

# PENERAPAN ALGORITMA *ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM* (AIS) DENGAN MODIFIKASI *ROUTE CONSTRUCTION*

## *IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM (AIS) ALGORITHM WITH MODIFICATION OF ROUTE CONSTRUCTION*

Oleh: Siti Eka Dewi Retno Sartika, Eminugroho Ratna Sari  
Program Studi Matematika, Jurusan Pendidikan Matematika, FMIPA UNY  
[dewiekkal@gmail.com](mailto:dewiekkal@gmail.com)

### Abstrak

*Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)* merupakan gabungan dari bentuk umum *capacitated vehicle routing problem (CVRP)* dengan *vehicle routing problem with time windows (VRPTW)*. Masalah CVRPTW yang dibahas adalah menentukan rute pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di PT. Wina Wira Usaha Jaya dengan batasan kapasitas dan waktu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelesaikan masalah CVRPTW pada Algoritma *Artificial Immune System* dengan modifikasi *Route Construction*. Algoritma AIS diselesaikan dengan dua tahap yaitu tahap *route construction-route minimization* dan tahap *local search*. Diperoleh hasil bahwa berdasarkan perbandingan total jarak tempuh dan total waktu tempuh, pemilihan titik yang paling jauh dengan total jarak tempuh 184,75 km dan waktu tempuh 807 menit lebih baik dari pemilihan titik yang paling dekat dengan total jarak tempuh 192,15 km dan waktu tempuh 814 menit, sedangkan berdasarkan tingkat keefektifitasan kapasitas tabung yang tersedia pemilihan titik yang paling dekat lebih baik dari pemilihan titik yang paling jauh.

Kata kunci: CVRPTW, Algoritma *Artificial Immune System (AIS)*, Bright Gas 5,5 Kg

### Abstract

*Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)* is a combination between *capacitated vehicle routing problem (CVRP)* and *vehicle routing problem with time windows (VRPTW)*. In this study, we determine distribution route of Bright Gas 5.5 Kg at PT. Wina Wira Usaha Jaya subject to the capacity and time limitation. The purpose of this research is to solve the CVRPTW problem using Algorithm *Artificial Immune System (AIS)* with modification of *Route Construction*. The AIS algorithm is completed in two stages: the *route construction-route minimization* and the *local search*. The results obtained that based on the comparison of total mileage and total travel time, the selection of the most distance point with a total distance of 184.75 km and travel time 807 minutes better than the selection of closest distance point to total mileage 192.15 km and travel time 814 minutes, while based on the degree of effectiveness of the available tube capacity the closest point selection is better than the farthest point selection.

Keywords: CVRPTW, *Artificial Immune System (AIS) Algorithm*, Bright Gas 5,5 Kg

## PENDAHULUAN

Pendistribusian barang merupakan salah satu kegiatan yang sering dilakukan oleh suatu perusahaan tertentu. Aspek yang diperhatikan dalam pendistribusian barang adalah bagaimana cara mendistribusikan barang ke sejumlah pelanggan dengan tujuan mengoptimalkan jarak dan waktu tempuh, sehingga dapat meminimumkan total biaya pendistribusian barang. Oleh karena itu, masalah yang harus dilakukan oleh perusahaan adalah pemilihan rute

distribusi yang benar-benar optimal, salah satu contohnya adalah pendistribusian tabung LPG (*Liquid Petroleum Gas*).

Program konversi minyak tanah ke LPG merupakan program pemerintah yang mulai diluncurkan pada tahun 2007 lalu, bertujuan untuk mengurangi subsidi BBM dengan mengalihkan pemakaian minyak tanah ke LPG. Seiring perubahan tersebut, pemerintah mulai membatasi pemakaian produk LPG 3 Kg yang merupakan produk PSO (subsidi). Hal ini

dilakukan karena pemasaran LPG 3 Kg yang seharusnya digunakan oleh masyarakat menengah ke bawah, justru digunakan semua kalangan. Pertamina akhirnya mengeluarkan varian LPG yang diperuntukkan bagi kalangan menengah ke atas yang telah resmi diluncurkan pada akhir tahun 2015. Wilayah DIY telah meluncurkan dan mulai memasarkan produk baru Pertamina yang dikenal dengan nama Bright Gas 5,5 Kg. Bright Gas 5,5 Kg merupakan varian kemasan baru yang melengkapi Bright Gas kemasan 12 Kg yang termasuk kedalam produk Non PSO (tidak subsidi). Agen distributor LPG Non PSO di DIY salah satunya adalah PT. Wina Wira Usaha Jaya.

Penyelesaian untuk masalah rute perjalanan sering dikenal dengan *Vehicle Routing Problem* (VRP). *Vehicle Routing Problem* (VRP) adalah masalah penentuan rute kendaraan untuk pendistribusian barang dari tempat produksi yang dinamakan depot ke pelanggan dengan tujuan untuk meminimumkan total jarak yang ditempuh kendaraan (Toth & Vigo, 2002). VRP memiliki beberapa variasi, antara lain yaitu *capacitated vehicle routing problem* (CVRP), dimana setiap kendaraan mempunyai kapasitas yang terbatas, adanya selang waktu tertentu bagi pelanggan untuk menerima pelayanan maka masalah tersebut menjadi VRP *with time windows* (VRPTW) (Toth dan Vigo, 2002). Beberapa penelitian penyelesaian permasalahan CVRP dan VRPTW secara heuristik ataupun metaheuristik telah dilakukan, antara lain: penyelesaian CVRP menggunakan *Adaptive Sweep* dan *Velocity Tentative PSO* (Akhand, Peay, & Murase, 2017), pendekatan metaheuristik untuk masalah CVRP optimasi pencarian lokasi berdasarkan GA dan *Ant Colony* (Mazidi, Fakhrahmad, & Sadreddini,

2016), pendekatan *goal programming* untuk memecahkan VRP menggunakan LINGO (Dhoruri, Sari, & Lestari, 2013), dan penyelesaian VRPTW menggunakan algoritma genetika hybrid (Pitaloka, Mahmudy, & Sutrisno, 2014).

*Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (CVRPTW) merupakan gabungan dari permasalahan *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) dengan *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW). Tujuan dari CVRPTW adalah membentuk rute optimal untuk memenuhi permintaan pelanggan dengan kendala kapasitas dan waktu pelayanan agar diperoleh waktu dan jarak yang minimum. Beberapa penelitian penyelesaian permasalahan CVRPTW telah dilakukan, antara lain: pendekatan *multi objective* untuk menyelesaikan CVRPTW menggunakan *mixed integer linear programming* (Sousa, Biswas, Brito, & Silveira, 2011) dan evaluasi masalah CVRPTW menggunakan ACO-GA (Gupta & Diwaker, 2017). Metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah CVRPTW adalah menggunakan Algoritma *Artificial Immune System* (AIS).

*Artificial Immune System* (AIS) telah digunakan dalam menyelesaikan berbagai bidang seperti optimasi, klasifikasi, *clustering*, deteksi anomali, *machine learning*, *adaptive control*, dan *associative memories* (Dasgupta & Niño, 2009). Secara umum, algoritma AIS diselesaikan dengan dua tahap yang menjadikannya unggul yaitu *route construction-route minimization* dan tahap *local search*. Pada tahap *route construction-route minimization* digunakan algoritma Solomon *insertion heuristic* II yang dilanjutkan dengan

prosedur *ejection pool* (Lim & Zhang, 2007) dan pada tahap *local search* digunakan *artificial immune system* (AIS) untuk mengurangi total jarak dari solusi yang dihasilkan pada tahap *Route Minimization*. Dari rangkaian tahap-tahap tersebut akan menghasilkan rute perjalanan yang paling optimal. Pada penelitian ini akan dilakukan penerapan algoritma *Artificial Immune System* (AIS) dengan modifikasi *route construction* yaitu memilih titik yang paling jauh dan memilih titik yang paling dekat.

*Artificial Immune System* (AIS) dipilih karena pada beberapa kasus optimasi, algoritma ini cukup efektif dalam mengatasi rute perjalanan. Beberapa penelitian tentang Algoritma AIS pernah dilakukan yaitu dilakukan oleh Sari (2017), penelitian tersebut menghasilkan jarak yang didapatkan menggunakan Algoritma AIS lebih baik dibandingkan Algoritma *Clarke and Wright Savings* dan penelitian yang dilakukan Hamzah (2011), penelitian tersebut dilakukan pada 56 masalah dengan menggunakan sampel 25 pelanggan dan 100 pelanggan. Hasil yang diperoleh menunjukkan penggunaan AIS sangat kompetitif untuk masalah dengan ukuran 25 pelanggan dari pada menggunakan data secara acak.

PT. Wina Wira Usaha Jaya belum mempunyai rute tetap yang digunakan untuk mendistribusikan Bright Gas 5,5 Kg kepada para pelanggan. Penentuan rute distribusi pada perusahaan ini hanya berdasarkan perkiraan saja tanpa mengetahui apakah jarak tempuh dan waktu tempuh yang dipilih sudah minimum atau belum. Oleh karena itu, PT. Wina Wira Usaha Jaya memerlukan metode khusus yang dapat membantu penentuan rute distribusi produk dari

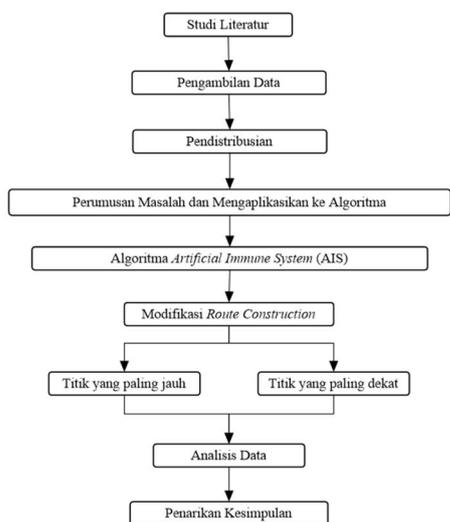
depot ke pelanggan dengan tujuan untuk meminimumkan total jarak dan waktu pendistribusian dalam melayani semua pelanggan, sehingga dengan terbentuknya rute baru maka total jarak dan waktu minimum. Permasalahan pendistribusian ini dapat dimodelkan dengan *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (CVRPTW) kemudian model tersebut akan diselesaikan menggunakan Algoritma *Artificial Immune System* (AIS). Hasil yang diperoleh pada penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai rute alternatif dalam proses pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di PT. Wina Wira Usaha Jaya.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan proses pengambilan data di PT. Wina Wira Usaha Jaya. Proses pengambilan data dilakukan dengan dua metode, yaitu metode *interview* (wawancara) dan metode menggunakan dokumen. Metode *interview* yaitu metode yang dilakukan dengan cara mengadakan Tanya jawab langsung dengan manajer operasional PT. Wina Wira Usaha Jaya tentang waktu pendistribusian, kapasitas kendaraan, serta hal-hal yang berhubungan dengan pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg. Metode kedua yaitu dengan dokumen yang merupakan metode pengumpulan data dengan dokumen yang ada di PT. Wina Wira Usaha Jaya berupa data alamat pelanggan dan permintaan pelanggan.

Data yang digunakan adalah data permintaan, jarak dan waktu dalam pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY oleh PT. Wina Wira Usaha Jaya. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan rute tetap yang

optimal agar dapat meminimumkan total jarak dan waktu pengiriman yang digunakan untuk pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY. Pendistribusian tersebut dilakukan pada pukul 08.00 – 11.30 WIB dan 12.30 – 16.30 WIB, sehingga termasuk data *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (CVRPTW). Teknik yang digunakan untuk menganalisis data tersebut menggunakan Algoritma *Artificial Immune System* (AIS). Berikut ini disajikan diagram alir dari penelitian sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

**HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg ke wilayah D.I Yogyakarta dilakukan di 20 tempat.

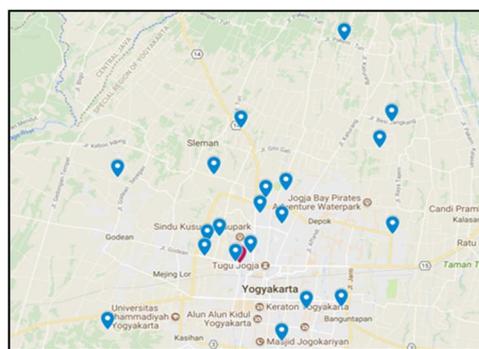
Berikut data permintaan:

Tabel 1. Data Permintaan Bright Gas 5,5 Kg (per minggu)

Nama	Alamat	Permintaan
PT. Wina Wira Usaha Jaya (Depot)	Jl. Kyai Mojo No. 65	-
B	Sinduadi	26
C	Sariharjo	11
D	Kricak	9
E	Harjobinangun	10
F	Nogotirto	12
G	Tlogoadi	34
H	Sinduadi	19
I	Warungboto	7
J	Banguntapan	13

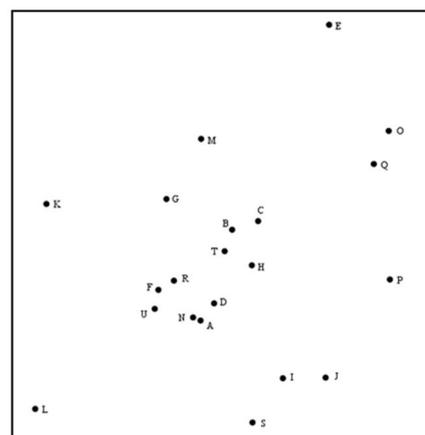
K	Margodadi	32
L	Balecatuur	7
M	Tridadi	13
N	Bener	18
O	Sukoharjo	8
P	Maguwoharjo	12
Q	Sukoharjo	14
R	Nogotirto	10
S	Sorosutan	18
T	Sinduadi	13
U	Banyuraden	7
Total		293

Berdasarkan data permintaan pelanggan pada Tabel 1 dan dengan menggunakan *google maps*, maka dapat diketahui lokasi yang akan didistribusikan, seperti pada Gambar 2



Gambar 2. Lokasi Pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg

Pada Gambar 2 diasumsikan setiap jalan dengan kondisi yang sama dapat dibentuk graf kosong seperti pada Gambar 3:



Gambar 3. Graf Kosong Pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg

Asumsi dalam permasalahan pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY adalah sebagai berikut:

1. Setiap lokasi pendistribusian hanya dikunjungi satu kali, pelanggan diasumsikan sebagai titik.
2. Kendaraan yang digunakan adalah 3 armada Pick Up dengan merek L300.
3. Masing-masing kendaraan memiliki kapasitas yang homogen yaitu 70 tabung setiap kendaraan.
4. Kecepatan rata-rata kendaraan konstan yaitu 50 km/jam dan tidak terjadi kemacetan, kondisi jalan tidak rusak, serta kendaraan dalam kondisi bagus.
5. Jarak antara dua titik diperoleh dari *google maps*.
6. *Time windows* (batasan waktu) masing-masing kendaraan yaitu 450 menit. Jadi, untuk keseluruhan kendaraan diperoleh *time windows* (batasan waktu) yaitu 1.350 menit.
7. Banyak lokasi pendistribusian ada 20 lokasi.

Permasalahan CVRPTW pada pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY dapat didefinisikan sebagai suatu graf  $G = (V, E)$ . Himpunan  $V$  terdiri atas gabungan himpunan pelanggan dan depot, dengan  $V = \{0, 1, 2, \dots, 21\}$ . Himpunan  $C$  yaitu pelanggan 1 sampai dengan 20,  $C = \{1, 2, 3, \dots, 20\}$  dan depot dinyatakan dengan 0 dan 21. Jaringan jalan yang dilalui oleh kendaraan dapat dinyatakan sebagai himpunan sisi berarah  $E$  yaitu penghubung antara pelanggan,  $E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ . Semua rute dimulai dan berakhir di depot.

Setiap simpul  $\{v_i \in V, i = 1, 2, \dots, n\}$  memiliki permintaan sebesar  $q_i$ . Himpunan  $K = \{1, 2, 3\}$  merupakan kumpulan kendaraan yang homogen dengan kapasitas sama yaitu  $Q$ , sehingga panjang setiap rute dibatasi oleh kapasitas kendaraan. Setiap simpul  $(v_i, v_j)$  memiliki jarak tempuh  $d_{ij}$ , dimana  $d_{ii} = d_{jj} = 0$

dan waktu tempuh  $t_{ij}$  yaitu waktu tempuh dari simpul  $i$  ke simpul  $j$ .

Berdasarkan asumsi-asumsi dapat dibentuk model matematika dalam pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY dengan tujuan meminimumkan total jarak dan waktu pendistribusian dalam melayani semua pelanggan, dengan variabel keputusan sebagai berikut:

1. Variabel  $x_{ijk}, \forall i, j \in \{0, 1, 2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1, 2, 3\}, i = 0, 1, \dots, 20, j = 1, 2, \dots, 21$  dengan  $i \neq j$ 

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{jika terdapat perjalanan dari } i \text{ ke } j \text{ dengan kendaraan } k \\ 0, & \text{jika tidak terdapat perjalanan dari } i \text{ ke } j \text{ dengan kendaraan } k \end{cases}$$
2. Variabel  $T_{ik}, T_{0k},$  dan  $S_{ik}, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1, 2, 3\}$ .
3. Variabel  $Y_{ik}$  dan  $q_j, \forall i, j \in \{0, 1, 2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1, 2, 3\}$ .

Oleh karena itu, fungsi tujuan untuk masalah CVRPTW adalah sebagai berikut:

$$\min z = \sum_{i=0}^{20} \sum_{j=1}^{21} t_{ij} \sum_{k=1}^3 x_{ijk}$$

dengan  $z$  merupakan fungsi tujuan dari masalah CVRPTW,  $t_{ij}$  merupakan waktu tempuh titik distribusi  $i$  ke titik distribusi  $j$ , dan  $x_{ijk}$  mempresentasikan ada tidaknya perjalanan dari titik  $i$  ke titik  $j$  dengan kendaraan  $k$ .

Adapun kendala dari permasalahan CVRPTW adalah sebagai berikut :

1. Setiap pelanggan hanya dikunjungi tepat satu kali oleh kendaraan yang sama. Pelanggan dengan titik tujuan yang sama hanya dikunjungi tepat satu kali oleh kendaraan yang sama.

$$\sum_{i=0}^{20} \sum_{k=1}^3 x_{i1k} = 1$$

$$\vdots$$

$$\sum_{i=0}^{20} \sum_{k=1}^3 x_{i21k} = 1$$

Pelanggan dengan titik asal yang sama hanya dikunjungi tepat satu kali oleh kendaraan yang sama.

$$\sum_{j=1}^{21} \sum_{k=1}^3 x_{0jk} = 1$$

$$\vdots$$

$$\sum_{j=1}^{21} \sum_{k=1}^3 x_{20jk} = 1$$

2. Total permintaan pelanggan dalam satu rute tidak melebihi kapasitas kendaraan yang melayani rute tersebut. Misalkan terdapat rute dari  $i$  ke  $j$  dengan kendaraan  $k$ , maka

$$Y_{ik} + q_j = Y_{jk}, \forall i, j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

$$Y_{jk} \leq 70, \forall j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

3. Jika ada perjalanan dari pelanggan ke- $i$  ke pelanggan ke- $j$ , maka waktu memulai pelayanan di pelanggan ke- $j$  lebih dari atau sama dengan waktu kendaraan ke- $k$  memulai pelayanan di pelanggan ke- $i$  ditambah waktu pelayanan ke- $i$  dan ditambah waktu tempuh perjalanan dari pelanggan ke- $i$  ke pelanggan ke- $j$ . Misalkan terdapat rute dari  $i$  ke  $j$  dengan kendaraan  $k$ , maka

$$T_{ik} + s_{ik} + t_{ij} \leq T_{jk}, \forall i, j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

4. Waktu kendaraan untuk memulai pelayanan di pelanggan ke- $i$  harus berada pada selang waktu  $[a_i, b_i]$ .

$$0 \leq T_{ik} \leq 450, \forall i \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

5. Setiap rute perjalanan pasti diawali oleh depot dan berakhir di depot

$$\sum_{i=0}^{20} \sum_{j=1}^{21} \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, \forall i, j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

6. Kekontinuan rute, artinya kendaraan yang mengunjungi setiap pelanggan, setelah selesai melayani akan meninggalkan pelanggan tersebut.

$$\sum_{i=0}^{20} x_{ijk} - \sum_{i=0}^{20} x_{ijk} = 0, \forall i, j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

7. Variabel keputusan  $x_{ijk}$  merupakan integer biner.

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j \in \{0,1,2, \dots, 21\}, \forall k \in \{1,2,3\}$$

### Penyelesaian Model dengan Pemilihan Titik yang Paling Jauh

1. Tahap *Route Construction – Route Minimization*

Langkah pertama, membentuk satu rute awal yang hasilnya diperoleh dari tahap *Route Construction*, kemudian rute tersebut akan dipisah pada tahap *Route Minimization* dengan kapasitas kurang dari sama dengan 70 tabung.

Pada tahap *Route Construction*, dapat dibentuk *seed route* yang berisi satu pelanggan. Pelanggan dengan titik yang paling jauh adalah titik E, sehingga terbentuk rute A – E – A. Langkah pertama adalah menyiapkan beberapa rute secara acak yang akan digunakan untuk mengidentifikasi letak insersi bagi seluruh pelanggan yang belum masuk ke rute. Beberapa rute yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

1) A – B – C – N – T – L – P – U – S – K – O – F – J – I – M – H – D – G – Q – R – A

2) A – U – F – B – M – N – R – H – D – L – I – G – S – P – K – Q – O – J – T – C – A

3) A – D – Q – O – F – U – H – N – I – G – R – M – L – C – P – B – S – T – J – K – A

4) A – G – I – D – M – Q – C – O – J – F – S – K – L – N – B – R – T – H – U – P – A

Kemudian membuat sebuah tabel yang berisi data untuk menghitung posisi insersi terbaik, dimana insersi *unrouted customer* adalah titik E.

Berikut ini langkah-langkah untuk membentuk kelompok rute pada tahap *Route Construction* adalah

- a) Menentukan nilai  $\delta_d = d_{iu} + d_{uj} - \mu \cdot d_{ij}$ ,
- b) Sebelum mencari nilai  $c_1(u)$  terlebih dahulu mencari nilai

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 \cdot \delta_d + \alpha_2 \cdot (t'_j - t_j),$$

- c) Nilai  $c_1(u)$  didapatkan dengan memilih nilai minimum dari  $c_1(i, u, j)$  pada masing-masing rute awal yang terbentuk.
- d) Pada langkah c) diperoleh rute C – O, sehingga dapat dilihat pada Tabel 2 hasil perubahan rutenya.

Tabel 2. Hasil Perubahan Rute

No	Rute Awal	Rute Baru
1	A-B-C-N-T-L-P-U-S-K-O-F-J-I-M-H-D-G-Q-R-A	A-B-N-T-L-P-U-S-K- <u>C-O</u> -F-J-I-M-H-D-G-Q-R-A
		A-B- <u>C-O</u> -N-T-L-P-U-S-K-F-J-I-M-H-D-G-Q-R-A
2	A-U-F-B-M-N-R-H-D-L-I-G-S-P-K-Q-O-J-T-C-A	A-U-F-B-M-N-R-H-D-L-I-G-S-P-K-Q- <u>C-O</u> -J-T-A
		A-U-F-B-M-N-R-H-D-L-I-G-S-P-K-Q-J-T- <u>C-O</u> -A
3	A-D-Q-O-F-U-H-N-I-G-R-M-L-C-P-B-S-T-J-K-A	A-D-Q-F-U-H-N-I-G-R-M-L- <u>C-O</u> -P-B-S-T-J-K-A
		A-D-Q- <u>C-O</u> -F-U-H-N-I-G-R-M-L-P-B-S-T-J-K-A
4	A-G-I-D-M-Q-	A-G-I-D-M-Q- <u>C-O</u> -J-

	C-O-J-F-S-K-L-N-B-R-T-H-U-P-A	F-S-K-L-N-B-R-T-H-U-P-A
--	-------------------------------	-------------------------

Melakukan langkah a) sampai dengan langkah c) terus-menerus hingga semua pelanggan telah berada di rute, maka proses dihentikan. Hasil yang diperoleh pada tahap *Route Construction* adalah A – I – D – R – H – U – S – L – N – T – B – G – P – M – Q – C – O – K – F – J – A. Setelah itu akan dilanjutkan ke tahap *Route Minimization*.

Setelah terbentuk rute pada tahap *Route Construction*, rute yang dihasilkan melebihi batas kapasitas kendaraan yang tersedia, sehingga akan dilakukan tahap selanjutnya yaitu mengurangi rute dengan *ejection pool*. Hasil yang diperoleh dari pengurangan rute tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Pengurangan Rute

Rute	Kapasitas (Tabung)
A – I – D – R – H – U – A	52
A – S – L – N – T – A	56
A – B – G – A	60
A – P – M – Q – C – O – A	58
A – K – F – J – A	57
A – E – A	10
Total	293

Rute-rute yang memiliki kapasitas dengan jumlah sedikit dapat digabungkan menjadi satu rute dalam *Ejection Pool* (EP) dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Rute *Ejection Pool* yang dihasilkan adalah A – I – D – R – H – U – E – A, sehingga hasil pembentukan rute dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Hasil Pembentukan Rute

Rute	Urutan Rute	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
1	A – S – L – N – T – A	56	42,8	163
2	A – B – G – A	60	18,4	142

3	A – P – M – Q – C – O – A	58	72,5	202
4	A – K – F – J – A	57	41,4	165
EP	A – I – D – R – H – U – E – A	62	68,7	206

Kemudian akan dilakukan pembentukan Rute 1, Rute 2, Rute 3, dan Rute 4 dengan Rute *Ejection Pool* dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Rute baru yang terbentuk dapat dilihat pada Tabel 5 berikut:

Tabel 5. Hasil Pembentukan R. 1, 2, 3, &amp; 4 dengan R. EP

Rute	Urutan Rute	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
1	A – S – L – N – D – T – A	65	42,7	181
2	A – B – G – R – A	70	19,1	163
3	A – U – P – M – Q – C – O – A	65	76,4	221
4	A – K – F – J – I – A	64	41,8	179
EP	A – H – E – A	29	36,2	101

Selanjutnya memilih titik yang terdapat pada Rute 1, Rute 2, Rute 3, dan Rute 4 yang dapat dipindahkan ke Rute EP dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia dan jaraknya kurang dari Rute EP yang terbentuk pada Tabel 4.5 yaitu 36,2 km, karena jarak yang terbentuk adalah 36,55 km tidak kurang dari jarak yang sebelumnya yaitu 36,2 km maka tidak diperoleh Rute EP yang baru.

## 2. Tahap *Local Search*

Pada tahap *Local Search* dilakukan perbaikan rute agar menghasilkan solusi yang lebih optimum dengan menggunakan data yang ada pada Tabel 4.5. Pada tahap ini dibedakan

menjadi dua yaitu satu rute (*Single-route*) atau menggunakan dua rute (*Multi-route*). Rute 1, Rute 3 dan Rute 4 akan dioperasikan menggunakan satu rute (*Single-route*) dikarenakan rute tersebut memiliki titik yang banyak dibandingkan Rute 2 dan Rute 5, sedangkan Rute 2 dan Rute 5 akan dioperasikan menggunakan dua rute (*Multi-route*).

### a) Satu Rute (*Single-route*)

*Single-route* akan dilakukan pada Rute 1, Rute 3, Rute 4 dan tidak akan berdampak pada rute lain.

#### 1) *Relocate*

*Relocate* adalah memindahkan suatu pelanggan  $v_i$  sebelum pelanggan  $v_j$  dalam satu rute, dalam hal ini pelanggan dapat dinotasikan sebagai titik.

#### 2) *Exchange*

*Exchange* adalah menukar posisi dua pelanggan yaitu  $v_i$  dan  $v_j$  dalam satu rute.

#### 3) *2-Opt*

*2-Opt* adalah memotong rute yang berisi sejumlah pelanggan berurutan menjadi dua rute dan menggabungkan rute tersebut menjadi rute baru.

#### 4) *Or-Opt*

*Or-Opt* adalah menukarkan sejumlah pelanggan  $\{v_i, \dots, v_{i+w-1}\}$  sebanyak  $k$  ke posisi yang lain dengan  $k \leq 3$ .

### b) Dua Rute (*Multi-route*)

Pada tahap *Multi-route* akan dilakukan pada sepasang atau dua rute yaitu Rute 2 dan Rute 5.

#### 1) *Relocate*

*Relocate* adalah memindahkan suatu pelanggan  $v_i$  dari Rute 2 sebelum pelanggan  $v'_p$  pada Rute 5, dalam hal ini pelanggan dapat dinotasikan sebagai titik.

2) *Exchange*

*Exchange* adalah menukar pelanggan  $v_i$  pada Rute 2 dengan  $v_p$  pada Rute 4.

3) *2-Opt\**

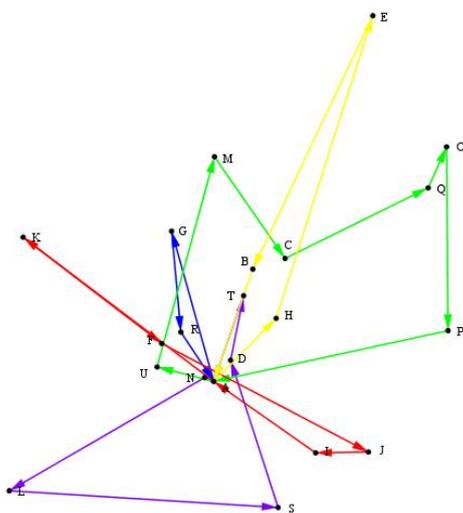
*2-Opt\** adalah menukarkan bagian ekor/belakang dari masing-masing rute.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan untuk pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY dengan memilih titik yang paling jauh dapat dilihat pada Tabel 6 sebagai berikut:

Tabel 6. Rute Pendistribusian dengan Memilih Titik yang Paling Jauh

Rute	Kendaraan	Kapasitas (Tabung)	Jarak Tempuh (Km)	Waktu Tempuh (Menit)
A – N – L – S – D – T – A	1	65	41,45	179
A – G – R – A	1	44	17,8	109
A – U – M – C – Q – O – P – A	2	65	46,9	186
A – K – F – J – I – A	2	64	41,8	179
A – H – E – B – A	3	55	36,8	154
<b>Total</b>		<b>293</b>	<b>184,75</b>	<b>807</b>

Berdasarkan Tabel 6 dibentuk sebagai suatu graf untuk pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY sebagai berikut



Gambar 4. Graf Rute Pendistribusian memilih titik yang paling jauh

Keterangan:

- Rute 1      — Rute 4
- Rute 2      — Rute 5
- Rute 3

**Penyelesaian Model dengan Pemilihan Titik yang Paling Dekat**

1. Tahap *Route Construction-Route Minimization*

Pada tahap ini, membentuk satu rute yang hasilnya diperoleh dari tahap *Route Construction*, kemudian rute tersebut akan dipisah pada tahap *Route Minimization* dengan kapasitas kurang dari sama dengan 70 tabung.

Pada tahap *Route Construction*, dapat dibentuk *seed route* yang berisi satu pelanggan. Pelanggan dengan titik yang paling dekat adalah titik N, sehingga terbentuk rute A – N – A. Langkah pertama adalah menyiapkan beberapa rute secara acak yang akan digunakan untuk mengidentifikasi letak insersi bagi seluruh pelanggan yang belum masuk ke rute. Beberapa rute yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) A – I – O – H – L – C – J – U – B – G – T – R – Q – K – M – D – F – S – E – P – A
- 2) A – F – B – U – H – R – M – Q – O – S – K – T – L – I – P – D – E – J – G – C – A
- 3) A – R – L – O – H – P – K – T – C – B – E – M – J – D – S – G – F – U – Q – I – A
- 4) A – C – O – Q – R – S – U – P – G – T – K – D – J – I – B – F – L – H – E – M – A

Kemudian membuat sebuah tabel yang berisi data untuk menghitung posisi insersi terbaik, dimana insersi *unrouted customer* adalah titik N. Melakukan langkah yang sama pada pemilihan titik yang paling jauh diperoleh rute R

– S, sehingga dapat dilihat pada Tabel 7 hasil perubahan rutenya.

Tabel 7. Hasil Perubahan Rute

No	Rute Awal	Rute Baru
1	A-I-O-H-L-C-J-U-B-G-T-R-Q-K-M-D-F-S-E-P-A	A-I-O-H-L-C-J-U-B-G-T-Q-K-M-D-F- <b>R-S</b> -E-P-A
	A-I-O-H-L-C-J-U-B-G-T-R-Q-K-M-D-F-S-E-P-A	A-I-O-H-L-C-J-U-B-G-T- <b>R-S</b> -Q-K-M-D-F-E-P-A
2	A-F-B-U-H-R-M-Q-O-S-K-T-L-I-P-D-E-J-G-C-A	A-F-B-U-H-M-Q-O- <b>R-S</b> -K-T-L-I-P-D-E-J-G-C-A
	A-F-B-U-H-R-M-Q-O-S-K-T-L-I-P-D-E-J-G-C-A	A-F-B-U-H- <b>R-S</b> -M-Q-O-K-T-L-I-P-D-E-J-G-C-A
3	A-R-L-O-H-P-K-T-C-B-E-M-J-D-S-G-F-U-Q-I-A	A-L-O-H-P-K-T-C-B-E-M-J-D- <b>R-S</b> -G-F-U-Q-I-A
	A-R-L-O-H-P-K-T-C-B-E-M-J-D-S-G-F-U-Q-I-A	A- <b>R-S</b> -L-O-H-P-K-T-C-B-E-M-J-D-G-F-U-Q-I-A
4	A-C-O-Q-R-S-U-P-G-T-K-D-J-I-B-F-L-H-E-M-A	A-C-O-Q- <b>R-S</b> -U-P-G-T-K-D-J-I-B-F-L-H-E-M-A

Melakukan langkah a) sampai dengan langkah c) terus-menerus hingga semua pelanggan telah berada di rute, maka proses dihentikan. Hasil yang diperoleh pada tahap *Route Construction* adalah A – D – F – I – K – J – R – S – U – H – L – T – B – M – Q – O – E – P – G – C – A. Setelah itu akan dilanjutkan ke tahap *Route Minimization*.

Setelah terbentuk rute pada tahap *Route Construction*, rute yang dihasilkan melebihi batas kapasitas kendaraan yang tersedia, sehingga akan dilakukan tahap selanjutnya yaitu mengurangi rute dengan *ejection pool*. Hasil yang diperoleh dari pengurangan rute tersebut dapat dilihat pada Tabel 8 sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil Pengurangan Rute

Rute	Kapasitas (Tabung)
A – D – F – I – K – A	60

A – J – R – S – U – H – A	67
A – L – T – B – M – A	59
A – Q – O – E – P – A	44
A – G – C – A	45
A – N – A	18
Total	293

Rute-rute yang memiliki kapasitas dengan jumlah sedikit dapat digabungkan menjadi satu rute dalam *Ejection Pool* (EP) dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Rute *Ejection Pool* yang dihasilkan adalah A – Q – O – E – P – N – A, sehingga hasil pembentukan rute dapat dilihat pada Tabel 9

Tabel 4. Hasil Pembentukan Rute

Rute	Urutan Rute	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
1	A – D – F – I – K – A	60	48,6	179
2	A – J – R – S – U – H – A	67	66,4	214
3	A – L – T – B – M – A	59	47,6	175
4	A – G – C – A	45	22	116
EP	A – Q – O – E – P – N – A	62	52,3	187

Kemudian akan dilakukan pembentukan Rute 1, Rute 2, Rute 3, dan Rute 4 dengan Rute *Ejection Pool* dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Rute baru yang terbentuk dapat dilihat pada Tabel 10 berikut:

Tabel 10. Hasil Pembentukan R. 1, 2, 3, & 4 dengan R. EP

Rute	Urutan Rute	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
1	A – D – F – I – O – K – A	68	68,2	219
2	A – J – R – S – U – H – A	67	66,4	214
3	A – L – T – B – E – M – A	69	62	212
4	A – N – G –	63	21,95	152

	C - A			
EP	A - Q - P - A	26	31,3	89

Selanjutnya memilih titik yang terdapat di Rute 1, Rute 2, Rute 3, dan Rute 4 (selain titik yang sebelumnya merupakan pindahan dari Rute EP) yang dapat dipindahkan ke Rute EP dengan syarat tidak melebihi kapasitas yang tersedia dan jarak yang dihasilkan kurang dari Rute EP yang terbentuk pada Tabel 10 yaitu 31,3 km. Pada Lampiran 31 diperoleh jarak minimum untuk Rute EP adalah 30,8 km, sehingga Rute EP berubah menjadi A - H - Q - P - A.

Pada tahap *Route Minimization*, algoritma prosedur pengurangan rute dengan *ejection pool* menghasilkan rute yang dapat dilihat pada Tabel 11 berikut:

Tabel 11. Hasil Tahap *Route Minimization*

Rute	Urutan Rute	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
1	A - D - F - I - O - K - A	68	68,2	219
2	A - J - R - S - U - A	48	54,1	161
3	A - L - T - B - E - M - A	69	62	212
4	A - N - G - C - A	63	21,95	152
5	A - H - Q - P - A	45	30,8	126

## 2. Tahap *Local Search*

Pada tahap *Local Search* dilakukan perbaikan rute agar menghasilkan solusi yang lebih optimum dengan menggunakan data yang ada pada Tabel 4.12. Pada tahap ini dibedakan menjadi dua yaitu satu rute (*Single-route*) atau menggunakan dua rute (*Multi-route*). Rute 1, Rute 2 dan Rute 3 akan dioperasikan menggunakan satu rute (*Single-route*) dikarenakan rute tersebut memiliki titik yang banyak dibandingkan Rute 4 dan Rute 5,

sedangkan Rute 4 dan Rute 5 akan dioperasikan menggunakan dua rute (*Multi-route*).

### a) Satu Rute (*Single-route*)

*Single-route* akan dilakukan pada Rute 1, Rute 2, dan Rute 4 dan tidak akan berdampak pada rute lain.

#### 1) *Relocate*

*Relocate* adalah memindahkan suatu pelanggan  $v_i$  sebelum pelanggan  $v_j$  dalam satu rute, dalam hal ini pelanggan dapat dinotasikan sebagai titik.

#### 2) *Exchange*

*Exchange* adalah menukar posisi dua pelanggan yaitu  $v_i$  dan  $v_j$  dalam satu rute.

#### 3) *2-Opt*

*2-Opt* adalah memotong rute yang berisi sejumlah pelanggan berurutan menjadi dua rute dan menggabungkan rute tersebut menjadi rute baru.

#### 4) *Or-Opt*

*Or-Opt* adalah menukarkan sejumlah pelanggan  $\{v_i, \dots, v_{i+w-1}\}$  sebanyak  $k$  ke posisi yang lain dengan  $k \leq 3$ .

### b) Dua rute (*Multi-route*)

Pada tahap *Multi-route* akan dilakukan pada sepasang atau dua rute yaitu Rute 4 dan Rute 5.

#### 1) *Relocate*

*Relocate* adalah memindahkan suatu pelanggan  $v_i$  dari Rute 4 sebelum pelanggan  $v'_p$  pada Rute 5, dalam hal ini pelanggan dapat dinotasikan sebagai titik.

#### 2) *Exchange*

*Exchange* adalah menukar pelanggan  $v_i$  pada Rute 4 dengan  $v_p$  pada Rute 5.

#### 3) *2-Opt\**

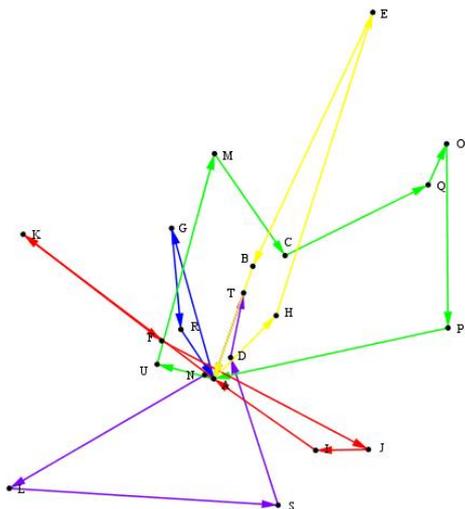
2-Opt\* adalah menukarkan bagian ekor/belakang dari masing-masing rute.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan untuk pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY dengan memilih titik yang paling dekat dapat dilihat pada Tabel 4.14 sebagai berikut:

Tabel 12. Rute Pendistribusian dengan Memilih Titik yang Paling Dekat

Rute	Kendaraan	Kapasitas (Tabung)	Jarak Tempuh (Km)	Waktu Tempuh (Menit)
A – F – K – D – O – I – A	1	68	51	200
A – U – R – J – S – A	1	48	29,6	126
A – L – M – E – B – T – A	2	69	59,2	209
A – G – H – A	2	53	20,6	131
A – N – C – Q – P – A	3	55	31,75	148
<b>Total</b>		<b>293</b>	<b>192,15</b>	<b>814</b>

Berdasarkan Tabel 12 dibentuk sebagai suatu graf untuk pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY sebagai berikut



Gambar 5. Graf Rute Pendistribusian memilih titik yang paling dekat

Keterangan:

- Rute 1      — Rute 4
- Rute 2      — Rute 5
- Rute 3

### Perbandingan Penyelesaian Model antara Pemilihan Titik yang Paling Jauh dan Titik yang Paling Dekat

Perbandingan penyelesaian model, dalam hal ini rute pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY yang diperoleh dengan memilih titik yang paling jauh dan titik yang paling dekat ditunjukkan dalam Tabel 13 sebagai berikut:

Tabel 13. Perbandingan Rute

Pemilihan Titik	Rute ke-	Rute	Kendaraan	Kapasitas (Tabung)	Jarak (Km)	Waktu (Menit)
Rute Asal	1	A-N-D-R-F-U-A	1	56	13	127
	2	A-K-G-A	1	66	26,9	164
	3	A-M-T-B-A	2	52	27	136
	4	A-H-C-Q-P-O-A	2	64	48	186
	5	A-E-J-I-S-L-A	3	55	72,5	197
	<b>Total</b>				<b>293</b>	<b>187,15</b>
Titik yang Paling Jauh	1	A-N-L-S-D-T-A	1	65	41,45	179
	2	A-G-R-A	1	44	17,8	109
	3	A-U-M-C-Q-O-P-A	2	65	46,9	186
	4	A-K-F-J-I-A	2	64	41,8	179
	5	A-H-E-B-A	3	55	36,8	154
	<b>Total</b>				<b>293</b>	<b>184,75</b>
Titik yang Paling Dekat	1	A-F-K-D-O-I-A	1	68	51	200
	2	A-U-R-J-S-A	1	48	29,6	126
	3	A-L-M-E-B-T-A	2	69	59,2	209
	4	A-G-	2	53	20,6	131

	H-A				
5	A-N- C-Q- P-A	3	55	31,75	148
Total			293	192,15	814

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Berdasarkan hasil kajian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat diperoleh simpulan bahwa dengan memilih titik yang paling jauh menghasilkan total jarak tempuh yang lebih baik dibandingkan dengan memilih titik yang paling dekat dalam menyelesaikan permasalahan CVRPTW dengan menggunakan Algoritma *Artificial Immune System* (AIS) pada pendistribusian Bright Gas 5,5 Kg di Wilayah DIY.

### Saran

Saran bagi penelitian selanjutnya, dalam penelitian ini untuk pembuatan *seed route* hanya memilih pelanggan yang memiliki jarak terjauh dan terdekat dari depot, dimungkinkan bagi peneliti selanjutnya dalam pembuatan *seed route* agar memilih pelanggan dengan *earliest due date* atau dengan selang-seling jarak terjauh maupun *earliest due date*.

Peneliti selanjutnya juga diharapkan agar melakukan pengembangan Algoritma *Artificial Immune System* (AIS) menggunakan aplikasi, seperti Matlab agar mempermudah dalam pengolahan data, sehingga proses pencarian solusi yang optimal dapat lebih cepat dan efisien. Dan juga saran untuk peneliti selanjutnya untuk kapasitas kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini bersifat homogen, dimungkinkan bagi peneliti selanjutnya untuk menggunakan kendaraan dengan kapasitas yang berbeda-beda.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akhand, M. A., Peya, Z. J., & Murase, K. (2017). Capacitated Vehicle Routing Problem Solving using Adaptive Sweep and Velocity Tentative PSO. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 8, no. 12, pp. 288-295.
- Dasgupta, D., & Niño, L. F. (2009). *Immunological computation: Theory and applications*. New York: Taylor & Francis Group.
- Dhoruri, A., Sari, E. R., & Lestari, D. (2013). A Goal Programming Approach to Solve Vehicle Routing Problem Using LINGO. *IndoMS International Conference on Mathematics and Its Applications*, pp. 155-161.
- Gupta, J., & Diwaker, C. (2017). Evaluation of Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows using ACO-GA. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 610-615.
- Hamzah, S.W. (2011). Artificial immune system untuk penyelesaian vehicle routing problem with time windows. *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Lim, A., & Zhang, X. (2007). A two-stage heuristic with ejection pools and generalized ejection chains for the vehicle routing problem with time windows. *INFORMS Journal on Computing*, vol. 19, no.3, pp. 443-457.
- Mazidi, A., Fakhrahmad, M., & Sadreddini, M. (2016). A Meta-heuristic Approach to CVRP Problem: Local Search Optimization Based on GA and Ant Colony. *Journal of Advances in Computer Research*, vol. 7, no.1, pp. 1-22.
- Pitaloka, D. A., Mahmudy, W. F., & Sutrisno. (2014). Penyelesaian vehicle routing problem with time windows (VRPTW) menggunakan algoritma genetika hybrid. *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology*, vol. 1, no. 2, hal. 104-110.
- Sari, V. A. (2017). Penyelesaian masalah rute penyiraman taman menggunakan algoritma artificial immune system (AIS) dan algoritma clarke and wright savings di Kota Yogyakarta. *Skripsi*. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, vol. 35, no.2, pp. 254-265.
- Sousa, J. C., Biswas, H. A., Brito, R., & Silveira, A. (2011). A Multi Objective Approach to solve Capacitated Vehicle Routing Problems with Time Windows Using Mixed Integer Linear Programming. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 1-8.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.