

Penerapan Algoritma *Sweep* dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai Alternatif Menentukan Rute Distribusi

Ilham Saiful Fauzi¹, Imaniah Bazlina Wardani², Indra Lukmana Putra³, Peni Puspitasari⁴

^{1,3,4}Jurusan Akuntansi, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

²Program Studi Tadris Biologi, FTIK, UIN Kiai Haji Achmad Siddiq Jember, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Jul 07, 2023

Revised Dec 20, 2023

Accepted Dec 28, 2023

Keywords:

Distribution

Route

CVRP

PSO algorithm

NN algorithm

ABSTRACT

One aspect of marketing activities is distribution. In the process of distributing goods, it is important to determine the optimal route that minimize mileage and reduce costs. This study aims to provide alternative solutions in determining distribution routes with the shortest distance which has implications for shorter travel times and lower costs. This research adapts the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) model with the approach of sweep and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to determine the route. To generate a comparison route, we use the Nearest Neighbor (NN) algorithm. The result was that 100 agents were divided into 6 clusters and the total distance of the PSO-generated route is 218.115 units or 85.70% of the route distance generated by Nearest Neighbor algorithm.

Copyright © 2023 Universitas Indraprasta PGRI.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Ilham Saiful Fauzi,

Jurusan Akuntansi,

Politeknik Negeri Malang,

Jl. Soekarno Hatta No. 9, Lowokwaru, Malang, Indonesia.

Email: ilham.fauzi@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Salah satu aspek penting dari kegiatan pemasaran adalah distribusi. Distribusi merupakan bagian penting dari alur pemasaran yang menjadi jembatan pada proses penyampaian barang atau jasa yang diproduksi oleh produsen sebagai penghasil kepada konsumen yang membutuhkan [1]. Kegiatan distribusi memiliki peran penting untuk menjamin bahwa konsumen sebagai pengguna produk dapat menerima produk yang dihasilkan oleh produsen dengan efektif dan efisien. Rangkaian pada proses distribusi akan membantu masyarakat untuk memperoleh barang dan jasa yang dibutuhkan dengan lebih mudah meskipun lokasi produsen bisa saja jauh dari lokasi masyarakat tersebut. Distribusi meningkatkan keterjangkauan masyarakat terhadap barang dan jasa yang menjadi kebutuhan atau keinginan mereka [2].

Di era persaingan pasar yang ketat, setiap perusahaan yang ingin tetap bertahan perlu memperhatikan sistem organisasi mereka terkait dengan rantai pasok (*supply chain*). Secara khusus, dibutuhkan analisis oleh perusahaan terkait rantai pasok untuk meningkatkan kualitas layanan kepada pelanggan tanpa disertai dengan pertumbuhan biaya yang tidak terkontrol. Setiap perusahaan dituntut untuk meningkatkan efisiensi operasional logistik mereka. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengoptimalkan arus distribusi barang antara produsen sebagai penghasil dan konsumen sebagai pengguna.

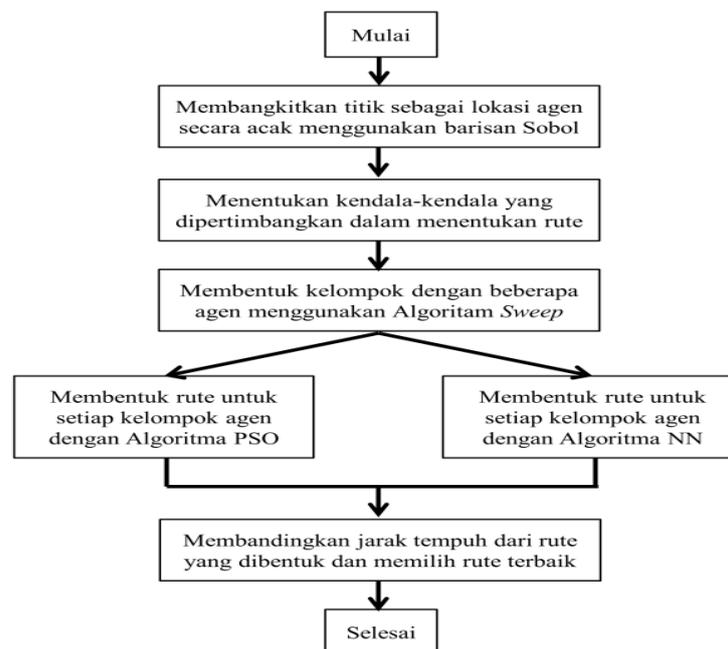
Selain sistem distribusi, terdapat beberapa faktor lain yang mempengaruhi proses distribusi barang yakni transportasi dan rute distribusi [3]. Salah satu permasalahan klasik dalam proses pendistribusian barang adalah kesulitan dalam menentukan rute distribusi yang optimal sehingga muncul masalah keterlambatan barang diterima konsumen atau meningkatnya biaya yang dikeluarkan distributor untuk menyalurkan barang.

Pola pendistribusian barang yang disusun tanpa pertimbangan yang terencana dan matang, misalnya hanya berdasarkan pengalaman pengendara atau pengelompokan wilayah, tidak menjamin diperoleh rute terpendek sehingga berdampak pada meningkatnya jarak tempuh kendaraan, waktu tempuh yang lebih lama dan ongkos lebih besar selama proses pendistribusian barang kepada para konsumen.

Menentukan rute distribusi barang yang efektif dan efisien bukan perkara mudah, apalagi jika terdapat banyak agen yang harus didatangi dan lokasinya tersebar di berbagai wilayah. Kendala tambahan seperti jumlah permintaan produk yang berbeda dari tiap agen dan keterbatasan kapasitas angkut kendaraan juga perlu diperhatikan [4]. Permasalahan menentukan rute dengan meminimalkan biaya dari suatu distributor ke beberapa agen yang tersebar acak di suatu wilayah tertentu dengan kapasitas kendaraan terbatas dan jumlah permintaan tiap agen yang berbeda dikenal dengan istilah *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*. Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk menyelesaikan masalah CVRP, diantaranya menggunakan algoritma *sweep* [5,6], algoritma *nearest neighbor* [7], algoritma PSO [8,9], dan algoritma genetik [10,11]. Tujuan penelitian ini adalah memberikan alternatif solusi dalam menentukan rute distribusi sehingga menghasilkan rute dengan jarak terpendek, waktu tempuh singkat, dan biaya rendah dengan memperhatikan kapasitas kendaraan untuk melayani permintaan agen. Kombinasi algoritma *sweep* dan PSO digunakan untuk menentukan rute dan selanjutnya dibandingkan dengan algoritma *nearest neighbor*.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian terapan (*applied reserach*). Penelitian terapan adalah metode penelitian yang lebih diarahkan untuk menciptakan inovasi dan pengembangan iptek [12]. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan solusi dari suatu masalah yang ada di masyarakat dan industri yang dalam hal ini berkaitan dengan penentuan rute distribusi yang optimal. Alur pelaksanaan penelitian ini disajikan dalam Gambar 1 sebagai berikut.



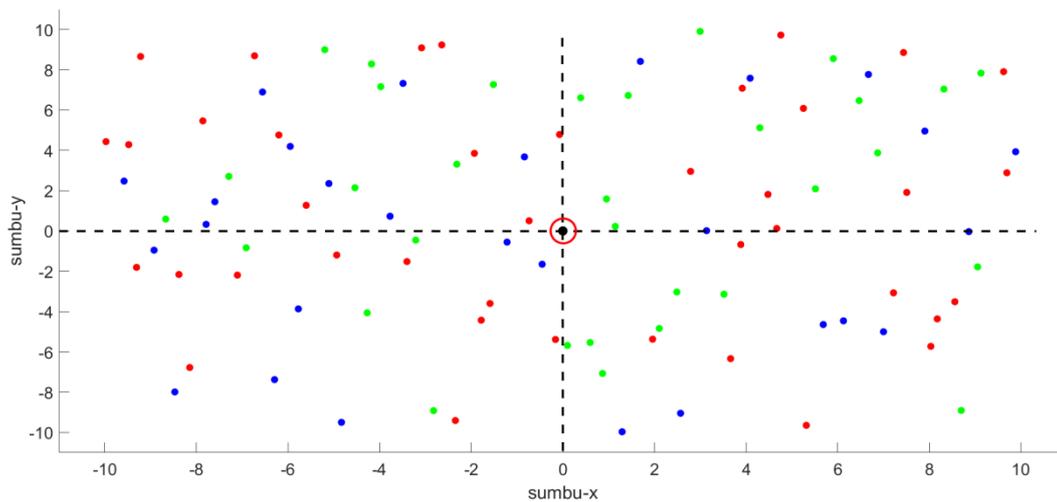
Gambar 1. Alur Penelitian

2.1 Data Penelitian

Penelitian ini bersifat umum karena tidak menggunakan data riil sehingga dapat diadaptasi oleh pihak terkait untuk diaplikasikan pada data yang dimiliki. Dengan menggunakan metode barisan Sobol, sebanyak 100 titik dibangkitkan secara acak pada bidang kartesius $\{(x, y) | -10 \leq x, y \leq 10\}$ yang mewakili lokasi dari 100 agen. Penggunaan barisan Sobol untuk menghasilkan titik acak didasari pertimbangan bahwa barisan ini menghasilkan partisi yang seragam dan distribusi yang baik. Barisan Sobol dirancang untuk memberikan distribusi titik-titik yang lebih merata dalam ruang pencarian khususnya untuk dimensi tinggi, dan telah banyak digunakan dalam penelitian yang berkaitan dengan pembangkitan data secara acak [13,14].

Lokasi distributor diatur sebagai titik pusat koordinat. Permintaan barang dari setiap agen, dinyatakan dengan d , juga dibangkitkan secara acak pada interval $[10,100]$. Lokasi masing-masing agen beserta jumlah permintaan barang ditunjukkan dalam Gambar 2 sebagai berikut. Titik hitam yang terletak di pusat koordinat

(0,0) menyatakan lokasi distributor. Titik-titik ditampilkan dengan warna yang berbeda sesuai dengan permintaan agen. Titik hijau adalah agen dengan permintaan $10 \leq d \leq 40$, titik biru adalah agen dengan permintaan $40 < d \leq 70$, dan titik merah adalah agen dengan permintaan $70 < d \leq 100$.



Gambar 2. Lokasi masing-masing agen yang diperoleh dari proses randomisasi

Hasil randomisasi permintaan untuk masing-masing agen menghasilkan total permintaan sebesar 5.773 produk. Diasumsikan bahwa distributor memiliki kendaraan dengan kapasitas angkut yang sama yakni 1.000 produk, sehingga dibutuhkan enam kendaraan untuk mendistribusikan produk ke 100 agen yang menjadi tanggung jawab distributor tersebut. Tahap selanjutnya adalah penentuan kelompok (*cluster*) menggunakan algoritma sweep dan pembentukan rute pada masing-masing kelompok (*cluster*) menggunakan algoritma PSO. Sebagai pembandingan akan digunakan juga algoritma *nearest neighbor* (NN) untuk membentuk rute mengingat algoritma ini adalah algoritma yang paling umum digunakan untuk membentuk rute dalam penyelesaian masalah CVRP. Pada algoritma NN, lokasi selanjutnya yang dikunjungi hanya titik tujuan terdekat dari lokasi sebelumnya. Setelah semua agen dilayani, maka selanjutnya rute ditutup.

2.2 Masalah CVRP

Permasalahan membentuk rute yang meminimumkan biaya dari suatu depot ke beberapa agen dengan lokasi menyebar di suatu wilayah tertentu dengan jumlah permintaan berbeda disertai kendala tambahan berupa kapasitas kendaraan yang terbatas dikenal dengan istilah *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) [15]. Penentuan rute dilakukan dengan pertimbangan bahwa setiap agen akan dikunjungi tepat satu kali oleh satu kendaraan. Semua rute yang terbentuk berawal dan berakhir di depot dan semua agen harus terlayani, artinya setiap agen masuk dalam rute tertentu. Penentuan rute dalam CVRP tidak hanya menekankan pada biaya minimum tetapi juga memperhatikan kapasitas masing-masing kendaraan yang terbatas dan homogen, yakni memiliki kapasitas sama [16]. Setiap kendaraan harus mengunjungi beberapa agen dengan permintaan tertentu dan sudah diketahui sebelumnya. Proses distribusi oleh setiap kendaraan hanya dilakukan dalam satu kali perjalanan yang berawal dari depot ke sejumlah agen dan berakhir di depot yang sama. Hal ini bertujuan untuk membentuk suatu sistem penyampaian barang dengan rute lebih efektif dan efisien dari pihak produsen kepada pihak konsumen yang membutuhkan.

Secara matematis, CVRP didefinisikan sebagai suatu graf $G = (V, E)$ dengan himpunan titik $V = \{0, 1, \dots, N\}$ dan himpunan sisi $E = \{(i, j) : i, j \in V\}$ [17]. Titik 0 mewakili depot (distributor) dan titik lainnya $\{1, \dots, N\}$ menunjukkan agen dengan permintaan sejumlah q_i , dimana $i = \{1, \dots, N\}$, yang harus dikirimkan. Jarak titik i dan titik j didefinisikan dengan $d_{ij} > 0$. Dengan depot tunggal 0, kendaraan sejumlah K dengan batas kapasitas homogen Q berangkat dan kembali ke depot tersebut. Jika kendaraan k berpindah dari agen i ke agen j secara langsung, maka $X_{ij}^k = 1$ selainnya $X_{ij}^k = 0$. Fungsi objektif dari CVRP ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\text{Minimize } \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K d_{ij} X_{ij}^k \quad (1)$$

yang meminimumkan total jarak tempuh kendaraan. Terdapat beberapa kendala yang ada pada CVRP dalam penelitian ini. Persamaan 2 dan persamaan 3 menunjukkan bahwa setiap agen dilayani tepat satu kendaraan. Kendala total permintaan agen di masing-masing rute tidak lebih dari kapasitas Q ditunjukkan di persamaan 4. Persamaan 5 menunjukkan bahwa setiap rute harus berawal dan berakhir di depot yang sama.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ij}^k = 1 \quad j \in \{1, \dots, N\} : i \neq j \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N X_{ij}^k = 1 \quad i \in \{1, \dots, N\} : i \neq j \tag{3}$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N X_{ij}^k q_i \leq Q \quad k \in \{1, \dots, K\} \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij}^k = \sum_{j=1}^N X_{ji}^k \leq 1 \quad i = 0, k \in \{1, \dots, K\} \tag{5}$$

2.3 Algoritma Sweep

Diperkenalkan pertama kalinya oleh Gillet dan Miller pada tahun 1974, algoritma sweep merupakan metode pengelompokan paling sederhana dalam penyelesaian CVRP [18]. Titik pusat koordinat diatur sebagai lokasi distributor dan masing-masing agen tersebar secara acak sesuai lokasinya. Pada dasarnya algoritma ini mengumpulkan agen-agen dengan arah yang sama dari distributor ke dalam satu rute yang akan ditempuh oleh salah satu kendaraan. Langkah algoritma sweep adalah sebagai berikut.

- 1) Menetapkan pusat koordinat sebagai lokasi distributor dan masing-masing agen digambarkan dalam koordinat kartesius sesuai lokasi.
- 2) Melakukan konversi dari koordinat kartesius ke dalam koordinat polar untuk mengetahui koordinat polar untuk setiap agen yang diketahui.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \theta = \text{arc tan} \left(\frac{y}{x} \right) \tag{6}$$

- 3) Membentuk kelompok dengan memperhatikan kapasitas kendaraan dimulai dari agen dengan sudut polar paling kecil dan dilanjutkan berurutan sampai agen dengan sudut polar paling besar. Klasterisasi berhenti saat total permintaan satu kelompok melebihi kapasitas.
- 4) Mengulangi langkah 3 untuk membuat pengelompokan baru dimulai dari agen dengan sudut polar paling kecil dan belum tergabung dalam kelompok sebelumnya. Semua agen harus terlayani oleh salah satu kendaraan, artinya harus masuk dalam salah satu kelompok (klaster).

2.4 Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

Pada tahun 1995, Eberhart dan Kennedy pertama kali memperkenalkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) [19]. Algoritma ini meniru perilaku sosial suatu kawanan makhluk hidup, seperti ikan, burung, lebah, rayap, atau semut. Masing-masing individu memiliki perilaku secara terdistribusi dengan memanfaatkan kecerdasan sendiri dan juga mendapat pengaruh dari perilaku kelompok [20]. Apabila seekor burung mendapati rute yang benar ke arah lokasi sumber makanan, maka anggota kelompok yang lain akan dapat menyusul dan mengikuti rute tersebut meskipun lokasinya saling berjauhan. Dalam konteks optimasi multivariabel, diasumsikan bahwa koloni memiliki suatu ukuran dan posisi awal setiap individu tersebar secara acak di suatu ruang. Masing-masing individu mempunyai dua karakteristik, yaitu posisi dan kecepatan. Selama bergerak di dalam ruang, individu akan mengingat dimana posisi terbaik yang sebelumnya pernah dilintasi. Setiap individu saling bertukar informasi terkait posisi terbaiknya kepada individu lain dan akan mengatur ulang posisi dan kecepatannya.

Simulasi algoritma ini dilakukan dalam ruang berdimensi hingga dengan beberapa iterasi, dimana posisi partikel di masing-masing iterasi akan semakin mendekati ke tujuan yang dicari. Santosa [21] menjabarkan algoritma PSO ke dalam langkah-langkah berikut ini.

- 1) Misalkan N adalah jumlah partikel (ukuran kelompok). Ukuran N yang dipilih sebaiknya tidak terlalu besar untuk mengurangi penghitungan nilai fungsi dalam proses menemukan solusi dan juga tidak terlalu kecil sehingga diperoleh banyak posisi yang nantinya menuju solusi terbaik.

- 2) Populasi awal X dibangkitkan secara acak dalam interval $[a, b]$ dan diperoleh X_1, X_2, \dots, X_N . Notasi $X_j(i)$ menyatakan partikel ke- j pada iterasi ke- i , sehingga $X_1(0), X_2(0), \dots, X_N(0)$ adalah partikel-partikel yang terbentuk di awal. Hitung nilai fungsi objektif untuk masing-masing partikel dan hasilnya dinyatakan dalam:

$$f[X_1(0)], f[X_2(0)], \dots, f[X_N(0)] \quad (7)$$

- 3) Hitung kecepatan masing-masing partikel. Setiap partikel memiliki kecepatan tertentu saat bergerak menuju target. Diasumsikan semua partikel memiliki kecepatan awal sama dengan nol. Set iterasi $i = 1$.
- 4) Temukan 2 parameter untuk setiap partikel j pada iterasi ke- i , yakni $P_{best,j}$ dan G_{best} . Variabel $P_{best,j}$ adalah nilai terbaik dari $X_j(i)$ sejauh ini dengan nilai fungsi tujuan $f[X_j(i)]$ paling kecil yang didapat oleh partikel j di iterasi sebelumnya. Variabel G_{best} adalah nilai terbaik dari semua partikel $X_j(i)$ yang didapat hingga iterasi ke- i dengan nilai fungsi objektif paling kecil dari semua partikel-partikel pada proses iterasi-iterasi yang telah dilakukan sebelumnya.
- 5) Lakukan perbaruan kecepatan setiap partikel ke- j pada iterasi ke- i .

$$V_j(i) = V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - x_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best} - x_j(i-1)] \quad (8)$$

untuk $j = 1, 2, \dots, N$. Konstanta c_1 dan c_2 menyatakan kecerdasan sendiri (kognitif) dan pengaruh kelompok (sosial). Konstanta r_1 dan r_2 adalah bilangan acak berdistribusi uniform pada 0 dan 1.

- 6) Lakukan perbaruan posisi (koordinat) setiap partikel ke- j pada iterasi ke- i dengan rumus:

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad (9)$$

untuk $j = 1, 2, \dots, N$. Selanjutnya hitung nilai fungsi objektif untuk masing-masing partikel yang diperbarui dan hasilnya dinyatakan dalam:

$$f[X_1(i)], f[X_2(i)], \dots, f[X_N(i)] \quad (10)$$

- 7) Periksa kekonvergenan dari solusi yang diperoleh saat ini. Jika belum konvergen maka kembali ke langkah 4 untuk memperbarui iterasi, $i = i + 1$, yakni mengevaluasi nilai $P_{best,j}$ dan G_{best} yang baru. Iterasi terus dilanjutkan hingga semua partikel mengarah ke satu tujuan yang sama. Kriteria penghentian biasanya digunakan dengan membatasi iterasi, i_{max} .

2.5 Algoritma Nearest Neighbor (NN)

Untuk memecahkan masalah pembentukan rute perjalanan, Algoritma *Nearest Neighbor* merupakan salah satu algoritma heuristik yang dapat digunakan [22]. Algoritma ini membentuk rute distribusi dari satu titik awal (depot) ke sejumlah titik lainnya (agen) dan kembali ke depot. Setelah setiap agen dikelompokkan ke dalam beberapa kelompok agen dengan menggunakan Algoritma *Sweep*, tahapan selanjutnya adalah membentuk rute untuk masing-masing kelompok. Pembentukan rute untuk setiap kelompok dengan menggunakan Algoritma NN dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut [23].

- 1) Lakukan proses inialisasi dengan memilih depot sebagai titik awal keberangkatan.
- 2) Pilih agen yang belum dikunjungi dan memiliki jarak terdekat dengan depot saat ini. Tambahkan agen tersebut ke dalam rute.
- 3) Perbarui titik keberangkatan menjadi agen yang baru ditambahkan.
- 4) Ulangi langkah-langkah tersebut sampai semua agen dalam satu kelompok telah dikunjungi.
- 5) Setelah semua agen telah dikunjungi, tambahkan langkah terakhir untuk kembali ke depot. Depot menjadi titik terakhir dalam rute.

2.6 Evaluasi Rute Terbaik

Rute yang terbentuk dari Algoritma PSO dan Algoritma NN selanjutnya dibandingkan untuk menentukan rute manakah yang terbaik. Dalam konteks CVRP, rute optimal adalah kombinasi perjalanan yang memenuhi semua kendaraan dan meminimalkan jarak tempuh atau waktu tempuh, serta memenuhi semua kendala dan batasan yang diberlakukan [24]. Pada penelitian ini, penentuan rute terbaik berdasarkan jarak tempuh kendaraan di masing-masing kelompok agen. Jarak antara titik ke- i dan titik ke- j , disimbolkan dengan $D_{i,j}$, dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (11)$$

dengan (x, y) menyatakan lokasi koordinat suatu titik. Misalkan K menyatakan banyaknya agen di suatu kelompok. Distributor sebagai titik awal keberangkatan diberi label 0, sekaligus sebagai titik terakhir dari suatu rute diberi label $K + 1$. Agen yang pertama dikunjungi diberi label 1, agen selanjutnya diberi label 2, dan seterusnya hingga agen terakhir yang dikunjungi diberi label K . Total jarak tempuh kendaraan dalam satu rute kelompok agen dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$T = \sum_{n=0}^K D_{n,n+1} \tag{12}$$

Dengan menggunakan rumus tersebut akan dihitung total jarak tempuh kendaraan dari rute yang dibentuk oleh Algoritma PSO (T_{PSO}) dan Algoritma NN (T_{NN}). Rute terbaik adalah rute yang memberikan jarak tempuh paling pendek sehingga kendaraan akan membutuhkan waktu lebih singkat saat proses distribusi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Statistika Deskriptif

Dengan melakukan randomisasi titik menggunakan barisan Sobol diperoleh 100 titik yang tersebar acak pada daerah pencarian sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 1 dan lebih lengkapnya disajikan dalam tabel di Apendiks. Proses randomisasi dilakukan dengan menggunakan software Matlab. Selanjutnya data lokasi dan permintaan untuk masing-masing agen dianalisis dan hasil analisis statistika deskriptif yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

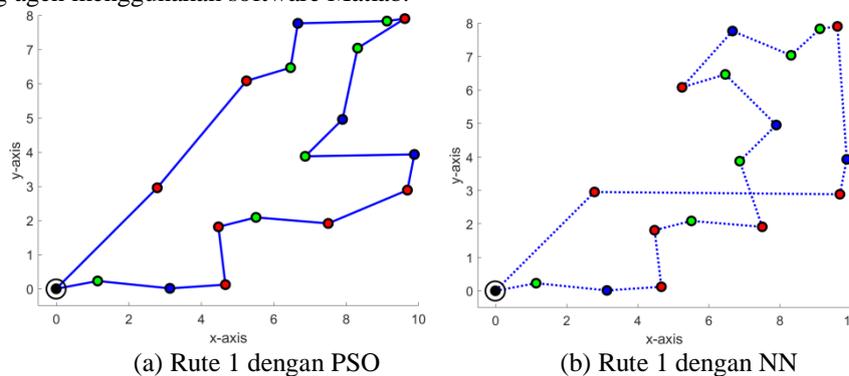
Tabel 1. Statistika Deskriptif

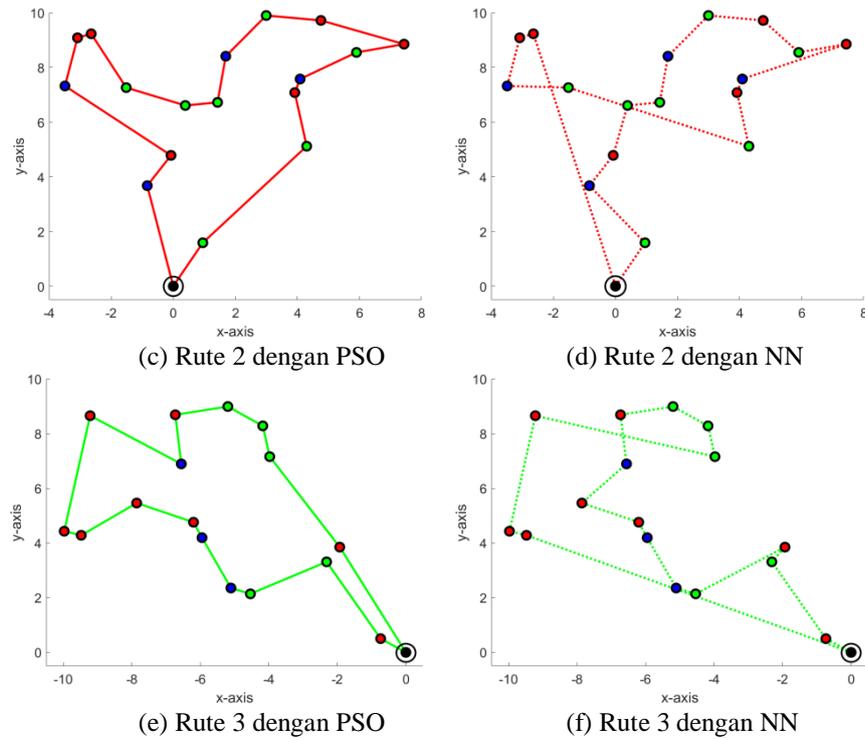
Label	N	Mean	Varians	Std. Dev	Min	Max
x	100	0,00	34,09	5,84	-9,97	9,88
y	100	0,86	71,22	5,59	-9,97	9,90
q	100	57,7	702,8	26,5	11,0	97,0

Nilai x menyatakan absis dari lokasi agen pada sumbu- x dan nilai y menyatakan ordinat pada sumbu- y . Nilai q menyatakan banyaknya permintaan untuk masing-masing agen. Banyaknya nilai yang dibangkitkan adalah sama, yakni 100. Secara umum, lokasi agen terdistribusi dengan baik dan tersebar secara merata pada interval pencarian di bidang kartesius $\{(x, y) | -10 \leq x, y \leq 10\}$.

3.2 Perbandingan Jarak Tempuh

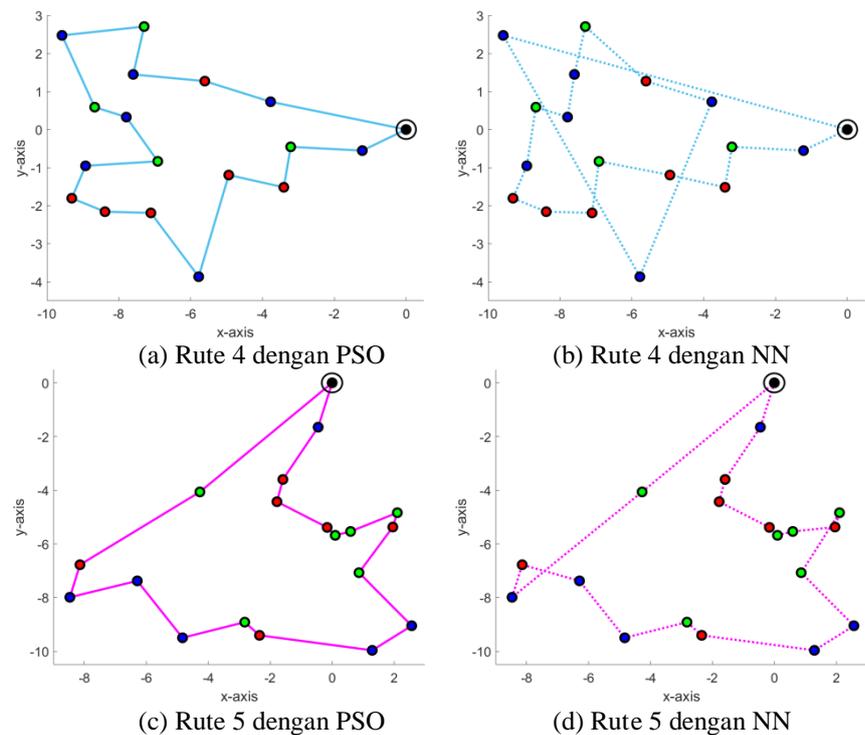
Titik lokasi agen yang diperoleh dari randomisasi titik sebanyak 100 lokasi. Jumlah total produk yang diminta oleh masing-masing agen adalah 5.773 produk. Dengan menggunakan algoritma sweep yang mengurutkan sudut polar dimulai dari sudut paling kecil hingga sudut polar terbesar berdasarkan kapasitas maksimal kendaraan yakni 1.000 produk menghasilkan sebanyak 6 kluster. Proses menentukan kluster untuk masing-masing agen menggunakan software Matlab.

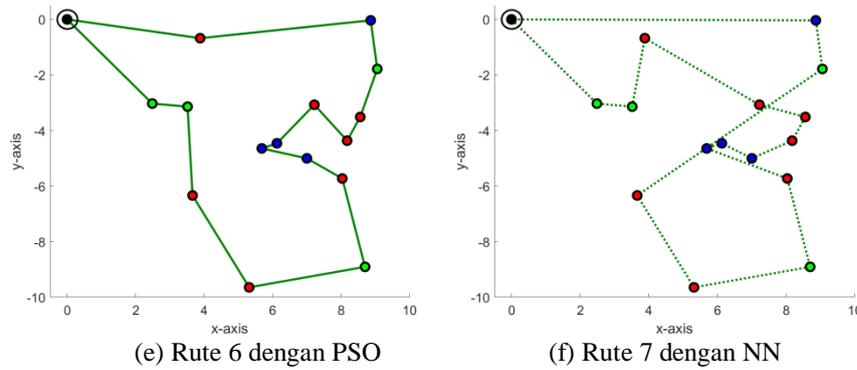




Gambar 3. Rute yang terbentuk pada kluster 1, 2 dan 3 dengan algoritma PSO dan algoritma NN

Tahap selanjutnya adalah menentukan rute untuk masing-masing kluster. Proses penentuan rute dilakukan menggunakan dua metode, yaitu algoritma PSO dan algoritma NN sebagai pembandingan mengingat algoritma NN adalah algoritma yang paling sering digunakan dengan hanya mempertimbangkan titik terdekat untuk dilalui selanjutnya. Rute dimulai dari distributor dan nantinya akan kembali ke distributor setelah semua agen di masing-masing kluster telah dilewati. Rute yang terbentuk dari algoritman PSO dan NN untuk kluster 1, 2 dan 3 ditampilkan di Gambar 3, sedangkan rute untuk kluster 4, 5 dan 6 ditampilkan di Gambar 4.



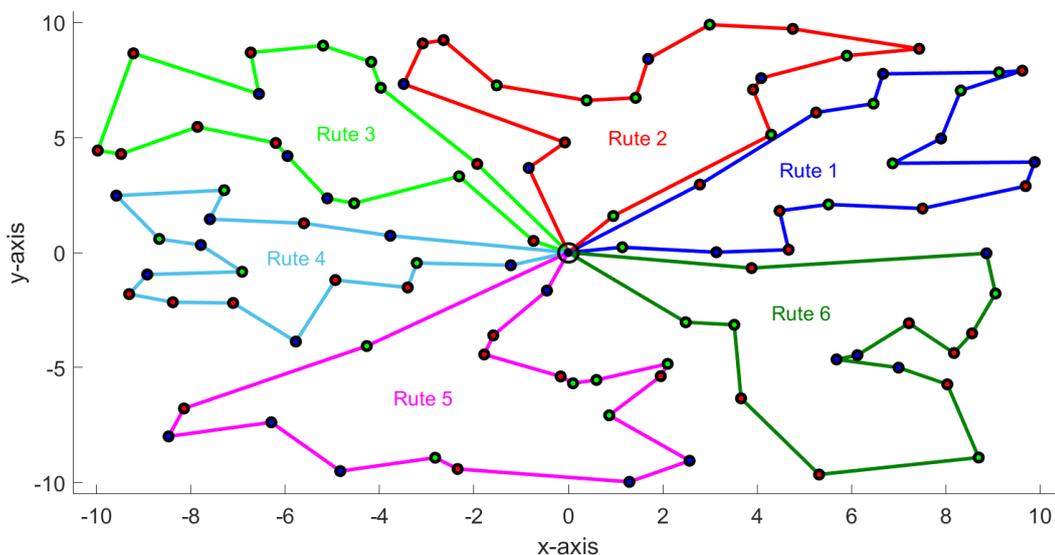


Gambar 4. Rute yang terbentuk pada kluster 4, 5 dan 6 dengan algoritma PSO dan algoritma NN

Pada Gambar 3 dan Gambar 4, rute yang dibentuk untuk masing-masing kluster oleh algoritma PSO ditunjukkan oleh garis lurus di gambar kiri (a,c,e). Sedangkan hasil dari algoritma NN ditunjukkan oleh garis putus-putus di gambar kanan (b,d,f). Secara umum rute yang dihasilkan oleh algoritma PSO membentuk kurva tertutup sehingga menghasilkan panjang lintasan yang lebih pendek jika dibandingkan dengan rute yang dibentuk oleh algoritma NN. Rute yang dihasilkan algoritma NN memuat beberapa perpotongan lintasan sehingga mengakibatkan jarak tempuh yang lebih jauh dan tentu saja tidak efektif digunakan untuk proses distribusi produk. Perpotongan ini muncul karena landasan utama pemilihan lokasi kunjungan berikutnya dari algoritma NN adalah titik terdekat dari titik sebelumnya. Gabungan dari semua rute yang diperoleh dari algoritma PSO untuk masing-masing kluster ditampilkan di Gambar 5.

Tabel 2. Perbandingan Jarak Tempuh

Rute	Banyak Agen	Total Permintaan	Jarak PSO	Jarak NN	Persentase Efisiensi
1	17	931	34,718	38,039	91,27%
2	17	934	38,112	43,689	87,23%
3	16	992	35,629	41,294	86,28%
4	17	972	31,955	43,912	72,77%
5	18	985	39,205	40,152	97,64%
6	15	959	38,496	47,413	81,19%
Total	100	5.773	218,115	254,499	85,70%



Gambar 5. Rute distribusi produk yang terbentuk dari algoritma PSO

Dari semua kluster yang dibentuk menggunakan algoritma sweep sebelumnya, algoritma PSO mampu menghasilkan rute dengan jarak lebih pendek dibandingkan rute dari algoritma NN. Perbandingan jarak tempuh, persentase efisiensi rute dan total produk untuk masing-masing rute disajikan dalam Tabel 2.

Dari algoritma PSO, rute dengan jarak terpendek adalah rute 4 yang melayani 17 agen dengan jarak 31,955 satuan, sedangkan jarak terpanjang adalah rute 5 yang melayani 18 agen dengan jarak 39,205 satuan. Rute 6 melayani agen dengan jumlah paling sedikit, yakni 16 agen dengan total permintaan 959 produk. Secara keseluruhan, total jarak rute semua kluster yang diperoleh dari PSO adalah 85,70% dari total jarak rute yang dihasilkan NN. Berdasarkan persentase efisiensi, rute hasil PSO dengan efisiensi terbaik dibandingkan rute hasil NN ditunjukkan oleh rute 4, yakni jarak rute hasil PSO adalah 72,77% dari jarak rute hasil NN. Pada rute 5, algoritma NN menghasilkan rute yang baik dan mendekati rute yang dihasilkan oleh algoritma PSO, dimana hal ini tidak ditunjukkan di rute lain.

Dalam menentukan suatu rute distribusi, aspek penting selain jarak tempuh adalah biaya yang dikeluarkan dan waktu tempuh kendaraan. Mengingat penelitian ini tidak menggunakan data riil, maka diasumsikan bahwa waktu tempuh adalah hasil pembagian jarak dengan kecepatan konstan kendaraan saat proses distribusi dan biaya diperoleh dari biaya penggunaan bahan bakar dengan asumsi jarak yang sama membutuhkan bahan bakar dengan jumlah sama. Penelitian lanjutan dapat dikembangkan dengan menggunakan data sebenarnya dan memperhatikan waktu tempuh dan biaya sesuai dengan kondisi jalan dan tingkat kesulitan masing-masing rute yang tentunya berbeda satu dengan lainnya.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan hasil beberapa penelitian sebelumnya, yakni algoritma PSO adalah salah satu algoritma yang cukup efektif dalam menentukan rute distribusi terbaik pada masalah CVRP. Penelitian yang dilakukan oleh Utami [25] menunjukkan bahwa algoritma PSO menghasilkan rute dengan jarak tempuh 45,33% lebih pendek dan efisiensi biaya sebesar 7,08% dalam sekali perjalanan. Hannan dkk. [26] melakukan penelitian tentang penjadwalan pengumpulan sampah dan diperoleh hasil bahwa algoritma PSO menghasilkan rute dengan efisiensi sebesar 70-75%. Hasil serupa juga ditunjukkan oleh Venkatesan dkk. [9] bahwa PSO mampu membangun rute untuk melayani pelanggan dengan jarak tempuh minimum dan kapasitas kendaraan maksimum sehingga efisiensi rute lebih baik.

4. PENUTUP

Penelitian ini untuk memberikan alternatif solusi dalam menentukan rute distribusi dalam masalah CVRP untuk menghasilkan rute dengan jarak tempuh terpendek. Data yang digunakan dibangun melalui randomisasi titik dengan barisan Sobol dan diperoleh 100 lokasi agen yang tersebar acak di daerah pencarian. Pembentukan kluster dilakukan dengan menggunakan algoritma sweep dan menghasilkan 6 kluster. Pembentukan rute untuk masing-masing kluster dilakukan dengan menggunakan algoritma PSO. Sebagai pembandingan, algoritma *nearest neighbor* (NN) juga digunakan untuk menentukan rute pada setiap kluster. Total jarak tempuh rute hasil PSO adalah 85,70% dari total jarak rute hasil NN, yang artinya memiliki efisiensi jarak sebesar 14,30%. Waktu tempuh dan biaya sebanding dengan jarak tempuh kluster.

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dalam berbagai aspek. Dengan menggunakan data riil, waktu tempuh dan biaya dapat dipengaruhi oleh kondisi medan dan tingkat kesulitan akses. Dalam beberapa kasus dapat ditambahkan kendala seperti kemacetan lalu lintas dan emisi karbon untuk pengiriman produk dingin menggunakan lemari pendingin. Dari aspek metode, pembentukan kluster menggunakan algoritma sweep dapat dikembangkan lebih adaptif sehingga tidak selalu dimulai dari arah sumbu- x positif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putri, W. E., Syahputra, T., & Rahmadiansyah, D. (2020). Sistem Pendukung Keputusan Menentukan Prioritas Distribusi Rokok Di Wilayah Langkat Pada PT. Surya Kekal Mandiri Menggunakan Metode Multi Objective Optimization On The Basis Of Ratio Analysis (MOORA). *Jurnal Cyber Tech*, 3(5), 844–855.
- [2] Ruauw, E. (2015). Kajian distribusi pangan pokok beras di Kabupaten Kepulauan Talud. *Agri-Sosioekonomi*, 11(1), 58–68.
- [3] Muhammad, M., Bakhtiar, B., & Rahmi, M. (2017). Penentuan rute distribusi sirup untuk meminimalkan biaya transportasi. *Industrial Engineering Journal*, 6(1).
- [4] Cahyaningsih, W. K., Sari, E. R., & Hernawati, K. (2015). Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem (Cvrp) Menggunakan Algoritma Sweep Untuk Optimasi Rute Distribusi Surat Kabar Kedaulatan Rakyat. *Seminar Nasional Matematika Dan Pendidikan Matematika UNY*, 1–8.
- [5] Arifita, E., & Rakhmawati, F. (2023). Analysis of Book Distribution Routes Using the Capacity Vehicle Routing Problem (CVRP) Method Using the Sweep Algorithm. *Sinkron: Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, 8(1), 360–367.

- [6] Hanafi, R., Rusman, M., Mardin, F., Parenreng, S. M., & Azzazli, A. (2020). Distribution Route Optimization of a Capacitated Vehicle Routing Problem by Sweep Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 875(1), 12066.
- [7] Fitriani, N. A., Pratama, R. A., Zahro, S., Utomo, P. H., & Martini, T. S. (2021). Solving capacitated vehicle routing problem using saving matrix, sequential insertion, and nearest neighbor of product 'X' in Grobogan district. *AIP Conference Proceedings*, 2326(1), 20007.
- [8] Kao, Y., & Chen, M. (2013). Solving the CVRP problem using a hybrid PSO approach. *Computational Intelligence: Revised and Selected Papers of the International Joint Conference, IJCCI 2011, Paris, France, October 24-26, 2011*, 59–67.
- [9] Venkatesan, S. R., Logendran, D., & Chandramohan, D. (2011). Optimization of capacitated vehicle routing problem using PSO. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(10), 7469–7477.
- [10] Mohammed, M. A., Ahmad, M. S., & Mostafa, S. A. (2012). Using genetic algorithm in implementing capacitated vehicle routing problem. *2012 International Conference on Computer & Information Science (ICCI)*, 1, 257–262.
- [11] Wang, C.H., & Lu, J.Z. (2009). A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 2921–2936.
- [12] Krueger, R. A. (2014). *Focus groups: A practical guide for applied research*. Sage publications.
- [13] Kucherenko, S. (2008). High dimensional Sobol's sequences and their application. In Technical Report. Technical Report.
- [14] Joe, S., & Kuo, F. Y. (2008). Constructing Sobol sequences with better two-dimensional projections. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 30(5), 2635–2654.
- [15] Ralphs, T. K., Kopman, L., Pulleyblank, W. R., & Trotter, L. E. (2003). On the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 94, 343–359.
- [16] Pratikno, S. R. I. B. B. (2017). Implementasi Algoritma Floyd-Warshall Untuk Menentukan Rute Tercepat Pada Jalur Distribusi Jasa Pengiriman Barang. Universitas Negeri Jakarta.
- [17] Altabeeb, A. M., Mohsen, A. M., Abualigah, L., & Ghallab, A. (2021). Solving capacitated vehicle routing problem using cooperative firefly algorithm. *Applied Soft Computing*, 108, 107403.
- [18] Nono, V., Sofitra, M., & Wijayanto, D. (2020). Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem Dengan Menggunakan Algoritma Sweep Untuk Penentuan Rute Distribusi Untuk Depo Pt. Abc Kubu Raya. *Jurnal TIN Universitas Tanjungpura*, 4(2).
- [19] Wati, D. A. R., & Rochman, Y. A. (2013). Model Penjadwalan Matakuliah Secara Otomatis Berbasis Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO). *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 2(1), 22–31.
- [20] Muhammad, R. D. (2016). Metode Particle Swarm Optimization Untuk Mengontrol Frekuensi Pada Hibrid Wind-Diesel. *Jurnal INTAKE: Jurnal Penelitian Ilmu Teknik Dan Terapannya*, 7(2), 1–13.
- [21] Santosa, B. (2006). Tutorial particle swarm optimization. *Sukolilo Surabaya: Kampus ITS*, 66.
- [22] Taiwo, O. S., Josiah, O., Taiwo, A., Dkhrullahi, S., & Sade, O. K. (2013). Implementation of heuristics for solving travelling salesman problem using nearest neighbor and nearest insertion approaches. *International Journal of Advance Research*, 1(3), 139–155.
- [23] Rozalina, A., Uslianti, S., & Anggela, P. (2020). Optimasi Rute Distribusi Dengan Penyelesaian Vehicle Routing Problem Menggunakan Algoritma Sweep Pada PD. XYZ Di Pontianak. *Jurnal TIN Universitas Tanjungpura*, 4(1).
- [24] Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2018). Vehicle routing problems with multiple trips. *Annals of Operations Research*, 271, 127–159.
- [25] Utami, A. P. (2022). Optimasi CVRP Pada Industri Automotive Spare Parts Dengan Membandingkan Metode Sweep Algorithm & PSO. Universitas Mercu Buana Jakarta-Menteng.
- [26] Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management*, 71, 31–41.