

**OPTIMISASI LOKASI DAN PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI
DAPUR MBG MENGGUNAKAN PENDEKATAN LRPTW BERBASIS
ALGORITMA *SIMULATED ANNEALING***

(Studi Kasus: Dapur MBG Kec. Ngemplak, Yogyakarta)

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri Program Sarjana - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Salwa Sabila

No. Mahasiswa : 22522288

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 02 - 07 - 2026



22522288

SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
J. Sekeloa Km. 14.5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext. 4110, 4100
F. (0274) 896007
E. ti@uii.ac.id
W. ti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 310/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/VII/2026

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Salwa Sabila

Nim : 22522288

Jurusan : Teknik Industri

Dosen Pembimbing : Zelania In Haryanto, S.T., M.T.

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul **"OPTIMISASI LOKASI DAN PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI DAPUR MBG MENGGUNAKAN PENDEKATAN LRPTW BERBASIS ALGORITMA *SIMULATED ANNEALING* (Studi Kasus: Dapur MBG Kec. Ngemplak, Yogyakarta)"** mulai pelaksanaan penelitian 1 Januari 2026 sampai 30 April 2026

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 21 Juli 2026
Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi


Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**OPTIMISASI LOKASI DAN PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI DAPUR
MBG MENGGUNAKAN PENDEKATAN LRPTW BERBASIS ALGORITMA
SIMULATED ANNEALING
(Studi Kasus: Dapur MBG Kec. Ngemplak, Yogyakarta)**



TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Salwa Sabila
No. Mahasiswa : 22522288

Yogyakarta, 22 Juli 2026

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Zelania In Haryanto'.

(Zelania In Haryanto, S.T., M.T.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**OPTIMISASI LOKASI DAN PERENCANAAN JARINGAN DISTRIBUSI DAPUR
MBG MENGGUNAKAN PENDEKATAN LRPTW BERBASIS ALGORITMA
SIMULATED ANNEALING
(Studi Kasus: Dapur MBG Kec. Ngemplak, Yogyakarta)**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Salwa Sabila
No. Mahasiswa : 22522288

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 22 Juli 2026

Tim Penguji

Zelania In Haryanto, S.T., M.T.

Ketua

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Anggota I

Ir. Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc., IPM,
ASEAN Eng.

Anggota II

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia



Ir. M. Ridwan Andi Purnomo, ST., M.Sc., Ph.D., IPM
NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan kemudahan yang diberikan sehingga perjalanan panjang ini dapat terselesaikan. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada diri saya sendiri, atas setiap perjuangan dan keyakinan yang tidak pernah padam untuk terus melangkah hingga sampai di titik ini. Persembahan yang paling utama kepada Bapak Sabda dan Ibu Musriah, orang tua terhebat yang tidak pernah berhenti mendoakan dan mendukung sehingga setiap langkah terasa lebih ringan karena tahu ada doa kalian yang selalu mengiringi. Semoga karya sederhana ini bukan sekedar syarat kelulusan melainkan bukti bahwa setiap usaha yang dilakukan dengan sungguh-sungguh tidak akan pernah mengkhianati hasil.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”
(QS. Al-Baqarah: 286)

“Karen apapun yang terjadi badai pun sudah aku lalui.”
(Bila-Raisa)

“Jika sempit hidup ini, tidur selalu tak tenang, pagi selalu menyiksa, semua akan baik saja,
sebab tuhan telah berjanji setelah sempit ada kemudahan.”
(Bersenja Gurau-Raim Laode)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Shalawat serta dalam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabat-Nya hingga akhir zaman.

Tugas Akhir dengan judul "Optimisasi Lokasi dan Perencanaan Jaringan Distribusi Dapur MBG Menggunakan Pendekatan LRPTW Berbasis Algoritma *Simulated Annealing* (Studi Kasus: Dapur MBG Kec. Ngemplak, Yogyakarta)" ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwa penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. M. Ridwan Andi Purnomo, ST., M.Sc., Ph.D., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Universitas Islam Indonesia.
4. Ibu Zelania In Haryanto, S.T., M.T. dan Ibu Putri Dwi Annisa, S.T, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berarti selama proses penyusunan Tugas Akhir ini dari awal hingga selesai.
5. Kepada kedua orang tua tercinta penulis Bapak Sabda dan Ibu Musriah, yang telah menjadi alasan terkuat untuk terus bertahan di setiap momen tersulit dalam perjalanan ini. Tidak ada kata yang cukup untuk menggambarkan betapa besarnya pengorbanan, ketulusan, dan cinta yang telah diberikan tanpa pernah meminta imbalan apapun. Di setiap doa subuh yang kalian panjatkan, di setiap kekhawatiran yang kalian sembunyikan agar penulis tetap kuat dan di setiap pelukan yang menjadi tempat pulang ketika segalanya terasa berat. Semua itu adalah bahan bakar yang menggerakkan penulis hingga sampai di titik ini. Semoga karya sederhana ini dapat menjadi sedikit pembuktian bahwa pengorbanan kalian tidak pernah sia-sia, dan semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, serta keberkahan yang tiada henti kepada keduanya. Terima kasih telah menjadi orang tua terhebat yang pernah ada.
6. Kepada saudara tersayang penulis, kakak Didit, Abdi, Adek Rado, Nunu, dan Ratu yang selalu hadir dengan cara yang paling sederhana namun paling bermakna. Terima kasih atas setiap tawa yang mengobati lelah, setiap semangat yang diberikan di saat yang paling dibutuhkan, dan kehadiran yang selalu menjadi pengingat bahwa penulis tidak pernah berjalan sendiri. Semoga kita senantiasa bisa menjadi kebanggaan bagi kedua orang tua dan terus bertumbuh bersama menuju versi terbaik dari diri kita masing-masing.
7. Kepada keponakan tersayang penulis, Maryam Nur At-Taheerah yang tanpa disadari selalu menghadirkan senyum dan semangat di tengah perjalanan Tugas Akhir ini. Semoga kamu tumbuh menjadi pribadi yang hebat dan membanggakan.
8. Kepada sahabat-sahabat SMA penulis Indah, Alia, Sri, Farda, Intan, dan Pute yang meskipun perjalanan hidup membawa kita ke arah yang berbeda-beda, namun ikatan dan

kehangatan yang terjalin tidak pernah pudar sedikitpun. Terima kasih telah menjadi tempat bercerita, tempat tertawa, dan tempat kembali di saat dunia terasa terlalu berat untuk dihadapi sendiri. Kehadiran kalian adalah salah satu hal yang selalu membuat hati ini merasa pulang, tidak peduli seberapa jauh jarak yang memisahkan. Semoga persahabatan ini senantiasa Allah SWT jaga hingga kelak kita sama-sama merayakan kesuksesan masing-masing.

9. Kepada sahabat-sahabat tersayang penulis selama masa kuliah Nindi, Dita, Pradita, dan Tifla yang telah menemani setiap babak perjalanan ini dari awal hingga akhir. Terima kasih telah menjadi teman berjuang, tempat berkeluh kesah, dan pengingat untuk tidak menyerah ketika segalanya terasa berat. Semoga setelah ini kita tetap saling mendukung dan bisa sama-sama meraih apa yang selama ini kita impikan.
10. Kepada teman-teman ALLBES terima kasih sudah hadir dan mewarnai perjalanan kuliah ini dengan cara kalian masing-masing. Kebersamaan, canda tawa, dan dukungan yang kalian berikan tanpa diminta menjadi salah satu hal yang paling penulis syukuri.
11. Terakhir, kepada diri sendiri, terima kasih sudah tidak menyerah. Terima kasih sudah tetap berjalan meski berkali-kali ingin berhenti, sudah bangkit di setiap kali jatuh, dan sudah memilih untuk terus percaya bahwa semua ini akan selesai pada waktunya. Perjuangan ini tidak mudah, tetapi kamu berhasil membuktikan bahwa kamu lebih kuat dari semua keraguan yang pernah menghantuimu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan yang perlu diperbaiki. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati menerima segala kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi penyempurnaan di masa mendatang. Besar harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

ABSTRAK

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak menghadapi tantangan dalam penentuan lokasi Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) dan perencanaan rute distribusi yang belum optimal sehingga berdampak pada tingginya biaya distribusi. Penelitian ini bertujuan membangkitkan kandidat lokasi SPPG menggunakan *K-Means Clustering*, menerapkan *Location Routing Problem with Time Windows* (LRPTW) berbasis algoritma *Simulated Annealing*, serta menganalisis dampak optimasi terhadap biaya distribusi dan kelayakan investasi pembangunan SPPG. Kandidat lokasi dibangkitkan menggunakan *K-Means Clustering* dengan $k = 8$ dan total permintaan 19.588 porsi sebagai *sample weight*, menghasilkan delapan kandidat lokasi yang selanjutnya dioptimasi menggunakan *Simulated Annealing*. Solusi awal dibentuk menggunakan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) kemudian diperbaiki secara iteratif selama 1.000 iterasi dengan parameter suhu awal $T_0 = 120$, faktor pendinginan $\alpha = 0,997$, dan mekanisme reheating sebesar 1,35 kali setiap 350 iterasi. Hasil optimasi menunjukkan konfigurasi optimum terdiri atas 8 SPPG (2 eksisting dan 6 usulan) dengan penurunan total jarak distribusi dari 735,46 km menjadi 664,35 km atau sebesar 9,67%, sehingga biaya perjalanan (BBM) berkurang dari Rp693.830 menjadi Rp626.747 atau menghemat Rp67.083 per hari. Seluruh 169 sekolah berhasil dilayani sesuai *time windows* tanpa melanggar kapasitas kendaraan maupun kapasitas harian SPPG. Analisis *Break Even Point* (BEP) pada skenario investasi menengah menunjukkan bahwa pembangunan satu unit SPPG diperkirakan mencapai titik impas dalam 190 hari operasional atau sekitar 7,31 bulan. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan LRPTW berbasis *Simulated Annealing* mampu menghasilkan konfigurasi lokasi dan jaringan distribusi yang lebih efisien serta memberikan gambaran kelayakan investasi pembangunan SPPG.

Kata Kunci: *K-Means Clustering, Location Routing Problem with Time Windows, Makan Bergizi Gratis, Multi-trip, Simulated Annealing*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Literatur	7
2.2 Landasan Teori	13
2.2.1 <i>Supply Chain Management</i>	13
2.2.2 Manajemen Logistik	15
2.2.3 Optimasi	15
2.2.4 <i>K-Means Clustering</i>	16
2.2.5 <i>Vehicle Routing Problem (VRP)</i>	16
2.2.6 <i>Location Routing Problem with Time Windows</i>	17
2.2.7 <i>Simulated Annealing (SA)</i>	17
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Objek Penelitian	19
3.2 Instrumen Penelitian	19
3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder	19
3.4 Metode Pengumpulan Data	20
3.5 Populasi dan Sampel	21
3.6 <i>Problem Definition</i>	21
3.7 Tahapan Optimasi dan Rute Distribusi	23
3.8 Alur Penelitian	25
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	29
4.1 Pengumpulan Data	29
4.1.1 Profil Program MBG	29
4.1.2 Formulasi Masalah	29
4.1.3 Data Penelitian	30
4.1.4 Matriks Jarak	34
4.1.5 Rute Distribusi <i>Eksisting</i>	37
4.2 Pengolahan Data	38
4.2.1 Pembangkitan Kandidat Lokasi SPPG menggunakan <i>K-Means</i>	38
4.2.2 Penetapan Parameter <i>Simulated Annealing</i>	40

4.2.3 Penerapan <i>Simulated Annealing</i>	41
4.2.4 Hasil Optimasi.....	50
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	55
5.1 Analisis Penentuan Lokasi Depot dalam Model LRPTW	55
5.1.1 Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi Depot Menggunakan <i>K-Means Clustering</i> 55	
5.1.2 Hasil Optimasi Lokasi Depot Menggunakan <i>Simulated Annealing</i>	57
5.2 Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi MBG	59
5.2.1 Analisis Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi Makan Bergizi Gratis...59	
5.2.2 Analisis Kinerja Distribusi Berdasarkan Jarak Tempuh dan Biaya BBM	64
5.2.3 Analisis Perbandingan Hasil Efisiensi Total Jarak dan Biaya BBM	66
5.2.4 Analisis Pemenuhan <i>Time Windows</i>	68
5.3 Analisis Komponen dan Estimasi Biaya Pembukaan Depot	69
5.4 Analisis Kelayakan Finansial.....	72
5.5 Analisis Algoritma <i>Simulated Annealing</i>	76
BAB VI KESIMPULAN.....	78
6.1 Kesimpulan	78
6.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Literatur	12
Tabel 4. 1 Data Penelitian	30
Tabel 4. 2 Data <i>Time Windows</i> dan <i>Service Time</i>	31
Tabel 4. 3 Data <i>Time Windows</i>	32
Tabel 4. 4 Data Kendaraan.....	33
Tabel 4. 5 Matriks Jarak.....	34
Tabel 4. 6 Rute <i>Eksisting</i> SPPG	37
Tabel 4. 7 Parameter <i>K-Means Clustering</i>	39
Tabel 4. 8 Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi Menggunakan <i>K-Means Clustering</i>	39
Tabel 4. 9 Parameter Algoritma <i>Simulated Annealing</i>	41
Tabel 4. 10 Pseudocode Algoritma <i>Simulated Annealing</i>	43
Tabel 4. 11 Hasil Optimasi Menggunakan Algoritma <i>Simulated Annealing</i>	51
Tabel 5. 1 Hasil Pembangkitan Kandidat Dapur	55
Tabel 5. 2 Hasil Optimasi Kandidat Depot Menggunakan SA	57
Tabel 5. 3 Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi MBG.....	60
Tabel 5. 4 Hasil Kinerja Distribusi Berdasarkan Jarak dan Biaya BBM	64
Tabel 5. 5 Perbandingan Kondisi Eksisting dan Usulan	67
Tabel 5. 6 <i>Time Windows</i> pada <i>Delivery</i> dan <i>Pickup</i>	68
Tabel 5. 7 Rincian Komponen Pembukaan Depot	70
Tabel 5. 8 Tabel Estimasi Pembukaan Depot	71
Tabel 5. 9 Estimasi Komponen Investasi Satu Unit SPPG	72
Tabel 5. 10 Proyeksi Penerimaan Satu Unit SPPG	73
Tabel 5. 11 Hasil Perhitungan Waktu BEP	74
Tabel 5. 12 Proyeksi BEP 5 Tahun Skenario Menengah	74
Tabel 5. 13 Perbandingan Proyeksi BEP	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Delivery Supply Chain Process</i>	14
Gambar 3. 1 Mekanisme Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi.....	24
Gambar 3. 2 Alur Penelitian.....	25
Gambar 5. 1 Visualisasi Peta Hasil Optimasi	67
Gambar 5. 1 Peta Visualisasi Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi.....	57
Gambar 5. 2 Visualisasi Peta Hasil Optimasi	67
Gambar 5. 3 Grafik Perbandingan Kondisi <i>Eksisting</i> dan Usulan	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Program makan bergizi gratis (MBG) merupakan inisiatif penyediaan makanan bergizi di lingkungan sekolah dengan tujuan untuk mendorong terciptanya keadilan dalam pendidikan dengan memastikan seluruh siswa memperoleh akses yang sama terhadap asupan gizi layak tanpa dipungut biaya (Kevin Andreas Halomoan Tambunan et al., 2025). Urgensi pelaksanaan program MBG tidak terlepas dari kondisi nyata kualitas kesehatan dan pendidikan di Indonesia yang masih menghadapi berbagai tantangan. Dalam upaya mewujudkan visi Indonesia emas 2045, pemanfaatan demografi memerlukan intervensi negara yang bersifat sistematis dan struktural, ketidakmerataan akses terhadap asupan gizi khususnya pada wilayah 3T (tertinggal, terdepan, dan terluar), yang menimbulkan kesenjangan kualitas modal manusia yang berpotensi menghambat daya saing nasional apabila tidak ditangani secara serius. Oleh karena itu, menurut Maulana Basuki et al. (2026), program MBG dipandang tidak hanya sebagai instrumen perlindungan sosial, tetapi juga sebagai bentuk investasi jangka panjang yang strategis dalam meningkatkan kualitas kesehatan, kecerdasan, dan daya saing sumber daya manusia Indonesia

Sebagai program penyediaan makanan dalam skala besar, keberhasilan pelaksanaan program makan bergizi gratis sangat dipengaruhi oleh sistem rantai pasok dan distribusi yang efektif. *Supply chain management* (SCM) adalah proses pengelolaan terkait aliran produk yang mencakup seluruh tahapan mulai dari pemasok hingga pengguna akhir (Ridwan & Rizal Gaffar, 2022). Dalam implementasinya, SCM merupakan proses terintegrasi, meliputi kegiatan perencanaan dan pengendalian aliran produk sejak tahap produksi hingga diterima oleh konsumen melalui jaringan hubungan yang kompleks antara organisasi dan berbagai mitra bisnis. Salah satu komponen utama dalam SCM adalah Manajemen logistik merupakan suatu rangkaian aktivitas yang meliputi perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengawasan terhadap pengadaan, pencatatan, penyimpanan, pemeliharaan, hingga pendistribusian barang secara efisien (Primadi & Salsabila Putri, 2025). Selain itu, proses distribusi juga harus memenuhi konsep 7R menekankan bahwa proses distribusi harus mampu memastikan produk yang sesuai dengan yang disalurkan dalam jumlah yang tepat kepada pelanggan yang tepat, dengan kondisi yang terjaga, dikirim ke lokasi yang benar, pada waktu yang sesuai, dan dengan biaya yang efisien (Purbasari et al., 2023). Oleh karena itu, sistem

distribusi yang baik menjadi faktor utama keberhasilan program MBG agar makanan dapat diterima dalam kondisi layak dan tepat waktu.

Meskipun demikian, implementasi program MBG masih menghadapi berbagai tantangan, terutama pada penentuan lokasi dapur penyedia makanan dan perencanaan rute distribusi menuju sekolah penerima manfaat. Wulandari & Sawir (2025) menjelaskan pada beberapa wilayah keterbatasan anggaran menghambat pemilihan lokasi dapur yang strategis sehingga meningkatkan biaya operasional distribusi. Selain itu, terdapat masalah berupa rute pengiriman yang panjang, waktu tempuh yang tidak efisien, serta ketidaksesuaian jadwal pengiriman dengan kebutuhan sekolah. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan keterlambatan distribusi, penurunan kualitas makanan, serta ketimpangan akses antar wilayah. Karena makanan yang dikirim memiliki batas waktu konsumsi dan harus diterima sesuai dengan jadwal sekolah, maka sistem distribusi MBG memerlukan perencanaan yang optimal dan terintegrasi.

Permasalahan tersebut juga dijumpai pada wilayah layanan satuan pelayanan pemenuhan gizi (SPPG) Sleman Ngemplak proses distribusi program MBG melayani banyak sekolah dengan karakteristik yang beragam, baik dari sisi jumlah permintaan, jenjang pendidikan, maupun waktu pelayanan (*time windows*) yang berbeda. Selain melakukan pengantaran makanan, kendaraan juga bertugas melakukan penjemputan kembali wadah makanan (ompreng) setelah jam makan selesai sehingga dalam satu hari kendaraan dapat melakukan beberapa perjalanan (*multi-trip*) dengan tetap memperhatikan kapasitas kendaraan, kapasitas produksi SPPG, urutan pelayanan, serta jadwal pengantaran dan penjemputan pada setiap kelompok sekolah. Kondisi tersebut menyebabkan proses perencanaan distribusi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan kedekatan lokasi karena berpotensi menghasilkan rute yang tidak efisien, meningkatkan total jarak tempuh dan biaya distribusi, serta menimbulkan keterlambatan pelayanan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan optimasi yang mampu menentukan lokasi SPPG (depot) yang paling efektif, mengalokasikan sekolah ke SPPG secara tepat, serta menyusun rute pengantaran dan penjemputan secara terintegrasi dengan mempertimbangkan seluruh batasan operasional.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah *Vehicle Routing Problem* (VRP), yaitu model distribusi yang berfokus pada penentuan rute kendaraan secara efisien. Namun, karena program MBG juga memerlukan keputusan mengenai lokasi dapur atau depot, maka pendekatan tersebut dikembangkan menjadi *Location Routing Problem* (LRP), yaitu model yang mengintegrasikan penentuan lokasi fasilitas dan rute

distribusi secara simultan (Ghasemi et al., 2023). Dalam pelaksanaannya, distribusi MBG juga memiliki batasan waktu pengiriman karena makanan harus diterima sekolah pada jam tertentu agar kualitas tetap terjaga. Oleh sebab itu, model yang lebih sesuai adalah *Location Routing Problem with Time Windows* (LRPTW), yaitu model LRP yang mempertimbangkan jendela waktu pelayanan pada setiap lokasi dapur, rute kendaraan, kapasitas kendaraan, jumlah permintaan, dan ketepatan waktu secara bersamaan. Dalam permasalahan penentuan lokasi fasilitas distribusi, dibutuhkan pendekatan yang mampu membangkitkan dan mengidentifikasi wilayah pelayanan berdasarkan kedekatan geografis titik permintaan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *K-Means Clustering*. Handayani (2022) menjelaskan bahwa metode pengelompokan data yang bertujuan membagi objek ke dalam beberapa kelompok berdasarkan jarak terdekat terhadap pusat cluster. Le et al. (2022) menjelaskan bahwa penggunaan *clustering* berhasil mengelompokkan pelanggan yang memiliki kedekatan geografis ke dalam wilayah pelayanan yang sama sehingga kendaraan dapat melayani pelanggan dalam area terfokus. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan *clustering* mampu mengurangi total jarak perjalanan kendaraan dan meningkatkan efisiensi penyusunan rute distribusi.

Setelah dilakukan pembangkitan kandidat lokasi distribusi, diperlukan metode optimasi yang mampu menghasilkan lokasi dan rute dengan biaya yang minimum. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Simulated Annealing* (SA). Yobioktabera et al. (2025) menjelaskan bahwa SA merupakan algoritma yang digunakan untuk mencari pendekatan terhadap solusi optimum global dari suatu permasalahan yang memiliki kemampuan menjelajahi ruang solusi secara fleksibel dan menghindari jebakan optimum lokal sehingga efektif untuk menyelesaikan masalah optimasi yang kompleks. Y. M. Simanjuntak et al. (2025) menjelaskan bahwa metode algoritma SA mampu menghasilkan solusi yang lebih baik dalam permasalahan distribusi dengan meminimalkan biaya transportasi dan jarak tempuh kendaraan melalui pencarian solusi secara iteratif. Oleh karena itu, SA dinilai sesuai untuk digunakan dalam menyelesaikan permasalahan LRPTW dengan algoritma SA, sehingga diharapkan diperoleh solusi lokasi distribusi dan rute pengiriman yang lebih efisien, biaya operasional yang lebih rendah, serta ketepatan waktu pelayanan yang lebih baik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapur MBG memiliki tantangan dalam penentuan lokasi dan perencanaan rute distribusi yang belum optimal, sehingga akan berdampak pada tingginya

biaya operasional dan efisiensi waktu pengiriman. Untuk menjawab permasalahan tersebut, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini:

1. Bagaimana membangkitkan kandidat lokasi SPPG (depot) berdasarkan sebaran sekolah penerima Makan Bergizi Gratis menggunakan *K-Means Clustering*?
2. Bagaimana penerapan *location routing problem with time windows* (LRPTW) berbasis algoritma *simulated annealing* dalam menentukan sistem distribusi yang efisien?
3. Apa dampak dari optimalisasi lokasi dan rute distribusi terhadap biaya distribusi dan efisiensi pengiriman makan bergizi gratis (MBG)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan penelitian ini adalah:

1. Membangkitkan kandidat lokasi SPPG (depot) berdasarkan sebaran sekolah penerima Makan Bergizi Gratis menggunakan metode *K-Means Clustering*.
2. Menerapkan pendekatan *location routing problem with time windows* (LRPTW) berbasis algoritma *simulated annealing* untuk menghasilkan penentuan lokasi dan rute distribusi yang lebih efisien.
3. Menganalisis dampak optimalisasi lokasi dan rute distribusi terhadap biaya dan efisiensi pengiriman makan bergizi gratis (MBG).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang terkait. Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat bagi dapur makan begizi gratis

Penelitian ini dapat memberikan solusi untuk meningkatkan efisiensi distribusi dapur MBG melalui optimasi lokasi dan rute pengiriman, serta memberikan strategi yang dapat membantu dalam mengurangi biaya distribusi dan meningkatkan ketepatan waktu pengiriman.

2. Manfaat bagi akademik

Penelitian ini dapat menambah wawasan dan literatur sebagai referensi dalam penerapan metode optimasi lokasi dan rute distribusi, dengan menggunakan LRPTW berbasis algoritma *simulated annealing* yang dapat digunakan sebagai rujukan bagi penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Penelitian

Agar pembahasan pada penelitian ini tetap terarah dan tidak melebar, maka diperlukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di wilayah Kecamatan Ngemplak dengan mempertimbangkan beberapa lokasi dapur MBG sebagai titik distribusi.
2. Model yang digunakan hanya memperhitungkan kendala kapasitas kendaraan serta batasan waktu pengantaran dan pengambilan (*time windows*), tanpa memasukkan faktor lalu lintas yang bersifat dinamis.
3. Kendaraan yang digunakan diasumsikan bersifat homogen dengan kapasitas yang telah ditentukan.
4. Permintaan distribusi dinyatakan dalam satuan porsi tanpa mempertimbangkan dimensi fisik dari produk dan ketahanan makanan tidak dimasukkan pada parameter penelitian ini.
5. Waktu tempuh diasumsikan sebanding dengan jarak dan tidak dipengaruhi oleh kondisi kemacetan lalu lintas.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penelitian ini terdiri dari beberapa bab yang nantinya sebagai acuan agar sistematis dalam penulisan penelitian ini, adapun sistematis dalam penulisan ini sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan terkait latar belakang penelitian pada dapur makan bergizi gratis (MBG) yang akan menjadi dasar dalam merumuskan permasalahan utama yang akan diselesaikan. Pada bab ini diuraikan secara singkat pentingnya penelitian terkait penentuan lokasi dan perencanaan rute distribusi, bab ini juga disusun tujuan penelitian, manfaat yang diharapkan, dan batasan-batasan penelitian agar pembahasan tetap terarah dan sesuai dengan fokus penelitian. Teori-teori

BAB II KAJIAN LITERATUR

Bab ini menyajikan tinjauan pustaka dan pembahasan teori yang mendukung pelaksanaan penelitian. Pada bab ini membahas konsep dan metode yang berkaitan dengan penentuan lokasi dan perencanaan rute distribusi, termasuk pendekatan LRPTW dan SA. Teori-teori tersebut digunakan sebagai acuan dalam membangun model optimasi jaringan distribusi pada dapur MBG.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan terkait metode penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian. Pembahasan meliputi objek penelitian, instrumen yang digunakan, sumber data yang berasal dari data primer dan sekunder, serta teknik pengumpulan data yang diterapkan. Selain itu, bab ini juga menjelaskan populasi dan sampel yang digunakan serta pada bagian akhir, disajikan tahapan atau alur penelitian secara sistematis untuk menggambarkan proses penelitian yang dilakukan dari awal hingga akhir.

BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini menjelaskan terkait hasil pengumpulan data yang diperoleh dari MBG, yang meliputi gambaran umum sistem distribusi, data lokasi dapur dan rute distribusi, serta data *time windows*. Kemudian data tersebut akan diolah melalui penyusunan model sistematis, penentuan notasi dan parameter, hingga pelaksanaan proses optimasi menggunakan LRPTW berbasis *simulated annealing*.

BAB V PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengumpulan data yang diperoleh dari dapur MBG, meliputi gambaran meliputi pembahasan kritis mengenai bab sebelumnya dan belum dipaparkan pada bab sebelumnya.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian kesimpulan berisi ringkasan hasil penelitian yang telah disajikan secara singkat dan sistematis dalam bentuk poin bernomor. Kesimpulan disusun untuk menjawab rumusan masalah serta membuktikan hipotesis yang ada. Sementara itu, saran berisi rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya, baik melalui penggunaan metode, alat, ataupun pendekatan yang berbeda guna memperluas kajian keilmuan. Selain itu, saran juga mencakup masukan yang didasarkan pada keterbatasan atau kendala yang ditemukan selama penelitian berlangsung, yang diperoleh dari hasil pembahasan pada bab sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini berisi daftar referensi yang digunakan sebagai dasar dan pendukung dalam penelitian, yang mencakup jurnal ilmiah, buku, serta sumber bacaan lain yang relevan.

LAMPIRAN

Bagian ini berisi lampiran berupa daftar tabel, gambar, maupun komponen pendukung lainnya yang berkaitan dengan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Bagian ini memaparkan tinjauan pustaka yang disusun melalui dua pendekatan, yakni induktif dan deduktif. Kajian induktif mengeksplorasi berbagai literatur seperti jurnal dan artikel ilmiah guna membedah penelitian terdahulu yang relevan, yang berfungsi sebagai acuan pengembangan studi. Di sisi lain, kajian deduktif menyajikan landasan teoretis dari referensi buku dan literatur ilmiah untuk memperkuat kerangka konseptual penelitian. Selain itu, dipaparkan pula *state of the art* guna menegaskan posisi serta kebaruan penelitian ini dibandingkan dengan studi-studi sebelumnya.

Menurut Maghfiroh et al. (2023), “*A Location Routing Problem with Time Windows Consideration: A Metaheuristics Approach*” model optimasi *Location Routing Problem with Time Windows* untuk meminimalkan total biaya logistik, yang mencakup biaya pembukaan depo, biaya operasional kendaraan, dan biaya penalti akibat keterlambatan pengiriman. Permasalahan diselesaikan menggunakan algoritma metaheuristik yang menggabungkan *Variable Neighborhood Search* dan *Path Relinking*. Hasil pengujian pada dataset solomon menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menghasilkan solusi yang kompetitif dengan waktu komputasi yang efisien terutama dalam menangani kendala *time windows* yang ketat.

Menurut Yu et al. (2022), “*Regional Location Routing Problem for Waste Collection Using Hybrid Genetic Algorithm-Simulated Annealing*” menyajikan model optimasi baru untuk permasalahan *Regional Location Routing Problem*. Penelitian ini mengusulkan algoritma metaheuristik hibrida yang menggabungkan *Genetic Algorithm* untuk mengeksplorasi ruang solusi secara global dan *Simulated Annealing* untuk memperkuat eksploitasi lokal guna mencapai solusi yang lebih optimal. Melalui pengujian pada data nyata dari PD kebersihan di kota Bandung, model ini terbukti mampu memberikan solusi yang efisien dalam menentukan lokasi depo serta rute pengumpulan sampah dengan mempertimbangkan batasan kapasitas dan kendala wilayah, sehingga sangat relevan untuk diaplikasikan dalam perencanaan logistik pelayanan publik yang kompleks.

Menurut Y. M. L. Simanjuntak et al. (2025), “*Optimalisasi Penentuan Rute Distribusi Beras Nasi Uduk Menggunakan Metode Simulated Annealing*” membahas permasalahan

optimalisasi rute distribusi beras nasi uduk pada PT. XYZ permasalahan ini dimodelkan sebagai VRP dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, permintaan agen, serta jarak antar lokasi. Untuk menyelesaikan masalah tersebut digunakan metode *simulated annealing*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SA mampu menghasilkan rute distribusi yang lebih efisien dengan total jarak tempuh sebesar 382,9 km dibandingkan kondisi awal 787,5 km, serta menurunkan biaya distribusi dari Rp.535.500 menjadi Rp.260.372, sehingga penghematan jarak sebesar 404,6 km atau sekitar 51% dan pengurangan biaya sebesar Rp.275.128.

Menurut Ferreira & Alves de Queiroz (2022), “*A Simulated Annealing Based Heuristic for A Location Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraint*” membahas permasalahan optimasi logistik yang cukup kompleks, yaitu *Location Routing Problem* yang disertai kendala pemuatan barang dua dimensi. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, penulis mengusulkan heuristik yaitu metode *Simulated Annealing* untuk mengoptimalkan pemilihan lokasi depo dan rute kendaraan dengan tetap memenuhi batasan kapasitas ruang muatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan heuristik yang diusulkan mampu menghasilkan solusi yang efektif dan efisien dalam menangani kendala pemuatan yang kompleks, memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan model logistik yang lebih realistis dan praktis.

Menurut Lorinez Silitonga et al. (2025), “Implementasi Algoritma Heuristik Dalam Penyelesaian Masalah Travelling Salesman Problem Pada Optimasi Jalur Pengiriman Makanan Untuk Layanan Online Menggunakan Python” penelitian ini mengimplementasikan dan membandingkan dua algoritma, yaitu *Nearest Neighbor* (NN) dan SA untuk menyelesaikan masalah *Travelling Salesman Problem* (TSP) pada optimasi jalur pengiriman makanan layanan online menggunakan bahasa pemrograman *Python*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma *Nearest Neighbor* mampu memberikan solusi awal dengan waktu komputasi yang sangat cepat sedangkan algoritma *Simulated Annealing* berhasil memberikan jarak tempuh hingga 15% dibandingkan metode *Nearest Neighbor*, sehingga biaya operasional diminimalisir secara signifikan.

Menurut M. Liu et al. (2025), “*Location Routing Problem for Customized Delivery Considering Assembly Delay*” mengkaji permasalahan optimasi logistik yang unik. Secara khusus mempertimbangkan keterlambatan perakitan pada produk *Assemble to Order*, penelitian ini bertujuan untuk menyeimbangkan efisiensi biaya bagi penyedia logistik pihak ketiga (3PL) dalam menghadapi perbedaan waktu persiapan antara produk kustomisasi dan produk standar.

Untuk menyelesaikan model matematika yang kompleks ini, penulis mengembangkan algoritma metaheuristik *Adaptive Large Neighborhood Search* yang efisien dalam menangani kendala waktu operasional yang ketat dan kompleksitas jaringan distribusi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa strategi pengiriman yang mengintegrasikan keputusan lokasi fasilitas dan rute kendaraan dengan memperhitungkan penundaan perakitan mampu menekan total biaya operasional secara signifikan.

Menurut Saragih & Turnip (2022), “*Design of Vehicle Routes for Rice Distribution System in Bandung Using Simulated Annealing Algorithm*” membahas terkait oprimasi rute pendistribusian beras di kota Bandung yang melibatkan 40 titik permintaan dengan menggunakan algoritma *Simulated Annealing* (SA). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kompleksitas permasalahan *vehicle routing problem* (VRP) yang bersifat NP-hard, di mana pencarian rute manual seringkali tidak efisien dalam meminimalkan total jarak tempuh sebesar 193,4 km. Temuan ini membuktikan bahwa penggunaan algoritma metaheursitik seperti *Simulated Annealing* efektif dalam memberikan solusi rute yang lebih pendek dan efisien dibandingkan dengan rute eksisting, sehingga dapat membantu meminimalkan biaya transportasi pada sistem logistik pangan daerah.

Menurut Rave & Fontaine (2025), “*The Location Routing Problem with Time Windows and Load-Dependent Travel Time for Cargo Bikes*” penelitian ini mengusulkan model *Location Routing Problem* yang mengintegrasikan penggunaan sepeda kargo (*cargo bikes*) melalui pusat mikro, dengan mempertimbangkan batasan waktu pengiriman (*time windows*) dan pengaruh beban muatan terhadap kecepatan tempuh. Penulis menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) untuk menyelesaikan model matematika yang kompleks ini, yang hasilnya membuktikan bahwa mengabaikan ketergantungan waktu tempuh terhadap beban dapat menyebabkan penempatan hub tidak optimal dan peningkatan biaya operasional.

Menurut Saputra & Sukmono (2024), “*Analisa Optimalisasi Rute Distribusi Untuk Mengefisiensikan Logistik Menggunakan Algoritma Genetika*” ini membahas upaya meminimalkan biaya logistik dan jarak tempuh pada sebuah industri jasa ekspedisi di Indonesia yang memiliki mobilitas yang sangat tinggi. Penelitian ini menggunakan algoritma pendekatan algoritma genetika yang menunjukkan bahwa penggunaan algoritma ini mampu memangkas total jarak tempuh harian dari semula 115 km menjadi 104 km selain penghematan jarak, optimalisasi ini juga berdampak langsung pada efisiensi ekonomi dengan menurunkan biaya bahan bakar harian dari Rp155.250 menjadi Rp140.400. Temuan ini menegaskan bahwa

penerapan metode heuristik seperti Algoritma Genetika sangat efektif dalam menekan biaya operasional logistik melalui manajemen rute yang lebih terukur.

Penelitian oleh Fatma et al. (2022) dengan judul “Penentuan Rute Pengangkut Limbah Medis Optimal Menggunakan Vehicle Routing Problem with Time Window pada Kasus Multi Depot” membahas sistem pengangkutan limbah medis dari fasilitas kesehatan (puskesmas) ke pusat pengolahan limbah di wilayah DKI Jakarta dengan fokus pada optimasi rute distribusi menggunakan model *Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW) multi depot* dalam konteks *reverse logistics*. Penyelesaian model dilakukan menggunakan metode *heuristik Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)* dengan mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan, waktu operasional, serta waktu pelayanan di setiap titik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan 6 rute optimal mampu menurunkan jarak tempuh sebesar 97,86 km dan menghemat biaya sekitar 15% dibandingkan kondisi eksisting sehingga model yang diusulkan efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem pengangkutan limbah medis.

Penelitian sebelumnya oleh Matsuoka & Miyasaka (2023) “*Optimising Food Distribution at a Food Bank: Using Simulated Annealing Algorithm*” membahas terkait penerapan algoritma *simulated annealing* mampu mengoptimalkan distribusi surplus pada *food bank* secara signifikan dibandingkan metode manual, dengan peningkatan nilai kepuasan organisasi penerima dari 4,0641 menjadi 5,5367. Melalui pendekatan ini, sistem berhasil menjamin keadilan distribusi terutama bagi lembaga kesejahteraan kecil yang sering kali kesulitan mengelola bantuan jika jenis makanan yang diterima tidak sesuai dengan kebutuhan spesifik mereka. Selain itu, integrasi konsep *cutoff* dalam model tersebut terbukti efektif memangkas waktu komputasi hingga lebih dari separuhnya tanpa mengurangi kualitas solusi.

Penelitian yang dilakukan oleh Zhao & Sharma (2023) dengan judul “*Logistics Distribution Route Optimization Based on Improved Particle Swarm Optimization*” ini membahas strategi optimalisasi rute distribusi logistik melalui penggabungan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* dengan algoritma *Mountain Climbing* untuk mengatasi kelemahan PSO standar yang sering terjebak dalam solusi optimal lokal. Melalui integrasi pencarian lokal yang lebih kuat, algoritma ini terbukti mampu meningkatkan stabilitas dan kecepatan konvergensi dalam menemukan rute terpendek, sehingga memberikan solusi yang lebih ekonomis bagi operasional logistik terutama pada skala distribusi yang besar.

Penelitian yang dilakukan oleh Sumiati et al. (2025) dengan judul "*Optimal distribution route for cooking oil delivery using the simulated annealing method*" ini membahas optimalisasi rute pengiriman minyak goreng di CV. Jati Jaya untuk mengatasi masalah efisiensi jarak tempuh dan biaya operasional. Penelitian ini menggunakan pendekatan *Simulated Annealing* (SA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Simulated Annealing* mampu menurunkan jarak dari 400,1 km menjadi 334,1 km atau sebesar 16,49% sehingga membuktikan bahwa algoritma ini sangat efektif untuk diaplikasikan dalam manajemen logistik barang kebutuhan pokok.

Penelitian sebelumnya oleh Kuo et al. (2022) dengan judul "*Neural Network Structure Optimization by Simulated Annealing*" membahas optimasi struktur jaringan saraf tiruan (*neural network*) menggunakan metode metaheuristik *Simulated Annealing* (SA), tanpa melibatkan proses *backpropagation* selama tahap optimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SA mampu secara signifikan mengurangi jumlah parameter jaringan sekaligus mempertahankan performa model, di mana pada tingkat pruning hingga 90% sehingga cocok diterapkan pada sistem dengan sumber daya terbatas dan aplikasi *real-time*.

Penelitian yang dilakukan oleh Xin et al. (2022) dengan judul "*Logistics Distribution Route Optimization Based on Genetic Algorithm*" ini membahas strategi pengoptimalan rute distribusi logistik menggunakan Algoritma Genetika (GA) untuk mengatasi tantangan biaya transportasi yang tinggi dan inefisiensi pengiriman. Penelitian ini mengembangkan model distribusi fungsional yang mengintegrasikan berbagai indikator penting seperti pengukuran berat, waktu pengiriman, nilai pelanggan, dan indeks proses keseluruhan untuk merumuskan rencana pengiriman yang paling efektif. Penggunaan algoritma ini terbukti mampu menekan biaya logistik secara substansial dan meningkatkan akurasi pengiriman, memberikan solusi praktis bagi perusahaan logistik untuk mengelola distribusi area yang luas dengan biaya operasional yang minimal dan efisiensi waktu yang maksimal.

Secara keseluruhan penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada optimasi rute distribusi (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*) atau optimasi lokasi fasilitas secara terpisah. Pada penelitian ini, optimasi dilakukan menggunakan pendekatan LRPW yang mengintegrasikan keputusan lokasi fasilitas dan rute distribusi secara simultan. Selain itu penelitian ini mempertimbangkan karakteristik distribusi Makan Bergizi Gratis melalui penerapan aktivitas *delivery* dan *pickup*, pembagian waktu pelayanan berdasarkan jenjang pendidikan (TW1, TW2, dan TW3), serta penggunaan sistem *multi-trip* dalam satu hari distribusi. metode *K-Means Clustering* digunakan

untuk membangkitkan kandidat lokasi SPPG, kemudian kandidat tersebut dioptimasi bersama alokasi pelanggan dan rute distribusi menggunakan SA sehingga diperoleh konfigurasi jaringan distribusi yang lebih efisien. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan rute distribusi yang optimal tetapi juga menghasilkan keputusan lokasi SPPG yang mendukung peningkatan efisiensi operasional distribusi Makan Bergizi Gratis secara menyeluruh.

Tabel 2. 1 Kajian Literatur

Penulis	Obyek (Industri)				Metode			
	makanan	Logistik dan Service	Kesehatan	FMCG	SA	GA	ALNS	PSO
(Maghfiroh et al., 2023)		√					√	
(Yu et al., 2022)		√			√	√		
(Y. M. L. Simanjuntak et al., 2025)	√				√			
(Ferreira & Alves de Queiroz, 2022)		√			√			
(Lorinez Silitonga et al., 2025)	√				√			
(M. Liu et al., 2025)		√					√	
(Saragih & Turnip, 2022)				√	√			
(Rave & Fontaine, 2025)		√					√	

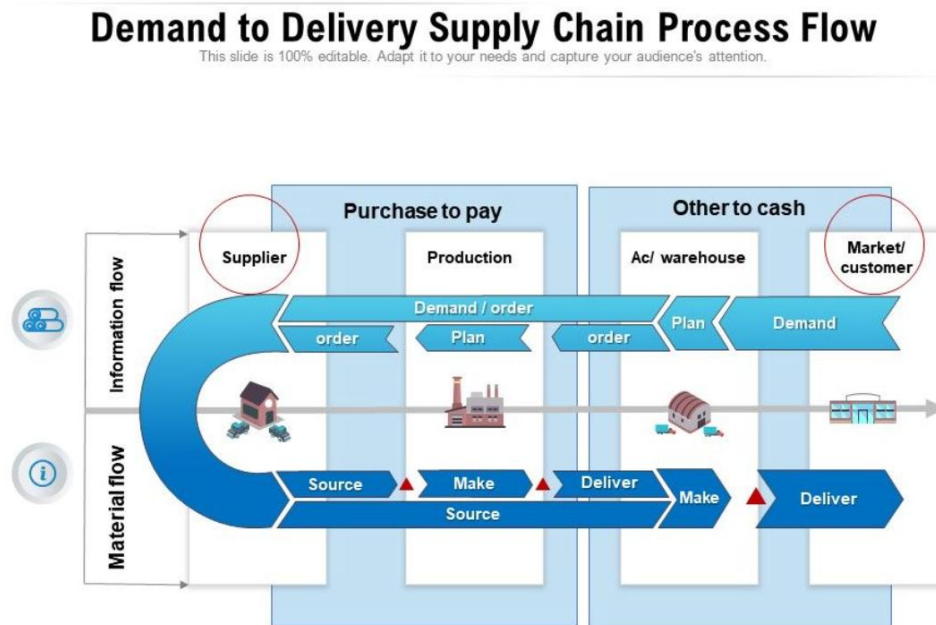
Penulis	Obyek (Industri)				Metode			
	makanan	Logistik dan Service	Kesehatan	FMCG	SA	GA	ALNS	PSO
(Saputra & Sukmono, 2024)		√				√		
(Fatma et al., 2022)			√				√	
(Matsuoka & Miyasaka, 2023)	√				√			
(Zhao & Sharma, 2023)		√						√
(Sumiati et al., 2025)				√	√			
(Kuo et al., 2022)		√			√			
(Xin et al., 2022)		√				√		
Usulan	√				√			

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Supply Chain Management

Menurut Adhairani Nasution & Aslami (2022), *Supply chain management* (SCM) adalah suatu pendekatan dalam mengoordinasikan dan mengelola seluruh proses bisnis dalam suatu organisasi agar saling terhubung dan berjalan secara selaras, sehingga tercipta alur kerja yang lebih teratur dan terintegrasi antarbagian dalam organisasi. SCM tidak hanya berperan sebagai instrumen pengelola arus barang, informasi, dan finansial, tetapi juga menjadi strategi kunci dalam mengoptimalkan efisiensi serta keunggulan kompetitif perusahaan. SCM mencakup pengawasan menyeluruh terhadap siklus hidup produk, mulai dari bahan baku, proses

pembayaran, hingga pertukaran informasi yang melibatkan sinergi antara pemasok, produsen, distributor, hingga konsumen akhir. Sebagai sistem yang luas dan kompleks, keberhasilan SCM sangat bergantung pada kolaborasi yang solid di antara setiap mitra dalam rantai pasokan tersebut (Nur Anisa et al., 2025).



Gambar 2. 1 *Delivery Supply Chain Process*

Sumber: www.theknowledgeacademy.com

Guna memenangkan persaingan pasar, perusahaan bekerja sama dalam sistem rantai pasok untuk menyediakan produk yang berkualitas dan terjangkau secara tepat waktu demi memuaskan konsumen. Menurut SEMNASTI, (2025) Ada tiga elemen utama yang diperlukan dalam rantai pasok, yaitu:

1. Aliran barang dari hulu ke hilir, misalnya bahan baku yang dikirim dari pemasok ke pabrik kemudian setelah produk selesai, barang tersebut dikirim ke distributor, pengecer, hingga konsumen akhir.
2. Aliran uang dan transaksi keuangan yang mengalir dari hilir ke hulu.
3. Aliran informasi yang dapat mengalir dari hulu ke hilir atau sebaliknya. Rantai pasok terdiri dari berbagai konsumen, seperti pemasok, titik distribusi, dan penyedia transportasi, yang berperan dalam mengantarkan produk dari bahan baku hingga sampai ke tangan pengguna akhir.

2.2.2 Manajemen Logistik

Manajemen logistik merupakan proses yang mencakup perencanaan, pengorganisasian, hingga pengawasan terhadap seluruh siklus aset mulai dari pengadaan, pendistribusian, pemeliharaan, hingga penghapusan. Strategi ini diimplementasi guna memastikan tujuan organisasi tercapai secara efektif dan efisien. Meskipun identik dengan sektor manufaktur, dagang, dan ritel karena intensitas pengelolaan barang fisiknya, manajemen logistik juga memegang peranan krusial pada perusahaan jasa, khususnya dalam mengoptimalkan sistem pengiriman dan distribusi produk ke tangan konsumen (Primadi & Salsabila Putri, 2025).

Fokus utama logistik terletak pada efisiensi biaya, khususnya pada sektor transportasi. Di samping itu, peningkatan kualitas pelayanan yang mencakup ketepatan waktu, keandalan, dan fleksibilitas layanan menjadi prioritas yang lebih krusial. Perusahaan bergerak di bidang distribusi fisik sangat mengedepankan strategi yang mampu meminimalkan biaya transportasi guna memperkuat daya saing mereka di pasar (Safira et al., 2023).

2.2.3 Optimasi

Optimasi merupakan suatu prosedur sistematis untuk menentukan variabel input dalam suatu himpunan guna mencapai titik ekstrim, baik berupa nilai maksimum atau minimum suatu fungsi. Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, muncul pendekatan metaheuristik yaitu untuk menyelesaikan masalah optimasi menggunakan algoritma metaheuristik (Wijayati et al., 2024).

Optimasi dipahami sebagai mekanisme untuk menentukan metode terbaik dalam menggunakan sumber daya yang ada tanpa melanggar batasan-batasan yang ada. Prosedur ini melibatkan pemodelan sistem matematis, identifikasi variabel serta kendala, penetapan fungsi tujuan, dan pencarian titik optimal melalui maksimasi atau minimasi. Tujuan utama dalam menyelesaikan persoalan optimasi yang rumit adalah menemukan solusi, terlepas dari seberapa baik solusi tersebut. Ketika setidaknya satu solusi ditemukan, berbagai metode dapat digunakan untuk meningkatkannya (Nassef et al., 2023).

Metaheuristik merupakan prosedur optimasi tingkat tinggi yang mengombinasikan strategi pencarian sistematis dengan mekanisme stokastik (acak) untuk menemukan solusi berkualitas pada masalah yang kompleks, seperti masalah NP-hard atau situasi dengan informasi terbatas. Secara etimologis, istilah ini bermakna "melampaui ilmu penemuan," di mana algoritma tersebut berperan sebagai strategi utama yang mengarahkan metode heuristik dasar agar mampu keluar dari jebakan optimalitas lokal. Meskipun tidak jaminan mutlak untuk

menemukan solusi optimal global, metaheuristik sangat efektif dalam menjelajahi ruang pencarian yang luas dengan beban komputasi yang lebih ringan, sehingga mampu menghasilkan solusi yang memuaskan dalam waktu yang wajar (M. Almufti et al., 2023).

2.2.4 *K-Means Clustering*

K-Means Clustering adalah metode yang digunakan untuk mengelompokkan data yang bersifat non-hierarkis untuk membagi suatu data ke dalam satu atau lebih kelompok (Nugraha et al., 2025). Pada penerapan metode ini ada beberapa langkah yang harus dijalani, yaitu:

- a. Menentukan jumlah kluster yang dibutuhkan.
- b. Hanya atribut numerik yang digunakan.

Metode *K-Means* dimulai dengan secara acak memilih pusat kluster awal, selanjutnya setiap data yang akan dikelompokkan ke dalam kluster terdekat berdasarkan jarak terkecil. Pada proses ini diikuti dengan pembaruan posisi pusat kluster secara bertahap sampai semua data terkelompokkan dengan optimal ke dalam kluster yang terbentuk.

2.2.5 *Vehicle Routing Problem (VRP)*

Vehicle routing problem (VRP) merupakan sebuah persoalan optimasi rute distribusi barang yang berfokus pada efisiensi penggunaan kendaraan dengan kapasitas terbatas. Masalah ini bermula dari satu titik depot utama untuk melayani sejumlah lokasi tujuan yang memiliki variasi tingkat permintaan. Dalam model ini, kendaraan dikerahkan untuk memenuhi kebutuhan setiap titik kunjungan tersebut dengan tetap memperhatikan batas muatan kendaraan yang tersedia (Agustine et al., 2022). Nurma Heitasari & Kemal Ghifari, (2022) menjelaskan bahwa VRP memiliki kelebihan dan kekurangan, diantaranya adalah:

1. Dengan adanya VRP kita dapat menentukan urutan pengiriman untuk keberbagai tempat dengan perhitungan jarak dan waktu yang efisien.
2. Dengan meminimalkan jarak dengan menggunakan VRP maka kita akan meminimalkan penggunaan waktu dan juga penggunaan biaya.

Tidak hanya kelebihan, VRP juga memiliki beberapa kekurangan diantaranya adalah:

1. Walaupun VRP bisa menghemat waktu, biaya dan juga jarak, VRP harus di dukung dengan menekan kemampuan operasi yang ada diperusahaan (pengisian esiapn mobil tanki, dan juga waktu antri).
2. Metode ini tidak mempertimbangkan waktu macet atau terjadinya kerusakan pada mobil.

2.2.6 Location Routing Problem with Time Windows

Location routing problem (LRP) merupakan model optimasi yang mengintegrasikan pengambilan keputusan strategis terkait penentuan lokasi fasilitas dengan keputusan taktis mengenai perancangan rute distribusi secara simultan. Implementasi model ini dalam skenario dunia nyata terbukti mampu meningkatkan produktivitas dan menghasilkan solusi biaya logistik yang paling efisien karena mampu mensinkronisasikan kebijakan lokasi depo dengan operasional kendaraan secara terpadu. Seiring perkembangannya, LRP telah meluas ke berbagai bidang melalui model-model seperti *pickup and delivery*, *multi-enkelon*, hingga LRP dengan elemen ketidakpastian. Namun, guna mengakomodasi kompleksitas praktis di mana layanan pelanggan terikat oleh batasan waktu (*time windows*) untuk menghasilkan jadwal distribusi yang lebih akurat dan realistis (Maghfiroh et al., 2023).

Time windows atau jendela waktu merupakan parameter batasan temporal yang menetapkan interval waktu tertentu bagi pelaksanaan aktivitas distribusi, baik pengiriman maupun pengambilan barang. Keberadaan elemen ini menjadi sangat krusial dalam manajemen logistik karena menuntut penyelesaian layanan tepat di dalam rentang waktu yang telah disepakati sebelumnya dengan pelanggan (X. Liu et al., 2023).

2.2.7 Simulated Annealing (SA)

Simulated annealing (SA) merupakan algoritma optimasi probabilistik yang mengadopsi teknik pendinginan logam dalam metalurgi. Dalam proses aslinya, material dipanaskan hingga titik tertentu lalu didinginkan secara bertahap guna membentuk struktur kristal yang stabil dengan tingkat energi minimal. Dengan meniru transisi energi ini, SA mampu mengeksplorasi ruang pencarian solusi secara optimal Anshari et al., (2024). Metode ini memproses satu solusi secara tunggal dan memiliki kemampuan untuk menerima solusi yang kurang optimal berdasarkan peluang tertentu, terutama saat suhu masih tinggi. Mekanisme ini sangat krusial agar algoritma tidak terjebak dalam optimum lokal. *Simulated annealing* unggul dalam kemudahan implementasi serta efisiensi waktu untuk menghasilkan solusi awal yang memadai, khususnya pada persoalan optimasi rute dengan tingkat kerumitan menengah (Zildan Ali Firmansyah et al., 2026).

Adhitama et al., (2023) menjelaskan bahwa dalam metode SA diperlukan beberapa parameter yaitu suhu awal, suhu akhir dan koefisien pendinginan. Berikut merupakan proses berjalannya metode ini:

1. Melakukan inisialisasi nilai awal parameter.

2. Membangkitkan solusi awal disertai dengan fitness dari solusi tersebut.
3. Melakukan modifikasi solusi awal dengan skema proses penggantian/penukaran noda.
4. Menghitung solusi hasil modifikasi yang telah diperoleh dari proses sebelumnya.
5. Menentukan apakah solusi baru yang dihasilkan akan diterima atau ditolak.
6. Memperbarui parameter dan mengulang kembali langkah modifikasi hingga hasil terbaik terpilih.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada lokasi dapur makan bergizi gratis (MBG) dan perencanaan jaringan distribusi makanan ke sekolah-sekolah di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta. Permasalahan tersebut dimodelkan LRPTW dengan mempertimbangkan terkait batasan waktu pengiriman ke setiap sekolah, dan diselesaikan menggunakan algoritma *Simulated Annealing* agar dapat memperoleh lokasi dapur dan rute distribusi yang optimal.

3.2 Instrumen Penelitian

Sejumlah alat bantu digunakan dalam penelitian ini untuk mendukung proses pengumpulan, pengolahan, dan analisis data. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. *Google Maps*, digunakan untuk memperoleh informasi geografis berupa lokasi sekolah dan kandidat lokasi dapur MBG di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta. *Google Maps* juga digunakan untuk menentukan koordinat latitude dan longitude yang kemudian digunakan sebagai input dalam proses penelitian ini.
2. *Python*, yang merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk mengolah data serta mengimplementasikan algoritma *Simulated Annealing* dalam menyelesaikan permasalahan *Location Routing Problem with Time Windows*. Python digunakan untuk menjalankan proses simulasi, melakukan perhitungan optimasi, serta menghasilkan solusi berupa lokasi dapur yang optimal dan rute distribusi yang efisien.
3. *Microsoft Excel*, digunakan sebagai alat bantu untuk menyusun, menyimpan, dan mengelola data penelitian, seperti data lokasi sekolah, koordinat geografis, serta parameter lain yang diperlukan dalam penelitian.

3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder

Pada penelitian ini, jenis data yang digunakan terdiri dari dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung dari objek penelitian. Data ini dikumpulkan melalui berbagai metode seperti wawancara, observasi lapangan, maupun

penyebaran kuesioner kepada pihak yang terkait dengan penelitian (Nurul Melani Haifa et al., 2025). Data primer pada penelitian ini meliputi hasil observasi lapangan secara langsung dari objek penelitian, yaitu wawancara dengan pengelola MBG yang berada di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta. Data tersebut meliputi informasi lokasi sekolah, koordinat geografis setiap titik distribusi, serta jarak antar lokasi.

2. Data sekunder, merupakan data yang telah tersedia dalam bentuk dokumentasi atau publikasi, seperti berita, artikel, maupun karya ilmiah (Alfassa et al., 2025). Data sekunder pada penelitian ini seperti laporan pemerintah, artikel serta publikasi ilmiah yang berkaitan dengan program makan bergizi gratis (MBG). Data ini digunakan untuk memperoleh informasi terkait MBG, serta referensi penelitian model LRPTW berbasis algoritma SA

3.4 Metode Pengumpulan Data

Untuk mendukung proses analisis pada penelitian ini, peneliti mengumpulkan berbagai data yang relevan dengan objek penelitian. Proses pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam pemodelan optimasi lokasi dapur MBG serta perencanaan rute distribusi ke sekolah-sekolah di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta. Adapun metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Wawancara

Metode wawancara dilakukan dengan mengajukan pertanyaan secara langsung kepada pihak yang dianggap memiliki pengetahuan terkait program MBG. Melalui wawancara ini, peneliti memperoleh informasi mengenai pelaksanaan distribusi, kebutuhan layanan ke sekolah-sekolah, serta gambaran umum sistem distribusi yang digunakan sebagai pendukung dalam penelitian.

2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari sumber yang relevan seperti buku, jurnal ilmiah, artikel, serta penelitian sebelumnya yang masih relevan dengan subjek. Metode ini bertujuan untuk memperoleh landasan teori serta memperkuat pemahaman terhadap metode yang digunakan dalam penelitian.

3.5 Populasi dan Sampel

3.5.1 Populasi

Populasi merupakan wilayah generalisasi yang mencakup objek atau subjek yang memiliki karakteristik dan kualitas tertentu yang telah ditentukan oleh peneliti untuk dipelajari, sehingga dari hasil penelitian tersebut dapat ditarik suatu kesimpulan Suryani et al., (2023). Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh sekolah yang berada di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta, yang menjadi potensi titik distribusi dalam program MBG.

3.5.2 Sampel

Sampel merupakan sebagian dari populasi yang dipilih untuk diteliti dan digunakan sebagai sumber data. Sampel ini diharapkan dapat mewakili keseluruhan populasi karena memiliki karakteristik yang sama dengan populasi yang diteliti Jailani et al., (2023). Sampel pada penelitian ini mencakup sejumlah titik distribusi dapur MBG yang tersebar di wilayah Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta, yang mempresentasikan lokasi pelanggan atau sekolah yang menerima MBG. Selain itu, penelitian ini mempertimbangkan beberapa dapur MBG sebagai depot yang berfungsi sebagai titik awal dan akhir rute distribusi. dalam kerangka LRPTW lokasi dapur tidak hanya berperan sebagai pusat distribusi, tetapi juga sebagai variabel keputusan yang akan dioptimalkan. Pemilihan sampel ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi nyata sistem distribusi dengan mempertimbangkan aspek jarak, permintaan, dan waktu pelayanan, sehingga proses optimasi menggunakan pendekatan SA dapat menghasilkan solusi yang efisien dan relevan dalam meminimalkan biaya distribusi.

3.6 Problem Definition

Permasalahan dalam penelitian ini dimodelkan sebagai *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) yang dikembangkan menjadi LRPTW. VRPTW merupakan permasalahan optimasi dalam sistem distribusi yang bertujuan menentukan rute kendaraan untuk melayani sejumlah pelanggan dengan mempertimbangkan batasan kapasitas dan jendela waktu pelayanan. Konsep dasar VRPTW pertama kali diperkenalkan oleh Solomon, (1987), yang hingga saat ini menjadi acuan utama dalam penelitian terkait *routing*.

Pengembangan menjadi LRPTW menambahkan aspek penentuan lokasi fasilitas ke dalam model, sehingga keputusan yang diambil tidak hanya terbatas pada rute kendaraan, tetapi juga pada lokasi depot yang optimal. Menurut penelitian Nagy & Salhi, (2007) integrasi antara penentuan lokasi dan rute distribusi ini penting karena keduanya saling mempengaruhi dalam

menentukan efisiensi sistem logistik secara. Permasalahan distribusi MBG dalam penelitian ini dirumuskan ke dalam model matematis LRPTW yang yang mengintegrasikan penentuan lokasi fasilitas dan rute pengiriman. Integrasi ini bertujuan untuk meminimalkan total biaya, terdiri atas biaya pembukaan depot dan biaya perjalanan. Dengan demikian, pemilihan lokasi SPPG yang dibuka akan berpengaruh secara langsung terhadap alokasi sekolah dan rute distribusi yang terbentuk. Berikut merupakan model matematis yang digunakan untuk merepresentasikan fungsi tujuan dan batasan dalam sistem distribusi MBG:

a. Indeks

- k : Indeks untuk kandidat lokasi dapur ($k = 1, 2, \dots, K$).
- i, j : Indeks untuk lokasi sekolah ($i, j = 0, 1, \dots, N$). (indeks 0 merepresentasikan lokasi dapur).

b. Parameter

- o_i : Biaya pembukaan depot pada lokasi i (Rp).
- c_{ij} : Biaya perjalanan dari lokasi i dan lokasi j (Rp).
- d_i : Kebutuhan (*demand*) makanan di sekolah i (porsi).
- Q : Kapasitas maksimal kendaraan pengangkut (porsi)
- a_i, b_i : Batas waktu awal dan akhir (*time windows*) pelayanan di sekolah i .

c. Variabel Keputusan

- x_{ijk} : Variabel biner yang bernilai 1 jika kendaraan k melakukan perjalanan dari lokasi i ke lokasi j , dan 0 jika tidak.
- t_i : Variabel kontinu yang merepresentasikan waktu kedatangan kendaraan di lokasi sekolah i .
- y_i : Variabel biner yang bernilai 1 jika depot i dibuka dan 0 jika tidak.

d. Fungsi Objektif

$$\min Z = \sum_{i \in I} o_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (3.1)$$

Fungsi objektif tersebut bertujuan untuk meminimalkan total biaya distribusi yang terdiri atas biaya pembukaan depot dan biaya perjalanan kendaraan. Dalam proses optimasi, algoritma Simulated Annealing digunakan untuk menentukan kombinasi lokasi depot yang dibuka, alokasi sekolah, serta urutan rute distribusi yang menghasilkan total biaya minimum dengan tetap memperhatikan batasan operasional yang berlaku.

e. Batasan yang digunakan

Model optimasi yang dibangun juga mempertimbangkan beberapa batasan agar solusi yang diperoleh bersifat layak (*feasible*). Berikut merupakan batasan yang digunakan pada penelitian ini:

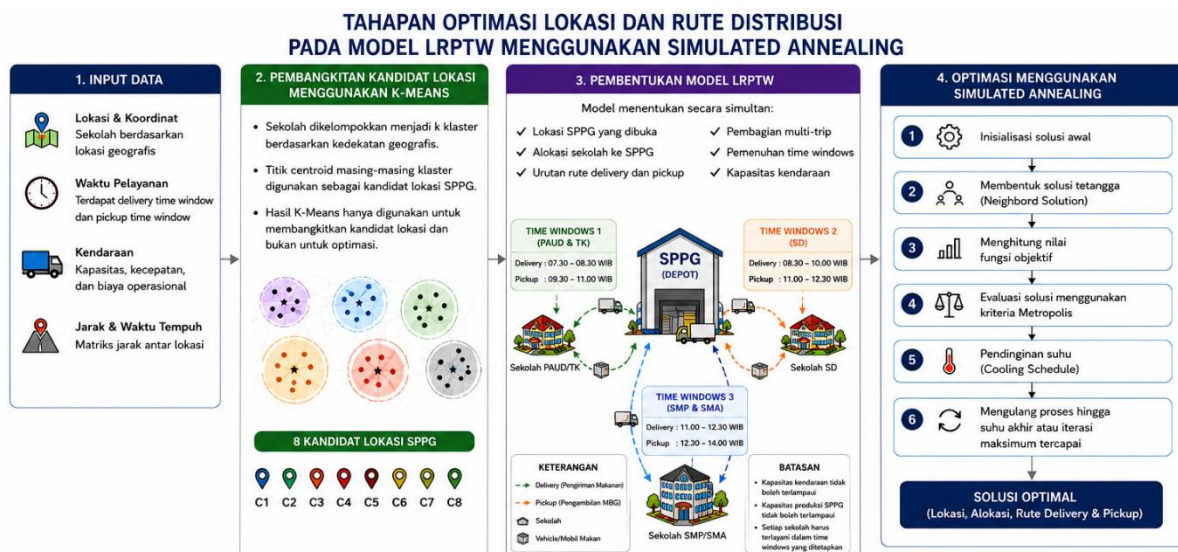
1. Setiap sekolah hanya dapat dilayani oleh satu SPPG yang aktif sehingga tidak terjadi duplikasi pelayanan.
2. Seluruh rute distribusi harus berawal dan berakhir pada depot yang sama.
3. Kapasitas muatan kendaraan pada setiap perjalanan tidak boleh melebihi kapasitas maksimum 1015 kendaraan yang tersedia.
4. Total permintaan pelanggan (sekolah) yang dialokasikan ke depot tidak boleh melebihi kapasitas depot yaitu 2500.
5. Mencegah terbentuknya rute tertutup yang tidak terhubung dengan depot
6. Memastikan setiap penerima manfaat hanya dapat dialokasikan ke depot yang aktif dan memiliki rute distribusi yang menghubungkan depot dengan lokasi penerima manfaat.
7. Menetapkan nilai awal waktu untuk keberangkatan dari depo (dapur MBG).
8. Jika kendaraan k melayani pengantaran di sekolah j , maka kendaraan k yang sama juga harus melayani pengambilan di sekolah j tersebut.
9. Setiap depot yang aktif hanya diperbolehkan mengoperasikan dua unit armada untuk melayani rute distribusi.
10. Selain itu, waktu kedatangan kendaraan pada setiap sekolah harus berada dalam rentang *time windows* yang telah ditentukan sesuai jadwal pelayanan masing-masing sekolah. Solusi yang melanggar batasan kapasitas maupun *time windows* akan dianggap tidak layak (*infeasible*) dan tidak diterima dalam proses pencarian solusi menggunakan algoritma *Simulated Annealing*.

3.7 Tahapan Optimasi dan Rute Distribusi

Tahapan optimasi lokasi dan rute distribusi pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa proses yang saling terintegrasi. Proses diawali dengan pengumpulan dan pengolahan data sekolah penerima manfaat yang meliputi data koordinat lokasi, permintaan, waktu pelayanan (*time windows*), kapasitas kendaraan, serta matriks jarak antar lokasi. Selanjutnya metode *K-Means Clustering* digunakan untuk membangkitkan kandidat lokasi SPPG berdasarkan kedekatan geografis sekolah. Kandidat lokasi yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai masukan pada model LRPTW dan optimasi lokasi, alokasi sekolah, serta penentuan rute

distribusi *delivery* dan *pickup* dilakukan secara simultan menggunakan SA dengan mempertimbangkan batasan kapasitas SPPG, kapasitas kendaraan, *service time*, dan *time windows* pada setiap sekolah.

Tahapan optimasi lokasi dan rute distribusi pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa proses yang saling terintegrasi. Proses dimulai dari pengumpulan dan pengolahan data sekolah penerima manfaat, kemudian dilanjutkan dengan penentuan kandidat lokasi SPPG menggunakan metode *K-Means Clustering*. Kandidat lokasi yang diperoleh selanjutnya akan digunakan sebagai depot pada model LRPTW, optimasi rute distribusi makanan dan pengambilan wadah dilakukan menggunakan algoritma SA dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, *service time*, serta batasan *time windows* pada setiap sekolah. Berikut merupakan tahapan yang digunakan dalam penelitian ini:

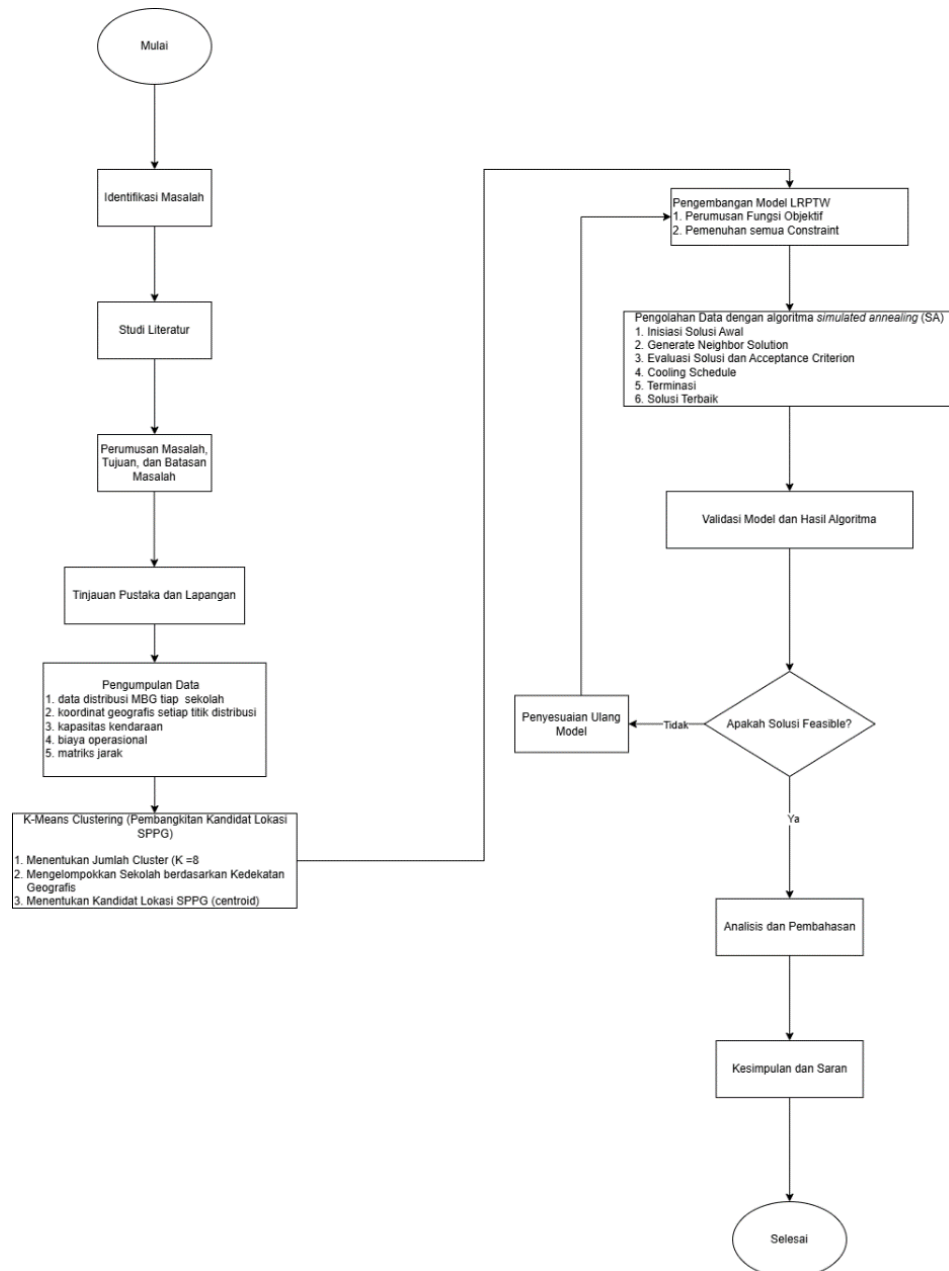


Gambar 3. 1 Mekanisme Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi

Berdasarkan gambar 3.1 diatas proses optimasi diawali dengna pengumpulan data yang meliputi koordinat sekolah, waktu pelayanan, kapasitas kendaraan, serta matriks jarak dan waktu tempuh antar lokasi. Selanjutnya metode *K-Means Clustering* digunakan untuk membangkitkan delapan kandidat lokasi SPPG berdasarkan kedekatan geografis sekolah, dimana kandidat lokasi tersebut berfungsi sebagai alternatif depot dan bukan sebagai solusi optimal. Kandidat lokasi yang diperoleh kemudian digunakan pada model LRPTW untuk menentukan lokasi SPPG yang dibuka, alokasi sekolah, rute *delivery* dan *pickup*, serta pembagian *multi-trip* dengan mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan dan *time windows* berdasarkan jenjang pendidikan. Proses optimasi dilakukan menggunakan *Simulated Annealing*

3.8 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian yang menggambarkan langkah-langkah penelitian yang disajikan dalam bentuk *flowchart*:



Gambar 3. 2 Alur Penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari langkah-langkah tersebut:

1. Mulai
2. Identifikasi Masalah

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan dalam sistem distribusi dapur MBG, khususnya terkait penentuan lokasi fasilitas dan rute distribusi yang belum optimal.

3. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan kajian terhadap berbagai sumber seperti jurnal, buku, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan LRPTW dengan menggunakan metode *simulated annealing*. Studi ini bertujuan untuk memahami konsep, model, serta solusi yang telah dikembangkan sebelumnya.

4. Perumusan Masalah, Tujuan, dan Batasan Masalah

Peneliti merumuskan permasalahan utama yaitu bagaimana menentukan lokasi dapur MBG dan rute distribusi yang optimal. Tujuan penelitian adalah meminimalkan biaya distribusi dengan mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan, jendela waktu pelayanan, serta keterbatasan operasional lainnya. Batasan penelitian juga ditetapkan agar ruang lingkup penelitian lebih terarah.

5. Tinjauan Pustaka dan Lapangan

Peneliti melakukan tinjauan pustaka mengenai pendekatan algoritma terkait kemudian melakukan tinjauan lapangan untuk mengetahui sistem distribusi yang berjalan, tahap ini bertujuan untuk memperoleh gambaran nyata sistem yang akan dimodelkan.

6. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh seluruh data yang dibutuhkan dalam proses pemodelan dan optimasi. Data yang dikumpulkan meliputi data distribusi MBG pada setiap sekolah, koordinat geografis masing-masing titik distribusi, kapasitas kendaraan yang digunakan, biaya operasional kendaraan, serta matriks jarak antar lokasi. Data tersebut digunakan sebagai parameter utama dalam *clustering* dan pemodelan LRPTW.

7. *K-Means Clustering* untuk pembangkitan kandidat lokasi SPPG

Pada tahap ini digunakan metode *K-Means Clustering* untuk mengelompokkan sekolah berdasarkan kedekatan geografis. Penggunaan metode ini bertujuan untuk membangkitkan lokasi kandidat yang berada pada posisi pusat terhadap sekolah-sekolah dalam satu kelompok.

8. Pengembangan Model LRPTW

Setelah kandidat lokasi SPPG diperoleh, tahap berikutnya adalah pengembangan model LRPTW. Model ini mengintegrasikan keputusan penentuan lokasi dan perencanaan rute distribusi dalam satu model optimasi.

9. Pengolahan Data Menggunakan Algoritma *Simulated Annealing*

Model LRPTW yang telah dikembangkan diselesaikan menggunakan algoritma SA. Proses diawali dengan pembentukan solusi awal terdiri dari kombinasi lokasi SPPG dan rute distribusi, kemudian dilakukan pembangkitan solusi tetangga untuk mencari alternatif solusi yang lebih baik. Setiap solusi dievaluasi berdasarkan nilai fungsi objektif dan diterima atau ditolak menggunakan *acceptance criterion*. Temperatur kemudian diturunkan secara bertahap mengikuti *cooling schedule* hingga mencapai kondisi terminasi dan hasil akhir dari proses ini adalah solusi terbaik yang menghasilkan biaya distribusi minimum dengan tetap memenuhi seluruh *constraint* yang ditetapkan.

10. Validasi Model dan hasil algoritma

Tahap validasi dilakukan untuk memastikan bahwa model dan solusi yang dihasilkan dapat diterapkan pada kondisi nyata. Validasi dilakukan dengan memeriksa apakah seluruh *constraint* dalam model telah terpenuhi dan juga hasil optimasi juga dievaluasi dari sisi operasional untuk memastikan solusi yang diperoleh realistis dan layak diterapkan.

11. Evaluasi Kelayakan Solusi

Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan terhadap hasil optimasi untuk menentukan apakah solusi yang diperoleh bersifat *feasible* atau tidak. Jika solusi belum memenuhi seluruh batasan yang ditentukan, maka dilakukan penyesuaian terhadap model, parameter, atau proses optimasi hingga diperoleh solusi yang layak. Sebaliknya, jika solusi telah memenuhi seluruh *constraint* maka penelitian dapat dilanjutkan ke tahap analisis dan pembahasan.

12. Analisis dan Pembahasan

Tahap analisis dan pembahasan dilakukan untuk menginterpretasikan hasil yang diperoleh dari proses optimasi. Analisis mencakup lokasi SPPG yang terpilih, rute distribusi yang terbentuk, total jarak tempuh, jumlah kendaraan yang digunakan, serta biaya distribusi yang dihasilkan. Selain itu, dilakukan pembahasan mengenai efektivitas solusi yang diperoleh dan perbandingannya dengan kondisi distribusi yang ada sebelumnya.

13. Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir adalah penyusunan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan memuat jawaban atas tujuan penelitian mengenai lokasi SPPG dan

rute distribusi yang optimal. Selain itu, diberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun rekomendasi bagi pihak terkait dalam penerapan hasil penelitian pada sistem distribusi Program MBG.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Profil Program MBG

Program makan bergizi gratis merupakan kebijakan pemerintah yang bertujuan untuk menyediakan makanan sehat dan bernutrisi secara cuma-cuma bagi kelompok sasaran, terutama siswa dari jenjang sekolah dasar hingga menengah atas. Inisiatif ini dirancang sebagai bagian dari upaya meningkatkan kualitas pendidikan, kesehatan, dan kesejahteraan masyarakat. Melalui program ini, kebutuhan gizi harian anak diharapkan dapat terpenuhi, angka stunting dapat ditekan, serta kehadiran dan konsentrasi belajar siswa di sekolah dapat meningkat. Program yang digagas oleh Presiden Prabowo Subianto ini juga sejalan dengan target nutrisi global tahun 2025 yang ditetapkan oleh organisasi internasional seperti *world health organization* (WHO) dan *united nations international children's emergency fund* (UNICEF), yang berfokus pada pembangunan sumber daya manusia. Latar belakang pelaksanaan program ini didasarkan pada kondisi bahwa sekitar 25% anak di Indonesia belum memperoleh asupan makanan bergizi setiap hari. Oleh karena itu, program ini hadir untuk mengatasi permasalahan kelaparan tanpa membedakan latar belakang ekonomi (Rahmah et al., 2025).

4.1.2 Formulasi Masalah

Penelitian ini berfokus pada penyelesaian permasalahan optimasi lokasi dan perencanaan jaringan distribusi pada program MBG di Kecamatan Ngemplak, Yogyakarta. Permasalahan utama terletak pada penentuan rute distribusi dari dapur MBG (SPPG) ke titik-titik penerima manfaat atau sekolah dengan tujuan meminimasi biaya distribusi yang timbul. Dalam proses distribusi, ketepatan waktu pengiriman menjadi faktor penting, di mana setiap titik tujuan harus dilayani sesuai dengan jendela waktu yang telah ditentukan agar makanan tetap dalam kondisi layak konsumsi.

Selain itu, terdapat batasan kapasitas kendaraan, di mana setiap mobil hanya mampu mengangkut maksimal 1015 porsi makanan. Setiap SPPG didukung oleh dua kendaraan distribusi, dan setiap SPPG hanya boleh mendistribusikan maksimal 2.500 porsi sehingga perencanaan rute harus mempertimbangkan pembagian beban secara optimal agar tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Oleh karena itu, diperlukan rute yang efisien sesuai dengan jumlah permintaan pada setiap titik distribusi.

Kode	Nama_Lokasi	Tipe	Demand_Porsi	Latitude	Longitude	East (X)	North (Y)
	BIMOMARTANI 2 (Pondok Suruh)						
	SPPG SLEMAN						
SPPG_07	NGEMPLAK WEDOMARTANI 1 (Mr. Blangkon 2)	Depot	0	-7,6803304	110,4156195	435551,491	9150997,926
	SPPG NGAGLIK 02						
SPPG_08	(Yayasan Mataram Bersama Indonesia)	Depot	0	-7,6803303	110,4078946	434699,52	9150996,768
CUST_001	KB Bintang Mulia	Customer	24	-7,6840645	110,2638155	418809,666	9150559,302
CUST_002	KB Among Siwi	Customer	35	-7,6653308	110,4151485	435497,285	9152656,143
CUST_003	SPS Puspita VIII	Customer	22	-7,6788867	110,4053856	434422,583	9151155,984
CUST_004	SPS Tunas Bangsa	Customer	83	-7,6843219	110,2676166	419228,943	9150531,562
CUST_005	TK Harjobinangun	Customer	32	-7,6690853	110,4087592	434793,162	9152240,097
n	...	...	...	...	...	...	...
CUST_166	SDN Malangrejo	Customer	185	-7,7440821	110,4182054	435846,292	9143950,209
CUST_167	SD Alam Anak Prima	Customer	59	-7,7415836	110,4153745	435533,742	9144226,004
CUST_168	MTS Anwar Futuhiyyah	Customer	155	-7,7373846	110,4197852	436019,49	9144690,894
CUST_169	SMK YPKK 3 Yogyakarta	Customer	107	-7,7397156	110,4117479	435133,54	9144431,971

Tabel 4. 2 Data Time Windows dan Service Time

Kode	Demand Porsi	Delivery ET	Delivery LT	Pickup ET	Pickup LT	Service Delivery	Service Pickup	Time Windows
CUST_001	24	90	150	210	300	10	10	1
CUST_002	35	90	150	210	300	10	10	1
CUST_003	22	90	150	210	300	10	10	1
CUST_004	83	90	150	210	300	10	10	1
CUST_005	32	90	150	210	300	10	10	1
n	...	...	...	...	...	...	...	...
CUST_166	185	150	240	300	390	10	10	2
CUST_167	59	150	240	300	390	10	10	2

Kode	Demand Porsi	Delivery ET	Delivery LT	Pickup ET	Pickup LT	Service Delivery	Service Pickup	Time Windows
CUST_ 168	155	330	390	390	480	10	10	3
CUST_ 169	107	330	390	390	480	10	10	3

Berdasarkan Tabel 4.2 di atas, lokasi kandidat SPGG yang diperoleh dari proses optimasi lokasi berperan sebagai depot dalam sistem distribusi. Depot tersebut digunakan sebagai titik awal dan titik akhir perjalanan kendaraan dalam melakukan pengiriman makanan serta penjemputan ompreng di sekolah penerima manfaat. Selain data koordinat lokasi kandidat SPGG, data sekolah penerima manfaat, *demand*, *time windows*, dan *service time*, penelitian ini juga menggunakan data pendukung lainnya. Adapun data pendukung yang digunakan dalam penelitian ini, dilampirkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Data *Time Windows*

Time Windows	Jenjang Pendidikan	Delivery Time	Pickup Time
Time Windows 1	PAUD dan TK	07.30 - 08.30 WIB	09.30 – 11.00 WIB
Time Windows 2	Sekolah Dasar (SD)	08.30 – 10.00 WIB	11.00 – 12.30 WIB
Time Windows 3	SMP dan SMA	11.30 – 12.30 WIB	12.30 – 14.00 WIB

Dalam penelitian ini digunakan tiga *time windows* pengiriman dan penjemputan yang disesuaikan dengan jadwal operasional program MBG. *Time windows* pertama digunakan untuk melayani sekolah jenjang PAUD/TK, *time windows* kedua untuk jenjang SD/MI, dan *time windows* ketiga untuk jenjang SMP/SMA/SMK sederajat. Pembagian *time windows* tersebut didasarkan pada perbedaan jadwal kegiatan belajar mengajar dan waktu konsumsi makanan pada masing-masing jenjang pendidikan, sehingga distribusi dapat dilakukan sesuai kebutuhan penerima manfaat. Selain itu, setiap *time windows* juga memiliki rentang waktu penjemputan ompreng yang digunakan untuk mengatur proses pengembalian wadah makanan kegiatan makan selesai. Dengan adanya pembagian *time windows* ini, proses distribusi dan penjemputan ompreng diharapkan dapat berjalan lebih teratur serta meminimalkan potensi keterlambatan pelayanan. Selain data *time windows*, penelitian ini juga menggunakan data kendaraan Asumsi kondisi perjalanan kendaraan distribusi pada penelitian ini mengacu pada TomTom *Traffic Index* Indonesia, yang merupakan *platform* pemantauan lalu lintas berbasis data GPS dari jutaan

perangkat navigasi dan kendaraan yang memberikan informasi mengenai tingkat kemacetan, kecepatan perjalanan, serta karakteristik lalu lintas pada berbagai wilayah. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menggambarkan kondisi operasional distribusi yang lebih realistis (TomTom, 2025). Selanjutnya, biaya bahan bakar pada penelitian ini dihitung berdasarkan total jarak tempuh hasil optimasi, konsumsi bahan bakar kendaraan, dan harga BBM yang digunakan dalam penelitian yang dijelaskan pada Tabel 4.4 tersebut:

Tabel 4. 4 Data Kendaraan

Jenis Kendaraan	Daihatsu Grand Max
Jumlah Kendaraan	2
Kapasitas Kendaraan	1015
Rata-rata Kecepatan Kendaraan	24,1 km/jam
Rasio Konsumsi BBM	1:10 (1 liter menempuh 10,6 km)
Harga BBM/Km	Rp10.000,00

4.1.4 Matriks Jarak

Jarak *euclidean* merupakan metode pengukuran jarak antara dua titik dalam ruang *Euclidean* yang dikembangkan berdasarkan konsep geometri oleh matematikawan Yunani, Euclid. Metode ini digunakan untuk menentukan jarak garis lurus antara dua titik berdasarkan koordinat yang dimiliki. Dalam penelitian ini, jarak *Euclidean* digunakan untuk menghitung jarak antara titik centroid dan masing-masing titik lokasi, sehingga dapat membantu dalam proses pengelompokan dan penentuan antar lokasi. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung matriks jarak dan hasil perhitungannya sebagai berikut:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.1)$$

Tabel 4. 5 Matriks Jarak

SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN
NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK
UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA
NI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	NI 2 (Mr. Blangkon 1)	NI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	NI 4 (Yayasan Nimara)	NI 5 (Pondok Suruh)	NI 6 (Pondok Suruh)	NI 7 (Pondok Suruh)	NI 8 (Pondok Suruh)	NI 9 (Pondok Suruh)	NI 10 (Pondok Suruh)	NI 11 (Pondok Suruh)	NI 12 (Pondok Suruh)	NI 13 (Pondok Suruh)	NI 14 (Pondok Suruh)	NI 15 (Pondok Suruh)	NI 16 (Pondok Suruh)	NI 17 (Pondok Suruh)
SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN	SPPG SLEMAN
NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK	NGEMPLAK
UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA	UMBULMARTA
NI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	NI 2 (Mr. Blangkon 1)	NI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	NI 4 (Yayasan Nimara)	NI 5 (Pondok Suruh)	NI 6 (Pondok Suruh)	NI 7 (Pondok Suruh)	NI 8 (Pondok Suruh)	NI 9 (Pondok Suruh)	NI 10 (Pondok Suruh)	NI 11 (Pondok Suruh)	NI 12 (Pondok Suruh)	NI 13 (Pondok Suruh)	NI 14 (Pondok Suruh)	NI 15 (Pondok Suruh)	NI 16 (Pondok Suruh)	NI 17 (Pondok Suruh)
0	0,71	0,23	0,18	4,16	4,39	0,7	1,12	16,8	0,96	1,27	16,38	0,95	0,4	...	0,92	
0,71	0	0,91	0,79	3,98	4,22	0,01	0,85	16,74	1,66	1,14	16,32	1,46	1,11	...	1,38	

	SPPG SLEMAN NGEMPLAK K UMBULM ARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK LAK UMBUL MARTA NI 2 (Mr. Blangkon 1)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK LAK UMBUL MARTA NI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK LAK UMBUL MARTA NI 4 (Yayasan Nimara)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOM ARTANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK LAK BIMOM ARTANI I 2 (Pondok Suruh)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK LAK WEDO MARTA NI 1 (Mr. Blangkon 2)	SPPG NGAGLIK 02 (Yayas an Matara m Bersa ma Indone sia)	KB Binta ng Mulia	KB Am ong Siwi	SPS Pus pita VIII	SPS Tuna s Bang sa	TK Harjob inangu n	TK Bina Kasih	SD N n Pake m 2
NI 2 (Mr. Blangkon 1)															
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTA NI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	0,23	0,91	0	0,33	4,35	4,58	0,9	1,17	16,69	0,76	1,26	16,27	0,73	0,22	... 0,73
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTA NI 4 (Yayasan Nimara)	0,18	0,79	0,33	0	4,03	4,25	0,78	1,29	16,97	0,93	1,45	16,56	1,06	0,4	... 1,06
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	4,16	3,98	4,35	4,03	0	0,24	3,98	4,82	20,64	4,66	5,12	20,22	5,09	4,36	... 5,08
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2 (Pondok Suruh)	4,39	4,22	4,58	4,25	0,24	0	4,22	5,05	20,88	4,87	5,35	20,46	5,31	4,58	... 5,31

	SPPG SLEMAN NGEMPLA K UMBUL ARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	SPPG SLEMAN NGEMP LAK UMBUL MARTA NI 2 (Mr. Blangkon 1)	SPPG SLEMA N NGEMP LAK UMBUL MARTA NI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	SPPG SLEMA N NGEMP LAK UMBUL MARTA NI 4 (Yayasan Nimara)	SPPG SLEMAN NGEMPL AK BIMOM ARTANI 1 (Clarisa Catering Tambaka n)	SPPG SLEMA N NGEMP LAK BIMOM ARTAN I 2 (Pondok Suruh)	SPPG SLEMA N NGEMP LAK WEDO MARTA NI 1 (Mr. Blangko n 2)	SPPG NGAG LIK 02 (Yayas an Matara m Bersa ma Indone sia)	KB Binta ng Mulia	KB Am ong Siwi	SPS Pus pita VIII	SPS Tuna s Bang sa	TK Harjob inangu n	TK Bina Kasih	n	SD N Pake m 2
SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTAN I 1 (Mr. Blangkon 2)	0,7	0,01	0,9	0,78	3,98	4,22	0	0,85	16,75	1,66	1,14	16,33	1,46	1,1	...	1,38
SPPG NGAGLIK 02 (Yayasan Mataram Bersama Indonesia)	1,12	0,85	1,17	1,29	4,82	5,05	0,85	0	15,9	1,84	0,32	15,48	1,25	1,38	...	1,12
KB Bintang Mulia	16,8	16,74	16,69	16,97	20,64	20,88	16,75	15,9	0	16,8 2	15,6 2	0,42	16,07	16,79	...	16,01
KB Among Siwi	0,96	1,66	0,76	0,93	4,66	4,87	1,66	1,84	16,82	0	1,85	16,41	0,82	0,56	...	0,92
SPS Puspita VIII	1,27	1,14	1,26	1,45	5,12	5,35	1,14	0,32	15,62	1,85	0	15,21	1,15	1,46	...	1,01
SPS Tunas Bangsa	16,38	16,32	16,27	16,56	20,22	20,46	16,33	15,48	0,42	16,4 1	15,2 1	0	15,66	16,38	...	15,6
TK Harjobinangun	0,95	1,46	0,73	1,06	5,09	5,31	1,46	1,25	16,07	0,82	1,15	15,66	0	0,75	...	0,13
TK Bina Kasih	0,4	1,11	0,22	0,4	4,36	4,58	1,1	1,38	16,79	0,56	1,46	16,38	0,75	0	...	0,78
n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
SD N Pakem 2	0,92	1,38	0,73	1,06	5,08	5,31	1,38	1,12	16,01	0,92	1,01	15,6	0,13	0,78	...	0

4.1.5 Rute Distribusi Eksisting

Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak SPPG, diperoleh informasi mengenai rute distribusi yang digunakan dalam kegiatan operasional sehari-hari. Informasi tersebut mencakup urutan sekolah yang dilayani oleh masing-masing kendaraan pada setiap SPPG. Rute distribusi eksisting ini disusun berdasarkan kondisi aktual di lapangan dan digunakan sebagai dasar pembandingan terhadap rute hasil optimasi yang diperoleh melalui pendekatan LRPTW berbasis algoritma SA. Adapun rute distribusi eksisting yang diperoleh dari masing-masing SPPG, dilampirkan pada Tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Rute Eksisting SPPG

SPPG	Kendaraan	Trip	Rute	Trip Load (Porsi)	Total Jarak (km)
SPPG Sleman Ngemplak Umbulmartani 1	K1	1	15-9-6-11-8-12-17-2-18	1.011	2,08
	K1	2	13	828	8,22
	K2	1	5-10-16-7-14-1-3-4	909	6,89
SPPG Sleman Ngemplak Umbulmartani 2	K1	1	23-22-19-20	912	7,41
	K2	1	24	718	6,49
	K2	2	21	614	6,57
SPPG Sleman Ngemplak Umbulmartani 3	K1	1	39-38-27-37-36-32-30-26-25	1.009	11,44
	K1	2	34	359	20,84
	K2	1	35-28-29-33	845	15,6
	K2	2	31	685	20,84
SPPG Sleman Ngemplak Umbulmartani 4	K1	1	68-46-45-44-51-67-66-65-59-54-49-62-52-55-47-56	1.001	18,8
	K2	1	60-40-61-41-48-42-63-43-53-50	995	16,94
	K2	2	57-58-64	231	16,53
	K1	1	91-70-93-80-84-69-87-88-79-90-76-96-73-71	1.008	6,96
	K2	1	86-98-89-94-95-92-75	999	5,9

SPPG	Kendaraan	Trip	Rute	Trip Load (Porsi)	Total Jarak (km)
SPPG Sleman Ngemplak Bimomartani 1	K2	2	78-77-74-81-83-97-82-72-85	748	53,25
SPPG Sleman Ngemplak Bimomartani 2	K1	1	114-99-100-113-111-112-106-107-108-102	1.007	9,47
	K1	2	115-101-105-103-110-109	982	15,01
	K2	1	104	121	21,37
SPPG Sleman Ngemplak Wedomartani 1	K1	1	131-126-121-116-120-117-125-127-124-118	1.002	11,65
	K1	2	122-128	218	7,85
	K2	1	135-136-130-133-134-132-137-119-129-123	953	14,61
SPPG Ngaglik 02	K1	1	147-157-148-164-158-159-138-162-155-146-143-141-169-139-160-140-167-144	1.015	19,07
	K2	1	149-142-163-168-165-153-152-151-156-145-150	966	23,64
	K2	2	154-161-166	452	20,3

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Pembangkitan Kandidat Lokasi SPPG menggunakan *K-Means*

Pada penelitian ini, *K-Means Clustering* digunakan untuk membangkitkan kandidat lokasi sppg berdasarkan kedekatan geografis sekolah penerima manfaat program MBG. Peran *K-Means* dalam penelitian ini bukan sebagai metode optimasi lokasi melainkan untuk mengelompokkan sekolah berdasarkan koordinat geografis sehingga diperoleh 8 titik centroid yang merepresentasikan kandidat lokasi SPPG. Kandidat lokasi tersebut selanjutnya menjadi solusi awal yang akan dievaluasi dan dioptimalkan menggunakan algoritma SA pada model LRPTW.

Penentuan jumlah *cluster* (*k*) ditetapkan sebesar 8, sesuai dengan jumlah SPPG *eksisting* yang saat ini beroperasi di Kecamatan Ngemplak. Penetapan nilai *k* ini bertujuan agar kandidat lokasi yang dihasilkan dapat dibandingkan langsung dengan kondisi aktual operasional MBG dilapangan. Seluruh sekolah penerima manfaat dikelompokkan ke dalam 8 *cluster* berdasarkan

kedekatan koordinat geografis (*latitude* dan *longitude*). Berikut Tabel 4.7 merupakan parameter dan hasil *clustering* menggunakan K-Means:

Tabel 4. 7 Parameter *K-Means Clustering*

Parameter	Nilai	Keterangan
Jumlah <i>Cluster</i> (k)	8	Disesuaikan dengan jumlah SPPG eksisting di Kec. Ngemplak.
Jumlah Sekolah	169	Total sekolah penerima manfaat MBG.
Total Demand	19.588 porsi	Total porsi makanan seluruh sekolah digunakan sebagai <i>sample weight</i> pada proses <i>clustering</i>
n_init	50	Jumlah inisialisasi centroid untuk memperoleh hasil <i>clustering</i> terbaik
Random State	42	Seed untuk reproduibilitas.

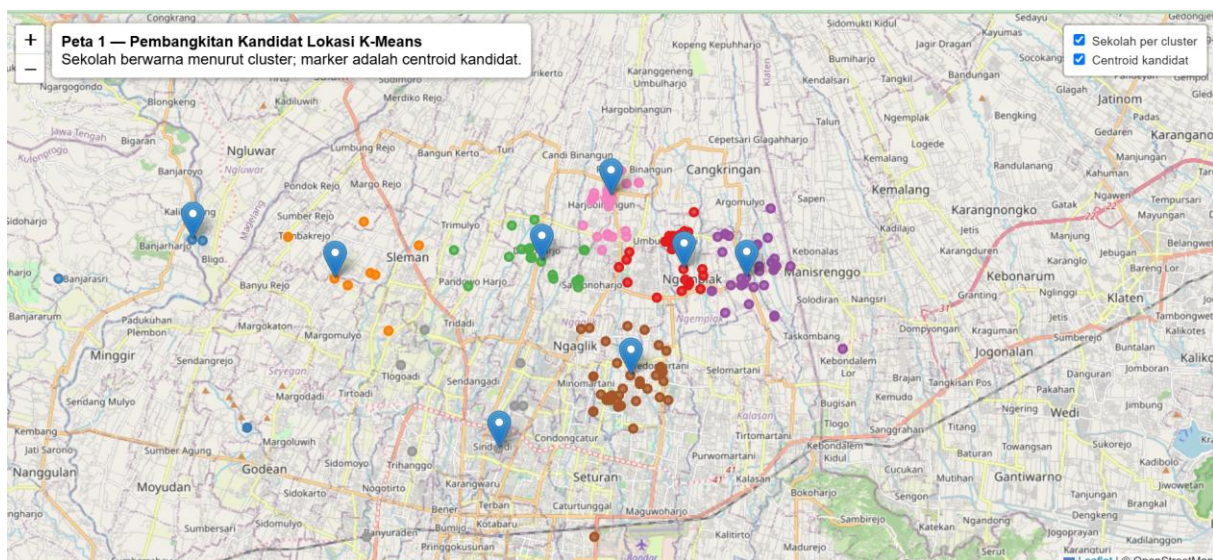
Proses pembangkitan kandidat lokasi menggunakan *K-Means Clustering* dilakukan dengan menetapkan jumlah *cluster* (k) sebanyak 8 sesuai dengan jumlah SPPG eksisting di Kecamatan Ngemplak. Proses *clustering* menggunakan data 169 sekolah dengan total permintaan sebesar 19.588 porsi, di mana jumlah permintaan digunakan sebagai *sample weight* sehingga sekolah dengan permintaan yang lebih besar memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap pembentukan titik *centroid*. Selain itu *random state* sebesar 42 digunakan untuk memastikan hasil *clustering* dapat direproduksi secara konsisten sedangkan parameter n_ini sebesar 50 memungkinkan algoritma melakukan 50 kali inisialisasi *centroid* dan memilih hasil *clustering* terbaik. Selanjutnya algoritma menghasilkan 8 titik *centroid* yang berfungsi sebagai kandidat lokasi awal SPPG yang kemudian akan dievaluasi dan dioptimalkan menggunakan algoritma SA pada tahap berikutnya. Berikut merupakan Tabel 4.8 hasil pengelompokan seluruh sekolah ke dalam 8 *cluster* beserta koordinat centroidnya.

Tabel 4. 8 Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi Menggunakan *K-Means Clustering*

Cluster K-Means	Kandidat SPPG	Nama_Kandidat	East (X)	North (Y)	Jumlah Sekolah Anggota	Total Demand
1	SPPG_01	KMeans Candidate 1	437830,8622	9149111,903	29	3199
2	SPPG_02	KMeans Candidate 2	418483,6866	9147536,662	5	261
3	SPPG_03	KMeans Candidate 3	432750,1725	9149905,538	21	3923
4	SPPG_04	KMeans Candidate 4	441165,4517	9149155,821	32	3053
5	SPPG_05	KMeans Candidate 5	424917,7137	9149570,423	8	954
6	SPPG_06	KMeans Candidate 6	436246,7562	9145136,587	40	4152

Cluster K-Means	Kandidat SPPG	Nama_Kandidat	East (X)	North (Y)	Jumlah Sekolah Anggota	Total Demand
7	SPPG_07	KMeans Candidate 7	435766,4953	9152338,157	26	3626
8	SPPG_08	KMeans Candidate 8	429777,372	9143759,367	8	420

Berdasarkan rincian hasil proses *K-Means Clustering*, berhasil menghasilkan 8 kandidat lokasi SPPG yang tersebar dengan persebaran sekolah penerima manfaat. setiap kluster memiliki jumlah sekolah dan total permintaan yang berbeda, yaitu berkisar 5-40 sekolah dengan total permintaan 261-4.152 porsi. Perbedaan tersebut terjadi karena proses pembentukan kluster tidak hanya mempertimbangkan kedekatan lokasi sekolah tetapi juga jumlah permintaan pada setiap sekolah sehingga sekolah dengan permintaan yang lebih besar memiliki pengaruh lebih besar dalam menentukan posisi *centroid*. Dengan demikian, *centroid* yang dihasilkan dapat mewakili pusat dari setiap kelompok sekolah berdasarkan lokasi dan jumlah permintaannya. Namun hasil tersebut belum merupakan lokasi SPPG yang optimal, melainkan hanya kandidat lokasi awal yang selanjutnya akan dioptimalkan menggunakan algoritma SA.



4.2.2 Penetapan Parameter *Simulated Annealing*

Algoritma SA pada penelitian ini digunakan untuk mengoptimasi lokasi dan rute distribusi pengantaran dan penjemputan makanan. Selama proses optimasi, setiap solusi dievaluasi dengan mempertimbangkan fungsi objektif dan seluruh *constraint* pada model LRPTW. Parameter SA pada penelitian ini ditentukan melalui proses *trial and error* berdasarkan karakteristik permasalahan LRPTW yang diteliti. Proses penentuan dilakukan dengan menguji beberapa kombinasi parameter hingga diperoleh konfigurasi yang mampu menghasilkan solusi yang *feasible* dengan kualitas terbaik dan waktu komputasi yang masih efisien. Pendekatan ini

sejalan dengan penelitian Wright (2010) dan Windu Arini et al. (2023) yang menyatakan bahwa tidak terdapat parameter SA yang bersifat universal sehingga penentuan parameter perlu disesuaikan dengan karakteristik setiap kasus optimasi. Berikut merupakan Tabel 4.9 parameter SA yang digunakan:

Tabel 4. 9 Parameter Algoritma *Simulated Annealing*

Parameter	Nilai	Keterangan
Suhu Awal (T_0)	120	Suhu awal SA untuk menerima solusi tetangga pada awal pencarian
Koefisien Pendinginan (α)	0,997	Digunakan untuk menurunkan suhu secara bertahap
Jumlah Iterasi	1000	Jumlah iterasi pencarian solusi iterasi
<i>Reheat Every</i>	350 iterasi	Suhu dinaikkan kembali setiap 350 iterasi agar pencarian tidak cepat terjebak
<i>Reheat Factor</i>	1,35	Faktor kenaikan suhu proses reheating
<i>Random Seed</i>	42	Digunakan agar hasil dapat reproduksi
<i>constraint</i>	<i>Hard Constraint</i>	Solusi yang melanggar constraint ditolak

4.2.3 Penerapan *Simulated Annealing*

Setelah parameter SA ditetapkan, proses optimasi LRPTW dijalankan menggunakan pendekatan SA. Pada penelitian ini SA tidak hanya mengoptimalkan rute distribusi tetapi juga mengoptimalkan keputusan lokasi dan alokasi sekolah secara terintegrasi. Proses optimasi dilakukan terhadap tiga keputusan utama yaitu pemilihan kandidat lokasi SPPG yang digunakan dari hasil pembangkitan *K-Means Clustering*, alokasi setiap sekolah ke SPPG yang dipilih dan penyusunan rute *delivery* dan *pickup* dengan *multi trip*. Berikut merupakan mekanisme SA yang diterapkan:

a. Representasi Solusi

Setiap solusi direpresentasikan sebagai kombinasi kandidat lokasi SPPG yang dipilih (*active depots*) dari hasil pembangkitan kandidat lokasi menggunakan *K-Means Clustering*, beserta alokasi sekolah ke masing-masing SPPG. Solusi awal dibangun menggunakan kandidat lokasi hasil pembangkitan *K-Means Clustering*, kemudian setiap sekolah

dialokasikan ke SPPG sesuai hasil alokasi awal yang memenuhi kapasitas. Berdasarkan solusi tersebut, rute *delivery* dan *pickup* secara *multi-trip* dibentuk untuk setiap SPPG yang dipilih.

b. Fungsi Objektif

Setiap solusi dievaluasi berdasarkan total biaya distribusi yaitu biaya pembukaan depot dan biaya perjalanan kendaraan. Optimasi ini bertujuan untuk meminimalkan total biaya distribusi yang terdiri atas biaya pembukaan depot dan biaya perjalanan kendaraan. Dalam proses optimasi, algoritma SA digunakan untuk menentukan kombinasi lokasi depot yang dibuka, alokasi sekolah, serta urutan rute distribusi yang menghasilkan total biaya minimum dengan tetap memperhatikan batasan operasional yang berlaku.

c. *Neighbourhood Move*

Pada setiap iterasi, SA membangkitkan solusi tetangga melalui beberapa operator, yaitu membuka kandidat lokasi SPPG, menutup kandidat lokasi SPPG, menukar kandidat lokasi yang dipilih, memindahkan sekolah ke SPPG lain, menukar alokasi dua sekolah, memindahkan kelompok sekolah, melakukan alokasi ulang berdasarkan kandidat lokasi terdekat, serta operator perbaikan (*repair*) untuk menjaga kualitas solusi. Setiap perubahan terhadap kandidat lokasi hasil pembangkitan K-Means akan diikuti dengan pembaruan alokasi sekolah serta penyusunan kembali rute distribusi pengantaran dan penjemputan *multi-trip* sebelum dilakukan evaluasi.

d. Kriteria Penerimaan Solusi

Solusi tetangga diterima apabila menghasilkan nilai fungsi objektif yang lebih baik dibandingkan solusi saat ini. Apabila solusi memiliki nilai fungsi objektif yang lebih buruk, solusi tersebut masih dapat diterima berdasarkan probabilitas Metropolis sebesar $e^{-\Delta/T}$, dengan Δ merupakan selisih nilai fungsi objektif dan T adalah suhu saat ini. Mekanisme ini memungkinkan algoritma mengeksplorasi ruang solusi yang lebih luas sehingga mengurangi kemungkinan terjebak pada solusi optimum lokal.

e. *Constraint* yang Ditegaskan

Model optimasi yang dibangun juga mempertimbangkan beberapa batasan agar solusi yang diperoleh bersifat layak (*feasible*). Setiap sekolah hanya dapat dilayani oleh satu SPPG yang aktif sehingga tidak terjadi duplikasi pelayanan. Seluruh rute distribusi harus berawal dan berakhir pada depot yang sama. Kapasitas muatan kendaraan pada setiap perjalanan tidak boleh melebihi kapasitas maksimum kendaraan yang tersedia. Selain itu, waktu

kedatangan kendaraan pada setiap sekolah harus berada dalam rentang *time windows* yang telah ditentukan sesuai jadwal pelayanan masing-masing sekolah. Solusi yang melanggar batasan kapasitas maupun *time windows* akan dianggap tidak layak (*infeasible*) dan tidak diterima dalam proses pencarian solusi menggunakan algoritma SA.

f. Alur Pseudocode SA

Secara keseluruhan mekanisme SA yang diterapkan dirangkum dalam Pseudocode pada Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4. 10 Pseudocode Algoritma *Simulated Annealing*

Pseudocode	Fungsi dan Penjelasan
<pre>import math, random, time, argparse, sys, json, html from pathlib import Path from dataclasses import dataclass from typing import Dict, List, Tuple, Any import numpy as np import pandas as pd from sklearn.cluster import KMeans from scipy.optimize import milp, LinearConstraint, Bounds, linear_sum_assignment from scipy.sparse import lil_matrix DEFAULT_INPUT_CANDIDATES = ["DATA_SPPG(1).xlsx", "DATA_SPPG.xlsx"] DEFAULT_OUTPUT = "HASIL_LRPTW_SA_MULTITRIP_FINAL.xlsx"</pre>	INPUT: Data sekolah dibaca dari file Excel, meliputi nama sekolah, jumlah demand (porsi), koordinat lokasi (<i>East, North</i>), dan time window pengiriman, yang menjadi dasar seluruh proses clustering dan optimasi rute.
<pre>N_KMEANS = 8 MIN_ACTIVE_DEPOTS = 8 MAX_ACTIVE_DEPOTS = 8 DEPOT_PENALTY_KM = 0.0 CAP_VEH = 1015 CAP_DEPOT = 2500 BALANCE_PENALTY = 0.0 # objektif murni total jarak SPEED = 24.1 VEHICLES = ["K1", "K2"] TARGET_EXISTING_KM = 735.46 # 2 x 367,73 km dari tabel rute awal (delivery + pickup) RANDOM_SEED = 42 SA_ITER = 1000 SA_T0 = 120.0 SA_ALPHA = 0.997 SA_REHEAT EVERY = 350 SA_REHEAT_FACTOR = 1.35</pre>	Penetapan Parameter: Jumlah klaster K-Means ditetapkan sebanyak 8. Jumlah SPPG yang harus aktif pada solusi akhir ditetapkan tepat 8 lokasi. Setiap SPPG memiliki kapasitas maksimum 2.500 porsi per hari, sedangkan kapasitas kendaraan pada setiap trip adalah 1.015 porsi.

Pseudocode	Fungsi dan Penjelasan
	Dua kendaraan, yaitu K1 dan K2, tersedia pada masing-masing proses penyusunan rute. Kecepatan kendaraan diasumsikan 24,1 km/jam. Parameter SA terdiri atas 1.000 iterasi, suhu awal 120, faktor pendinginan 0,997, reheating setiap 350 iterasi dengan faktor 1,35, serta random seed 42.
<pre> total_demand = sum(n.demand for n in nodes.values()) total_capacity = MIN_ACTIVE_DEPOTS * CAP_DEPOT if total_demand > total_capacity: raise ValueError(f"Total demand {total_demand} melebihi kapasitas total " f"{(MIN_ACTIVE_DEPOTS) x {CAP_DEPOT}} = {total_capacity}.") if max(n.demand for n in nodes.values()) > CAP_VEH: raise ValueError("Terdapat demand sekolah yang melebihi kapasitas kendaraan per trip.") return nodes </pre>	Validasi awal: Program memastikan bahwa total permintaan tidak melebihi kapasitas total delapan SPPG. Program juga memastikan bahwa permintaan satu sekolah tidak melebihi kapasitas kendaraan per trip. Data <i>time windows</i> yang tidak ditemukan atau tidak valid akan menyebabkan proses dihentikan.

Pseudocode

```
def generate_kmeans_candidates(nodes: Dict[str, Node], n_clusters=n_KMEANS, seed=RANDOM_SEED) -> Dict:
    """Membangkitkan kandidat lokasi SPPG menggunakan Weighted K-Means.

    Output fungsi ini bukan solusi akhir lokasi, melainkan daftar centroid
    sebagai kandidat lokasi yang selanjutnya dievaluasi oleh SA. Metadata
    K-Means disimpan ke variabel global KMEANS_OUTPUT agar bisa diekspor ke
    Excel pada sheet Parameter_KMeans, Hasil_KMeans, dan Cluster_Anggota.
    """
    global KMEANS_OUTPUT
    vals = list(nodes.values())
    X = np.array([[n.x, n.y] for n in vals])
    w = np.array([max(1, n.demand) for n in vals])
    km = KMeans(n_clusters=n_clusters, random_state=seed, n_init=50).fit(X, sample_weight=w)
    depots = {}

    for i, c in enumerate(km.cluster_centers_):
        near = min(vals, key=lambda n: math.hypot(n.x-c[0], n.y-c[1]))
        uid = f"KMEANS_{i+1:02d}"
        depots[uid] = Depot(uid, f"K-Means Candidate {i+1}", float(c[0]), float(c[1]), near.lat, near.lng)

    # Ringkasan anggota cluster berdasarkan label asli K-Means.
    member_rows = []
    cluster_demand = {i: 0 for i in range(n_clusters)}
    cluster_count = {i: 0 for i in range(n_clusters)}
    for idx, n in enumerate(vals):
        cluster = km.predict([n.x, n.y])
        cluster_demand[cluster] += n.demand
        cluster_count[cluster] += 1
```

Fungsi dan Penjelasan

Weighted K-Means:

Sekolah dikelompokkan menjadi 8 kluster berdasarkan koordinat *East* dan *North* dengan jumlah permintaan sebagai *sample_weight*. Oleh karena itu, sekolah dengan permintaan lebih besar mempunyai pengaruh lebih besar terhadap posisi centroid. Delapan *centroid* hanya berfungsi sebagai kandidat lokasi dan belum menjadi lokasi SPPG optimum.

```
KMEANS_OUTPUT = {
    "parameters": [
        {"Parameter": "Sumber kandidat lokasi", "Nilai": "Regenerate dari Sheet1 menggunakan Weighted K-Means", "Keterangan": "Sumber kandidat lokasi"},
        {"Parameter": "Jumlah Cluster (k)", "Nilai": n_clusters, "Keterangan": "Jumlah kandidat lokasi"},
        {"Parameter": "Jumlah Sekolah", "Nilai": len(vals), "Keterangan": "Total sekolah penerima layanan"},
        {"Parameter": "Total Demand", "Nilai": int(sum(n.demand for n in vals)), "Keterangan": "Total permintaan layanan"},
        {"Parameter": "Variabel clustering", "Nilai": "East (X), North (Y)", "Keterangan": "Koordinat lokasi"},
        {"Parameter": "Bobot clustering", "Nilai": "Demand_Porsi sebagai sample_weight", "Keterangan": "Bobot clustering"},
        {"Parameter": "Metode inisialisasi", "Nilai": "k-means++ (default scikit-learn)", "Keterangan": "Metode inisialisasi"},
        {"Parameter": "Distance metric", "Nilai": "Euclidean Distance", "Keterangan": "Jarak pada r"},
        {"Parameter": "n_init", "Nilai": 50, "Keterangan": "Jumlah inisialisasi centroid yang dicoba"},
        {"Parameter": "Random State", "Nilai": seed, "Keterangan": "Seed untuk reproduisibilitas hasil"}
    ],
    "centroids": centroid_rows,
    "members": member_rows,
}
```

Output K-Means:

Parameter *clustering*, koordinat *centroid*, jumlah sekolah, total *demand* setiap kluster, dan anggota masing-masing kluster disimpan sebagai output antara untuk dokumentasi proses pembangunan kandidat lokasi.

Pseudocode

```

solve_capacitated_location_assignment_milp(depots, nodes, p=8, random_noise=0.0, seed=42):
    """Warm start kuat untuk SA: pilih tepat p lokasi dari pool 16 dan alokasikan sekolah.

    K-Means tetap hanya membangkitkan kandidat. Keputusan lokasi akhir tetap masuk
    ke state SA. MILP ini hanya menghasilkan titik awal berkualitas berdasarkan
    biaya jarak langsung dua arah, kapasitas 2.500, dan arc time-window langsung.
    Solusi akhir tetap ditentukan oleh evaluasi rute dan SA 1.000 iterasi.
    """
    rng = np.random.default_rng(seed)
    dids = sorted(depots)
    uids = list(nodes)
    m, q = len(uids), len(dids)
    nx = m*q
    ny = q
    N = nx + ny

    c = np.zeros(N)
    for i,u in enumerate(uids):
        for j,d in enumerate(dids):
            base = 2.0*d_dn(depots[d], nodes[u])
            if random_noise > 0:
                base *= 1.0 + rng.uniform(-random_noise, random_noise)
            c[i*q+j] = base

```

Fungsi dan Penjelasan

Inisialisasi SA:

Beberapa alternatif solusi awal dibentuk, yaitu berdasarkan alokasi rute *eksisting*, hasil *assignment* MILP pada lokasi *eksisting*, dan warm start MILP yang memilih tepat 8 lokasi dari *pool* 16 lokasi. Setiap alokasi diperbaiki agar memenuhi kapasitas. Dari beberapa solusi tersebut dipilih solusi *feasible* dengan total jarak terendah sebagai solusi awal SA. MILP hanya digunakan untuk membentuk warm start, sedangkan solusi akhir tetap ditentukan melalui SA.

```

for it in range(1, SA_ITER + 1):
    cand, op = make_neighbor(cur, depots, nodes)
    cand_ev = evaluate(cand, depots, nodes)
    cand_obj = obj(cand_ev)
    delta = cand_obj - cur_obj
    accepted = False
    if cand_ev["violations"] == 0:
        if cur_ev["violations"] > 0 or delta < 0 or random.random() < math.exp(-delta/max(temp, 1e-9)):
            accepted = True
    elif cur_ev["violations"] > 0:
        if delta < 0 or random.random() < math.exp(-delta/max(temp, 1e-9)):
            accepted = True
    if accepted:
        cur, cur_ev, cur_obj = cand, cand_ev, cand_obj

```

Perulangan SA: Proses pencarian dilakukan selama 1.000 iterasi. Pada setiap iterasi, satu solusi tetangga dibangkitkan dari solusi saat ini dengan mengubah kombinasi lokasi aktif atau alokasi sekolah.

Pseudocode

```
def make_neighbor(state, depots, nodes):
    """Membangkitkan solusi tetangga.

    """
    active = set(state["active"])
    new = dict(state["assign"])
    uids = list(nodes); dids = list(depots)
    op = random.choices(
        [
            "swap_active_depot",
            "relocate_customer", "swap_customer", "relocate_cluster",
            "k_nearest_reassign", "tw_group_shuffle", "destroy_repair",
            "load_balance", "time_window_repair", "distance_greedy"
        ],
        weights=[18, 18, 10, 8, 8, 4, 8, 5, 5, 16], k=1)[0]

    def reassign_from_closed(closed):
        for u, d in list(new.items()):
            if d == closed or d not in active:
                new[u] = min(active, key=lambda nd: d_dn(depots[nd], nodes[u]))

    if op == "open_depot":
        closed = [d for d in dids if d not in active]
        if closed and len(active) < min(MAX_ACTIVE_DEPOTS, len(dids)):
            nd = random.choice(closed)

    new = repair_capacity(new, depots, nodes, active)
    return {"active": set(active), "assign": new}, op
```

Fungsi dan Penjelasan

Operator *neighborhood*:

Sepuluh operator digunakan secara probabilistik.

SWAP_ACTIVE_DEPOT

T menukar lokasi aktif dengan lokasi tidak aktif tanpa mengubah jumlah SPPG aktif. Operator lain mengubah alokasi sekolah, memindahkan kelompok sekolah, melakukan penugasan berdasarkan depot terdekat, menyesuaikan kelompok *time windows*, melakukan *destroy-repair*, menyeimbangkan beban, memperbaiki *time windows*, dan melakukan perpindahan yang diarahkan pada pengurangan jarak. OPEN_DEPOT dan CLOSE_DEPOT tidak digunakan dalam pemilihan operator karena jumlah lokasi aktif harus selalu tepat 8.

```
new = repair_capacity(new, depots, nodes, active)
return {"active": set(active), "assign": new}, op
```

Perbaikan solusi:

Alokasi sekolah

Pseudocode	Fungsi dan Penjelasan
	diperbaiki agar seluruh sekolah hanya dialokasikan pada SPPG aktif dan total permintaan setiap SPPG tidak melebihi 2.500 porsi. Pada kondisi tertentu, digunakan perbaikan berbasis jarak untuk memindahkan sekolah ke SPPG yang lebih dekat selama kapasitas tetap terpenuhi.
<pre>def obj(ev): if ev["violations"] == 0: return ev["total_distance"] return 1e12 + ev["violations"] * 1e9 + ev["total_distance"] cur_obj = obj(cur_ev) best = None best_ev = None best_obj = float("inf") if cur_ev["violations"] == 0: best = {"active": set(cur["active"]), "assign": dict(cur["assign"])} best_ev = cur_ev best_obj = cur_ev["total_distance"]</pre>	Fungsi objektif: Pada solusi feasible, nilai objektif adalah total jarak pengantaran dan penjemputan. Penalti depot dan penalti keseimbangan bernilai nol sehingga tidak memengaruhi fungsi objektif. Solusi <i>infeasible</i> diberikan penalti sangat besar. Ketika solusi saat ini sudah feasible, solusi tetangga yang infeasible tidak diterima.
<pre>delta = objective_neighbor - objective_current if delta < 0 or random.random() < math.exp(-delta / T): current_solution = neighbor objective_current = objective_neighbor</pre>	Kriteria penerimaan: Solusi yang lebih baik selalu diterima. Solusi

Pseudocode	Fungsi dan Penjelasan
	feasible yang lebih buruk masih dapat diterima berdasarkan probabilitas Metropolis atau fungsi <i>Boltzmann</i>. Mekanisme tersebut memungkinkan SA keluar dari optimum lokal. Solusi <i>infeasible</i> hanya dapat dipertimbangkan ketika solusi saat ini juga masih <i>infeasible</i>.
<pre> if violations == 0 and objective_neighbor < best_objective: best_solution = copy.deepcopy(neighbor) best_objective = objective_neighbor </pre>	Pembaruan solusi terbaik: Hanya solusi <i>feasible</i> yang dapat disimpan sebagai solusi terbaik. Perbandingan solusi terbaik dilakukan berdasarkan total jarak <i>delivery</i> dan <i>pickup</i> paling rendah.
<pre> if iteration % 350 == 0: T *= 1.35 T *= 0.997 </pre>	Cooling dan reheating: Suhu dinaikkan kembali sebesar 1,35 kali setiap 350 iterasi untuk memperluas eksplorasi ruang solusi. Setelah itu, suhu diturunkan dengan faktor pendinginan 0,997 pada setiap iterasi.

Pseudocode	Fungsi dan Penjelasan
<pre> assert validate_capacity(best_solution) assert validate_time_windows(best_solution) assert validate_delivery(best_solution) assert validate_pickup(best_solution) </pre>	Validasi akhir: Program memastikan solusi akhir tidak memiliki pelanggaran, seluruh sekolah dialokasikan ke lokasi aktif yang valid, dan jumlah SPPG aktif tepat 8. Solusi <i>infeasible</i> tidak dapat ditetapkan sebagai hasil akhir.
<pre> export_excel("Parameter_KMeans", "Hasil_KMeans", "Cluster_Anggota", "KPI", "Keputusan_Depot", "Detail_Trip", "Detail_Kunjungan", "Assignment_Sekolah", "Validasi_Constraint", "Riwayat_SA",) export_html("PETA_1_PEMBANGKITAN_KMEANS.html") export_html("PETA_2_HASIL_OPTIMASI_SA.html") </pre>	Output akhir: Hasil optimasi diekspor ke file <i>Excel multi-sheet</i> yang memuat parameter, hasil <i>clustering</i>, indikator kinerja, keputusan lokasi, alokasi sekolah, rincian trip, rincian kunjungan, validasi <i>constraint</i>, dan riwayat SA. Dua peta HTML dihasilkan, yaitu peta pembangkitan kandidat.

Berdasarkan mekanisme tersebut, SA memastikan bahwa keputusan membuka atau menutup depot, realokasi sekolah, dan penyusunan urutan rute dilakukan secara terintegrasi dalam satu proses optimasi.

4.2.4 Hasil Optimasi

Setelah proses optimasi menggunakan algoritma SA selesai dilakukan, diperoleh rute distribusi untuk masing-masing kandidat lokasi SPPG yang telah memenuhi batasan kapasitas kendaraan dan *time windows* yang ditetapkan. Rute yang dihasilkan mencakup kegiatan pengiriman

(*delivery*) dan penjemputan (*pickup*) pada setiap periode pelayanan. Berikut merupakan Tabel 4.11 hasil optimasi rute untuk masing-masing kandidat lokasi:

Tabel 4. 11 Hasil Optimasi Menggunakan Algoritma *Simulated Annealing*

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	131 - 79 - 126 - 3 - 44 - 118 - 45 - 117 - 120 - 100 - 116	655	7,045859
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW2	122 - 121	290	5,611594
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	31	685	4,290773
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	131 - 79 - 126 - 3 - 44 - 118 - 45 - 117 - 120 - 116 - 100	655	6,655186
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	122 - 121	290	5,611594
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	31	685	4,290773
AWALAN_02	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	33 - 22	831	8,542136
AWALAN_02	K2	1	<i>Pickup</i>	TW3	33 - 22	831	8,542136
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	99 - 132 - 134 - 133 - 49 - 54 - 55 - 52	315	6,560223
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW2	105	179	3,147593
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	112 - 114 - 129	1014	5,002268
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	99 - 132 - 134 - 133 - 49 - 54 - 55 - 52	315	6,560223
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	105	179	3,147593
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	112 - 114 - 129	1014	5,002268
AWALAN_05	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	111 - 113 - 13	983	7,428712
AWALAN_05	K2	1	<i>Pickup</i>	TW3	111 - 113 - 13	983	7,428712
KMEANS_01	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	130 - 59 - 135 - 101 - 136 - 137 - 119 - 60 - 40 - 43 - 80	549	36,82309 4
KMEANS_01	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	115 - 66 - 67 - 110	633	10,10818
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	130 - 101 - 59 - 135 - 136 - 137 - 119 - 60 - 40 - 43 - 80	549	36,89094 8
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	165	357	10,19973 3
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	115 - 66 - 67 - 110	633	10,10818
KMEANS_01	K2	1	<i>Delivery</i>	TW2	61 - 107 - 63 - 123 - 125 - 65	961	11,11314 4

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
KMEANS_01	K2	1	Pickup	TW2	107 - 61 - 63 - 123 - 125 - 65	961	11,25534 6
KMEANS_01	K2	2	Delivery	TW2	165	357	10,19973 3
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW1	51 - 152 - 147 - 25	219	16,70553 1
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW2	124 - 128 - 28 - 20 - 127 - 19 - 30	944	5,722278
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW3	32 - 36 - 21	967	2,455488
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW1	51 - 152 - 147 - 25	219	16,70553 1
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW2	124 - 128 - 28 - 127 - 19 - 20 - 30	944	5,732224
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW3	32 - 36 - 21	967	2,455488
KMEANS_03	K2	1	Delivery	TW2	29	79	3,395486
KMEANS_03	K2	1	Delivery	TW3	14 - 23 - 37	276	11,78052 3
KMEANS_03	K2	1	Pickup	TW2	29	79	3,395486
KMEANS_03	K2	1	Pickup	TW3	14 - 23 - 37	276	11,78052 3
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW1	73 - 41 - 48 - 71 - 102 - 75 - 74 - 86 - 72 - 84 - 69 - 81 - 154 - 76 - 70	625	18,03436
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW2	89 - 108 - 91 - 93 - 88 - 87 - 90	997	8,564254
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW3	96 - 98 - 95	714	3,269624
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW1	73 - 41 - 48 - 71 - 102 - 75 - 74 - 86 - 72 - 84 - 69 - 81 - 154 - 76 - 70	625	18,03436
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW2	89 - 108 - 91 - 93 - 88 - 87 - 90	997	8,564254
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW3	96 - 98 - 95	714	3,269624
KMEANS_04	K2	1	Delivery	TW2	92 - 94	141	4,868475
KMEANS_04	K2	1	Pickup	TW2	92 - 94	141	4,868475
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW1	46 - 149 - 146 - 106 - 57 - 68 - 82 - 26	324	20,12405 2
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW2	62 - 64 - 104	452	13,83455 8
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW3	97	472	1,620866

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW1	4 - 1 - 46 - 149 - 146 - 106 - 57 - 68 - 82 - 26	431	31,53079 9
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW2	62 - 64 - 104	452	13,83455 8
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW3	97	472	1,620866
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW1	140 - 141 - 47 - 1 - 4	261	28,84676 3
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW3	24	718	14,86378 1
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW1	47 - 140 - 141	154	28,55957 7
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW3	24	718	14,86378 1
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW1	83 - 143 - 144 - 145 - 139 - 160 - 161 - 153 - 151 - 156 - 103 - 158 - 159 - 148 - 50 - 58 - 53 - 157 - 56 - 78 - 142 - 155 - 138	1014	15,96725 7
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW2	164 - 35 - 166 - 167 - 163 - 162	898	3,899053
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW3	169 - 168	262	2,740775
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW1	83 - 143 - 144 - 145 - 139 - 160 - 161 - 153 - 151 - 156 - 103 - 158 - 159 - 148 - 50 - 58 - 53 - 157 - 56 - 78 - 142 - 155 - 138	1014	15,96725 7
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW2	164 - 35 - 166 - 167 - 163 - 162	898	3,899053
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW3	169 - 168	262	2,740775
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW1	42 - 85 - 77 - 150	144	19,67501 5
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW2	109	178	2,807227
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW1	42 - 85 - 77 - 150	144	19,67501 5
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW2	109	178	2,807227
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW1	2 - 16 - 5 - 18 - 39 - 6	258	2,664617
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW2	27 - 8 - 7 - 9	868	3,763164
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW3	15 - 10 - 11 - 12 - 17 - 38	966	3,191376
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW1	2 - 16 - 5 - 18 - 39 - 6	258	2,664617

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
KMEANS_07	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	27 - 8 - 7 - 9	868	3,763164
KMEANS_07	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	15 - 10 - 11 - 12 - 17 - 38	966	3,191376
KMEANS_07	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	34	359	2,033534
KMEANS_07	K2	1	<i>Pickup</i>	TW3	34	359	2,033534

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Penentuan Lokasi Depot dalam Model LRPTW

5.1.1 Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi Depot Menggunakan *K-Means Clustering*

Tahap awal dalam penelitian ini adalah pembangkitan kandidat lokasi depot menggunakan metode *K-Means Clustering*. Penggunaan *K-Means* bertujuan untuk mengelompokkan sekolah berdasarkan kedekatan geografis sehingga diperoleh beberapa titik *centroid* yang merepresentasikan pusat layanan pada masing-masing klaster. Titik *centroid* tersebut selanjutnya digunakan sebagai kandidat lokasi depot (SPPG) yang akan menjadi alternatif lokasi dalam proses optimasi berikutnya. Pada tahap ini *K-Means* belum digunakan untuk menentukan lokasi yang optimal, melainkan hanya menghasilkan sekumpulan kandidat lokasi yang layak berdasarkan persebaran sekolah dan permintaan yang ada. Selain menghasilkan koordinat *centroid*, proses *clustering* juga memberikan informasi mengenai jumlah sekolah dan total permintaan pada setiap kandidat lokasi SPPG. Seluruh kandidat lokasi yang dihasilkan pada tahap selanjutnya menjadi masukan bagi algoritma SA untuk menentukan lokasi SPPG yang dipilih, alokasi sekolah, serta rute distribusi yang paling optimal. Berikut merupakan Tabel 5.1 hasil pembangkitan lokasi kandidat dapur SPPG menggunakan *K-Means Clustering*.

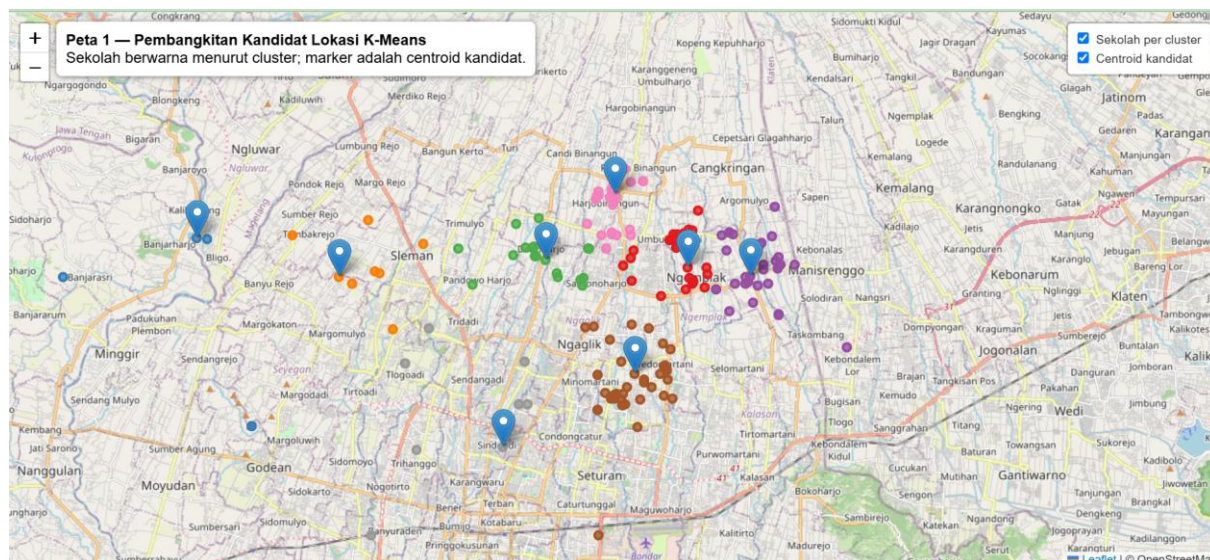
Tabel 5. 1 Hasil Pembangkitan Kandidat Dapur

Kandidat SPPG	Nama Kandidat	East (X)	North (Y)	Jumlah Sekolah	Total Demand Anggota
KMEANS_0 1	K-Means Candidate 1	437830,86 22	9149111,9 03	29	3199
KMEANS_0 2	K-Means Candidate 2	418483,68 66	9147536,6 62	5	261
KMEANS_0 3	K-Means Candidate 3	432750,17 25	9149905,5 38	21	3923
KMEANS_0 4	K-Means Candidate 4	441165,45 17	9149155,8 21	32	3053
KMEANS_0 5	K-Means Candidate 5	424917,71 37	9149570,4 23	8	954
KMEANS_0 6	K-Means Candidate 6	436246,75 62	9145136,5 87	40	4152
KMEANS_0 7	K-Means Candidate 7	435766,49 53	9152338,1 57	26	3626
KMEANS_0 8	K-Means Candidate 8	429777,37 2	9143759,3 67	8	420

Berdasarkan hasil pada Tabel 5.1 pembangkitan kandidat lokasi menggunakan metode *K-Means Clustering*, diperoleh sebanyak 8 kandidat lokasi SPPG yang akan digunakan sebagai alternatif depot dalam proses optimasi selanjutnya. Delapan kandidat lokasi terbentuk dari pengelompokan 169 sekolah dengan total permintaan 19.588 porsi berdasarkan kedekatan geografis antar sekolah, setiap kandidat lokasi merepresentasikan titik *centroid* dari masing-masing klaster yang berfungsi sebagai pusat wilayah pelayanan bagi sekolah-sekolah yang tergabung dalam klaster tersebut.

Berdasarkan tabel diatas setiap klaster memiliki jumlah sekolah dan total permintaan yang berbeda. Klaster 6 memiliki jumlah sekolah anggota terbanyak yaitu 40 sekolah dengan total permintaan sebesar 4.152 porsi sedangkan klaster 2 memiliki jumlah sekolah anggota yang paling sedikit. Perbedaan jumlah sekolah dan total permintaan pada setiap klaster menunjukkan bahwa persebaran sekolah penerima manfaat MBG di Kecamatan Ngemplak tidak merata, sehingga terdapat wilayah dengan konsentrasi sekolah yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Jika ditinjau dari total permintaan klaster 6, 3, dan 7 memiliki total permintaan terbesar, masing-masing 4.152 porsi, 3.923, dan 3.626 porsi. Sementara itu, klaster 2 dan 8 memiliki total permintaan paling rendah yaitu 261 porsi dan 420 porsi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan distribusi MBG pada setiap wilayah pelayanan berbeda-beda sehingga kapasitas pelayanan yang dibutuhkan pada masing-masing kandidat lokasi juga tidak sama.

Selain menghasilkan jumlah sekolah dan total permintaan pada setiap cluster, proses *K-Means* juga menghasilkan koordinat *East* (X) dan *North* (Y) yang menunjukkan posisi *centroid* masing-masing *cluster*. Koordinat *centroid* tersebut menjadi kandidat lokasi awal SPPG yang akan digunakan pada tahap optimasi berikutnya. Pada tahap ini, *K-Means Clustering* belum menentukan lokasi SPPG yang optimal, melainkan hanya membangkitkan kandidat lokasi berdasarkan pola persebaran sekolah dan permintaan. Selanjutnya, seluruh kandidat lokasi tersebut digunakan sebagai masukan bagi algoritma SA untuk menentukan konfigurasi lokasi SPPG, alokasi sekolah, serta rute distribusi dan penjemputan yang paling optimal dengan tetap memenuhi seluruh constraint pada LRPTW.



Gambar 5. 1 Peta Visualisasi Hasil Pembangkitan Kandidat Lokasi

5.1.2 Hasil Optimasi Lokasi Depot Menggunakan *Simulated Annealing*

Setelah dilakukan pembangkitan kandidat lokasi depot menggunakan *K-Means Clustering*, selanjutnya adalah melakukan optimasi lokasi depot menggunakan algoritma SA dalam model LRPTW. Pada tahap ini algoritma SA berperan dalam mengevaluasi setiap kandidat lokasi yang telah terbentuk untuk menentukan konfigurasi lokasi depot yang mampu melayani permintaan sekolah secara efisien dengan mempertimbangkan kapasitas, alokasi sekolah, serta biaya distribusi. Hasil optimasi ini menunjukkan status operasional masing-masing kandidat lokasi depot beserta jumlah sekolah dan total permintaan yang dilayani setelah proses optimasi dilakukan. Berikut merupakan Tabel 5.2 hasil optimasi lokasi depot menggunakan algoritma SA:

Tabel 5. 2 Hasil Optimasi Kandidat Depot Menggunakan SA

Nama SPPG <i>Eksisting</i>	Keputusan SA	Lokasi Akhir ID	Jumlah Penerima Manfaat	Total <i>Demand</i>
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_05	18	2227
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 2 (Mr. Blangkon 1)	DIPERTAHANKAN	AWALAN_02	16	2461
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_07	17	2451

Nama SPPG Eksisting	Keputusan SA	Lokasi Akhir ID	Jumlah Penerima Manfaat	Total Demand
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 4 (Yayasan Nimara)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_06	36	2496
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	DIPERTAHANKAN	AWALAN_05	15	2491
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2 (Pondok Suruh)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_04	27	2477
SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTANI 1 (Mr. Blangkon 2)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_01	22	2500
SPPG NGAGLIK 02 (Yayasan Mataram Bersama Indonesia)	RELOKASI KE KANDIDAT K- MEANS	KMEANS_03	18	2485

Berdasarkan hasil Tabel 5.2 hasil optimasi menunjukkan bahwa SA memilih delapan lokasi SPPG yang terdiri atas dua lokasi *eksisting* dan enam kandidat lokasi hasil *K-Means Clustering*. Perlu ditegaskan bahwa pada penelitian ini *K-Means Clustering* tidak digunakan sebagai metode optimasi, melainkan hanya berfungsi untuk membangkitkan kandidat lokasi berdasarkan persebaran sekolah. SA akan mengevaluasi seluruh alternatif lokasi, baik lokasi eksisting maupun kandidat hasil *K-Means Clustering*, untuk memperoleh kombinasi lokasi yang memberikan nilai fungsi objektif terbaik dengan tetap memenuhi seluruh kendala yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, keputusan akhir mengenai lokasi SPPG sepenuhnya merupakan hasil proses optimasi SA.

Berdasarkan hasil optimasi, dua lokasi eksisting yang dipertahankan adalah AWALAN_02 dan AWALAN_05, sedangkan enam lokasi lainnya berasal dari kandidat hasil K-Means, yaitu KMEANS_01, KMEANS_03, KMEANS_04, KMEANS_05, KMEANS_06, dan KMEANS_07. Terpilihnya enam kandidat tersebut menunjukkan bahwa lokasi *hasil K-Means Clustering* mampu memberikan alternatif yang lebih baik untuk beberapa wilayah pelayanan. Namun demikian, dipertahankannya dua lokasi *eksisting* menunjukkan bahwa SA tidak secara otomatis memilih seluruh kandidat hasil *K-Means Clustering*, melainkan

mengevaluasi setiap alternatif berdasarkan fungsi objektif dan kendala model sehingga lokasi eksisting yang masih memberikan konfigurasi terbaik tetap dipertahankan.

Seluruh lokasi hasil optimasi melayani 169 sekolah dengan total demand sebesar 19.588 porsi. Dengan kapasitas maksimum setiap SPPG sebesar 2.500 porsi, seluruh lokasi memiliki total *demand* yang berada dalam batas kapasitas yang ditetapkan. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi lokasi yang dipilih telah memenuhi kendala kapasitas sehingga setiap SPPG mampu melayani wilayahnya tanpa mengalami kelebihan beban. Selain memenuhi kendala kapasitas, hasil optimasi juga menunjukkan bahwa distribusi demand antar-SPPG relatif merata. Sebagian besar SPPG memiliki tingkat pemanfaatan kapasitas di atas 98%, bahkan KMEANS_01 mencapai kapasitas maksimum sebesar 2.500 porsi. Sementara itu, KMEANS_05 memiliki tingkat pemanfaatan kapasitas yang lebih rendah dibandingkan lokasi lainnya. Kondisi tersebut tidak menunjukkan bahwa lokasi tersebut kurang optimal melainkan mengindikasikan adanya variasi persebaran *demand* pada wilayah pelayanannya atau kebutuhan untuk menjaga keseimbangan alokasi demand agar seluruh kendala model tetap terpenuhi.

Perbedaan jumlah sekolah yang dilayani oleh masing-masing SPPG juga menunjukkan bahwa proses optimasi tidak didasarkan pada pemerataan jumlah sekolah melainkan pada total demand yang harus dipenuhi. Seperti terdapat SPPG yang melayani jumlah sekolah lebih banyak namun memiliki total demand yang hampir sama dengan SPPG yang melayani sekolah lebih sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa setiap sekolah memiliki kebutuhan porsi MBG yang berbeda sehingga jumlah sekolah tidak dapat dijadikan indikator utama dalam menentukan beban pelayanan setiap SPPG. Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa SA berhasil menentukan konfigurasi lokasi SPPG yang memenuhi seluruh kendala kapasitas dengan memilih kombinasi terbaik dari lokasi *eksisting* dan kandidat lokasi hasil *K-Means Clustering*.

5.2 Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi MBG

5.2.1 Analisis Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi Makan Bergizi Gratis

Setelah diperoleh kandidat lokasi depot (SPPG) selanjutnya mencari rute distribusi yang lebih terstruktur dengan pembagian rute berdasarkan *time windows* dan jenis pelayanan, yaitu *delivery* dan *pickup*. Berikut merupakan Tabel 5.3 hasil optimasi rute distribusi yang diperoleh menggunakan *Simulated Annealing*:

Tabel 5. 3 Hasil Optimasi Lokasi dan Rute Distribusi MBG

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
AWALAN_02	K1	1	Delivery	TW1	131 - 79 - 126 - 3 - 44 - 118 - 45 - 117 - 120 - 100 - 116	655	7,045859
AWALAN_02	K1	1	Delivery	TW2	122 - 121	290	5,611594
AWALAN_02	K1	1	Delivery	TW3	31	685	4,290773
AWALAN_02	K1	1	Pickup	TW1	131 - 79 - 126 - 3 - 44 - 118 - 45 - 117 - 120 - 116 - 100	655	6,655186
AWALAN_02	K1	1	Pickup	TW2	122 - 121	290	5,611594
AWALAN_02	K1	1	Pickup	TW3	31	685	4,290773
AWALAN_02	K2	1	Delivery	TW3	33 - 22	831	8,542136
AWALAN_02	K2	1	Pickup	TW3	33 - 22	831	8,542136
AWALAN_05	K1	1	Delivery	TW1	99 - 132 - 134 - 133 - 49 - 54 - 55 - 52	315	6,560223
AWALAN_05	K1	1	Delivery	TW2	105	179	3,147593
AWALAN_05	K1	1	Delivery	TW3	112 - 114 - 129	1014	5,002268
AWALAN_05	K1	1	Pickup	TW1	99 - 132 - 134 - 133 - 49 - 54 - 55 - 52	315	6,560223
AWALAN_05	K1	1	Pickup	TW2	105	179	3,147593
AWALAN_05	K1	1	Pickup	TW3	112 - 114 - 129	1014	5,002268
AWALAN_05	K2	1	Delivery	TW3	111 - 113 - 13	983	7,428712
AWALAN_05	K2	1	Pickup	TW3	111 - 113 - 13	983	7,428712
KMEANS_01	K1	1	Delivery	TW1	130 - 59 - 135 - 101 - 136 - 137 - 119 - 60 - 40 - 43 - 80	549	36,82309 4
KMEANS_01	K1	1	Delivery	TW3	115 - 66 - 67 - 110	633	10,10818
KMEANS_01	K1	1	Pickup	TW1	130 - 101 - 59 - 135 - 136 - 137 - 119 - 60 - 40 - 43 - 80	549	36,89094 8
KMEANS_01	K1	1	Pickup	TW2	165	357	10,19973 3
KMEANS_01	K1	1	Pickup	TW3	115 - 66 - 67 - 110	633	10,10818
KMEANS_01	K2	1	Delivery	TW2	61 - 107 - 63 - 123 - 125 - 65	961	11,11314 4
KMEANS_01	K2	1	Pickup	TW2	107 - 61 - 63 - 123 - 125 - 65	961	11,25534 6
KMEANS_01	K2	2	Delivery	TW2	165	357	10,19973 3

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW1	51 - 152 - 147 - 25	219	16,705531
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW2	124 - 128 - 28 - 20 - 127 - 19 - 30	944	5,722278
KMEANS_03	K1	1	Delivery	TW3	32 - 36 - 21	967	2,455488
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW1	51 - 152 - 147 - 25	219	16,705531
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW2	124 - 128 - 28 - 127 - 19 - 20 - 30	944	5,732224
KMEANS_03	K1	1	Pickup	TW3	32 - 36 - 21	967	2,455488
KMEANS_03	K2	1	Delivery	TW2	29	79	3,395486
KMEANS_03	K2	1	Delivery	TW3	14 - 23 - 37	276	11,780523
KMEANS_03	K2	1	Pickup	TW2	29	79	3,395486
KMEANS_03	K2	1	Pickup	TW3	14 - 23 - 37	276	11,780523
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW1	73 - 41 - 48 - 71 - 102 - 75 - 74 - 86 - 72 - 84 - 69 - 81 - 154 - 76 - 70	625	18,03436
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW2	89 - 108 - 91 - 93 - 88 - 87 - 90	997	8,564254
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW3	96 - 98 - 95	714	3,269624
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW1	73 - 41 - 48 - 71 - 102 - 75 - 74 - 86 - 72 - 84 - 69 - 81 - 154 - 76 - 70	625	18,03436
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW2	89 - 108 - 91 - 93 - 88 - 87 - 90	997	8,564254
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW3	96 - 98 - 95	714	3,269624
KMEANS_04	K2	1	Delivery	TW2	92 - 94	141	4,868475
KMEANS_04	K2	1	Pickup	TW2	92 - 94	141	4,868475
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW1	46 - 149 - 146 - 106 - 57 - 68 - 82 - 26	324	20,124052
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW2	62 - 64 - 104	452	13,834558
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW3	97	472	1,620866
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW1	4 - 1 - 46 - 149 - 146 - 106 - 57 - 68 - 82 - 26	431	31,530799
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW2	62 - 64 - 104	452	13,834558
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW3	97	472	1,620866

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Rute	Trip Load	Total Jarak km
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW1	140 - 141 - 47 - 1 - 4	261	28,846763
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW3	24	718	14,863781
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW1	47 - 140 - 141	154	28,559577
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW3	24	718	14,863781
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW1	83 - 143 - 144 - 145 - 139 - 160 - 161 - 153 - 151 - 156 - 103 - 158 - 159 - 148 - 50 - 58 - 53 - 157 - 56 - 78 - 142 - 155 - 138	1014	15,967257
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW2	164 - 35 - 166 - 167 - 163 - 162	898	3,899053
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW3	169 - 168	262	2,740775
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW1	83 - 143 - 144 - 145 - 139 - 160 - 161 - 153 - 151 - 156 - 103 - 158 - 159 - 148 - 50 - 58 - 53 - 157 - 56 - 78 - 142 - 155 - 138	1014	15,967257
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW2	164 - 35 - 166 - 167 - 163 - 162	898	3,899053
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW3	169 - 168	262	2,740775
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW1	42 - 85 - 77 - 150	144	19,675015
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW2	109	178	2,807227
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW1	42 - 85 - 77 - 150	144	19,675015
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW2	109	178	2,807227
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW1	2 - 16 - 5 - 18 - 39 - 6	258	2,664617
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW2	27 - 8 - 7 - 9	868	3,763164
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW3	15 - 10 - 11 - 12 - 17 - 38	966	3,191376
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW1	2 - 16 - 5 - 18 - 39 - 6	258	2,664617
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW2	27 - 8 - 7 - 9	868	3,763164
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW3	15 - 10 - 11 - 12 - 17 - 38	966	3,191376
KMEANS_07	K2	1	Delivery	TW3	34	359	2,033534
KMEANS_07	K2	1	Pickup	TW3	34	359	2,033534

Berdasarkan hasil Tabel 5.3 diatas hasil optimasi delapan lokasi SPPG yang telah dipilih melalui proses optimasi Simulated Annealing selanjutnya menjadi titik awal pembentukan rute distribusi untuk melayani seluruh sekolah yang telah dialokasikan pada masing-masing wilayah pelayanan. Rute distribusi dibentuk dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, pembagian time window (TW1, TW2, dan TW3), serta jenis fase distribusi yang terdiri atas *delivery* dan *pickup*. Hasil optimasi menunjukkan bahwa seluruh sekolah yang dialokasikan pada masing-masing SPPG berhasil dilayani tanpa melanggar kendala kapasitas kendaraan maupun pembagian *time windows* yang telah ditetapkan. Pembentukan rute pada setiap SPPG menunjukkan bahwa setiap kendaraan hanya melayani sekolah yang berada dalam wilayah pelayanan SPPG masing-masing. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil optimasi lokasi yang diperoleh pada tahap sebelumnya telah menghasilkan pembagian wilayah pelayanan yang jelas sehingga tidak terjadi tumpang tindih pelayanan antar SPPG. Selain itu setiap rute dibentuk secara terpisah berdasarkan *time windows*, sehingga sekolah dengan jadwal pelayanan yang berbeda tidak digabungkan dalam satu perjalanan.

Seluruh rute hasil optimasi memiliki *Trip Load* yang berada di bawah atau sama dengan kapasitas maksimum kendaraan sebesar 1.015 porsi, sehingga seluruh kendala kapasitas kendaraan berhasil dipenuhi. Meskipun terdapat variasi nilai *Trip Load* dan Total Jarak pada setiap rute, kondisi tersebut dipengaruhi oleh perbedaan jumlah *demand* dan persebaran geografis sekolah pada masing-masing wilayah pelayanan. Dengan demikian, variasi beban kendaraan maupun jarak tempuh merupakan pengaruh dari karakteristik wilayah pelayanan yang berbeda, bukan menunjukkan adanya pelanggaran terhadap model atau ketidakseimbangan distribusi. Selain memenuhi kendala kapasitas dan *time windows*, hasil optimasi juga menunjukkan bahwa mekanisme *multi-trip* telah diterapkan pada model LRPTW. Hal ini terlihat pada SPPG KMEANS_01, di mana kendaraan K2 melakukan dua perjalanan (*Trip 1* dan *Trip 2*) pada proses *delivery* di TW2 karena seluruh permintaan tidak dapat diangkut dalam satu perjalanan akibat batas kapasitas kendaraan. Sementara itu pada rute lainnya hanya diperlukan satu perjalanan karena seluruh sekolah dalam *time windows* yang sama telah dapat dilayani dalam satu *trip*. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *multi-trip* bekerja secara adaptif, yaitu hanya digunakan ketika diperlukan, sehingga tidak menambah jumlah perjalanan apabila satu *trip* sudah mampu melayani seluruh permintaan secara optimal.

5.2.2 Analisis Kinerja Distribusi Berdasarkan Jarak Tempuh dan Biaya BBM

Hasil optimasi selanjutnya dianalisis berdasarkan total jarak tempuh dan biaya bahan bakar (BBM) yang dihasilkan pada masing-masing SPPG. Analisis bertujuan untuk mengevaluasi tingkat efisiensi operasional distribusi MBG yang terbentuk setelah penerapan model LRPTW menggunakan algoritma SA. Berikut merupakan Tabel 5.4 distribusi masing-masing SPPG yang diperoleh:

Tabel 5. 4 Hasil Kinerja Distribusi Berdasarkan Jarak dan Biaya BBM

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Trip Load	Total Jarak km	Total Biaya BBM (Rp)
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	655	7,05	6.647
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW2	290	5,61	5.294
AWALAN_02	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	685	4,29	4.048
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	655	6,66	6.278
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	290	5,61	5.294
AWALAN_02	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	685	4,29	4.048
AWALAN_02	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	831	8,54	8.059
AWALAN_02	K2	1	<i>Pickup</i>	TW3	831	8,54	8.059
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	315	6,56	6.189
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW2	179	3,15	2.969
AWALAN_05	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	1014	5,00	4.719
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	315	6,56	6.189
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	179	3,15	2.969
AWALAN_05	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	1014	5,00	4.719
AWALAN_05	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	983	7,43	7.008
AWALAN_05	K2	1	<i>Pickup</i>	TW3	983	7,43	7.008
KMEANS_01	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	549	36,82	34.739
KMEANS_01	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	633	10,11	9.536
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	549	36,89	34.803
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	357	10,20	9.622
KMEANS_01	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	633	10,11	9.536
KMEANS_01	K2	1	<i>Delivery</i>	TW2	961	11,11	10.484
KMEANS_01	K2	1	<i>Pickup</i>	TW2	961	11,26	10.618
KMEANS_01	K2	2	<i>Delivery</i>	TW2	357	10,20	9.622
KMEANS_03	K1	1	<i>Delivery</i>	TW1	219	16,71	15.760
KMEANS_03	K1	1	<i>Delivery</i>	TW2	944	5,72	5.398
KMEANS_03	K1	1	<i>Delivery</i>	TW3	967	2,46	2.316
KMEANS_03	K1	1	<i>Pickup</i>	TW1	219	16,71	15.760
KMEANS_03	K1	1	<i>Pickup</i>	TW2	944	5,73	5.408
KMEANS_03	K1	1	<i>Pickup</i>	TW3	967	2,46	2.316
KMEANS_03	K2	1	<i>Delivery</i>	TW2	79	3,40	3.203
KMEANS_03	K2	1	<i>Delivery</i>	TW3	276	11,78	11.114
KMEANS_03	K2	1	<i>Pickup</i>	TW2	79	3,40	3.203

SPPG ID	Vehicle	Trip	Fase	Time Windows	Trip Load	Total Jarak km	Total Biaya BBM (Rp)
KMEANS_03	K2	1	Pickup	TW3	276	11,78	11.114
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW1	625	18,03	17.014
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW2	997	8,56	8.079
KMEANS_04	K1	1	Delivery	TW3	714	3,27	3.085
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW1	625	18,03	17.014
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW2	997	8,56	8.079
KMEANS_04	K1	1	Pickup	TW3	714	3,27	3.085
KMEANS_04	K2	1	Delivery	TW2	141	4,87	4.593
KMEANS_04	K2	1	Pickup	TW2	141	4,87	4.593
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW1	324	20,12	18.985
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW2	452	13,83	13.051
KMEANS_05	K1	1	Delivery	TW3	472	1,62	1.529
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW1	431	31,53	29.746
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW2	452	13,83	13.051
KMEANS_05	K1	1	Pickup	TW3	472	1,62	1.529
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW1	261	28,85	27.214
KMEANS_05	K2	1	Delivery	TW3	718	14,86	14.022
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW1	154	28,56	26.943
KMEANS_05	K2	1	Pickup	TW3	718	14,86	14.022
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW1	1014	15,97	15.063
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW2	898	3,90	3.678
KMEANS_06	K1	1	Delivery	TW3	262	2,74	2.586
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW1	1014	15,97	15.063
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW2	898	3,90	3.678
KMEANS_06	K1	1	Pickup	TW3	262	2,74	2.586
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW1	144	19,68	18.561
KMEANS_06	K2	1	Delivery	TW2	178	2,81	2.648
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW1	144	19,68	18.561
KMEANS_06	K2	1	Pickup	TW2	178	2,81	2.648
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW1	258	2,66	2.514
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW2	868	3,76	3.550
KMEANS_07	K1	1	Delivery	TW3	966	3,19	3.011
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW1	258	2,66	2.514
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW2	868	3,76	3.550
KMEANS_07	K1	1	Pickup	TW3	966	3,19	3.011
KMEANS_07	K2	1	Delivery	TW3	359	2,03	1.918
KMEANS_07	K2	1	Pickup	TW3	359	2,03	1.918
						664,35	626.747

Berdasarkan tabel 5.4 hasil optimasi seluruh proses *delivery* dan *pickup* pada delapan SPPG menghasilkan total jarak distribusi sebesar 664,35 km dengan estimasi total biaya BBM

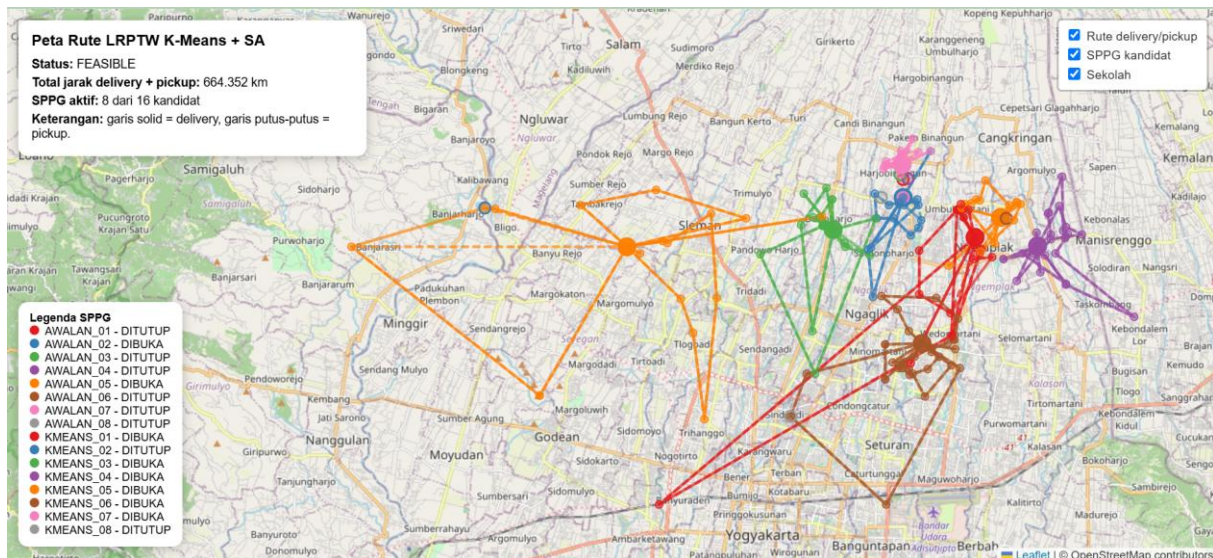
sebesar Rp626.747. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi lokasi SPPG dan rute distribusi yang dihasilkan oleh SA mampu membentuk jaringan distribusi yang *feasible* dengan tetap memenuhi seluruh kendala model, seperti kapasitas kendaraan, pembagian *time windows*, dan alokasi sekolah pada masing-masing SPPG. Hasil optimasi menunjukkan bahwa biaya operasional distribusi memiliki hubungan yang searah dengan jarak tempuh kendaraan. Semakin besar total jarak yang ditempuh, semakin besar pula estimasi biaya BBM yang diperlukan. Oleh karena itu, efisiensi rute distribusi secara langsung berpengaruh terhadap efisiensi biaya operasional. Dengan terbentuknya rute yang lebih efektif, kendaraan dapat menyelesaikan proses distribusi dengan jarak tempuh yang lebih terkendali sehingga penggunaan bahan bakar juga menjadi lebih efisien.

Variasi jarak tempuh antarperjalanan merupakan kondisi yang wajar karena setiap SPPG memiliki karakteristik wilayah pelayanan yang berbeda. Perbedaan jumlah sekolah yang dilayani, persebaran lokasi sekolah, serta pembagian *demand* menyebabkan setiap rute memiliki panjang lintasan yang tidak sama. Meskipun demikian, hasil optimasi menunjukkan bahwa seluruh perjalanan dapat diselesaikan dengan tetap memenuhi kebutuhan distribusi tanpa menghasilkan jarak tempuh yang berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma mampu menyesuaikan pembentukan rute dengan kondisi masing-masing wilayah pelayanan sehingga penggunaan kendaraan tetap efisien.

Secara keseluruhan, total jarak distribusi sebesar 664,35 km dengan estimasi biaya BBM sebesar Rp626.747 menunjukkan bahwa solusi yang dihasilkan SA memiliki kinerja distribusi yang baik dari sisi operasional. Nilai tersebut menggambarkan bahwa proses optimasi tidak hanya menghasilkan solusi yang memenuhi seluruh *constraint* model, tetapi juga mampu menjaga efisiensi penggunaan kendaraan melalui pengendalian jarak tempuh yang berdampak langsung pada biaya operasional distribusi.

5.2.3 Analisis Perbandingan Hasil Efisiensi Total Jarak dan Biaya BBM

Berikut merupakan visualisasi hasil optimasi jaringan distribusi menggunakan model LRPTW berbasis algoritma SA. Visualisasi ini menunjukkan lokasi SPPG aktif beserta rute distribusi *delivery* dan *pickup* yang terbentuk untuk melayani seluruh sekolah sesuai dengan hasil optimasi model.



Gambar 5. 2 Visualisasi Peta Hasil Optimasi

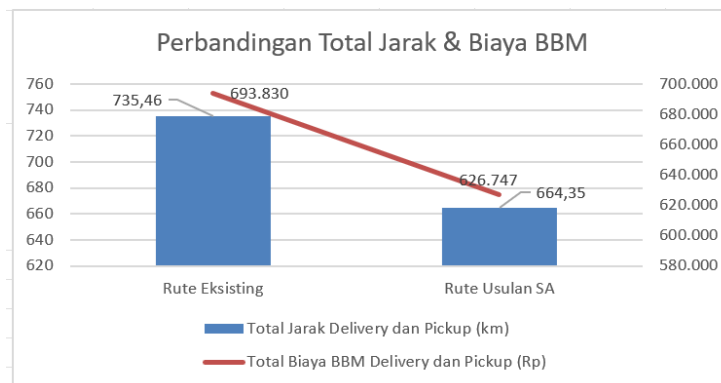
Gambar 5.1 diatas terlihat bahwa setiap SPPG aktif melayani sekolah-sekolah yang telah dialokasikan pada wilayah pelayanannya masing-masing melalui rute distribusi yang terbentuk. Rute *delivery* dan *pickup* menghubungkan lokasi SPPG dengan seluruh sekolah yang menjadi tanggung jawabnya sehingga seluruh sekolah pada wilayah penelitian dapat terlayani. Visualisasi juga menunjukkan bahwa bentuk dan panjang rute distribusi berbeda pada setiap SPPG. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh persebaran lokasi sekolah pada masing-masing wilayah pelayanan sehingga kebutuhan jarak tempuh setiap rute tidak sama.

Tabel 5. 5 Perbandingan Kondisi Eksisting dan Usulan

Indikator	Rute Eksisting	Rute Usulan SA	Selisih	Persentase Penurunan
Total Jarak <i>Delivery</i> dan <i>Pickup</i> (km)	735,46	664,35	71,11	9,67%
Total Biaya BBM <i>Delivery</i> dan <i>Pickup</i> (Rp)	693.830	626.747	67.083	

Berdasarkan Tabel 5.5 diatas hasil optimasi menggunakan algoritma SA menunjukkan adanya peningkatan efisiensi distribusi dibandingkan dengan kondisi eksisting. Total jarak tempuh distribusi *delivery* dan *pickup* pada kondisi eksisting sebesar 735,46 km, sedangkan pada rute usulan hasil optimasi menurun menjadi 664,35 km. Dengan demikian, terjadi pengurangan jarak tempuh sebesar 71,11 km atau 9,67% dibandingkan kondisi *eksisting*. Hasil ini menunjukkan bahwa jaringan distribusi hasil optimasi mampu mengurangi kebutuhan perjalanan kendaraan dalam proses pendistribusian. Perbaikan tersebut juga berdampak pada

biaya operasional distribusi. Total biaya BBM pada kondisi *eksisting* sebesar Rp693.830, sedangkan pada rute usulan hasil optimasi menjadi Rp626.747, sehingga terjadi penghematan sebesar Rp67.083. Penurunan biaya BBM tersebut sejalan dengan berkurangnya total jarak tempuh distribusi, karena semakin pendek jarak perjalanan kendaraan maka semakin rendah konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan. Oleh karena itu, hasil optimasi menggunakan algoritma SA mampu meningkatkan efisiensi distribusi baik dari aspek jarak tempuh maupun biaya operasional dibandingkan kondisi *eksisting*.



Gambar 5. 3 Grafik Perbandingan Kondisi *Eksisting* dan Usulan

Berdasarkan Gambar 5.2 diatas menunjukkan bahwa rute usulan hasil optimasi memiliki total jarak tempuh dan biaya BBM yang lebih rendah dibandingkan kondisi *eksisting*. Hal ini memperlihatkan adanya peningkatan efisiensi distribusi setelah penerapan algoritma SA.

5.2.4 Analisis Pemenuhan *Time Windows*

Pemenuhan *time windows* merupakan salah satu indikator penting dalam model LRPTW karena menunjukkan apakah rute yang dihasilkan dapat melayani sekolah sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi dengan membandingkan batas waktu pelayanan dengan waktu pelayanan aktual hasil optimasi menggunakan algoritma SA. Berikut merupakan Tabel 5.5 perbandingan hasil batas waktu pelayanan dengan waktu pelayanan aktual.

Tabel 5. 6 *Time Windows* pada *Delivery* dan *Pickup*

Fase	Time Windows	Batas Waktu (Menit)	Waktu Pelayanan Aktual (Menit)
Delivery	TW 1	90 – 150	91 – 141
Delivery	TW 2	150 – 240	151 – 175
Delivery	TW 3	330 – 390	331 – 389
Pickup	TW 1	210 – 300	211 – 261

Pickup	TW 2	300 – 390	301 – 325
Pickup	TW 3	390 – 480	391 – 454

Pada Tabel 5.5 Seluruh waktu pelayanan hasil optimasi yang menggunakan algoritma SA berada dalam rentang *time windows* yang telah ditetapkan. Pada fase *delivery*, pelayanan TW1 berlangsung dalam rentang 91–141 menit, TW2 pada 151–175 menit, dan TW3 pada 331–389 menit. Di sisi lain, pada fase *pickup*, pelayanan TW1 berlangsung pada 211–261 menit, TW2 pada 301–325 menit, dan TW3 pada 391–454 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semua sekolah berhasil dilayani sesuai dengan batas waktu yang ditentukan tanpa ada pelanggaran terhadap *time windows*.

Jika dibandingkan dengan waktu yang tersedia, kebanyakan pelayanan selesai sebelum mencapai batas akhir. Hal ini menunjukkan bahwa rute yang dihasilkan masih memiliki waktu tambahan, sehingga kendaraan memiliki toleransi terhadap kemungkinan keterlambatan operasional di lapangan, seperti keadaan lalu lintas atau waktu pelayanan yang lebih panjang dari yang diperkirakan. Dengan adanya waktu tambahan tersebut, sistem distribusi menjadi lebih mudah disesuaikan dan memiliki risiko keterlambatan yang lebih rendah. Selain itu, rentang waktu pelayanan yang cukup terfokus pada setiap fase menunjukkan bahwa algoritma SA berhasil mengatur urutan kunjungan secara efisien. Kendaraan tidak hanya memenuhi batasan waktu pelayanan, tetapi juga mampu menyelesaikan distribusi dan penjemputan dalam periode yang telah direncanakan. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses optimasi tidak hanya berfokus pada pengurangan jarak tempuh, tetapi juga mempertimbangkan kelayakan jadwal distribusi sesuai karakteristik operasional MBG.

5.3 Analisis Komponen dan Estimasi Biaya Pembukaan Depot

Dalam model LRPTW yang dikembangkan dalam penelitian ini, biaya pembukaan depot adalah elemen biaya tetap yang muncul satu kali ketika sebuah kandidat lokasi SPPG ditetapkan sebagai depot aktif dalam sistem distribusi. Biaya ini mencerminkan semua investasi awal yang diperlukan agar sebuah SPPG bisa beroperasi sesuai dengan standar yang ditetapkan pemerintah, sebelum dapur tersebut dapat mulai memproduksi dan mendistribusikan makanan bergizi kepada penerima manfaat.

Penetapan komponen biaya untuk membuka depot dalam penelitian ini merujuk pada Petunjuk Teknis Tata Kelola Penyelenggaraan Program Makan Bergizi Gratis Tahun Anggaran

2026 (Keputusan Kepala Badan Gizi Nasional Nomor 401.1 Tahun 2025), yang secara resmi mewajibkan setiap fasilitas SPPG untuk menyediakan enam komponen utama, yakni bangunan, peralatan dapur, peralatan makan (*food tray*), sarana dan prasarana pendukung, alat mesin kantor (*Alsintor*), serta *buffer* operasional berupa seragam relawan dan dana talangan awal sebelum bantuan pemerintah (*Banper*) dicairkan. Keenam komponen ini menjadi landasan struktur biaya untuk pembukaan depot yang digunakan dalam fungsi objektif model.

Karena Juknis BGN hanya menyertakan spesifikasi teknis dan tidak mencantumkan nilai rupiah per komponen, penelitian ini memanfaatkan data perbandingan dari sumber industri untuk mengira total nilai investasi. Sertifikasi SPPG Indonesia (2026) melaporkan bahwa biaya untuk mendirikan dapur SPPG berkisar antara Rp500 juta hingga Rp1,8 miliar, tergantung pada skala dan kondisi awal lokasi. Estimasi ini didukung oleh laporan Bisnis.com (2026) yang mengutip Kementerian UMKM, yang menyatakan bahwa pelaku usaha membutuhkan modal antara Rp1 miliar hingga Rp4 miliar untuk mengelola dapur Program MBG.

Tabel 5. 7 Rincian Komponen Pembukaan Depot

No	Komponen Biaya	Rincian / Spesifikasi	Dasar Regulasi	Sumber
1	Bangunan	Luas 300–400 m ² (SPPG BGN) / 150–400 m ² (SPPG Mandiri), di atas lahan 600–1.000 m ²	Juknis BGN No. 401.1/2025	https://cdn-web.bgn.go.id/juknis/01KFZQGR85YKY1HRMNDK4RRM1P.pdf
2	Peralatan dapur	Konfigurasi sesuai spesifikasi teknis untuk kapasitas produksi 3.000 porsi/hari	Juknis BGN No. 401.1/2025, Lampiran 7	
3	Peralatan makan (<i>food tray</i>)	Stainless steel 304/316, 5 sekat, dimensi 22×28×6 cm, tebal plat 0,4–0,6 mm	Juknis BGN No. 401.1/2025	
4	Sarana & prasarana pendukung	Gudang kering, gudang basah (<i>chiller</i> & <i>freezer</i>), ruang	Juknis BGN No. 401.1/2025, Lampiran 8	

No	Komponen Biaya	Rincian / Spesifikasi	Dasar Regulasi	Sumber
		persiapan, ruang packing & distribusi, instalasi gas		
5	Alat mesin kantor (Alsintor)	2 unit komputer, 1 kamera video conference, 1 printer, 1 TV monitor, jaringan internet	Juknis BGN No. 401.1/2025	
6	Buffer operasional	3 seragam × 51 relawan = 153 seragam; talangan awal sebelum Banper cair	Juknis BGN No. 401.1/2025	

Karena Petunjuk Teknis Badan Gizi Nasional hanya memuat spesifikasi teknis dari masing-masing komponen dan tidak mencantumkan nilai rupiah secara resmi, penelitian ini menggunakan data estimasi modal pendirian dapur SPPG dari sumber industri sebagai acuan nilai investasi. Berikut merupakan tabel estimatis pembukaan depot dari dua sumber:

Tabel 5. 8 Tabel Estimasi Pembukaan Depot

Sumber	Estimasi Modal	Keterangan
https://www.sertifikasisppg.com/berapa-modal-mendirikan-dapur-sppg-panduan-juknis-mbg/	Rp500 juta – Rp1,8 miliar	Tergantung skala dan kondisi awal lokasi.
https://www.bisnis.com/read/20260121/638/1945837/langkah-langkah-bikin-usaha-dapur-mbg-butuh-modal-hingga-rp4-miliar	Rp1 miliar – Rp4 miliar	Untuk pengelolaan dapur MBG oleh usaha menengah sebagai operator.

Berdasarkan Tabel 5.7 diatas Penetapan biaya pembukaan depot dalam penelitian ini didasarkan pada dua sumber yang saling melengkapi. Komponen biaya merujuk pada standar teknis resmi yang ditetapkan oleh Badan Gizi Nasional melalui Petunjuk Teknis Tata Kelola

Penyelenggaraan Program Makan Bergizi Gratis, sehingga setiap elemen biaya (bangunan, peralatan dapur, *food tray*, sarana dan prasarana, alat kantor, serta *buffer* operasional) memiliki dasar regulasi yang jelas dan bukan merupakan asumsi bebas peneliti. Sementara itu, karena regulasi tersebut hanya mengatur spesifikasi teknis tanpa menyertakan nilai rupiah, estimasi nilai investasi pembukaan depot diperoleh dari data industri yang dilaporkan oleh dua sumber independen, yaitu Sertifikasi SPPG Indonesia (2026) dan Bisnis.com (2026) yang mengutip Kementerian UMKM. Kedua sumber estimasi tersebut menunjukkan hasil yang saling mendukung, dengan rentang nilai yang beririsan pada kisaran Rp1.000.000.000 hingga Rp1.800.000.000. Kesesuaian antara dua sumber independen ini memperkuat keabsahan nilai investasi yang digunakan sebagai parameter biaya pembukaan depot dalam penelitian, karena angka tersebut tidak berasal dari satu sumber tunggal, melainkan didukung oleh lebih dari satu pihak yang secara terpisah melaporkan estimasi modal yang sejalan.

5.4 Analisis Kelayakan Finansial

Pada analisis kelayakan finansial *Break Even Point* dilakukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan agar penerimaan kumulatif satu unit SPPG dapat menutupi investasi awal pembangunan. Perhitungan menggunakan tiga skenario investasi, yaitu rendah, menengah, dan tinggi, dengan proyeksi selama lima tahun. Berikut merupakan estimasi investasi pembangunan satu unit SPPG:

Tabel 5. 9 Estimasi Komponen Investasi Satu Unit SPPG

No.	Komponen Biaya	Rendah (Rp)	Menengah (Rp)	Tinggi (Rp)
1	Bangunan SPPG	150.000.000	575.000.000	1.000.000.000
2	Peralatan Dapur Industri	150.000.000	250.000.000	350.000.000
3	Food Tray dan Perlengkapan Makan	75.000.000	97.500.000	120.000.000
4	Sarana Pendukung (kendaraan distribusi, rak penyimpanan, dll.)	50.000.000	100.000.000	150.000.000
5	Peralatan Administrasi dan Kantor	10.000.000	17.500.000	25.000.000
6	Modal Kerja Awal	50.000.000	100.000.000	150.000.000
TOTAL CAPEX SATU UNIT SPPG		485.000.000	1.140.000.000	1.795.000.000

Berdasarkan Tabel 5.9 tersebut, kebutuhan investasi pembangunan satu unit SPPG berada pada rentang Rp485.000.000 sampai Rp1.795.000.000. Skenario rendah menggambarkan kebutuhan pembangunan minimum, skenario menengah menggambarkan kondisi moderat, sedangkan skenario tinggi menggambarkan pembangunan dengan fasilitas yang lebih lengkap. Perhitungan ini menggunakan pendekatan BEP investasi berdasarkan penerimaan bruto fasilitas. Oleh karena itu, hasilnya menunjukkan pengembalian investasi awal, bukan keuntungan bersih. Tabel 5.10 menyajikan proyeksi penerimaan satu unit SPPG

Tabel 5. 10 Proyeksi Penerimaan Satu Unit SPPG

Uraian	Perhitungan	Hasil
Penerimaan per hari	-	Rp6.000.000
Hari operasional per bulan	-	26 hari
Penerimaan per bulan	$Rp6.000.000 * 26 \text{ hari}$	Rp156.000.000
Hari operasional per tahun	-	312 hari
Penerimaan per tahun	$Rp6.000.000 * 312 \text{ hari}$	Rp1.872.000.000
Penerimaan lima tahun	$Rp1.872.000.000 * 5 \text{ tahun}$	Rp9.360.000.000

Berdasarkan Tabel 5.10 diatas, satu unit SPPG diproyeksikan memperoleh penerimaan bruto sebesar Rp6.000.000 per hari operasional, atau sekitar Rp156.000.000 per bulan dan Rp1.872.000.000 per tahun dengan asumsi 312 hari operasional. Apabila besaran penerimaan tersebut diasumsikan tetap, maka total penerimaan kumulatif selama lima tahun diperkirakan mencapai Rp9.360.000.000. Penerimaan bruto tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis *Break Even Point* untuk mengestimasi waktu pengembalian investasi pembangunan satu unit SPPG. Dengan besarnya penerimaan tahunan yang diproyeksikan, investasi pada setiap skenario dapat dievaluasi untuk mengetahui kapan modal awal diperkirakan kembali. Namun, proyeksi ini disusun berdasarkan asumsi penerimaan bruto yang tetap dan belum memperhitungkan biaya operasional maupun penyusutan aset.

Tabel 5. 11 Hasil Perhitungan Waktu BEP

Skenario	Investasi awal	BEP hari operasional	BEP bulan	BEP tahun	Waktu tercapai
Rendah	Rp485.000.000	80,83 hari atau 81 hari	3,11 bulan	0,26 tahun	Tahun pertama
Menengah	Rp1.140.000.000	190 hari	7,31 bulan	0,61 tahun	Tahun pertama
Tinggi	Rp1.795.000.000	299,17 hari atau 300 hari	11,51 bulan	0,96 tahun	Tahun pertama

Berdasarkan Tabel 5.11 hasil perhitungan waktu tercapainya BEP, seluruh skenario investasi dapat mencapai titik impas pada tahun pertama. Skenario rendah memerlukan sekitar 81 hari operasional atau 3,11 bulan, skenario menengah sekitar 190 hari operasional atau 7,31 bulan, sedangkan skenario tinggi membutuhkan sekitar 300 hari operasional atau 11,51 bulan. Perbedaan waktu tersebut terjadi karena semakin besar nilai investasi awal, semakin lama penerimaan kumulatif diperlukan untuk menutup modal pembangunan. Hasil ini menunjukkan bahwa skenario rendah memiliki pengembalian investasi paling cepat, sedangkan skenario tinggi memiliki waktu pengembalian paling lama dan baru mencapai BEP mendekati akhir tahun pertama. Skenario menengah dapat dianggap paling representatif karena berada di antara kedua kondisi tersebut, yaitu dengan estimasi BEP sekitar 7,31 bulan. Namun hasil ini tetap merupakan estimasi berdasarkan penerimaan bruto dan belum memperhitungkan biaya operasional, penyusutan, serta perubahan penerimaan selama masa analisis.

Tabel 5. 12 Proyeksi BEP 5 Tahun Skenario Menengah

Tahun	Penerimaan tahunan	Penerimaan kumulatif	Investasi awal	Saldo kumulatif	Status
0	Rp0	Rp0	Rp1.140.000.000	— Rp1.140.000.000	Belum BEP
1	Rp1.872.000.000	Rp1.872.000.000	Rp1.140.000.000	Rp732.000.000	BEP tercapai
2	Rp1.872.000.000	Rp3.744.000.000	Rp1.140.000.000	Rp2.604.000.000	Melebihi BEP
3	Rp1.872.000.000	Rp5.616.000.000	Rp1.140.000.000	Rp4.476.000.000	Melebihi BEP

4	Rp1.872.000.000	Rp7.488.000.000	Rp1.140.000.000	Rp6.348.000.000	Melebihi BEP
5	Rp1.872.000.000	Rp9.360.000.000	Rp1.140.000.000	Rp8.220.000.000	Melebihi BEP

Berdasarkan Tabel 5. 12 proyeksi BEP selama lima tahun pada skenario menengah, investasi awal sebesar Rp1.140.000.000 telah tertutup pada tahun pertama. Dengan penerimaan bruto sebesar Rp1.872.000.000 per tahun, pada akhir tahun pertama diperoleh saldo positif sebesar Rp732.000.000, sehingga BEP diperkirakan tercapai setelah sekitar 190 hari operasional atau 7,31 bulan. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan investasi awal secara teoritis dapat kembali dalam waktu kurang dari satu tahun. Setelah BEP tercapai, penerimaan kumulatif terus meningkat hingga mencapai Rp9.360.000.000 pada akhir tahun kelima. Setelah dikurangi investasi awal, saldo kumulatif menjadi Rp8.220.000.000. Namun, nilai tersebut merupakan selisih antara penerimaan bruto dan investasi awal, sehingga tidak dapat langsung diartikan sebagai laba bersih karena belum memperhitungkan biaya operasional, pemeliharaan, penyusutan aset, dan kemungkinan perubahan penerimaan selama periode proyeksi.

Tabel 5. 13 Perbandingan Proyeksi BEP

Skenario	Investasi awal	Waktu BEP	Saldo akhir tahun pertama	Saldo akhir tahun kelima
Rendah	Rp485.000.000	3,11 bulan	Rp1.387.000.000	Rp8.875.000.000
Menengah	Rp1.140.000.000	7,31 bulan	Rp732.000.000	Rp8.220.000.000
Tinggi	Rp1.795.000.000	11,51 bulan	Rp77.000.000	Rp7.565.000.000

Berdasarkan Tabel 5.13 hasil perbandingan BEP, ketiga skenario investasi menunjukkan bahwa pembangunan satu unit SPPG diperkirakan telah mencapai titik impas pada tahun pertama. Perbedaan nilai investasi awal memberikan pengaruh terhadap lamanya waktu pengembalian investasi, di mana semakin besar investasi yang dikeluarkan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai BEP. Meskipun demikian, seluruh skenario masih menunjukkan kemampuan pengembalian investasi dalam waktu kurang dari satu tahun berdasarkan asumsi penerimaan yang digunakan dalam penelitian. Dari ketiga skenario tersebut, skenario investasi menengah dipilih sebagai dasar pembahasan karena dianggap paling merepresentasikan kebutuhan pembangunan satu unit SPPG. Skenario ini

memberikan keseimbangan antara besarnya investasi yang diperlukan dengan estimasi waktu pengembalian investasi, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kelayakan pembangunan SPPG. Oleh karena itu, skenario menengah dinilai paling sesuai untuk menggambarkan kondisi investasi yang realistis dibandingkan skenario rendah maupun skenario tinggi.

5.5 Analisis Algoritma *Simulated Annealing*

Bagian ini membahas terkait bagaimana mekanisme kerja algoritma SA berperan dalam pencapaian solusi optimal yang diperoleh, dengan mempertimbangkan parameter yang digunakan serta ciri pencarian solusi yang diterapkan dalam penelitian ini. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Wright (2010) dan Windu Arini et al. (2023) yang menyatakan bahwa tidak terdapat parameter SA yang bersifat universal sehingga penentuan parameter perlu disesuaikan dengan karakteristik setiap kasus optimasi.

a. Keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi

Algoritma SA dalam penelitian ini memulai dengan suhu awal (T_0) sebesar 120 dan menggunakan faktor pendinginan (α) sebesar 0,997 selama 1.000 iterasi. Di tahap awal pencarian, suhu yang tinggi memungkinkan algoritma menerima solusi tetangga yang kurang baik melalui probabilitas Metropolis $e^{-\Delta/T}$, sehingga pencarian solusi dapat mencakup area ruang solusi yang lebih luas (eksplorasi) dan tidak terjebak pada lokasi-alokasi depot yang pertama kali ditemukan. Seiring bertambahnya iterasi, suhu secara bertahap menurun, sehingga probabilitas untuk menerima solusi yang kurang baik semakin kecil, dan algoritma mulai memperhalus solusi terbaik yang telah ditemukan (eksploitasi). Mekanisme inilah yang menjadi alasan mengapa algoritma dapat keluar dari solusi awal *K-Means* yang masih melanggar kapasitas di beberapa klaster, menuju konfigurasi akhir yang sepenuhnya memenuhi batas kapasitas 3.000 porsi.

b. Peran *reheating* dalam mencegah optimum lokal

Mekanisme *reheating* yang meningkatkan suhu sebanyak 1,35 kali dalam setiap 350 iterasi memiliki peranan krusial dalam menghindari algoritma terjebak pada solusi optimum lokal karena suhu yang terlalu rendah untuk mengizinkan perubahan signifikan. Dengan adanya pemanasan ulang, algoritma diberikan kesempatan untuk menjelajahi konfigurasi lokasi dan alokasi yang bervariasi di tengah hingga akhir proses pencarian, sebelum kembali ke tahap pendinginan dan penyempurnaan solusi. Karakteristik ini sangat relevan untuk

masalah LRPTW yang memiliki ruang solusi yang rumit karena kombinasi keputusan lokasi depot, alokasi sekolah, dan urutan rute yang saling berpengaruh satu sama lain.

c. Kontribusi operator neighborhood yang beragam

Penggunaan sebelas jenis operator transformasi (termasuk *relocate*, *swap*, *destroy-repair*, dan *load balance*) menawarkan beragam cara untuk memperbaiki solusi di setiap fase. Operator seperti memindahkan pelanggan dan menukar pelanggan memberi peluang untuk perbaikan solusi yang bersifat lokal (modifikasi kecil pada satu atau dua sekolah), sementara operator seperti *destroy-repair* dan *relocate* memungkinkan perubahan yang lebih signifikan yang bisa membantu algoritma keluar dari pola solusi yang tidak berkembang. Gabungan antara operator dengan skala kecil dan besar ini memfasilitasi algoritma untuk tetap fleksibel dalam mencari solusi yang lebih baik, daripada hanya melakukan perubahan minor yang berisiko terjebak dalam pengaturan yang sama.

d. Peran mekanisme repair dalam menjaga kelayakan solusi

Setiap solusi tetangga yang dihasilkan selalu melalui tahap perbaikan kapasitas sebelum proses evaluasi dilakukan, sehingga algoritma dapat menghindari membuang waktu komputasi untuk menilai solusi yang sudah jelas tidak memenuhi syarat karena pelanggaran kapasitas. Pendekatan ini, bersama dengan validasi batasan pada fase evaluasi (kapasitas kendaraan, waktu layanan, dan aturan satu kali layanan untuk setiap sekolah), menjamin bahwa solusi terbaik pada akhir proses tidak hanya berorientasi pada biaya rendah, tetapi juga merupakan solusi yang benar-benar bisa dijalankan secara operasional. Secara keseluruhan, karakteristik algoritma SA dalam penelitian ini mulai dari kriteria penerimaan yang berbasis probabilitas, mekanisme reheating, variasi operator tetangga, hingga prosedur perbaikan solusi saling melengkapi untuk menghasilkan solusi akhir yang tidak hanya efisien dalam hal biaya tetapi juga memenuhi batasan operasional, yang terlihat dari pengurangan total jarak tempuh sebesar 16,70% dan penghematan biaya BBM sebesar 16,69% dibandingkan kondisi yang *eksisting*.

BAB VI

KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan penentuan lokasi dan rute distribusi Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak yang belum optimal melalui pendekatan *Location Routing Problem with Time Windows* berbasis algoritma *Simulated Annealing*. Berdasarkan hasil pengolahan data, berikut merupakan kesimpulan yang diperoleh untuk menjawab rumusan masalah pada penelitian ini:

1. Kandidat lokasi SPPG (depot) berhasil dibangkitkan menggunakan metode *K-Means Clustering* dengan mengelompokkan 169 sekolah penerima manfaat ke dalam 8 cluster berdasarkan koordinat geografis dan total permintaan sebesar 19.588 porsi sebagai *sample weight*. Hasil proses clustering menghasilkan delapan titik centroid yang digunakan sebagai kandidat lokasi SPPG. Pada penelitian ini, *K-Means Clustering* berfungsi sebagai metode pembangkitan kandidat lokasi awal (*initial solution generator*), sedangkan proses optimasi lokasi, alokasi sekolah, dan rute distribusi dilakukan pada tahap berikutnya menggunakan algoritma SA.
2. Penerapan pendekatan LRPTW berbasis algoritma SA berhasil menghasilkan sistem distribusi yang lebih efisien. Berdasarkan hasil optimasi, diperoleh konfigurasi 8 SPPG yang terdiri atas 2 SPPG *eksisting* dan 6 SPPG usulan untuk melayani seluruh 169 sekolah tanpa melanggar batasan kapasitas SPPG, kapasitas kendaraan, maupun time windows pelayanan. Algoritma SA mampu mengoptimalkan keputusan lokasi, alokasi sekolah, serta penyusunan rute distribusi secara terintegrasi sehingga diperoleh solusi yang memenuhi seluruh *constraint* operasional dengan nilai fungsi objektif yang minimum.
3. Optimalisasi lokasi dan rute distribusi memberikan dampak positif terhadap efisiensi biaya distribusi dan pengiriman MBG. Dibandingkan dengan kondisi eksisting, hasil optimasi menurunkan total jarak distribusi dari 735,46 km menjadi 664,35 km, sehingga terjadi pengurangan jarak sebesar 71,11 km atau 9,67%. Penurunan jarak tersebut berdampak pada penurunan biaya perjalanan (biaya BBM) dari Rp693.830 menjadi Rp626.747 atau terjadi penghematan sebesar Rp67.083 per hari. Selain itu, berdasarkan analisis kelayakan investasi menggunakan skenario investasi menengah, pembangunan satu unit SPPG diperkirakan mencapai BEP dalam waktu sekitar 190 hari operasional atau 7,31 bulan.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan selama proses pengolahan dan analisis data, berikut beberapa saran yang diharapkan dapat bermanfaat sebagai bahan pertimbangan dan masukan bagi pihak-pihak terkait maupun penelitian selanjutnya:

1. Bagi Pemerintah dan Pengelola program MBG

Pengelola SPPG disarankan mempertimbangkan penerapan perencanaan rute distribusi berbasis optimasi dalam kegiatan operasional harian, mengingat pendekatan sistematis terbukti dapat menghasilkan efisiensi jarak dan biaya yang lebih baik dibandingkan perencanaan konvensional. Selain itu, penerapan mekanisme *multi-trip* secara konsisten juga disarankan agar kapasitas armada kendaraan yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa perlu penambahan kendaraan baru. Mengingat rekomendasi lokasi SPPG yang dihasilkan model ini bersifat matematis, pemerintah atau pengelola program disarankan untuk melakukan studi kelayakan secara menyeluruh sebelum mengambil keputusan operasional lebih lanjut, mencakup kajian biaya investasi, kesesuaian infrastruktur, ketersediaan utilitas, serta pemenuhan regulasi yang berlaku.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini menggunakan jarak *Euclidean* sebagai pendekatan perhitungan jarak antar-titik, sehingga penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jarak jalan raya aktual agar rute yang dihasilkan lebih mencerminkan kondisi nyata di lapangan. Penelitian ini juga mengasumsikan jumlah permintaan bersifat tetap, sehingga penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan variasi jumlah siswa hadir per hari untuk menghasilkan solusi yang lebih adaptif terhadap perubahan permintaan. Selain itu, cakupan wilayah penelitian ini terbatas pada Kecamatan Ngemplak, sehingga penerapan pendekatan LRPTW berbasis *Simulated Annealing* pada wilayah distribusi MBG yang lebih luas di Kabupaten Sleman dapat menjadi pengembangan yang relevan dan berdampak lebih besar bagi efisiensi program MBG secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhairani Nasution, D., & Aslami, N. (2022). Pembentukan Sistem Informasi Kafe/Restoran dengan Menggunakan Metode Supply Chain Management. *SIBATIK JOURNAL: Jurnal Ilmiah Bidang Sosial, Ekonomi, Budaya, Teknologi, Dan Pendidikan*, 1(8), 1437–1444. <https://doi.org/10.54443/sibatik.v1i8.187>
- Adhitama, L., Murniati, S., & Pramudyo, C. S. (2023). Minimasi Jarak Pengiriman Roti CV. Twin Setia Setia dengan Metode K-Means Clustering dan Simulated Annealing. *Jurnal Teknik SILITEK*, 03(02), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.51135/jts.v3i02.88>
- Agustine, D., Hadi, I. H., & Devi Eka Wardani Meganingtyas. (2022). Masalah Vehicle Routing Problem Pada Pengiriman Barang di kota Bandung utara dengan menggunakan Kluster KMeans dan Algoritma Nearest Neighbor. *JMT : Jurnal Matematika Dan Terapan*, 4(2), 1–8. <https://doi.org/10.21009/jmt.4.2.1>
- Alfassa, A. I., Kusumawardhani, F., & Sudeska, E. (2025). Kebijakan Kependudukan Dalam Grand Design Pembangunan Kependudukan (GDPK) Pada Penataan Data Statistik Kependudukan Dengan Indikator Demografi (Fertilitas, Mortalitas, dan Migrasi) Population Policy in the Grand Design of Population Development (GDPK) in the Arrangement of Population Statistics Data with Demographic Indicators (Fertility, Mortality, and Migration). *EMOS: Journal of Demography, Ethnography and Social Transformation*, 5, 1.
- Anshari, N., Abdullah Hafizh, M., Rahmanda Putri, E., & Nugroho Sihananto, A. (2024). Metode Simulated Annealing untuk Optimasi Biaya Operasional Penerbangan. *Prosiding Seminar Nasional Informatika Bela Negara (SANTIKA)*, 4, 33–38.
- Fatma, E., Kartika, W., & Nur Madyanti, A. (2022). Penentuan Rute Pengangkut Limbah Medis Optimal Menggunakan Vehicle Routing Problem with Time Window pada Kasus Multi Depot. *Jurnal Manajemen Dan Organisasi*, 13(4), 324–335. <https://doi.org/10.29244/jmo.v13i4.38587>
- Fauzi, R., Priansyah, A., Puspawati, P. K., Awal, S. M. Z., Nguyen, H. T., & Rifai, A. P. (2025). Optimizing Vehicle Routing for Perishable Products with Time Window Constraints: *Jurnal Teknik Industri: Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknik Industri*, 27(1), 1–20. <https://doi.org/10.9744/jti.27.1.1-20>
- Ferreira, K. M., & Alves de Queiroz, T. (2022). A simulated annealing based heuristic for a location-routing problem with two-dimensional loading constraints. *Applied Soft Computing*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108443>
- Ghasemi, P., Hemmaty, H., Pourghader Chobar, A., Heidar, M. R., & Keramati, M. (2023). A Multi-Objective and Multi-Level Model for Location-Routing Problem in the Supply Chain Based on the Customer's Time Window. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 10(3), 412–426. <https://doi.org/10.22105/jarie.2022.321454.1414>
- Handayani, F. (2022). Aplikasi Data Mining Menggunakan Algoritma K-Means Clustering untuk Mengelompokkan Mahasiswa Berdasarkan Gaya Belajar. *Jurnal Teknologi Dan Informasi*, 12 (1), 46–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.34010/jati.v12i1.6733>
- Jailani, Ms., Jeka, F., & Negeri Sulthan Thaha Saifuddin Jambi, U. (2023). *Populasi dan Sampling (Kuantitatif), Serta Pemilihan Informan Kunci (Kualitatif) dalam Pendekatan Praktis*.
- Kevin Andreas Halomoan Tambunan, Ridha Nababan, Rimma Anisa Siagian, Roslin Naiborhu, Sintia Harianti, & Jamaludin Jamaludin. (2025). Tinjauan Kritis Tentang Program Makan Bergizi Gratis Terhadap Produktivitas Belajar Siswa. *Katalis Pendidikan : Jurnal Ilmu Pendidikan Dan Matematika*, 2(2), 21–31. <https://doi.org/10.62383/katalis.v2i2.1428>

- Kuo, C. L., Kuruoglu, E. E., & Chan, W. K. V. (2022). Neural Network Structure Optimization by Simulated Annealing. *Entropy*, 24(3). <https://doi.org/10.3390/e24030348>
- Le, T. D. C., Nguyen, D. D., Oláh, J., & Pakurár, M. (2022). Clustering algorithm for a vehicle routing problem with time windows. *Transport*, 37(1), 17–27. <https://doi.org/10.3846/transport.2022.16850>
- Liu, M., Wang, N., Zhang, M., & Shi, W. (2025). Location-routing problem for customized product delivery considering assembly delay. *Computers and Industrial Engineering*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111086>
- Liu, X., Chen, Y. L., Por, L. Y., & Ku, C. S. (2023). A Systematic Literature Review of Vehicle Routing Problems with Time Windows. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Number 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151512004>
- Lorinez Silitonga, Y., Indra, Z., Paramitha Purba, D., William Iskandar Ps, J. V, Baru, K., Percut Sei Tuan, K., Deli Serdang, K., & Utara, S. (2025). Impementasi Algoritma Heursitik Dalam Penyelesaian Masalah Travelling Salesman Problem Pada Optimasi Jalur Pengiriman Makanan Untuk Layanan Online Menggunakan Pyhton. In *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika* (Vol. 9, Number 1).
- M. Almufti, S., Ahmad Shaban, A., Arif Ali, Z., Ismael Ali, R., A. Dela Fuente, J., & Rajab Asaad, R. (2023). Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10–32. <https://doi.org/10.58429/pgjsrt.v2n2a144>
- Maghfiroh, M. F. N., Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., & Abdallah, B. N. (2023). A Location Routing Problem with Time Windows Consideration: A Metaheuristics Approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/app13020843>
- Matsuoka, T., & Miyasaka, J. (2023). *Optimising Food Distribution at a Food Bank: Using Simulated Annealing Algorithm*.
- Maulana Basuki, R., Muharrom, N. W., Kusuma, N. A., & Hadji, K. (2026). Implementasi Program Makan Bergizi Gratis: Evaluasi pelaksanaan dan tantangan operasional. *Nur Wahid Muharrom*, 4, 3026–2925. <https://doi.org/10.61104/alz.v4i1.3208>
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). *Location-routing: Issues, models and methods* *. <https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies>
- Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Maghrabie, H. M., & Baroutaji, A. (2023). Review of Metaheuristic Optimization Algorithms for Power Systems Problems. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Number 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su15129434>
- Nugraha, R., Suarna, N., Ali, I., & Rohman, D. (2025). Optimasi Pengelolaan Sampah Melalui Model Pengelompokan Dengan Algoritma K-Means. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5694>
- Nur Anisa, L., Andawiah, S., Putra Utama, D., & Afan, I. (2025). Implementasi supply chain management untuk meningkatkan kinerja logistik perusahaan. *Jurnal Masharif Al-Syariah: Jurnal Ekonomi Dan Perbankan Syariah*, 10 (1), 460–471. <https://doi.org/10.30651/jms.v10i1.25469>
- Nurma Heitasari, D., & Kemal Ghifari, M. (2022). *Perbandingan Metode Round Trip Time & Vehicle Routing Problem Time Windows Dalam Pemilihan Supply Point Pada Proses Distribusi Pertashop* (Vol. 2).
- Nurul Melani Haifa, Indah Nabilla, Virda Rahmatika, Rully Hidayatullah, & Harmonedi Harmonedi. (2025). Identifikasi Variabel Penelitian, Jenis Sumber Data dalam Penelitian Pendidikan. *Dinamika Pembelajaran : Jurnal Pendidikan Dan Bahasa*, 2(2), 256–270. <https://doi.org/10.62383/dilan.v2i2.1563>

- Primadi, A., & Salsabila Putri, L. (2025a). *Evaluasi Manajemen Logistik dan Pemanfaatan Sistem Informasi Logistik dalam Meningkatkan Kualitas Distribusi Barang terhadap Kepuasan Pelanggan*. <https://doi.org/10.38035/jmpd.v3i3>
- Primadi, A., & Salsabila Putri, L. (2025b). *Evaluasi Manajemen Logistik dan Pemanfaatan Sistem Informasi Logistik dalam Meningkatkan Kualitas Distribusi Barang terhadap Kepuasan Pelanggan*. <https://doi.org/10.38035/jmpd.v3i3>
- Purbasari, R., Jamil, N., Novel, A., & Kostini, N. (2023). Digitalisasi Logistik Dalam Mendukung Kinerja E-Logistic Di Era Digital: A Literature Review Logistic Digitalization in Support of E-Logistics Performance in the Digital Era: A Literature Review. In *Management, Business and Logistics (JOMBLO)* (Vol. 01, Number 02).
- Rahmah, H. A., Anggraini, A., Nilasari, Y. P., & Salsabilla, E. P. (2025). Analisis Efektivitas Program Makan Bergizi Gratis Di Sekolah Dasar Indonesia Tahun 2025. *Integrative Perspectives of Social and Science Journal*, 2(2), 2855–2866.
- Rave, A., & Fontaine, P. (2025). The location routing problem with time windows and load-dependent travel times for cargo bikes. *European Journal of Operational Research*, 323(1), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.11.040>
- Ridwan, M., & Rizal Gaffar, M. (2022). Efisiensi Persediaan dan Distribusi Melalui Integrasi Supply Chain Management. In *Applied Business and Administration Journal* (Vol. 1).
- Safira, Maulana, A., Ghufro, M., Zulfikar, H., & Prama, B. A. (2023). *Tantangan dan Peluang Implementasi Jaringan Logistik Berkelanjutan: Menuju Efisiensi dan Lingkungan Yang Ramah*.
- Saputra, N. Q., & Sukmono, T. (2024). *Analisa Optimalisasi Rute Distribusi Untuk Mengefisiensikan Logistik Menggunakan Algoritma Genetika*. XXV(1), 67–78. <https://doi.org/10.350587/Matrik>
- Saragih, N. I., & Turnip, P. (2022). Design of Vehicle Routes for Rice Distribution System in Bandung Using Simulated Annealing Algorithm. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 11(2), 211–220. <https://doi.org/10.26593/jrsi.v11i2.5842.211-220>
- SEMNASTI, D. H. (2025). Perencanaan Supply Chain Management Pada Seneca Coffe Studio. *WALUYO JATMIKO PROCEEDING*, 1–7. <https://doi.org/10.33005/wj.v17i1.107>
- Simanjuntak, Y. M., Adriel Silalahi, F., Gilang Maulana, R., Amar, S., Novianti, T., Raya Telang, J., Telang Indah, P., Kamal, K., Bangkalan, K., & Timur, J. (2025). *OPTIMALISASI PENENTUAN RUTE DISTRIBUSI BERAS NASI UDUK MENGGUNAKAN METODE SIMULATED ANNEALING*. <https://doi.org/10.36499/psnst.v15i1.14822>
- Simanjuntak, Y. M. L., Ummiyatun1, Febri Adriel Silalahi, Rayhan Gilang Maulana, Samsul Amar, & Trisita Novianti1. (2025). Optimalisasi Penentuan Rute Distribusi Beras Nasi Uduk Menggunakan Metode Simulated Annealing. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 15(1), 264–270. <https://doi.org/10.36499/psnst.v15i1.14822>
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. In *Operations Research* (Vol. 35, Number 2).
- Sumiati, Aryanny, E., Rahmawati, N., Novasani, R. J., Rahadian, Y. R., & Cahyono, J. A. (2025). Optimal distribution route for cooking oil delivery using the simulated annealing method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1454(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1454/1/012054>
- Suryani, N., Jailani, Ms., Suriani, N., Raden Mattaher Jambi, R., & Sulthan Thaha Saifuddin Jambi, U. (2023). *Konsep Populasi dan Sampling Serta Pemilihan Partisipan Ditinjau Dari Penelitian Ilmiah Pendidikan*. <http://ejournal.yayasanpendidikandzurriyatulquran.id/index.php/ihsan>

- TomTom. (2025). *TomTom Traffic Index: Indonesia*.
- Wang, D. L., Ding, A., Chen, G. L., & Zhang, L. (2023). A combined genetic algorithm and A* search algorithm for the electric vehicle routing problem with time windows. *Advances in Production Engineering And Management*, 18(4), 403–416. <https://doi.org/10.14743/apem2023.4.481>
- Wang, S., Sun, W., & Huang, M. (2024). An adaptive large neighborhood search for the multi-depot dynamic vehicle routing problem with time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110122>
- Wijayati, D., Krisnha, R., & Dewi, S. (2024). *Optimasi Fungsi Nonlinier Menggunakan Algoritma Spiral Dinamik*. 12.
- Windu Arini, R., Herdianto, B., Harist Refian Anwar, M., Yanyan Ramdhani, A., Khanza, S., Anna Tul Munikhah, I., Panjaitan No, J. DI, Kidul, P., Purwokerto Sel, K., Banyumas, K., & Tengah, J. (2023). *Perancangan Eksperimen Untuk Menemukan Parameter Terbaik Algoritma Simulated Annealing: Studi Kasus Vehicle Routing Problem* (Vol. 18, Number 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.33005/tekmapro.v18i1.340>
- Wright, M. (2010). *Automating Parameter Choice For Simulated Annealing*. <http://www.lums.lancs.ac.uk/publications/LUMShomepage:http://www.lums.lancs.ac.uk/>
- Wulandari, L., & Sawir, M. (2025). Dampak Jangka Panjang Program Makan Bergizi Gratis Terhadap Kesehatan dan Keberlanjutan Pendidikan. *Indonesian Journal of Intellectual Publication*, 5(2), 130–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.51577/ijipublication.v5i2.660>
- Xin, L., Xu, P., & Manyi, G. (2022). Logistics Distribution Route Optimization Based on Genetic Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8468438>
- Yobioktabera, A., Nur, A., Thohari, A., Aji, N. B., Informatika, T., Elektro, J. T., Semarang, P. N., & Komputer, T. R. (2025). Model Optimasi Segmentasi Tumor Otak Dalam Magnetic Resonance Imaging Berbasis Fuzzy C-Means dan Simulated Annealing. In *ORBITH* (Vol. 21, Number 2). <https://doi.org/https://doi.org/10.32497/orbith.v21i2.6708>
- Yu, V. F., Aloina, G., Susanto, H., Effendi, M. K., & Lin, S. W. (2022). Regional Location Routing Problem for Waste Collection Using Hybrid Genetic Algorithm-Simulated Annealing. *Mathematics*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/math10122131>
- Zhao, H., & Sharma, A. (2023). Logistics Distribution Route Optimization Based on Improved Particle Swarm Optimization. *Informatika (Slovenia)*, 47(2), 243–252. <https://doi.org/10.31449/inf.v47i2.4011>
- Zildan Ali Firmansyah, M., Romadhona, S., Mukhlisin, R. A., Aditya Purwanto, P., Amar, S., Novianti, T., Raya Telang, J., Telang Indah, P., Kamal, K., Bangkalan, K., & Timur, J. (2026). Optimasi Rute Distribusi Multi-depot Vehicle Routing Problem Dengan Perbandingan Algoritma Genetika dan Simulated Annealing. In *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika* (Vol. 10, Number 1).

LAMPIRAN

A - Titik Koordinat (x) dan (y)

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Kode	Nama_Lokasi	Tipe	Demand_Porsi	Latitude	Longitude	East (X)	Noi
1	SPPG_01	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	Depot	0	-7,6739892	110,4157864	435568,943	91
2	SPPG_02	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 2 (Mr. Blangkon 1)	Depot	0	-7,6803807	110,4155768	435546,789	91
3	SPPG_03	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	Depot	0	-7,6722054	110,4146363	435441,829	91
4	SPPG_04	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 4 (Yayasan Nimara)	Depot	0	-7,6734432	110,4173392	435740,12	91
5	SPPG_05	SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	Depot	0	-7,6876422	110,4509506	439449,143	91
6	SPPG_06	SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2 (Pondok Suruh)	Depot	0	-7,6877472	110,4531189	439688,292	91
7	SPPG_07	SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTANI 1 (Mr. Blangkon 2)	Depot	0	-7,6803304	110,4156195	435551,491	91
8	SPPG_08	SPPG NGAGLIK 02 (Yayasan Mataram Bersama Indonesia)	Depot	0	-7,6803303	110,4078946	434699,52	91
9	CUST_001	KB Bintang Mulia	Customer	24	-7,6840645	110,2638155	418809,666	91
10	CUST_002	KB Among Siwi	Customer	35	-7,6653308	110,4151485	435497,285	91
11	CUST_003	SPS Puspita VIII	Customer	22	-7,6788867	110,4053856	434422,583	91
12	CUST_004	SPS Tunas Bangsa	Customer	83	-7,6843219	110,2676166	419228,943	91
13	CUST_005	TK Harjobinangun	Customer	32	-7,6690853	110,4087592	434793,162	91
14	CUST_006	TK Bina Kasih	Customer	36	-7,6703447	110,4154492	435531,205	91
15	CUST_007	SD N Pakem 2	Customer	155	-7,6701941	110,4083364	434746,7	91
16	CUST_008	SD N Pakem 4	Customer	181	-7,6664798	110,4143298	435407,161	91
17	CUST_009	SD N Pakem 3	Customer	367	-7,6684453	110,4153315	435517,037	91

B - Perhitungan Matriks Jarak

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
		SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 2 (Mr. Blangkon 1)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 4 (Yayasan Nimara)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2 (Pondok Suruh)	SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTANI 1 (Mr. Blangkon 2)	SPPG NGAGLIK 02 (Yayasan Mataram Bersama Indonesia)	KB Bintang Mulia	KB Among Siwi	SPS Puspita VIII	SPS Tunas Bangsa	TK Harjobinangun
1	PLAK UMBULMARTANI 1	0,00000000	0,706994188	0,234480605	0,181585904	4,161588565	4,389309066	0,701297183	1,117602148	16,797984723	0,959815602	1,268469212	16,381652099	0,945
2	HEMLAK UMBULMARTANI 1	0,706994188	0,00000000	0,909757971	0,791226072	3,983037777	4,219766319	0,007286995	0,847280472	16,742724530	1,664520305	1,136051174	16,324350889	1,457
3	PLAK UMBULMARTANI 3	0,234480605	0,909757971	0,00000000	0,328014320	4,353510289	4,578811931	0,904786220	1,166068771	16,685793954	0,762121315	1,25982570	16,270202154	0,734
4	EMPLAK UMBULMARTANI 1	0,181585904	0,791226072	0,328014320	0,00000000	4,025630124	4,251165568	0,784885433	1,290257366	16,972948852	0,928845844	1,449226841	16,56782543	1,061
5	PLAK BIMOMARTANI 1	4,161588565	3,983037777	4,353510289	4,025630124	0,00000000	0,239415913	3,979551001	4,818865664	20,642696740	3,979551001	5,117648693	20,223054528	5,085
6	NGEMPLAK BIMOMARTANI 1	4,389309066	4,219766319	4,578811931	4,251165568	0,239415913	0,00000000	4,216223536	5,054893995	20,832099247	4,866969318	5,354770776	20,462108089	5,369
7	EMPLAK WEDOMARTANI 1	0,701297183	0,007286995	0,904786220	0,791226072	3,979551001	0,00000000	0,851971787	16,742724530	16,972948852	0,928845844	1,449226841	16,56782543	1,455
8	IK 02 (Yayasan Mataram Bers)	1,117602148	0,959815602	0,762121315	1,268469212	1,449226841	0,00000000	0,851971787	0,00000000	15,895874831	1,841182877	0,31943010	15,47759878	1,246
9	KB Bintang Mulia	16,797984723	16,742724530	16,685793954	16,972948852	20,642696740	20,832099247	16,742724530	15,895874831	0,00000000	16,818839736	15,624314598	0,430193658	16,071
10	KB Among Siwi	0,959815602	1,664520305	0,762121315	0,928845844	4,655724441	4,866096358	1,659102742	1,841182877	16,818839736	0,00000000	1,845389231	16,406486396	0,817
11	SPS Puspita VIII	1,268469212	1,136051174	1,25982570	1,449226841	5,117648693	5,354770776	1,139919122	0,31943010	15,624314598	1,845389231	0,00000000	15,206465707	1,815
12	SPS Tunas Bangsa	16,381652099	16,324350889	16,270202154	16,56782543	20,223054528	20,462108089	16,329209062	15,47759878	0,420193658	16,406486396	15,206465707	0,00000000	15,657
13	TK Harjobinangun	0,945841229	1,457870066	0,734263386	1,061887423	5,085441165	5,309634063	1,453352763	1,246850362	16,073627678	0,817852966	1,145700568	15,67713911	0,900
14	TK Bina Kasih	0,40401662	1,109624439	0,224398954	0,409997366	4,578409675	4,578409675	1,104134371	1,383097687	16,79259859	0,555059493	1,457399881	16,37717365	0,750
15	SD N Pakem 2	0,922593136	1,280568693	0,728537789	1,055966138	5,080319107	5,306580424	1,378774928	1,212473685	16,013022038	0,923888017	1,014626422	15,98538906	0,131
16	SD N Pakem 4	0,845606395	1,542963692	0,633898709	0,838345196	4,607593625	4,881576175	1,537853779	1,68773996	16,7139618	0,155851571	1,689539821	16,30105715	0,628
17	SD N Perumahan 3	0,814957927	1,319801403	0,422710968	0,59262645	4,465040445	4,68209884	1,31434737	1,548946062	16,79993234	0,349491828	1,592424264	16,38599198	0,728
18	SMP N 3 Pakem	0,888774596	1,432607355	0,669730169	0,995402499	5,01452841	5,237846028	1,429885834	1,276228345	16,19885544	0,733557425	1,195120495	15,7459905	0,088
19	SMP Kanisius Pakem	0,746945518	1,44153074	0,531967319	0,749083092	4,624608103	4,840737673	1,436486638	1,591204727	16,69353591	0,250236314	1,601849355	16,28016176	0,633
20	MTS Yapi Pakem	1,032530939	1,373109637	0,833943173	1,000573775	4,700052768	4,969023678	1,731704574	1,90391071	16,82137235	0,077225746	1,90094969	16,4093164	0,851
21	SMA N 2 Ngaglik	3,876281921	3,281367043	4,109967253	3,853714705	2,817322606	2,989596475	3,283347438	3,824538213	18,71695033	4,770856032	4,133291175	18,29734683	4,737

C - Parameter SA

```

N_KMEANS = 8
MIN_ACTIVE_DEPOTS = 8
MAX_ACTIVE_DEPOTS = 8

DEPOT_PENALTY_KM = 0.0
CAP_VEH = 1015
CAP_DEPOT = 2500

BALANCE_PENALTY = 0.0 # objektif murni total jarak
SPEED = 24.1
VEHICLES = ["K1", "K2"]
TARGET_EXISTING_KM = 735.46 # 2 x 367,73 km dari tabel rute awal (delivery + pickup)
RANDOM_SEED = 42

SA_ITER = 1000
SA_T0 = 120.0
SA_ALPHA = 0.997
SA_REHEAT EVERY = 350
SA_REHEAT_FACTOR = 1.35

```

D - Pembangkitan Kandidat K-Means

```

def generate_kmeans_candidates(nodes: Dict[str, Node], n_clusters=N_KMEANS, seed=RANDOM_SEED) -> Dict[str, Node]:
    """Membangkitkan kandidat lokasi SPPG menggunakan Weighted K-Means.

    Output fungsi ini bukan solusi akhir lokasi, melainkan daftar centroid
    sebagai kandidat lokasi yang selanjutnya dievaluasi oleh SA. Metadata
    K-Means disimpan ke variabel global KMEANS_OUTPUT agar bisa diekspor ke
    Excel pada sheet Parameter_KMeans, Hasil_KMeans, dan Cluster_Anggota.
    """
    global KMEANS_OUTPUT
    vals = list(nodes.values())
    X = np.array([[n.x, n.y] for n in vals])
    w = np.array([max(1, n.demand) for n in vals])
    km = KMeans(n_clusters=n_clusters, random_state=seed, n_init=50).fit(X, sample_weight=w)
    depots = {}

    for i, c in enumerate(km.cluster_centers_):
        near = min(vals, key=lambda n: math.hypot(n.x-c[0], n.y-c[1]))
        uid = f"KMEANS_{i+1:02d}"
        depots[uid] = Depot(uid, f"K-Means Candidate {i+1}", float(c[0]), float(c[1]), near.lat, near.lng)

    # Ringkasan anggota cluster berdasarkan label asli K-Means.
    member_rows = []
    cluster_demand = {i: 0 for i in range(n_clusters)}
    cluster_count = {i: 0 for i in range(n_clusters)}
    for idx, n in enumerate(vals):
        lab = int(km.labels_[idx])
        cluster_count[lab] += 1

```

E - Pseudocode SA

```
def optimize_sa(depots, nodes, verbose=True):
    """SA dengan revisi terbatas: kapasitas 2.500 dan pemilihan 8 dari 16 lokasi.

    Struktur routing, multi-trip, time window, dan evaluasi tetap menggunakan
    kode awal. Perubahan utama hanya:
    1) solusi awal berasal dari rute eksisting pengguna;
    2) SA boleh menukar lokasi eksisting dengan kandidat K-Means;
    3) objective setelah feasible adalah murni total jarak delivery + pickup.
    """
    t0 = time.time()
    existing_ids = sorted([d for d, objd in depots.items() if objd.source == "AWALAN"])
    active0 = set(existing_ids)
    if len(active0) != 8:
        raise RuntimeError(f"Jumlah lokasi eksisting harus tepat 8, diperoleh {len(active0)}.")

    initial_assign = build_initial_assignment_from_routes(nodes, existing_ids)
    route_assign = repair_capacity(initial_assign, depots, nodes, active0)
    candidates0 = [{"active": active0, "assign": route_assign}]
    try:
        milp_assign = solve_assignment_milp(depots, nodes, active0)
        milp_assign = repair_capacity(milp_assign, depots, nodes, active0)
        candidates0.append({"active": active0, "assign": milp_assign})
    except Exception as exc:
        if verbose:
            print("Peringatan assignment awal MILP:", exc)
```