) \leq 0 \\ T_{vr}^o, & \text{if } (T_{vr}^w - t^n) > 0 \end{cases} \quad \text{Pers. 5}$$

$$T_{vr}^w = T_{vr}^d + T_{vr}^s + t^h \quad \text{Pers. 6}$$

$$T_{vr}^d = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J t_{ijvr}^d ; \forall v \in V, \forall r \in R \quad \text{Pers. 7}$$

$$T_{vr}^s = \sum_{i=0}^I t_{iv}^s ; \forall v \in V, \forall r \in R \quad \text{Pers. 8}$$

Total biaya kompensasi keterlambatan pengiriman:

$$C_{vr}^b = Q_{vr}^l \cdot p \cdot b \quad \text{Pers. 9}$$

dimana:

$$Q_{vr}^l = \sum_{i=0}^I q_{iv}^l ; \forall v \in V, \forall r \in R \quad \text{Pers. 10}$$

Total biaya pengiriman kembali:

$$C_{vr}^l = D_{vr}^l \cdot f \cdot c^f \quad \text{Pers. 11}$$

dimana:

$$D_{vr}^l = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^K (d_{ijvr} + d_{jkvr} - d_{kivv}) ; \forall v \in V, \forall r \in R \quad \text{Pers. 12}$$

sehingga:

Total biaya pengiriman:

$$C_{vr} = C_{vr}^d + C_{vr}^o + C_{vr}^b + C_{vr}^l \quad \text{Pers. 13}$$

Pers. 1 hingga Pers. 8 mengacu pada model matematis dalam penelitian Liputra et al. (2016). Pers. 9 hingga Pers. 13 dirumuskan pada penelitian ini sesuai dengan karakteristik kondisi aktual pada perusahaan yang diteliti. Pers. 9 adalah biaya kompensasi yang harus dikeluarkan jika pengiriman terlambat (melebihi *time window* pelanggan) tetapi pelanggan masih mau menerima produknya. Pers. 11 merupakan biaya perjalanan (dimana jarak yang ditempuh dihitung dengan Pers. 12) yang harus dikeluarkan akibat pengiriman terlambat dan pelanggan sudah tidak dapat menerima produknya sehingga harus dikirimkan kembali keesokan harinya.

Model ACVRPTW

Fungsi tujuan:

$$\text{Min } TC = \sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R C_{vr} \cdot X_{vr} \quad \text{Pers. 14}$$

Fungsi pembatas:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R q_{iv}^R \cdot X_{vr} \leq q^c ; \forall v \in V \quad \text{Pers. 15}$$

$$\sum_{r=1}^R X_{vr} = 1 ; \forall v \in V \quad \text{Pers. 16}$$

$$\sum_{v=1}^V X_{vr} = 1 ; \forall r \in R \quad \text{Pers. 17}$$

$$\sum_{r=1}^R T_{vr}^e \leq t^e ; \forall v \in V \quad \text{Pers. 18}$$

$$\sum_{r=1}^R T_{vr}^w \leq t^o ; \forall v \in V \quad \text{Pers. 19}$$

$$X_{vr} = \{0, 1\} \quad \text{Pers. 20}$$

Pers. 14 hingga Pers. 20 (kecuali Pers. 18) mengacu pada penelitian Liputra et al. (2016).

Pers. 15 adalah pembatas untuk jumlah permintaan produk yang dikirimkan agar tidak melebihi kapasitas kendaraan. Pers. 16 menjamin bahwa setiap kendaraan hanya melayani satu rute, sedangkan Pers. 17 menjamin bahwa setiap rute hanya dilayani oleh satu kendaraan. Pers. 18 dirumuskan pada penelitian ini untuk memastikan bahwa kendaraan sampai di pelanggan terakhir tidak melebihi *time window* pelanggan. Pers. 19 memastikan bahwa kendaraan kembali ke gudang tidak melebihi *time window* lembur. Pers. 20 merupakan pembatas biner untuk variabel keputusan.

Algoritma SI

Prosedur algoritma SI yang dikembangkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat rute awal, $r = 1$.
2. Memilih pelanggan pertama (lainnya) yang memiliki jarak terdekat dari gudang (pelanggan yang terakhir disisipkan).
3. Menghitung total permintaan pelanggan dan total waktu pengiriman.
4. Memeriksa apakah kelayakan kapasitas kendaraan, *time window* pelanggan, dan *time window* lembur terpenuhi? Jika ya, sisipkan pelanggan tersebut ke dalam rute yang sedang dibentuk dan lanjut ke Langkah 5. Jika tidak, buat rute baru, $r = r + 1$ lalu kembali ke Langkah 2.
5. Memeriksa apakah semua pelanggan sudah disisipkan ke dalam suatu rute? Jika ya, lanjut ke Langkah 6. Jika tidak, kembali ke Langkah 2.
6. Memeriksa apakah selisih waktu pengiriman antar kendaraan \leq selisih waktu yang diinginkan (t^e)? Jika ya, iterasi berhenti. Jika tidak, pindahkan pelanggan terakhir (berikutnya) dari rute dengan waktu pengiriman terlama ke dalam rute dengan waktu pengiriman tersingkat dan lanjut ke Langkah 7.
7. Menghitung total permintaan pelanggan, total waktu pengiriman, dan total biaya pengiriman.
8. Memeriksa apakah kelayakan kapasitas kendaraan, *time window* pelanggan, dan *time window* lembur terpenuhi? Jika ya, kembali ke Langkah 6. Jika tidak, batalkan pemindahan pelanggan tersebut dan iterasi berhenti.

Algoritma ACO

Berikut adalah prosedur algoritma ACO yang dikembangkan pada penelitian ini:

1. Menentukan jumlah semut (a_{max}), jumlah feromon (τ_{ij}), tingkat penguapan feromon (ρ), derajat kepentingan feromon (α), dan derajat kepentingan visibilitas (β).
2. Menghitung nilai visibilitas (η_{ij}).
3. Membuat siklus atau iterasi awal, $c = 1$.
4. Menugaskan semut pertama, $a = 1$.
5. Membuat rute awal, $r = 1$.
6. Menentukan titik awal semut, yaitu gudang.
7. Menghitung probabilitas ketertarikan semut (p_{ij}) untuk setiap pelanggan.
8. Membangkitkan bilangan *random*[0,1].
9. Memilih pelanggan yang memiliki nilai kumulatif p_{ij} lebih besar dan paling mendekati bilangan *random* tersebut.
10. Menghitung total permintaan pelanggan dan total waktu pengiriman.
11. Memeriksa apakah kelayakan kapasitas kendaraan, *time window* pelanggan, dan *time window* lembur terpenuhi? Jika ya, lanjut ke Langkah 13. Jika tidak, lanjut ke Langkah 12.
12. Memeriksa apakah masih ada pelanggan lain yang dapat terpilih? Jika ya, kembali ke Langkah 8. Jika tidak, buat rute baru, $r = r + 1$ lalu kembali ke Langkah 6.
13. Memeriksa apakah semua pelanggan telah dilewati? Jika ya, hitung total jarak perjalanan semut dan lanjut ke Langkah 14. Jika tidak, kembali ke Langkah 7.
14. Memeriksa apakah seluruh semut telah ditugaskan? Jika ya, lanjut ke Langkah 15. Jika tidak, tugaskan semut baru, $a = a + 1$ lalu kembali ke Langkah 5.
15. Menghitung perubahan jumlah feromon ($\Delta \tau_{ij}^{(a)}$).
16. Memeriksa apakah siklus maksimum (c_{max}) sudah tercapai atau pembentukan rute sudah konvergen? Jika ya, lanjut ke Langkah 17. Jika tidak, perbarui jumlah feromon pada setiap ruas jalan yang dilewati oleh semut dan buat siklus baru, $c = c + 1$ lalu kembali ke Langkah 4.
17. Memeriksa apakah selisih waktu pengiriman antar kendaraan $\leq t^e$? Jika ya, iterasi berhenti. Jika tidak, pindahkan pelanggan terakhir (berikutnya) dari rute dengan waktu pengiriman terlama ke dalam rute dengan waktu pengiriman tersingkat dan lanjut ke Langkah 18.

18. Menghitung total permintaan pelanggan, total waktu pengiriman, dan total biaya pengiriman.

19. Memeriksa apakah kelayakan kapasitas kendaraan, *time window* pelanggan, dan *time window* lembur terpenuhi? Jika ya, kembali ke Langkah 17. Jika tidak, batalkan pemindahan pelanggan tersebut dan iterasi berhenti.

Contoh Numerik

Pada sistem nyata yang diteliti, yaitu sebuah industri konveksi pakaian, terdapat 16 pelanggan yang harus dilayani setiap harinya dengan dua buah kendaraan berkapasitas 2.000 unit. Selisih waktu pengiriman antar kendaraan yang diinginkan adalah ± 30 menit. *Time window* perusahaan adalah 480 menit (reguler) dan 540 menit (lembur), sedangkan *time window* pelanggan adalah 510 menit. Waktu istirahat kendaraan adalah 30 menit.

Rute pengiriman pada kondisi aktual, yaitu:

- (1) Gudang – K – J – L – H – A – G – F – B – D – C – E – I – Gudang, dan
- (2) Gudang – O – M – N – P – Gudang.

Rute pengiriman usulan dengan algoritma SI adalah sebagai berikut:

- (1) Gudang – I – E – D – C – F – A – G – H – B – L – K – J – Gudang, dan
- (2) Gudang – N – P – O – M – Gudang.

Rute pengiriman usulan dengan algoritma ACO menggunakan parameter $a_{max} = 5$, $\tau_{ij} = 1$, $\rho = 0,5$; $\alpha = 1$, dan $\beta = 2$. Hasil pembentukan rutenya menggunakan program *Visual Studio Community* 2018 dengan waktu komputasi selama 40 detik adalah sebagai berikut:

- (1) Gudang – I – E – H – C – D – B – F – G – A – K – L – J – Gudang, dan
- (2) Gudang – N – P – O – M – Gudang.

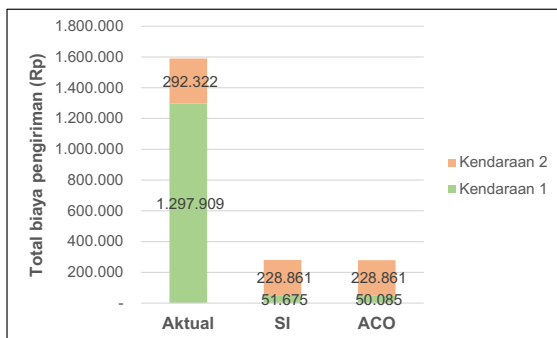
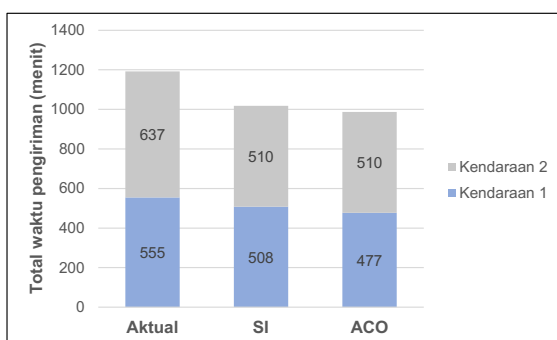
Perbandingan total waktu pengiriman (dalam menit) dan total biaya pengiriman (dalam Rupiah) dari rute aktual dengan rute usulan dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat diketahui bahwa pada rute aktual masih muncul biaya lembur pengiriman sebesar Rp9.000 untuk kendaraan 1 dan Rp25.400 untuk kendaraan 2 (karena melanggar *time window* reguler) serta biaya kompensasi keterlambatan pengiriman untuk kendaraan 1 sebesar Rp1.218.750 dan biaya pengiriman kembali untuk kendaraan 2 sebesar Rp10.236 (karena melanggar *time window* pelanggan).

Tabel 2. Perbandingan kinerja rute aktual dengan rute usulan algoritma SI dan ACO

Rute		T_{vr}^d	T_{vr}^s	T_{vr}^w	C_{vr}^d	C_{vr}^o	C_{vr}^b	C_{vr}^j	TC
Aktual	1	385	140	555	70.159	9.000	1.218.750	0	1.297.909
	2	551	56	637	256.686	25.400	0	10.236	292.322
			Total	1.192				Total	1.590.231
SI	1	338	140	508	51.675	0	0	0	51.675
	2	424	56	510	228.861	0	0	0	228.861
			Total	1.018				Total	280.536
ACO	1	307	140	477	50.085	0	0	0	50.085
	2	424	56	510	228.861	0	0	0	228.861
			Total	987				Total	278.946

Pada rute usulan, baik hasil algoritma SI maupun ACO, ketiga jenis biaya tersebut dapat dihilangkan karena tidak ada *time window* (reguler, lembur, dan/atau pelanggan) yang dilanggar. Rute aktual menghasilkan total biaya pengiriman sebesar Rp1.590.231, sedangkan rute usulan SI dan ACO masing-masing mampu menurunkannya sebesar 82,36% dan 82,46%, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Perbandingan total biaya pengiriman rute aktual dengan rute usulan**Gambar 2.** Perbandingan total waktu pengiriman rute aktual dengan rute usulan

Selain itu, dapat diketahui pula bahwa total waktu pengiriman untuk kendaraan 1 dan kendaraan 2 pada rute aktual adalah sebesar 555 menit dan 637 menit. Total waktu pengiriman pada rute usulan SI dan ACO masing-masing adalah sebesar 508 menit dan 477 menit untuk kendaraan 1, serta sama-

sama sebesar 510 menit untuk kendaraan 2. Hal ini menunjukkan bahwa rute usulan SI dan ACO berturut-turut mampu mempercepat waktu pengiriman sebesar 8,47% dan 14,05% untuk kendaraan 1 serta sama-sama sebesar 19,94% untuk kendaraan 2, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.

Jika dilihat dari keseimbangan waktu pengiriman antar kendaraan, maka rute usulan SI adalah yang terbaik dengan selisih sebesar 2 menit antara kendaraan 1 dan kendaraan 2. Namun, rute usulan ACO adalah yang terbaik dari segi total biaya pengiriman, yaitu sebesar Rp278.946 maupun dari segi total waktu pengiriman untuk setiap kendaraan.

Kesimpulan

Penelitian ini membahas pengembangan dua algoritma untuk pemecahan masalah rute kendaraan atau *vehicle routing problem* (VRP). Varian VRP yang diteliti adalah *the asymmetric capacitated vehicle routing problem with time windows* (ACVRPTW), dimana sebuah industri konveksi pakaian dijadikan sebagai objek kajian. Algoritma solusi yang dikembangkan adalah *sequential insertion* (SI) yang bersifat heuristik dan *ant colony optimization* (ACO) yang tergolong dalam metaheuristik.

Dari hasil yang diperoleh, dapat diketahui bahwa algoritma ACO menghasilkan rute kendaraan yang lebih optimal dari segi total biaya pengiriman, yang menjadi tujuan utama penelitian ini. Namun, algoritma SI dapat juga dijadikan sebagai alternatif jika diinginkan pula keseimbangan waktu antar kendaraan yang lebih baik. Untuk selanjutnya, penelitian ini masih dapat dikembangkan lagi ke arah perbandingan antara algoritma ACO yang dikembangkan pada penelitian ini dengan algoritma metaheuristik lainnya, seperti *genetic algorithm* (GA), *simulated annealing* (SA), *tabu search* (TS), dan lain sebagainya dalam

pencarian solusi yang lebih baik lagi untuk pemecahan ACVRPTW.

Daftar Pustaka

- Archetti, C., & Speranza, M. G. (2014). A survey on matheuristics for routing problems. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2(4), 223–246.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., & Vigo, D. (2007). Vehicle Routing. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science: Transportation* (1st ed., Vol. 14, pp. 195–224). Amsterdam: North-Holland.
- CSCMP. (2023, February 6). *Supply Chain Management Definitions and Glossary*. https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx.
- Herrero, R., Rodriguez, A., Cruz, J. C., & Juan, A. A. (2014). Solving vehicle routing problems with asymmetric costs and heterogeneous fleets. *International Journal of Advanced Operations Management*, 6(1), 58–80.
- Ilin, V., Matijevic, L., Davidovic, T., & Pardalos, P. M. (2018). Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Window. *Proceedings of XLV Symposium on Operational Research*, 174–179.
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, 4(3), 66–74.
- Leggieri, V., & Haouari, M. (2016). A matheuristic for the asymmetric capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 234, 139–150.
- Li, J., Li, T., Yu, Y., Zhang, Z., Pardalos, P. M., Zhang, Y., & Ma, Y. (2019). Discrete firefly algorithm with compound neighborhoods for asymmetric multi-depot vehicle routing problem in the maintenance of farm machinery. *Applied Soft Computing*, 81.
- Liputra, D. T., Anna, I. D., & Kartika, W. (2015). Multi-vendor-Single-buyer Transportation Model with Heterogeneous Vehicles for Perishable Product. *Proceedings of the 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems*, 1542–1546.
- Liputra, D. T., Suhandi, V., & Ramdani, R. (2016). Balancing Vehicle Utilization on Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Simulated Annealing Algorithm. *Proceedings of the 7th International Conference on Operations and Supply Chain Management*, 344–351.
- Marinakis, Y., & Migdalas, A. (2002). Heuristic Solutions of Vehicle Routing Problems in Supply Chain Management. In P. M. Pardalos, A. Migdalas, & R. E. Burkard (Eds.), *Combinatorial and Global Optimization* (Vol. 14, pp. 205–236). Singapore: World Scientific.
- Pujawan, I. N., & Mahendrawathi, E. (2010). *Supply Chain Management* (2nd ed.). Surabaya: Guna Widya.
- Santosa, B., & Ai, T. J. (2017). *Pengantar Metaheuristik: Implementasi dengan Matlab* (1st ed.). Surabaya: ITS Tekno Sains.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2009). *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Togatorop, R. E., Puspita, F. M., Yuliza, E., Dewi, N. R., & Octarina, S. (2022). Penerapan Algoritma Tabu Search pada Model ACVRP untuk Menentukan Rute Pengangkutan Sampah yang Optimal di Kecamatan Kalidoni. *Teorema: Teori Dan Riset Matematika*, 7(2), 303–310.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Kristen Maranatha yang telah memberikan dukungan terhadap pelaksanaan kegiatan penelitian ini.

This page is intentionally left blank.