

PENENTUAN RUTE DISTRIBUSI RASTRA MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

L. Syakina¹, T. Bakhtiar², *F. Hanum³, P.T. Supriyo⁴

¹Mahasiswa S1 Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Pertanian Bogor, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga Bogor.
syakina_lana01@apps.ipb.ac.id

^{2,3,4}Departemen Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Pertanian Bogor, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga Bogor.
tbakhtiar@apps.ipb.ac.id, fhanum@apps.ipb.ac.id *corresponding author, praptosu@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Proses distribusi produk yang dilakukan oleh produsen untuk memenuhi kebutuhan konsumen sering kali melibatkan penyelesaian masalah perutean kendaraan. *Vehicle routing problem* (VRP) dapat digunakan untuk menentukan rute dan alokasi kendaraan agar biaya distribusi minimum. Penelitian ini membahas masalah penentuan rute distribusi beras untuk keluarga sejahtera (rastra) dari gudang penyimpanan Perum Bulog di Kabupaten Ponorogo ke beberapa desa/kelurahan. Periode pendistribusian yang diambil dalam penelitian ini hanya satu dari dua belas periode yang tersedia. Terdapat desa/kelurahan dengan permintaan yang melebihi kapasitas kendaraan, sehingga memerlukan distribusi terpisah. VRP dapat diselesaikan menggunakan metode eksak maupun heuristik. Dalam penelitian ini, metode heuristik yang digunakan adalah algoritma genetika dengan solusi awal diperoleh dari metode *nearest neighbour* untuk distribusi beras di Perum Bulog. Dari hasil implementasi diperoleh rute kendaraan yang meminimumkan biaya distribusi dan memenuhi semua kendala yang ada menggunakan algoritma genetika dan diberikan pula hasil perbandingannya dengan solusi dari metode eksak.

Kata kunci: algoritma genetika, distribusi beras, perutean, rastra, VRP

1 Pendahuluan

Proses distribusi, yang menjadi aspek vital dalam memenuhi kebutuhan konsumen, sering kali mengandalkan penggunaan kendaraan untuk mengirim barang dari produsen kepada konsumen. Penentuan rute bagi kendaraan pengantar barang dapat dimodelkan sebagai *vehicle routing problem* (VRP). VRP klasik bertujuan mencari serangkaian rute agar biaya yang dikeluarkan minimum. Tujuan VRP dapat pula meminimumkan banyak kendaraan atau menentukan rute terpendek. Semua kendaraan memulai dan mengakhiri perjalanan di depot setelah memenuhi permintaan konsumen. VRP mengasumsikan setiap pelanggan hanya dilayani oleh satu kendaraan dan setiap kendaraan memiliki kapasitas terbatas [19].

Penyelesaian VRP umumnya menggunakan dua pendekatan, yaitu metode eksak dan teknik heuristik. Algoritma eksak seperti *set covering based*, *branch and bound*, dan *branch and cut* memerlukan waktu komputasi yang lama, sehingga pendekatan heuristik menjadi pilihan. Teknik heuristik yang digunakan antara lain *hill climbing*, *simulated annealing*, *tabu search*, *genetic algorithms*, *ant colony optimization*, dan *memetic algorithms* [15].

Perum Badan Urusan Logistik (BULOG) adalah BUMN yang bergerak di bidang logistik pangan dengan layanan publik seperti beras, gula pasir, dan kedelai serta kegiatan komersial seperti perdagangan dan unit bisnis. Salah satu tugas utama BULOG adalah menyediakan beras subsidi, seperti Beras untuk Rakyat Sejahtera (Rastra) atau sebelumnya dikenal sebagai Raskin, bagi kelompok masyarakat berpendapatan rendah dengan mengutamakan petani dalam negeri sebagai produsen beras [12].

Kemiskinan dan kerentanan pangan memerlukan penanganan dan program terpadu yang berkelanjutan. Program Rastra, yang diberlakukan sejak 2015, memberikan subsidi beras sebesar 15 kg/bulan/Keluarga Sasaran Penerima Manfaat (KPM) dengan harga tebus beras sebesar Rp1.600/kg. Perum BULOG Kabupaten Ponorogo bertanggung jawab dalam mendistribusikan beras sejahtera kepada rumah tangga sasaran di wilayah Kabupaten Ponorogo, yang dapat dimodelkan sebagai *multidepot vehicle routing problem with split delivery* (MDVRPSD).

Penelitian ini bertujuan (a) membangun model MIP (*mixed integer programming*) untuk *multidepot vehicle routing problem with split delivery* pada masalah distribusi rastra, (b) menyelesaikan masalah *multidepot vehicle routing problem with split delivery* pada masalah distribusi rastra di Kabupaten Ponorogo menggunakan algoritma genetika dengan solusi awalnya ditentukan menggunakan metode heuristik *nearest neighbour*, (c) membandingkan hasil yang diperoleh dari metode heuristik dengan hasil dari metode eksak, serta menganalisis perubahan beberapa nilai parameter terhadap biaya distribusi dan waktu eksekusi algoritma.

2 Tinjauan Pustaka

2.1 *Multidepot Vehicle Routing Problem with Split Delivery* (MDVRPSD)

Vehicle routing problem (VRP) adalah sebuah model yang umum digunakan dalam perencanaan dan pengambilan keputusan. Menurut [15], dalam VRP (a) sejumlah kendaraan yang memiliki kapasitas tertentu diketahui berada di suatu depot; (b) terdapat sejumlah pelanggan dan setiap pelanggan memiliki permintaan; (c) terdapat biaya perjalanan antarlokasi, (d) memiliki tujuan mencari rute pengiriman atau pengangkutan barang dari depot ke pelanggan yang meminimumkan biaya yang diperlukan. Solusi dari model *vehicle routing problem* adalah himpunan rute perjalanan suatu kendaraan yang memenuhi semua kendala dan permintaan yang diberikan. Beberapa contoh penggunaan VRP di antaranya adalah dalam masalah pendistribusian, misalnya makanan [8], tabung gas LPG [10], BBM di kepulauan Ambon [11], barang logistik di Croatia [5]; pengambilan sampah, pengumpulan uang dari mesin ATM, dan sebagainya.

Menurut [19] komponen utama dalam *vehicle routing problem* adalah kendaraan, pengemudi, pelanggan, depot, dan kondisi jalan raya. Pada variasi VRP yang berbeda, terdapat kendala dan situasi berbeda yang dapat diberlakukan pada setiap komponen dan memiliki tujuan tertentu yang ingin dicapai. Variasi dasar dari VRP di antaranya *capacitated vehicle routing problem* (CVRP), *distance constraint and capacitated vehicle routing problem* (DCVRP), *vehicle routing problem with time window* (VRPTW), *vehicle routing problem with backhauls* (VRPB), *vehicle routing problem with pickup and delivery* (VRPPD), dan kombinasi dari variasi ini. Para peneliti kemudian mengembangkan variasi VRP lain yang telah dimuat dalam berbagai literatur seperti [2], [3], [6], [7], [9], [10], [13], [14], [17], dan [20]. Ada *open vehicle routing problem* (OVRP), *multidepot vehicle routing problem* (MDVRP), *mix fleet vehicle routing problem* (MFVRP), *split delivery vehicle routing problem* (SDVRP), *periodic vehicle*

routing problem (PVRP), *stochastic vehicle routing problem* (SVRP), *fuzzy vehicle routing problem* (VRPF), dan *multidepot vehicle routing problem with split delivery* (MDVRPSD) yang memiliki lebih dari satu depot dan pelanggan boleh dilayani oleh lebih dari satu kendaraan.

2.2 Algoritma Genetika

Algoritma genetika (AG) adalah pendekatan pencarian heuristik yang adaptif yang bersumber dari teori genetika populasi yang terinspirasi dari gagasan Darwin. Konsep dasar AG dikembangkan oleh John Holland pada tahun 1975, yang kemudian digunakan oleh de Jong untuk menyelesaikan permasalahan kompleks pada periode yang sama. Penggunaan AG dikembangkan lebih lanjut oleh Goldberg pada tahun 1989 [3]. Algoritma genetika banyak juga digunakan untuk menyelesaikan VRP di antaranya untuk distribusi makanan [8], MDVRP [17], VRPTW [18], SDVRP [1], [20].

Dalam [16] dikatakan AG bekerja sebagai prosedur pencarian stokastik yang mengoptimalkan masalah dengan mengadaptasi prinsip evolusi dan adaptasi alam. Berbeda dengan pendekatan heuristik lainnya yang dimulai dari satu titik awal dan bergerak menuju solusi tunggal, AG dimulai dengan populasi acak, yang menyatakan kumpulan solusi, dan berpindah dari satu generasi ke generasi berikutnya. Proses ini berlangsung hingga kriteria penghentian tercapai. Di setiap iterasi, operator pencarian diterapkan untuk menghasilkan populasi baru. Solusi yang lebih baik dipilih melalui proses seleksi untuk membentuk generasi berikutnya.

Dalam algoritma genetika, terdapat beberapa istilah yang umum digunakan. Gen, yang dapat berupa nilai biner, *float*, integer, karakter, atau kombinatorial, merupakan komponen dasar yang membentuk arti khusus dari kromosom. Kromosom, pada gilirannya, merupakan kumpulan gen yang menghasilkan nilai tertentu. Nilai yang dimiliki oleh gen disebut sebagai *allele*. Individu dalam konteks ini adalah representasi dari satu solusi potensial dari masalah yang sedang dihadapi yang terbentuk dari kromosom tersebut. Kualitas solusi dapat diukur dengan nilai *fitness*. Sejumlah individu membentuk populasi yang dikelola secara bersama dalam siklus evolusi, yang disebut sebagai generasi. Penerapan istilah-istilah tersebut pada VRP diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Istilah-istilah pada algoritma genetika

Istilah algoritma genetika	Penerapan dalam <i>vehicle routing problem</i>
Gen (<i>substring</i>)	Pelanggan
Kromosom dan individu	Rute dan tur
Populasi	Keseluruhan (himpunan) rute dan tur
Induk (<i>parent</i>)	Rute kendaraan yang akan diproses
Keturunan (<i>offspring/child</i>)	Rute kendaraan yang terbentuk
Seleksi	Operator yang memilih individu untuk proses kawin silang dan mutasi
Kawin silang	Operator untuk menghasilkan generasi baru
Mutasi gen	Operator pertukaran gen dengan gen lainnya
<i>Fitness</i>	Solusi atau penyelesaian tur
Generasi	Uji coba populasi

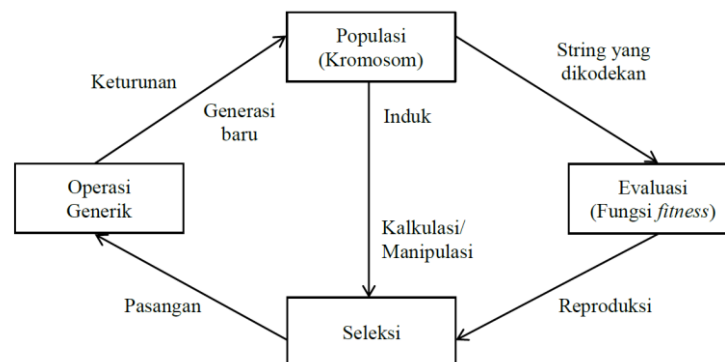
Menurut [16] algoritma genetika bekerja menggunakan operator yang mirip dalam proses evolusi, yaitu seleksi (*selection*), kawin silang (*crossover*), dan mutasi (*mutation*). Seleksi dilakukan untuk memilih individu terbaik yang akan menjadi induk dalam proses

kawin silang dan mutasi. Sebelum seleksi dilakukan, kriteria atau ukuran yang menentukan kualitas individu harus ditetapkan terlebih dahulu. Fungsi *fitness* digunakan untuk mengukur tingkat kebaikan individu; semakin tinggi nilai *fitness*, semakin baik individu tersebut dan memiliki peluang lebih besar untuk dipilih sebagai induk. Bentuk fungsi *fitness* bervariasi, bergantung pada parameter yang menjadi pertimbangan dalam menilai individu, seperti tujuan dan kendala-kendala yang harus dipatuhi. Penalti juga bisa menjadi bagian dari fungsi *fitness* untuk menghukum pelanggaran kendala; ini mengakibatkan penurunan nilai *fitness*. Berbagai metode seleksi yang digunakan antara lain *roulette wheel selection*, *random selection*, *rank selection*, *tournament selection*, *Boltzmann selection*, *elitism*, dan *stochastic universal sampling*.

Kawin silang bertujuan menciptakan individu baru dari induk-induk terbaik yang telah dipilih sebelumnya dengan memanfaatkan solusi yang telah ada. Proses kawin silang ini menghasilkan dua anak (*offspring*) dari dua induk. Peluang terjadinya kawin silang telah ditentukan sebelumnya, disebut *crossover probability* (P_c). Keputusan untuk melakukan kawin silang atau tidak pada individu diputuskan oleh bilangan acak (r) antara 0 hingga 1. Jika $r < P_c$, kawin silang dilakukan pada induk terpilih. Namun, jika $r \geq P_c$, kawin silang tidak terjadi, sehingga gen-gennya diturunkan ke generasi selanjutnya. Terdapat beberapa metode kawin silang, di antaranya adalah *ordered crossover* yang digunakan dalam penelitian ini.

Mutasi berperan dalam mempertahankan keragaman gen dalam populasi dengan memperkenalkan gen baru atau mengembalikan gen yang hilang. Tujuan mutasi adalah menjelajahi ruang solusi yang lebih luas dan mencegah terjebak dalam optimum lokal. Probabilitas mutasi (P_m) telah ditentukan sebelumnya untuk mengontrol frekuensi terjadinya mutasi. P_m mencerminkan persentase gen yang diharapkan mengalami mutasi dari total gen dalam populasi. Keputusan untuk melakukan mutasi ditentukan oleh bilangan acak (r) antara 0 hingga 1; jika $r < P_m$, mutasi dilakukan; jika $r \geq P_m$, mutasi tidak terjadi.

Beberapa metode mutasi antara lain penyisipan, *flipping*, *interchanging*, dan *reversing*. Mutasi *flipping* terkait dengan kromosom biner, mengubah gen 0 menjadi 1 dan sebaliknya berdasarkan kromosom yang dipilih secara acak. Metode *interchanging* menukar dua posisi gen dalam kromosom secara acak, sedangkan metode *reversing* membalik urutan gen yang terpilih.



Gambar 1 Siklus algoritma genetika menurut [16]

Penentuan rute dengan algoritma genetika yang di dalamnya terdapat proses kawin silang (*crossover*) dan *mutation* memerlukan pembangkitan bilangan acak agar urutan rute dapat diseleksi dan ditukar untuk mendapatkan solusi (nilai *fitness*) yang lebih baik.

Banyaknya induk yang mengalami *crossover* adalah perkalian probabilitas *crossover* dengan banyak populasi, yaitu $P_c \times n_populasi$. Tingkat mutasi yang terjadi didapatkan dengan perkalian *probability mutation*, banyak populasi, dan panjang struktur/gen, yaitu $P_m \times n_populasi \times p_jg_gen$. Walaupun P_c dan P_m dapat bernilai 0–1, namun nilai yang baik berada dalam rentang 0.65–1 untuk P_c dan 0.01–0.3 untuk P_m [18].

3 Metode

3.1 Deskripsi Masalah

Perum BULOG dan Jasa Prima Logistik menjalankan kerja sama dalam distribusi rastra di Kabupaten Ponorogo. Keduanya mengoperasikan total 5 truk dengan kapasitas homogen maksimal 9 ton atau setara dengan 600 karung rastra (dengan setiap karung berisi 15 kg) yang tersedia di tiga depot penyimpanan beras. Terdapat total 21 kecamatan, 307 desa/kelurahan, serta 70.398 RTS-PM (rumah tangga sasaran penerima manfaat) yang akan dikirim rastra menggunakan kendaraan yang tersedia. Kendaraan-kendaraan ini bergerak dari depot untuk memenuhi permintaan di desa/kelurahan yang menjadi titik distribusi rastra dalam wilayah yang lebih kecil. Bila permintaan desa/kelurahan melebihi kapasitas angkutan armada, lebih dari satu truk dapat mengunjungi lokasi tersebut. Truk yang melakukan distribusi dari depot akan kembali ke depot yang sama setelah menyelesaikan distribusi sesuai dengan jadwal. Proses pendistribusian rastra ini dilaksanakan dalam rentang waktu 12 hari (periode).

Dalam [4] disajikan model matematika secara umum untuk masalah pendistribusian beras sejahtera ke titik distribusi yang terdapat di desa/kelurahan tertentu di Kabupaten Ponorogo menggunakan model *mixed integer linear programming* (MILP). Model yang dibangun bertujuan menyelesaikan VRP dengan variasi tertentu, yaitu *multidepot multitrip vehicle routing problem* (MDMTVRP), *multidepot vehicle routing problem with split delivery* (MDVRPSD), dan *multidepot multitrip vehicle routing problem with split delivery* (MDMTVRPSD). Pendistribusian dilakukan selama 12 hari (periode) dengan periode 5, 7, dan 9 merupakan kasus MDMTVRP, periode 12 merupakan kasus MDVRPSD, serta periode 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11 merupakan kasus MDMTVRPSD. Salah satu titik distribusi pada periode 12 memiliki permintaan yang melebihi kapasitas kendaraan, sehingga desa/kelurahan tersebut dapat dikunjungi lebih dari satu kali dalam rute pendistribusian. Dalam [4], masalah pendistribusian diselesaikan secara eksak untuk semua periode. Pada penelitian ini, masalah pendistribusian rastra yang diteliti hanya untuk periode 12, sehingga model yang digunakan adalah MDVRPSD, dan diselesaikan secara heuristik menggunakan algoritma genetika.

3.2 Formulasi Masalah

Model matematik yang digunakan adalah *multidepot vehicle routing problem with split delivery* (MDVRPSD) dengan asumsi sebagai berikut.

1. Setiap permintaan desa/kelurahan telah diketahui dan permintaan tersebut dapat terpenuhi selama periode pendistribusian.
2. Jenis beras yang tersedia dan truk yang digunakan adalah homogen di setiap gudang penyimpanan.
3. Truk berangkat dan kembali ke gudang penyimpanan beras yang sama serta tidak semua truk harus digunakan.
4. Desa/kelurahan dengan permintaan melebihi kapasitas truk diperbolehkan mendapat kunjungan lebih dari satu kali.

Model matematika untuk menyelesaikan permasalahan distribusi rastra pada subbab ini merupakan modifikasi dari [4] dan beberapa pustaka. Terlebih dahulu didefinisikan himpunan, indeks, parameter, dan variabel keputusan yang digunakan dalam model. Misalkan I adalah himpunan gudang penyimpanan beras sebagai depot, J adalah himpunan desa/kelurahan yang akan dikunjungi, dan K_i menyatakan himpunan truk pada depot i dengan $i \in I$. Gudang beras dan desa/kelurahan yang harus dikunjungi dinyatakan dengan *node*. Di model ini, indeks yang digunakan untuk menyatakan *node* adalah i, j, l dan indeks untuk menyatakan kendaraan adalah k . Notasi dan definisi yang digunakan untuk parameter adalah sebagai berikut.

N = banyaknya *node*,

C_{ij} = jarak dari *node* i ke *node* j , untuk $i, j \in I \cup J$,

D_i = banyaknya permintaan rastra oleh desa/kelurahan i yang akan dikunjungi,

Q = kapasitas truk,

F = biaya tetap apabila truk digunakan,

B_{ij} = biaya perjalanan dari *node* i ke *node* j , untuk $i, j \in I \cup J$.

Variabel keputusan dalam model ini adalah sebagai berikut.

z_k = $\begin{cases} 1, & \text{jika truk ke } k \text{ digunakan} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$

x_{ijk} = $\begin{cases} 1, & \text{jika truk } k \text{ dari } \textit{node } i \text{ mengunjungi } \textit{node } j \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$

p_{ik} = banyaknya rastra untuk desa/kelurahan i yang dibawa truk k

U_{ik} = variabel tambahan untuk mengeliminasi *subtour* untuk *node* i truk k

Masalah pendistribusian ini memiliki fungsi objektif yaitu meminimumkan biaya total distribusi yang terkait dengan biaya tetap truk yang digunakan dan biaya perjalanan ketika melakukan kegiatan dan dituliskan sebagai

$$\text{minimumkan } \sum_{k \in K} F z_k + \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} B_{ij} C_{ij} x_{ijk}$$

dengan kendala sebagai berikut.

1. Tidak semua truk harus digunakan dan truk yang beroperasi berangkat dari gudang masing-masing,

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} = z_k, \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K_i.$$

2. Tidak ada truk yang berangkat dari gudang bukan depot asal,

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall k \notin K_i.$$

3. Truk yang beroperasi kembali ke gudang penyimpanan beras saat berangkat,

$$\sum_{i \in J} x_{ijk} = z_k, \quad \forall j \in I, \quad \forall k \in K_j.$$

4. Tidak ada truk yang kembali ke gudang bukan depot asal,

$$\sum_{i \in J} x_{ijk} = 0, \quad \forall j \in I, \quad \forall k \notin K_j.$$

5. Tidak ada desa/kelurahan yang dikunjungi oleh truk yang tidak beroperasi,

$$x_{ijk} \leq z_k, \quad \forall i, j \in I \cup J, \quad \forall k \in K_i.$$

6. Tidak ada rute antargudang penyimpanan,

$$x_{ijk} = 0, \quad \forall i, j \in I, \quad \forall k \in K_i.$$

7. Tidak ada rute untuk lokasi yang sama,

$$x_{jjk} = 0, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K_i, \quad i \in I.$$

8. Kendala eliminasi *subtour* untuk membentuk *tour* yang fisibel,

$$U_{ik} - U_{jk} + N \cdot x_{ijk} \leq N - 1, \quad \forall i, j \in I \cup J, \quad \forall k \in K_l, l \in I.$$

9. Desa/kelurahan dapat dikunjungi oleh lebih dari satu truk

$$\sum_{\substack{i=1, l \neq j \\ i \in I \cup J}} \sum_{k \in K_i} x_{ijk} \geq 1, \quad \forall j \in I \cup J.$$

10. Kendaraan yang selesai mengunjungi pelanggan harus meninggalkan pelanggan tersebut,

$$\sum_{\substack{i=1, l \neq l \\ i \in I \cup J}} x_{ilk} - \sum_{\substack{j=1, j \neq l \\ j \in I \cup J}} x_{ljk} = 0, \quad \forall l \in J, \quad \forall k \in K_i, i \in I.$$

11. Banyaknya beras untuk desa/kelurahan tidak melebihi permintaan,

$$p_{ik} \leq D_i \cdot \sum_{j \in I \cup J} x_{ijk}, \quad \forall i \in J, \quad \forall k \in K_l, l \in I.$$

12. Permintaan setiap desa/kelurahan terpenuhi,

$$D_i = \sum_{k \in K_l} p_{ik}, \quad \forall i \in J, \quad l \in I.$$

13. Banyaknya beras yang diangkut tidak melebihi batas kapasitas kendaraan,

$$\sum_{i \in J} p_{ik} \leq Q, \quad \forall k \in K_l, l \in I.$$

14. Kendala biner,

$$\begin{aligned} z_k &\in \{0,1\}, \quad \forall k \in K_i, i \in I, \\ x_{ijk} &\in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in I \cup J, \quad \forall k \in K_l, l \in I. \end{aligned}$$

15. Ketaknegatifan,

$$p_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in J, \quad \forall k \in K_l, l \in I.$$

Penyelesaian kegiatan distribusi rastra yang dipandang sebagai suatu masalah rute kendaraan (*vehicle routing problem*) pada penelitian ini diselesaikan dengan metode heuristik. Rute awal ditentukan dengan metode *nearest neighbour* untuk mendapatkan solusi yang fisibel, kemudian dilanjutkan dengan tahapan algoritma genetika berikutnya.

4 Hasil dan Pembahasan

Data mengenai permintaan barang dari setiap desa atau kelurahan serta jarak antar lokasi, baik sebagai gudang penyimpanan maupun titik distribusi, dianalisis menggunakan metode *nearest neighbour* untuk menetapkan solusi awal. Proses ini dimulai dengan menentukan jumlah kendaraan yang tersedia di depot. Lokasi terdekat dengan depot menjadi tujuan pertama, diikuti oleh lokasi terdekat berikutnya dari lokasi sebelumnya, dan seterusnya hingga kapasitas kendaraan tercapai. Setelah kapasitas terpenuhi, kendaraan harus kembali ke depot. Proses ini berlanjut untuk kendaraan berikutnya dengan aturan yang serupa hingga semua lokasi dikunjungi oleh kendaraan yang tersedia di depot. Data jumlah permintaan tiap titik distribusi (desa/kelurahan) serta

node yang mencakup depot (gudang penyimpanan) dan titik distribusi disajikan dalam Tabel 2. Jarak antar-*node* bersifat simetris dan datanya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2 Daerah tujuan distribusi dan jumlah permintaan rastra (karung) setiap desa/kelurahan

Kecamatan	Desa/Kelurahan	Node	Permintaan rastra
Jenangan	Ngrupit	1 (depot)	0
Siman	Madusari	2 (depot)	0
Babadan	Babadan	3 (depot)	0
	Wringinanom	4	571
	Bancangan	5	171
Sambit	Bulu	6	110
	Besuki	7	84
	Bedingin	8	112
	Temon	9	807
Sawoo	Tumpakpelem	10	425
	Ketro	11	53
Total			2333

Tabel 3 Data jarak (km) setiap desa/kelurahan

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0										
2	14.7	0									
3	3.5	14	0								
4	26	14.7	27.9	0							
5	20.9	9.7	22.9	5.1	0						
6	20.4	9.2	22.4	6.7	1.6	0					
7	21.4	10.2	23.4	9.1	4.1	3.5	0				
8	24.1	12.9	26.1	11.8	6.7	6.2	2.9	0			
9	34.1	24.8	36.1	21.8	16.7	16.2	12.9	10.4	0		
10	35.4	24.2	37.4	23.1	18	17.5	14.2	11.7	5.4	0	
11	22.8	12.9	24.8	12.4	7.3	6.8	3.5	2.8	14.9	14.3	0

Terdapat lima kendaraan (berupa truk) homogen dengan kapasitas 9 ton (setara dengan 600 karung rastra) yang tersedia di tiga lokasi depot/gudang berbeda. Depot-depot ini terletak di Desa Ngrupit (memiliki 2 truk, yaitu Truk-A dan Truk-B), Desa Madusari (dengan 2 truk, yaitu Truk-C dan Truk-D), dan Desa Babadan (hanya ada 1 truk, yaitu Truk-E). Penggunaan kendaraan menimbulkan biaya Rp 1.500.000,00 per rute, dan biaya perjalanan sebesar Rp 1.000,00 per kilometer yang dilalui oleh kendaraan.

4.1 Penentuan Rute Pendistribusian dengan Algoritma Genetika

4.1.1 Penentuan Rute Awal Menggunakan Metode *Nearest Neighbour*

Dari Tabel 3 terlihat bahwa *node* 2 dan *node* 6 memiliki jarak terdekat dari gudang penyimpanan ke desa atau kelurahan. Truk dengan kapasitas 600 karung dapat memenuhi permintaan sebesar 110 karung di *node* 6, menyisakan muatan 490 karung untuk rute selanjutnya. *Node* terdekat setelah *node* 6 adalah *node* 5 dengan permintaan 171 karung.

Setelah permintaan dipenuhi, kapasitas truk berkurang menjadi 319 karung, memungkinkan truk untuk melanjutkan perjalanan ke *node* berikutnya. Rute berakhir di *node* 4 sebelum truk kembali ke *node* 2 (lihat Tabel 4), sedangkan *node* 4, 9, dan 10 masih belum dilayani di rute pertama.

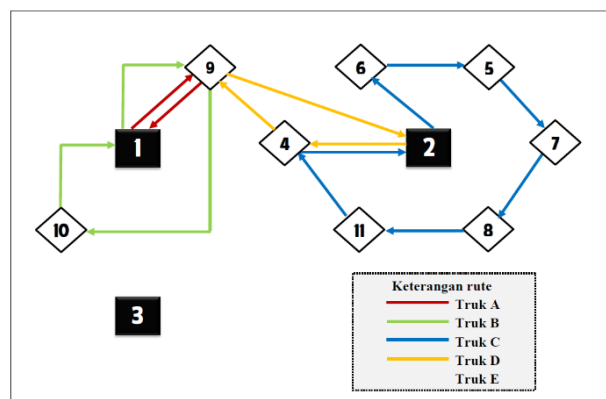
Tabel 4 Pendistribusian pada rute pertama dengan *nearest neighbour*

<i>Node</i> awal	<i>Node</i> tujuan	Kapasitas truk <i>node</i> awal (karung)	Permintaan <i>node</i> tujuan (karung)	Sisa kapasitas truk (karung)	Jarak dua <i>node</i> (km)
2	6	600	110	490	9.2
6	5	490	171	319	1.6
5	7	319	84	235	4.1
7	8	235	112	123	2.9
8	11	123	53	70	2.8
11	4	70	571	0	12.4
4	2	0	0	0	14.7
Total					47.7

Biaya pendistribusian adalah total biaya tetap penggunaan truk dan biaya perjalanan sehingga biaya untuk rute pertama adalah $\text{Rp}1.500.000,00 + (47.7) \times \text{Rp}1.000,00 = \text{Rp}1.547.700,00$. Pada akhir rute pertama terdapat *node* 4, 9, dan 10 yang perlu mendapat kunjungan untuk memenuhi permintaan berturut-turut sebesar 501, 807, dan 425 karung. Langkah-langkah pendistribusian serupa dilakukan menggunakan kendaraan dan depot lain hingga semua permintaan *node* terpenuhi. Hasil rute pendistribusian ditampilkan pada Tabel 5 dan Gambar 2.

Tabel 5 Rute pendistribusian dengan *nearest neighbour*

Depot	Truk	Kode	Rute	Total beras yang didistribusikan (karung)
1	1	A	1 → 9 → 1	600
	2	B	1 → 9 → 10 → 1	533
2	1	C	2 → 6 → 5 → 7 → 8 → 11 → 4 → 2	600
	2	D	2 → 4 → 9 → 2	600
3	1	E	Tidak ada	0

Gambar 2 Rute pendistribusian beras dengan *nearest neighbour*

Total biaya yang dikeluarkan dengan menggunakan algoritma *nearest neighbour* pada pendistribusian rastra ini sebesar Rp6.252.100,00.

4.1.2 Perbaikan Rute Pendistribusian

Rute pendistribusian yang diperoleh dengan *nearest neighbour* pada tahap sebelumnya digunakan sebagai solusi awal dalam algoritma genetika. Tahapan penentuan rute menggunakan algoritma genetika dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Representasi kromosom dan memberikan nilai-nilai dari parameter yang diperlukan. Hasil dari metode *nearest neighbour* menjadi representasi kromosom awal, sedangkan kromosom-kromosom berikutnya dibentuk dari variasi permutasi gen untuk membentuk populasi awal. Data lain yang menjadi input adalah jarak antar gen, banyak iterasi, ukuran populasi ($n_{populasi}$), nilai probabilitas *crossover* (Pc), dan nilai probabilitas mutasi (Pm).
2. Evaluasi nilai *fitness*
Semakin tinggi nilai *fitness* suatu individu, semakin baik individu atau kromosom tersebut sehingga individu tersebut memiliki peluang lebih besar untuk terpilih sebagai induk. Nilai *fitness* individu/kromosom i adalah

$$f_i = \frac{1}{z_i + w_i}$$

dengan z_i adalah jarak tempuh kromosom i dan w_i adalah penalti kromosom i . Jika permintaan kromosom tidak melebihi kapasitas kendaraan, penalti bernilai 0; jika permintaan kromosom melebihi kapasitas kendaraan sebesar w , penalti bernilai w .

3. Proses seleksi
Pada penelitian ini digunakan metode *Roulette wheel selection* untuk memilih induk (*parent*) dengan langkah-langkah
 - a) menghitung total nilai *fitness* seluruh kromosom ($\sum f_i$);
 - b) menghitung nilai probabilitas seleksi kromosom (p_i) dengan rumus $p_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$;
 - c) menghitung nilai probabilitas kumulatif kromosom (q_i);
 - d) membangkitkan bilangan acak (R_i) dalam interval $[0,1]$ sejumlah kromosom;
 - e) melakukan seleksi *roulette wheel* sesuai dengan ukuran populasi dengan syarat
 - jika $R_i < q_1$, kromosom pertama dipilih sebagai induk;
 - jika $q_{i-1} < R_i < q_i$, kromosom ke- i dipilih sebagai induk.
4. Proses kawin silang (*crossover*)
Dalam penelitian ini, *ordered crossover* digunakan untuk menggabungkan dua induk dan menghasilkan keturunan/anak dengan langkah-langkah
 - a) membangkitkan bilangan acak (r) dalam interval $[0,1]$. Jika $r < Pc$, proses kawin silang terjadi pada kromosom yang terpilih sebagai induk sebanyak $n_{induk} = Pc \times n_{populasi}$;
 - b) menentukan lokasi *crossover* dengan secara acak membagi kromosom induk menjadi bagian awal, tengah, dan akhir;
 - c) memasang dua kromosom terpilih untuk direkombinasikan. Bagian tengah kromosom induk ke-1 dan ke-2 menjadi bagian tengah kromosom anak ke-1 dan ke-2;
 - d) gen pada induk ke-2 menjadi gen anak ke-1 dengan cara menyalin susunan gen induk ke-2 dan menghilangkan gen anak ke-1 bagian tengah. Susunan baru yang diperoleh dimasukkan sesuai dengan urutan ke bagian awal dan akhir anak ke-1.
 - e) Tahap d) dilakukan kembali untuk menghasilkan anak ke-2.

5. Proses mutasi

Proses mutasi pada anak hanya terjadi jika ada proses kawin silang. Dalam penelitian ini, *swap mutation* digunakan untuk menciptakan keturunan/anak dari satu induk dengan cara membangkitkan bilangan acak (r_i) dalam interval $[0,1]$ sebanyak ukuran induk. Jika $r_i < Pm$, kromosom anak ke- i mengalami mutasi. Pada kromosom terpilih, mutasi dilakukan dengan mengubah posisi dua gen yang dipilih secara acak.

6. Proses pemilihan kromosom terbaik

Kromosom yang dimiliki bertambah n_induk dari populasi awal. Kromosom yang memiliki *fitness* terbaik menjadi populasi untuk generasi selanjutnya.

Tahapan 1-6 ini diimplementasikan untuk menyelesaikan masalah pendistribusian rastra. Rute yang dihasilkan dari metode *nearest neighbour* untuk Truk-A dan Truk-B menjadi kromosom dari depot pertama, sementara rute untuk Truk-C dan Truk-D menjadi kromosom dari depot kedua. Informasi mengenai jarak antardesa dan jumlah permintaan rastra disesuaikan dengan representasi kromosom sebelumnya.

Pada contoh perhitungan berikut nilai parameter yang digunakan yaitu, $iterasi = 1$, $Pc = 0.8$, $Pm = 0.2$, dan $n_populasi = 10$.

4.1.2.1 Depot Pertama

Hasil dari metode *nearest neighbour* untuk depot pertama menunjukkan bahwa Truk-A melayani *node* 9 dengan kapasitas 600 karung, sementara Truk-B melayani *node* 9 sebanyak 108 karung dan *node* 10 sebanyak 425 karung. Informasi mengenai jarak antardesa dari depot pertama disajikan dalam Tabel 6. Data mengenai populasi awal tercatat pada Tabel 7, yang mencakup jarak (z_i), penalti (w_i), *fitness* (f_i), probabilitas (p_i), dan probabilitas kumulatif (q_i) berdasarkan nilai *fitness* untuk setiap kromosom.

Tabel 6 Data jarak (km) desa/kelurahan yang dilayani depot 1

Node	1	9(1)	9(2)	10
1	0	34.1	34.1	35.4
9(1) ^a	34.1	0	0	5.4
9(2) ^b	34.1	0	0	5.4
10	35.4	5.4	5.4	0

^aNode 9 yang dilayani pertama kali pada solusi *nearest neighbour*.

^bNode 9 yang dilayani kedua kali pada solusi *nearest neighbour*.

Tabel 7 Data populasi awal yang dilayani Depot 1

Kromosom(i)	Truk-A	Truk-B	z_i	w_i	f_i	p_i	q_i
1	9(1)	9(2) 10	143.1	0	0.007	0.2185	0.2185
2	10	9(1) 9(2)	139	108	0.004	0.1266	0.3451
3	9(2)	10 9(1)	143.1	425	0.0018	0.055	0.4001
4	9(2)	9(1) 10	143.1	425	0.0018	0.055	0.4551
5	10	9(2) 9(1)	139	108	0.004	0.1266	0.5817
6	9(2)	10 9(1)	143.1	425	0.0018	0.055	0.6368
7	10	9(1) 9(2)	139	108	0.004	0.1266	0.7633
8	10	9(1) 9(2)	139	108	0.004	0.1266	0.8899
9	9(2)	9(1) 10	143.1	425	0.0018	0.055	0.945
10	9(2)	10 9(1)	143.1	425	0.0018	0.055	1

Terlebih dahulu dibangkitkan bilangan acak R_i sebanyak jumlah kromosom. Proses seleksi *roulette wheel* dapat dilakukan dengan syarat: jika $R_i < q_1$, kromosom ke-1 dipilih sebagai induk; jika $q_{i-1} < R_i < q_i$, kromosom ke- i dipilih sebagai induk. Bilangan acak yang telah dibangkitkan dan kromosom terpilih adalah sebagai berikut:

$R_1 = 0.4370$, kromosom 4 terpilih	$R_6 = 0.0960$ kromosom 1 terpilih
$R_2 = 0.5505$, kromosom 5 terpilih	$R_7 = 0.8981$ kromosom 9 terpilih
$R_3 = 0.9861$, kromosom 10 terpilih	$R_8 = 0.0584$ kromosom 1 terpilih
$R_4 = 0.6898$, kromosom 7 terpilih	$R_9 = 0.1233$ kromosom 1 terpilih
$R_5 = 0.9701$, kromosom 10 terpilih	$R_{10} = 0.6307$ kromosom 6 terpilih

Tabel 8 Kromosom induk hasil *roulette wheel selection* pada iterasi 1

Kromosom	Truk-A	Truk-B	Kromosom	Truk-A	Truk-B
1	9(2)	9(1)	10	6	9(1) 9(2) 10
2	10	9(2)	9(1)	7	9(2) 9(1) 10
3	9(2)	10	9(1)	8	9(1) 9(2) 10
4	10	9(1)	9(2)	9	9(1) 9(2) 10
5	9(2)	10	9(1)	10	9(2) 10 9(1)

Karena bilangan acak yang dibangkitkan adalah $r = 0.3701 < P$, maka *ordered crossover* dilakukan kepada $0.8 \times 10 = 8$ induk terpilih secara acak. Pasangan kromosom yang terpilih sebagai induk yaitu kromosom 6 dan 3, kromosom 1 dan 5, kromosom 4 dan 7, kromosom 2 dan 8. Sebagai contoh, berikut adalah proses *ordered crossover* untuk kromosom 6 dan 3:

- Kromosom induk
Kromosom 6: 9(1) - 9(2) - 10 Kromosom 3: 9(2) - 10 - 9(1)
- Berdasarkan pengacakan, titik potong pertama adalah 1 dan titik potong kedua adalah 2 untuk setiap kromosom induk, maka bagian tengah untuk setiap kromosom induk adalah gen kedua.
Anak 1: __ 9(2) __ Anak 2: __ 10 __
- Urutan gen untuk disusun ulang pada anak 1 yang berasal dari kromosom 3 adalah 10 - 9(1), sedangkan urutan gen untuk disusun ulang pada anak 2 yang berasal dari kromosom 6 adalah 9(1) - 9(2). Kemudian urutan tersebut disisipkan pada gen yang belum terisi dengan kata lain bukan gen bagian tengah.
- Hasil kawin silang
Anak 1: 10 - 9(2) - 9(1) Anak 2: 9(1) - 10 - 9(2)

Tabel 9 Kromosom hasil *ordered crossover* pada iterasi 1

Induk			Anak			
Kromosom i	Truk-A	Truk-B	Kromosom i	Truk-A	Truk-B	
6	9(1)	9(2)	10	1	10	9(2) 9(1)
3	9(2)	10	9(1)	2	9(1)	10 9(2)
1	9(2)	9(1)	10	3	9(2)	10 9(1)
5	9(2)	10	9(1)	4	9(2)	9(1) 10
4	10	9(1)	9(2)	5	9(2)	9(1) 10
7	9(2)	9(1)	10	6	10	9(1) 9(2)
2	10	9(2)	9(1)	7	9(1)	9(2) 10
8	9(1)	9(2)	10	8	10	9(2) 9(1)

Proses mutasi untuk kromosom anak dapat dilakukan apabila kawin silang terjadi. Karena pada iterasi 1 terjadi kawin silang, mutasi dilakukan. Jika $r_i < Pm$, kromosom anak ke- i mengalami mutasi, dengan r_i merupakan bilangan acak. Bilangan acak yang dihasilkan, yaitu $r_1=0.7958$, $r_2=0.1303$, $r_3=0.9099$, $r_4=0.0536$, $r_5=0.7064$, $r_6=0.6783$, $r_7=0.0932$, dan $r_8=0.4337$. Karena $Pm = 0.2$, kromosom anak ke-2, 4, dan 7 mengalami mutasi. Sebagai contoh, berikut proses *swap mutation* untuk kromosom anak.

1. Kromosom 4

Kromosom sebelum mutasi : 9(2) - 9(1) - 10

Dua posisi gen dipilih secara acak untuk ditukar, terpilih gen 2 dan 1

Kromosom setelah mutasi : 9(1) - 9(2) - 10

2. Pada kromosom 2 dan 7 posisi gen yang terpilih acak untuk ditukar adalah sama, yaitu gen 3, sehingga kromosom sebelum mutasi dan setelah mutasi tidak berubah.

Tabel 10 Kromosom anak hasil *swap mutation* pada iterasi 1

Kromosom	Truk-A	Truk-B	Kromosom	Truk-A	Truk-B
1	10	9(2) 9(1)	5	9(2)	9(1) 10
2	9(1)	10 9(2)	6	10	9(1) 9(2)
3	9(2)	10 9(1)	7	9(1)	9(2) 10
4	9(2)	10 9(1)	8	10	9(2) 9(1)

Populasi saat ini terdiri dari 18 kromosom, yang mencakup kromosom induk dan kromosom anak. Pada generasi berikutnya, hanya kromosom dengan tingkat kecocokan dengan populasi terbaik yang membentuk populasi baru. Kromosom yang terpilih untuk menjadi bagian dari populasi pada iterasi kedua adalah kromosom induk 2, 4, 6, 8, 9, dan kromosom anak 1, 2, 6, 7, 8 dengan nilai kecocokan yang tercantum dalam Tabel 11.

Tabel 11 Data populasi akhir pada iterasi 1

No	Kromosom	Truk-A	Truk-B	Nilai <i>fitness</i>
1	Kromosom induk 6	9(1)	9(2) 10	0.0070
2	Kromosom induk 8	9(1)	9(2) 10	0.0070
3	Kromosom induk 9	9(1)	9(2) 10	0.0070
4	Kromosom anak 2	9(1)	10 9(2)	0.0070
5	Kromosom anak 7	9(1)	9(2) 10	0.0070
6	Kromosom induk 2	10	9(2) 9(1)	0.0040
7	Kromosom induk 4	10	9(1) 9(2)	0.0040
8	Kromosom anak 1	10	9(2) 9(1)	0.0040
9	Kromosom anak 6	10	9(1) 9(2)	0.0040
10	Kromosom anak 8	10	9(2) 9(1)	0.0040
11	Kromosom induk 1	9(2)	9(1) 10	0.0018
12	Kromosom induk 3	9(2)	10 9(1)	0.0018
13	Kromosom induk 5	9(2)	10 9(1)	0.0018
14	Kromosom induk 7	9(2)	9(1) 10	0.0018
15	Kromosom induk 10	9(2)	10 9(1)	0.0018
16	Kromosom anak 3	9(2)	10 9(1)	0.0018
17	Kromosom anak 4	9(2)	9(1) 10	0.0018
18	Kromosom anak 5	9(2)	9(1) 10	0.0018

4.1.2.2 Depot Kedua

Berdasarkan hasil *nearest neighbour* untuk depot kedua, Truk-C melayani *node* 6 sebesar 110 karung, *node* 5 sebesar 171 karung, *node* 7 sebesar 84 karung, *node* 8 sebesar 112 karung, *node* 11 sebesar 53 karung, dan *node* 4 sebanyak 70 karung. Selanjutnya, Truk-D melayani *node* 2 sebesar 501 karung dan *node* 9 sebesar 99 karung. Data mengenai jarak antardesa dari depot pertama ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 12 Data jarak (km) desa/kelurahan yang dilayani Depot 2

<i>Node</i>	2	4(1)	4(2)	5	6	7	8	9	11
2	0	14.7	14.7	9.7	9.2	10.2	12.9	24.8	12.9
4(1) ^a	14.7	0	0	5.1	6.7	9.1	11.8	21.8	12.4
4(2) ^b	14.7	0	0	5.1	6.7	9.1	11.8	21.8	12.4
5	9.7	5.1	5.1	0.0	1.6	4.1	6.7	16.7	7.3
6	9.2	6.7	6.7	1.6	0.0	3.5	6.2	16.2	6.8
7	10.2	9.1	9.1	4.1	3.5	0.0	2.9	12.9	3.5
8	12.9	11.8	11.8	6.7	6.2	2.9	0.0	10.4	2.8
9	24.8	21.8	21.8	16.7	16.2	12.9	10.4	0	14.9
11	12.9	12.4	12.4	7.3	6.8	3.5	2.8	14.9	0

^a*Node* 4 yang dilayani pertama kali pada solusi *nearest neighbour*.

^b*Node* 4 yang dilayani kedua kali pada solusi *nearest neighbour*.

Langkah-langkah metode heuristik yang diterapkan pada depot pertama juga diterapkan pada depot kedua.

4.2 Analisis Hasil dari Algoritma Genetika

Pada bagian ini diberikan analisis hasil yang diperoleh dari metode heuristik (algoritma genetika). Solusi yang diperoleh dari metode ini akan dibandingkan dengan solusi serupa dari metode eksak. Selain itu, dilihat juga pengaruh perubahan beberapa nilai parameter terhadap biaya distribusi dan waktu eksekusi algoritma.

Solusi global optimum untuk MDVRPSD pada distribusi rastra di Kabupaten Ponorogo yang ditentukan dengan metode eksak diperoleh menggunakan *software* LINGO11.0. Hasil metode eksak ditampilkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Rute pendistribusian dengan metode eksak

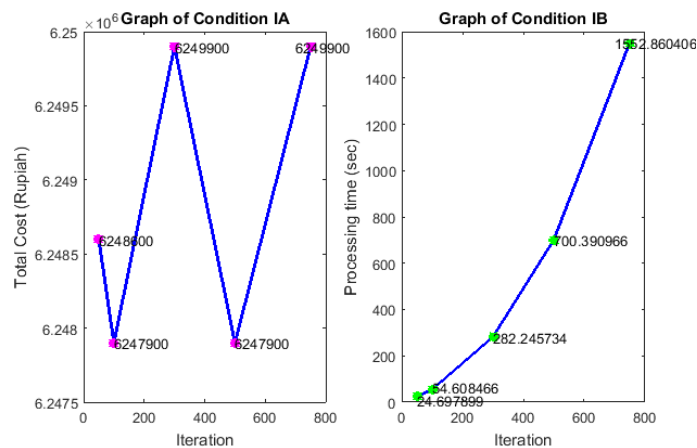
Truk	Rute	Jarak yang ditempuh (km)	Total beras yang didistribusikan (karung)
A	1 → 9 → 1	68.2	572
B	1 → 11 → 10 → 7 → 1	72.7	590
C	2 → 6 → 5 → 9 → 8 → 2	50.8	600
D	2 → 4 → 2	29.4	571
E	Tidak ada	0	0
Total		221.1	2333

Penentuan rute distribusi dalam penelitian ini menggunakan metode heuristik dengan perangkat lunak Matlab R2015a dengan memperhatikan beberapa kondisi/kasus.

Pada Kondisi I, banyak iterasi berbeda-beda, sedangkan ukuran populasi, probabilitas *crossover* P_c , dan probabilitas mutasi P_m bernilai tetap.

Tabel 14 Kondisi I metode heuristik

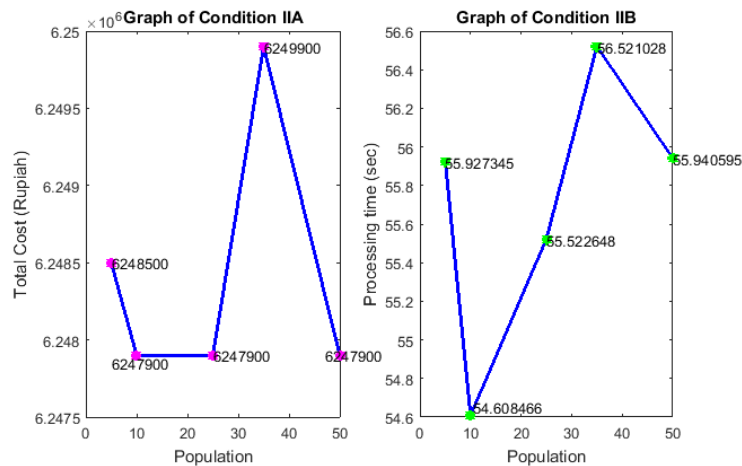
Iterasi	Populasi	P_c	P_m	Biaya (Rp)	Waktu (detik)
50	10	0.8	0.2	6.248.600	24.697899
100	10	0.8	0.2	6.247.900	54.608466
300	10	0.8	0.2	6.249.900	282.245734
500	10	0.8	0.2	6.247.900	700.390966
750	10	0.8	0.2	6.249.900	1552.860406



Gambar 3 Kasus I metode heuristik

Dari grafik pada Kondisi I, terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses penghitungan akan bertambah ketika banyak iterasi dinaikkan. Pada Kasus I total biaya yang paling mendekati solusi optimal bila menggunakan metode heuristik ialah Rp6.247.900,00 ketika jumlah iterasi 100 dan 500, serta ukuran populasi 10, $P_c = 80\%$, dan $P_m = 20\%$. Waktu yang dibutuhkan yaitu 54.608466 detik untuk 100 iterasi dan 700.390966 detik untuk 500 iterasi.

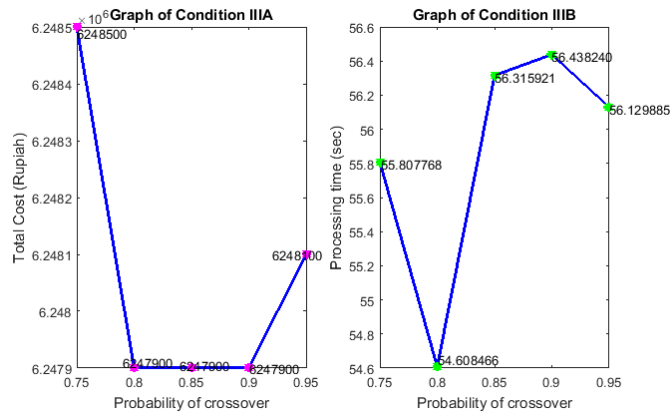
Pada Kondisi II, ukuran populasinya berbeda-beda (5, 10, 25, 35, 50), sedangkan banyak iterasi adalah 100, probabilitas *crossover* $P_c = 0.8$, probabilitas mutasi $P_m = 0.2$. Hasil yang diperoleh diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Kondisi II metode heuristik

Pada Kondisi II ini total biaya yang minimum adalah Rp6.247.900,00 ketika ukuran populasi 10, 25, dan 50. Waktu yang dibutuhkan yaitu 54.608466 detik untuk 10 populasi, 55.522648 detik untuk 25 populasi, dan 55.940595 detik untuk 50 populasi.

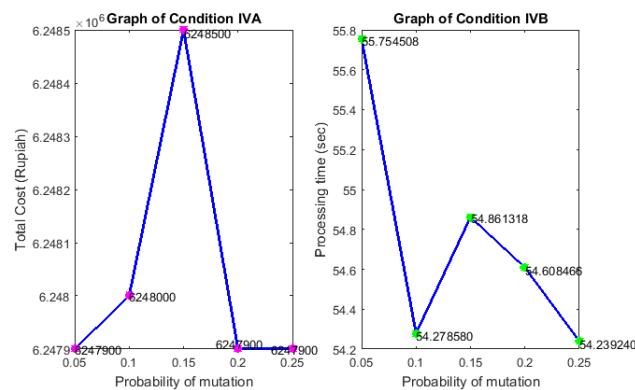
Pada Kondisi III, probabilitas *crossover* berbeda-beda (0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95), sedangkan nilai parameter lain tetap, yaitu banyak iterasi adalah 100, ukuran populasi adalah 10, probabilitas mutasi 0.2, dan hasilnya diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Kondisi III metode heuristik

Pada Kondisi III ini total biaya minimumnya adalah Rp6.247.900,00 ketika probabilitas *crossover* 0.80, 0.85, dan 0.90. Waktu yang dibutuhkan yaitu 54.608466 detik untuk $P_c = 0.80$, 56.315921 detik untuk $P_c = 0.85$, dan 56.438240 detik untuk $P_c = 0.90$.

Pada Kondisi IV, nilai probabilitas mutasi P_m berbeda-beda (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25), sedangkan jumlah iterasi (= 100), ukuran populasi (= 10), probabilitas *crossover* (= 0.80) bernilai tetap, dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 6.



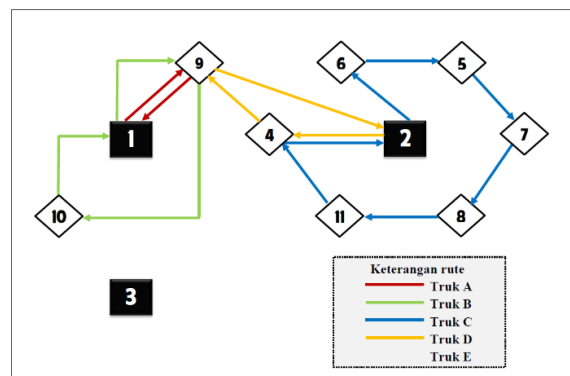
Gambar 6 Kondisi IV metode heuristik

Pada kondisi IV total biaya minimum yaitu Rp 6.247.900,00 ketika probabilitas mutasi 0.05, 0.20, dan 0.25, serta 100 iterasi, 10 ukuran populasi, dan $P_c = 0.80$. Waktu yang dibutuhkan yaitu 55.754508 detik untuk $P_m = 0.05$, 54.608466 detik untuk $P_m = 0.20$, dan 54.239240 detik untuk $P_m = 0.25$.

Salah satu hasil metode heuristik yang paling mendekati solusi optimal ditampilkan pada Tabel 15 dan Gambar 7. Karena algoritma genetika menggunakan bilangan acak dalam prosesnya, rute yang diperoleh *software* dapat berubah ketika melakukan proses ulang pencarian solusi.

Tabel 15 Rute pendistribusian dengan metode heuristik yang mendekati rute optimal

Truk	Rute	Jarak yang ditempuh (km)	Total beras yang didistribusikan (karung)
A	1 → 9 → 1	68.2	600
B	1 → 9 → 10 → 1	74.9	533
C	2 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 11 → 2	43.5	600
D	2 → 9 → 4 → 2	61.3	600
E	Tidak ada	0	0
Total		247.9	2333



Gambar 7 Rute pendistribusian beras dengan algoritma genetika

Total biaya yang dikeluarkan dengan menggunakan metode eksak pada pendistribusian rastra adalah sebesar Rp 6.221.100,00, membutuhkan waktu 43 menit 50 detik dengan iterasi sebanyak 17.743.909 kali. Pendistribusian menggunakan metode heuristik membuat biaya yang dikeluarkan sebesar Rp 6.247.900,00. Dari sini diperoleh selisih biaya yang dikeluarkan antara metode eksak dan metode heuristik untuk menentukan rute kendaraan adalah sebesar 0.43%.

Berdasarkan perbedaan input nilai parameter, hasil metode heuristik yang paling mendekati solusi optimal pada penelitian ini membutuhkan waktu eksekusi tertinggi 11 menit 40 detik untuk 500 iterasi, 10 populasi, probabilitas *crossover* 0.80, dan probabilitas mutasi 0.20. Waktu eksekusi terendah adalah 54.239240 detik untuk 100 iterasi, 10 populasi, probabilitas *crossover* 0.80, dan probabilitas mutasi 0.25. Dari sini terlihat bahwa waktu eksekusi *software* yang diperlukan menggunakan metode heuristik pada setiap kondisi lebih sedikit jika dibandingkan dengan waktu eksekusi pada metode eksak.

4 Simpulan

Penentuan rute kendaraan dalam masalah distribusi rastra di Kabupaten Ponorogo dapat dimodelkan sebagai *mixed integer programming* dalam bentuk *multidepot vehicle routing problem with split delivery* dan bisa diselesaikan menggunakan metode heuristik. Teknik heuristik yang diterapkan dalam penelitian ini adalah algoritma genetika dengan

pendekatan *nearest neighbour* untuk memperoleh solusi awal. Algoritma genetika menggunakan bilangan acak dalam pencarian solusi, sehingga setiap perhitungan mungkin menghasilkan rute yang berbeda.

Variasi nilai parameter memengaruhi waktu eksekusi dan hasil solusi yang dihasilkan. Jumlah generasi atau iterasi yang tinggi bisa mendekati solusi optimal pada batas tertentu. Namun, iterasi yang tinggi tidak selalu menghasilkan solusi yang lebih baik dari iterasi yang lebih rendah.

Ukuran populasi yang besar meningkatkan kemungkinan solusi pada setiap generasi. Meskipun meningkatkan ukuran populasi dapat memberikan solusi yang lebih baik, hasilnya bergantung pada individu atau kromosom dengan nilai *fitness* terbaik pada setiap generasi.

Probabilitas *crossover* yang tinggi menghasilkan eksplorasi pencarian solusi yang lebih luas karena lebih banyak kromosom yang terpilih sebagai induk; namun, nilai *crossover* yang tinggi tidak selalu tepat karena pemilihan kromosom induk yang acak.

Probabilitas mutasi yang rendah mengakibatkan sedikit kromosom anak yang dimutasi, sementara nilai mutasi yang tinggi menghasilkan kromosom anak yang berbeda secara signifikan dari kromosom induk. Oleh karena itu, evaluasi *fitness* diperlukan untuk menentukan kromosom terbaik pada setiap generasi selanjutnya.

Dari hasil percobaan, ukuran populasi, probabilitas *crossover*, dan probabilitas mutasi yang dinaikkan menunjukkan fluktuasi pada grafik waktu eksekusi. Penambahan iterasi juga memperpanjang waktu eksekusi. Dalam berbagai kondisi input parameter, penyelesaian menggunakan metode heuristik membutuhkan waktu lebih sedikit daripada metode eksak. Dalam penelitian ini, perbandingan biaya antara metode eksak dan heuristik adalah 0.43%.

Daftar Pustaka

- [1] Archetti C, Speranza MG. 2012. Vehicle routing problem with split deliveries. *Intl Trans in Op Res.* 19(2012):3-22. doi:10.1111/j.1475-3995.2011.00811.x.
- [2] Belfiore P, Tsugunobu H, Yoshizaki Y. 2008. Scatter search for vehicle routing problem with time windows and split deliveries. Di dalam: Caric T, Gold H, editor. *Vehicle Routing Problem*. Croatia (CRO): In-The. hlmn 1-14.
- [3] Braysy O, Gendreau M. 2005. Vehicle routing problem with time windows, part II : metaheuristics. *Transport Sci.* 39(1):119-139. doi:10.1287/trsc.1030.0057.
- [4] Hanum F, Hadi MRN, Aman A, Bakhtiar T. 2019. Vehicle routing problems in rice-for-the-poor distribution. *Decision Science Letters.* 8(2019):323-338. doi:10.5267/j.dsl.2018.11.001.
- [5] Jakara M, Skrinjar JP, Brnjac N. 2019. Vehicle routing problem – case study on logistics company in Croatia. *International Journal for Traffic and Transport Engineering.* 9(4):456 – 470. doi:10.7708/ijtte.2019.9(4).10.
- [6] Jayarathna N, Lanel J, Juman ZAMS. 2020. Five years of multi-depot vehicle routing problems. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics.* 5(2):109-123. doi:10.14254/jsdtl.2020.5-2.10.
- [7] Junior OSS, Lopes LAS, Bergmann U. 2011. A free geographic information system as a tool for multi-depot vehicle routing. *Brazilian Journal of Operations & Production Management.* 8(1):103-120. doi:10.4322/bjopm.2011.006.
- [8] Keskinurk T, Yildirim MB. 2011. A genetic algorithm metaheuristic for bakery distribution vehicle routing problem with load balancing. Di dalam: *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2011 International Symposium on. IEEE.* hlm 287-291; [diakses 15 Desember 2023] doi:10.1109/INISTA.2011.5946077.
- [9] Latiffianti E, Siswanto N, Firmandani RA. 2018. Split delivery vehicle routing problem with time windows: a case study. *IOP Conf. Ser Mater. Sci. Eng.* 337. hlm 1-8. doi:10.1088/1757-899X/337/1/012012.
- [10] Lubis FS, Herliansyah MK. 2017. Vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up

- services (VRPSDP) pada distribusi tabung gas LPG 3 kg (kasus: PT. Lentera Putera Sejahtera). Seminar Nasional Teknik Industri Universitas Gadjah Mada 2017; 2017 Nov 8; Yogyakarta, Indonesia. Yogyakarta: Program Studi Teknik Industri Departemen Teknik Mesin dan Industri FT UGM. hlm 22-29. <https://senti.ft.ugm.ac.id/wp-content/uploads/sites/454/2017/11/Buku-Prosiding-SeNTI-2017.pdf>
- [11] Nusmesse P, Rahawarin A, Paillin DB. 2016. Usulan penentuan rute dalam pendistribusian BBM bersubsidi (premium) pada PT. Pertamina TBBM Wayame Ambon ke SPBU di Pulau Ambon dengan pendekatan *vehicle routing problem*. *ARIKA*. 10(1):1-14.
- [12] Rachman B, Agustian A, Wahyudi. 2018. Efektivitas dan perspektif pelaksanaan program beras sejahtera (rastra) dan bantuan pangan non-tunai (BPNT). *Analisis Kebijakan Pertanian*. 16(1):1-18. doi:10.21082/akp.v16n1.2018.1-18.
- [13] Ray S, Soeanu A, Berger J, Debbabi. 2014. The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: model and solution algorithm. *Knowledge-Based Systems*. 71(2014):238-265. doi:10.1016/j.knosys.2014.08.006.
- [14] Ruiz-Meza J, Montes I, Perez A, Ramos-Marquez M. 2020. VRP model with time window, multiproduct and multidepot. *J APPL SCI ENG-A*. 23(2):239-247. doi:10.6180/jase.202006_23(2).0008.
- [15] Sarker RA, Newton CS. 2008. *Optimization Modelling: A Practical Approach*. Boca Raton: CRC Press
- [16] Sivanandam SN, Deepa SN. 2008. *Introduction to Genetic Algorithms*. New York: Springer.
- [17] Surekha P, Sumathi S. 2011. Solution to multi-depot vehicle routing problem using genetic algorithms. *World Applied Programming*. 1(3):118-131.
- [18] Tanujaya W, Dewi DRS, Endah D. 2011. Penerapan algoritma genetik untuk penyelesaian masalah *vehicle routing* di PT. MIF. *Widya Teknik*. 10(1):92-102.
- [19] Toth P, Vigo D. 2002. *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM-MOS.
- [20] Wilck JH, Cavalier TM. 2012. A genetic algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *American Journal of Operations Research*. 2(2):207-216. doi:10.4236/ajor.2012.22024.