

**OPTIMASI *LOCATION ROUTING PROBLEM* DISTRIBUSI MAKAN
BERGIZI GRATIS DI NGEMPLAK MENGGUNAKAN ALNS DENGAN
TIME WINDOWS UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI**

TUGAS AKHIR

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



Nama : Rangga Pamungkas Putradharma
No. Mahasiswa : 22522284

**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, 3 Juni 2026



Rangga Pamungkas Putradharma
22522284

SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Gedung KH. Wasi Munzir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14.5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 886444 ext.4110, 4100
F. (0274) 899007
E. W.Lab@uii.ac.id
W. W.Lab.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 275/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/V/2026

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Rangga Pamungkas Putradharma

Nim : 22522284

Jurusan : Teknik Industri

Dosen Pembimbing : Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul **"OPTIMASI LOCATION ROUTING PROBLEM DISTRIBUSI MAKAN BERGIZI GRATIS DI NGEMPLAK MENGGUNAKAN ALNS DENGAN TIME WINDOWS UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI"**. Mulai 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, 07 Mei 2026

Kepala Laboratorium

Sistem Manufaktur Terintegrasi

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

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING
OPTIMASI *LOCATION ROUTING PROBLEM* DISTRIBUSI MAKAN
BERGIZI GRATIS DI NGEMPLAK MENGGUNAKAN ALNS DENGAN
***TIME WINDOWS* UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI**



TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Rangga Pamungkas Putradharma

No. Mahasiswa: 22522284

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
OPTIMASI LOCATION ROUTING PROBLEM DISTRIBUSI MAKAN BERGIZI
GRATIS DI NGEMPLAK MENGGUNAKAN ALNS DENGAN TIME WINDOWS
UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Rangga Pamungkas Putradharma
No. Mahasiswa: 22522284

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, 3 Juni 2026

Tim Penguji

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

Ketua

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

Anggota I

Dr. Sri Indrawati, S.T., M.Eng.

Anggota II

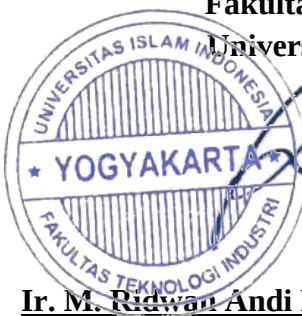
Visaph

Zelania

Dr. Sri

Mengetahui,

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



[Signature]

Ir. M. Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.

NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin. Puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas izin dan rahmat-Nya, Tugas Akhir ini dapat terselesaikan sebagai sebuah tonggak sejarah yang menandai akhir dari perjalanan akademik sekaligus awal dari pengabdian profesional saya sebagai sarjana Teknik Industri Universitas Islam Indonesia. Karya ini merupakan manifestasi dari keteguhan hati dan dedikasi yang tulus, yang saya persembahkan pertama-tama untuk diri saya sendiri sebagai bentuk apresiasi atas resiliensi, kesabaran, serta kerja keras dalam melampaui setiap hambatan hingga mampu mencapai hasil yang maksimal. Persembahan paling utama juga saya haturkan kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Wendarwoto Budi Tias Sungkowo dan Ibu Irma Kurnia Hapsari, yang sepanjang hayat senantiasa menjadi pilar kekuatan melalui kasih sayang yang tak terbatas dan doa-doa tulus yang dilangitkan demi keselamatan serta keberhasilan langkah saya. Semoga karya yang sederhana ini tidak hanya menjadi simbol kelulusan, tetapi juga menjadi sumber kebanggaan yang bermakna bagi keluarga, serta menjadi bekal bagi saya untuk terus bertumbuh sebagai pembelajar sepanjang hayat yang mampu memberikan kemaslahatan di masa depan.

MOTTO

“Maha Suci Allah yang tidak memberi jalan bagi hamba-Nya untuk mengenal-Nya kecuali melalui ketidakmampuan mereka untuk mengenal-Nya”

(Abu Bakar Ash-Shiddiq r.a)

“Jika engkau melakukan sesuatu karena Allah, maka janganlah engkau merasa sedih karena ketidaktahuan manusia akan usahamu. Karena Allah tidak pernah lalai mencatat apa yang tidak dilihat oleh mata manusia”

(Ibnu Qayyim Al-Jauziyyah)

“I am the master of my fate, I am the captain of my soul”

(William Ernest Henley)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada uswah hasanah kita, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya hingga akhir zaman. Atas pertolongan-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

“Optimasi *Location Routing Problem* Distribusi Makan Bergizi Gratis Di Ngemplak Menggunakan Alns Dengan *Time Windows* Untuk Peningkatan Efisiensi”

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat akademis dalam menyelesaikan studi Strata-1 pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Dalam proses penyelesaiannya, penulis menyadari bahwa keberhasilan ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU, ASEAN.Eng., 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, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Universitas Islam Indonesia.
4. Ibu Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah dengan sabar meluangkan waktu, memberikan arahan intelektual, motivasi, serta bimbingan yang sangat berharga bagi kesempurnaan penelitian ini.
5. Bapak Wahyu Kurniawan, S.T., M.T., CISCIP, yang telah memberikan bimbingan teknis serta menyediakan wadah bagi penulis untuk melaksanakan penelitian ini dengan optimal.
6. Kedua orang tua tercinta, Bapak Wendarwoto Budi Tias Sungkowo dan Ibu Irma Kurnia Hapsari. Terima kasih atas cinta kasih yang tak terhingga, dukungan moril maupun materiil, serta untaian doa yang tidak pernah putus sebagai kekuatan utama penulis dalam menyelesaikan studi.
7. Saudara kandung penulis dan keponakan tercinta, Nara, atas dukungan, bantuan, dan semangat yang senantiasa diberikan selama proses perjuangan ini.
8. Rekan-rekan Asisten Laboratorium *Enterprise Resource Planning* kabinet NARAYA dan ASKARA, sebagai keluarga seperjuangan yang telah saling menguatkan dan tumbuh bersama dalam lingkungan yang suportif.
9. Dedikasi penuh dan rasa terima kasih kepada Keluarga Besar DPKA UII. Terima kasih telah menjadi rumah kedua yang penuh kehangatan, mendampingi proses tumbuh saya secara profesional melalui berbagai aktivitas, serta memberikan bekal pengalaman yang amat berharga untuk masa depan.

10. Kelancaran dalam proses penelitian dan pencarian solusi pada Tugas Akhir ini tidak lepas dari kebaikan, keterbukaan, serta izin yang telah diberikan oleh Mas Nico serta segenap Pengurus SPPG Kecamatan Ngemplak.
11. Apresiasi tulus saya berikan kepada seluruh Dosen, Tendik, dan Student Staff UII Periode 2023-2026. Terima kasih atas lingkungan yang kondusif, kepercayaan dalam berkoordinasi, serta keceriaan di setiap momen yang menjadi titik awal penting bagi perjalanan saya selanjutnya.
12. Untuk teman-teman "Laa Haula Wa La Quwwata", "Itikaf ga", Aqila Yofinda, serta Alisha Nara. Terima kasih atas doa, dukungan tulus, dan keceriaan yang selalu hadir di setiap prosesnya. Kehadiran serta dinamika pertemanan yang penuh canda tawa telah memberikan warna tersendiri dan meringankan langkah saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
13. Mas Moch. Adib Heramunida, atas bimbingan sebagai kakak tingkat yang telah memberikan motivasi, arahan, serta berbagi pengalaman berharga sejak awal pengerjaan skripsi ini.
14. Segenap keluarga besar Teknik Industri Angkatan 2022, atas kebersamaan dan motivasi yang telah diberikan selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan manfaat luas bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan masyarakat.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 25 Mei 2026



Rangga Pamungkas Putradharma
22522284

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada optimasi jaringan distribusi Program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak untuk mengatasi permasalahan penentuan lokasi dapur dan rute distribusi yang sebelumnya masih dilakukan secara manual. Permasalahan diformulasikan sebagai *Multi-Trip Location-Routing Problem with Time Windows* (MTLRP-TW) guna mengintegrasikan keputusan lokasi fasilitas dan penentuan rute distribusi secara simultan. Penelitian menerapkan metode *Center of Gravity* (COG) untuk mengidentifikasi kandidat lokasi fasilitas yang lebih representatif terhadap sebaran permintaan serta algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) untuk optimasi rute distribusi. Hasil pemodelan menunjukkan rekomendasi relokasi dua unit dapur, yaitu Dapur 1 dan Dapur 8, serta realokasi 53 sekolah penerima manfaat guna menyeimbangkan beban operasional. Melalui mekanisme *destroy* dan *repair* yang adaptif, solusi ALNS berhasil menurunkan total jarak operasional harian sebesar 27,60%, dari 1,051.71 km menjadi 760.717 km. Secara manajerial, hasil penelitian menunjukkan potensi peningkatan efisiensi biaya distribusi dan kepatuhan terhadap *dual time windows*. Namun, hasil relokasi fasilitas diposisikan sebagai rekomendasi berbasis model optimasi yang masih memerlukan evaluasi kelayakan implementatif lebih lanjut.

Kata Kunci: Optimasi, *Adaptive Large Neighborhood Search*, *Location Routing Problem*, Makan Bergizi Gratis.

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.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Landasan Teori	9
2.1.1 <i>Supply Chain Management</i>	9
2.1.2 Logistik.....	11
2.1.3 <i>Adaptive Large Search Neighborhood</i>	11
2.1.4 <i>Location Routing Problem</i>	16
2.1.5 Transportasi	17
2.1.6 Distribusi	19
2.1.7 <i>Circuitry Factor</i>	20
2.1.8 Analisis Sensitivitas.....	21
2.1.9 <i>Center of Gravity</i>	22
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Objek Penelitian	25
3.2 Instrumen Penelitian.....	25
3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder	26
3.4 Metode Pengumpulan Data	26
3.5 Populasi dan Sampel	27
3.5.1 Populasi	27
3.5.2 Sampel	27
3.6 Persamaan Model Matematika	28
3.6.1 Struktur LRP Sebagai Dasar Pembangunan Model.....	28
3.6.1 Nilai <i>Circuitry Factor</i>	30
3.6.2 Waktu Pelayanan	30
3.7 Alur Penelitian.....	31
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	36
4.1 Pengumpulan Data	36
4.1.1 Profil Program	36

4.1.2	Formulasi Masalah	36
4.1.3	Data Penelitian.....	37
4.2	Pengolahan Data.....	40
4.2.1	Rute Dapur.....	40
4.2.2	Matriks Jarak	42
4.2.3	Estimasi <i>Network Distance</i> Berbasis <i>Circuitry Factor</i>	44
4.2.4	Waktu Tempuh	44
4.2.5	Penentuan Titik Kandidat Dapur dengan Center of Gravity	44
4.2.6	Proses Algoritma Adaptive Large Neighborhood Search	46
4.2.7	Hasil Rute Terbaik.....	59
4.2.8	Analisis Sensitivitas.....	62
BAB V	PEMBAHASAN	66
5.1	Analisis Hasil Usulan	66
5.1.1	Perbandingan Efisiensi Rute Jarak	66
5.1.2	Analisis Pemilihan Lokasi Fasilitas.....	69
5.1.3	Hasil Analisis Sensitivitas	73
5.1.4	Hasil Analisis Kelayakan Finansial	73
5.2	Analisis Hasil Algoritma.....	77
5.2.1	Perbandingan Iterasi	77
5.2.2	Operator ALNS.....	80
BAB VI	PENUTUP	81
6.1	Kesimpulan.....	81
6.2	Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA		84
LAMPIRAN		A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Posisi Penelitian	8
Tabel 2.2 Jenis-jenis operator destroy	13
Tabel 2.3 Jenis-jenis operator <i>repair</i>	15
Tabel 3.1 <i>Time Windows</i>	29
Tabel 4.1 Titik Koordinat UTM	38
Tabel 4.2 Tipe <i>Time Windows</i>	39
Tabel 4.3 <i>Time Windows</i> dan <i>Demand</i>	39
Tabel 4.4 Data Pendukung	40
Tabel 4.5 Rute Awal	40
Tabel 4.6 Matriks Jarak (m)	43
Tabel 4.7 Titik Koordinat Kandidat Dapur	45
Tabel 4.8 <i>Pseudocode</i> Inisialisasi Data	47
Tabel 4.9 <i>Pseudocode</i> Penentuan Parameter	48
Tabel 4.10 <i>Pseudocode</i> Total Jarak, Kapasitas, dan Waktu	49
Tabel 4.11 <i>Pseudocode Feasibility Check</i>	50
Tabel 4.12 <i>Pseudocode</i> Solusi Awal dengan NN	51
Tabel 4.13 <i>Pseudocode</i> Operator <i>Destroy & Repair</i>	52
Tabel 4.14 Tabel Rute Usulan	60
Tabel 4. 15 Konversi Rute Awal	61
Tabel 4. 16 Konversi Rute Final (ALNS)	62
Tabel 4. 17 Kategori Uji Sensitivitas	62
Tabel 4. 18 Sensitivitas Permintaan	63
Tabel 4. 19 Sensitivitas Harga BBM	63
Tabel 4. 20 Sensitivitas Kapasitas Kendaraan	64
Tabel 4. 21 Sensitivitas Biaya – <i>Total Cost Ownership</i> Harian	65
Tabel 5.1 Perbandingan Rute	67
Tabel 5.2 Hasil Optimasi Lokasi Fasilitas SPPG dan Beban Permintaan	70
Tabel 5.3 Realokasi Penerima Manfaat	71
Tabel 5. 4 Estimasi Komponen CAPEX Pembangunan Satu Unit SPPG	74
Tabel 5. 5 Proyeksi Penghematan OPEX Tahunan dan Akumulasi 5 Tahun	75
Tabel 5. 6 Amortisasi dengan Skenario <i>baseline</i> dan CAPEX Rendah	75
Tabel 5. 7 Matriks <i>Payback Period</i> dan ROI 5 Tahun	76
Tabel 5.8 Perbandingan Iterasi	77
Tabel 5.9 Bobot Akhir Operator ALNS	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>General SCM Process (Taj et al., 2023)</i>	10
Gambar 2.2 <i>General framework of the ALNS (Duan et al., 2023)</i>	12
Gambar 2.3 <i>Pseudocode of the simulated annealing in ALNS</i>	15
Gambar 2. 4 <i>Splitting Procedure</i>	17
Gambar 3.1 Alur Penelitian.....	31
Gambar 4.1 Solusi Representatif.....	46
Gambar 4.2 <i>Pseudocode</i> Pembaruan Bobot Adaptif.....	56
Gambar 4.3 <i>Pseudocode Acceptance Criteria</i>	57
Gambar 4.4 <i>Pseudocode Running ALNS</i>	59
Gambar 5.1 Rute Usulan	66
Gambar 5.2 Grafik Perbandingan Rute	69
Gambar 5. 3 Perbandingan Temperatur	79

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manajemen rantai pasok mencakup seluruh tahapan produk dari pemasok hingga konsumen. Tujuannya adalah merumuskan strategi distribusi yang optimal dari segi jumlah, lokasi, dan ketersediaan persediaan demi peningkatan efisiensi proses distribusi (Ridwan & Gaffar, 2022). Perencanaan jalur yang efisien dan pemilihan moda transportasi yang sesuai dapat menghemat waktu dan biaya, didukung oleh infrastruktur logistik yang solid untuk kelancaran distribusi dan pertumbuhan ekonomi (Ayuningtias et al., 2023). Mengoptimalkan sumber daya seperti bahan bakar, waktu, dan biaya adalah inti dari efisiensi transportasi dalam logistik (Madani & Sahara, 2023). Rantai pasok publik hanya efektif jika desain distribusinya tepat, karena keputusan lokasi fasilitas dan penentuan rute berdampak langsung pada biaya operasional, ketepatan layanan, dan pemerataan akses. Pada program Makan Bergizi Gratis (MBG), aspek distribusi menjadi sangat penting, makanan harus tiba tepat waktu dan dalam kondisi layak agar tujuan gizi tercapai. Dalam kajian optimasi jaringan, masalah lokasi dan rute tidak bisa dipisahkan secara semata, keputusan mengenai lokasi fasilitas mengubah pola rute, dan sebaliknya, sehingga diperlukan kerangka yang mengaitkan kedua aspek ini (Tadaros & Migdalas, 2022).

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) berfokus pada dukungan gizi ibu hamil dan anak. Tujuannya adalah meningkatkan kualitas SDM dan mengatasi masalah gizi di Indonesia. Dengan demikian, MBG tidak hanya meningkatkan status gizi, tetapi juga mendorong pemerataan pembangunan nasional melalui intervensi gizi yang berkelanjutan (Rayhan, 2025). Pelaksanaan program skala besar seperti MBG menghadapi kendala kesiapan infrastruktur, standarisasi distribusi, dan koordinasi yang kuat antar berbagai tingkatan pemerintahan, sekolah, serta produsen pangan lokal. Oleh karena itu, kajian mendalam mengenai implementasi MBG sangat krusial (Yuliana et al., 2025). MBG merupakan program strategis berskala besar dengan anggaran Rp71 triliun pada 2025, di mana setiap unit SPPG mengelola perputaran modal sekitar Rp500 juta per bulan dan diarahkan menuju sistem produksi yang lebih desentralistik untuk menjaga kualitas makanan. Namun, di lapangan masih muncul

persoalan keterlambatan distribusi, keterlambatan konsumsi, serta kasus makanan basi dan dugaan keracunan, sehingga menunjukkan bahwa keberhasilan MBG tidak cukup ditopang oleh besarnya anggaran, tetapi sangat bergantung pada efektivitas distribusi, ketepatan waktu, pengendalian mutu pangan, keamanan konsumsi, birokrasi yang efisien, dan efisiensi biaya agar program benar-benar memberi dampak positif bagi kesehatan dan kualitas pendidikan generasi muda Indonesia. Program MBG dirancang dengan tujuan besar dan berupaya mencapai dampak berskala luas dalam periode terbatas, sehingga memerlukan perencanaan cermat dan peningkatan kapabilitas kelembagaan di seluruh level (Suprpto et al., 2025). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas distribusi MBG memerlukan pendekatan optimasi yang mampu mengelola lokasi fasilitas, rute distribusi, dan ketepatan waktu pengiriman secara terintegrasi.

Location Routing Problem (LRP) merupakan permasalahan distribusi yang mengintegrasikan penentuan lokasi fasilitas, penjadwalan kendaraan, dan rute pengiriman untuk meminimalkan biaya operasional sistem (Song & Wu, 2023). Dalam konteks MBG, permasalahan ini menjadi krusial karena makanan yang didistribusikan bersifat *perishable*, sehingga ketepatan waktu pengiriman dan penjemputan wadah makanan perlu dijaga melalui skema *multi-trip* dan *time windows* yang sesuai. *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) relevan karena memasukkan kendala waktu pelayanan, namun karena termasuk masalah NP-hard, pendekatan eksak sering kurang praktis untuk kasus nyata berskala besar (Tordecilla et al., 2023). Oleh karena itu, ALNS dapat dipertimbangkan sebagai salah satu kandidat pendekatan metaheuristik yang menjanjikan karena memiliki fleksibilitas dalam menghadapi kombinasi kendala lokasi, rute, *multi-trip*, dan *time windows* (Himstedt & Meisel, 2025). Sejumlah studi juga menunjukkan potensinya, ALNS mampu mempercepat waktu komputasi hingga 99,95% dibanding metode eksak dengan *average differential gap* 0,11% (Khamsing et al., 2021), sedangkan Akpunar & Akpinar (2021) menunjukkan performa yang baik pada *Capacitated Location Routing Problem* berskala besar dibandingkan ALNS standar.

Dalam kondisi nyata, keterbatasan jumlah armada sering kali membuat asumsi rute tunggal pada model klasik menjadi tidak praktis, sehingga setiap kendaraan harus melakukan serangkaian rute atau 'perjalanan majemuk' agar kebutuhan distribusi tetap terpenuhi di tengah keterbatasan fasilitas (Mahdavi et al., 2022). Hal ini diperkuat oleh Moon et al. (2020) yang menyatakan bahwa karena mayoritas perjalanan distribusi dapat diselesaikan dalam waktu

singkat, relaksasi pada aturan satu perjalanan per hari sangat diperlukan untuk menghindari inefisiensi operasional dan menekan biaya pengemudi. Di Kecamatan Ngemplak, penentuan lokasi dapur dan penjadwalan rute masih bersifat manual dan cenderung berbasis kebiasaan pelaksana. Pola ini berpotensi membuat rute disusun secara acak, sehingga jarak tempuh menjadi kurang efisien, konsumsi bahan bakar meningkat, dan utilisasi kendaraan tidak maksimal, terlebih ketika armada yang digunakan relatif homogen sehingga fleksibilitas operasional menjadi terbatas. Kondisi tersebut semakin menantang karena wilayah ini melibatkan banyak dapur dan sangat banyak penerima manfaat, sementara distribusi harus dilakukan setiap hari dengan pengendalian biaya yang ketat. Kecamatan Ngemplak dipilih karena merepresentasikan persoalan distribusi MBG yang kompleks dan *case-based*, sehingga hasil pemodelannya diharapkan tetap relevan serta dapat diadaptasi pada wilayah lain dengan karakteristik serupa. Selain itu, makanan matang yang didistribusikan bersifat *perishable*, sehingga keterlambatan distribusi berisiko menurunkan kualitas, keamanan pangan, dan keberhasilan program secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan utama dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana optimalisasi lokasi dapur dan rute distribusi MBG di Kecamatan Ngemplak menggunakan algoritma ALNS?
2. Bagaimana pengaruh model usulan *Location-Routing Problem* terhadap efisiensi operasional Jaringan distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak?
3. Bagaimana efektivitas dan karakteristik perilaku teknis algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) dalam mengeksplorasi ruang solusi permasalahan pada penelitian ini?

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan model *Location Routing Problem* (LRP) untuk penentuan cakupan dapur MBG dan perencanaan rute distribusi.
2. Mengetahui peningkatan efisiensi distribusi MBG yang dihasilkan melalui implementasi algoritma ALNS, terutama dalam hal reduksi total jarak tempuh serta optimalisasi pemenuhan cakupan permintaan dibandingkan dengan kondisi operasional awal.

3. Mengevaluasi kinerja komputasi dan mekanisme algoritma ALNS berdasarkan parameter jumlah iterasi serta probabilitas pemilihan operator *destroy-repair*.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan:

1. Bagi Pemerintah dan Pengelola Program MBG

Penelitian ini diharapkan menjadi instrumen strategis bagi pemerintah dan pengelola dalam pengambilan keputusan operasional serta manajerial program MBG. Hasil analisis *Location Routing Problem* (LRP) menyediakan dasar saintifik untuk mengevaluasi urgensi dan menentukan lokasi pembangunan dapur MBG baru di masa depan guna meminimalkan total biaya logistik jangka panjang. Melalui implementasi rute hasil optimasi ALNS, program dapat menjamin efisiensi pemanfaatan sumber daya armada, pemerataan jangkauan layanan, serta kepatuhan terhadap batasan *time windows* untuk menjaga kualitas dan keamanan pangan nasional. Secara keseluruhan, penghematan biaya operasional dari reduksi jarak tempuh harian diharapkan dapat memberikan ruang fiskal yang lebih besar untuk dialokasikan pada peningkatan kualitas gizi makanan bagi para penerima manfaat.

2. Bagi Akademisi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah terkait penerapan *Location Routing Problem* pada konteks program pangan publik, serta menjadi referensi metodologis bagi penelitian lanjutan di bidang optimasi sistem logistik dan rantai pasok sosial.

1.5 Batasan Penelitian

Berikut merupakan batasan penelitian yang digunakan untuk membatasi ruang lingkup penelitian yang dilakukan:

1. Penelitian dilakukan pada wilayah Kecamatan Ngemplak dengan mempertimbangkan jumlah lokasi dapur MBG Per 19 Januari 2026 sebagai fasilitas distribusi.
2. Model hanya mempertimbangkan batasan kapasitas kendaraan dan *time windows* pengantaran dan pengambilan, tanpa memasukkan faktor lalu lintas dinamis.
3. Jenis kendaraan yang digunakan diasumsikan homogen dengan kapasitas tertentu.

4. Fungsi objektif penelitian berfokus pada minimasi jarak tempuh dan peningkatan keterpenuhan cakupan distribusi.
5. Permintaan distribusi dinyatakan dalam satuan porsi dan tidak mempertimbangkan dimensi fisik produk.
6. Waktu tempuh diasumsikan proporsional terhadap jarak dan tidak dipengaruhi kondisi kemacetan.
7. Proses optimasi dilakukan secara bertahap, dimulai dari realokasi dapur terlebih dahulu sebelum penentuan dan penyusunan rute distribusi.
8. Model yang dihasilkan memberikan rekomendasi optimasi yang dapat dijadikan acuan strategis dan diadaptasikan secara fleksibel untuk meningkatkan efisiensi pada kondisi operasional aktual.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini menyajikan hasil sintesis literatur yang disusun melalui dua pendekatan utama, yakni kajian induktif dan deduktif. Pendekatan induktif dilakukan dengan menganalisis berbagai artikel ilmiah dan publikasi relevan dari penelitian terdahulu guna memperoleh rujukan dalam menyempurnakan serta mengembangkan model penelitian saat ini. Sebaliknya, pendekatan deduktif berfungsi sebagai landasan teoretis yang bersumber dari literatur fundamental untuk memperkuat kerangka konseptual penelitian. Selain itu, bagian ini juga menguraikan posisi penelitian (*state of the art*) serta mengidentifikasi celah penelitian melalui perbandingan mendalam dengan studi-studi sebelumnya.

Pada level strategis, penelitian difokuskan pada pengembangan kerangka kerja jaringan rantai pasok yang menyeimbangkan efisiensi biaya, emisi, dan resiliensi. Lebih lanjut, Pasandideh et al. (2023) merumuskan *Location-Inventory-Routing Problem* (LIRP) untuk produk mudah rusak dengan menyeimbangkan biaya operasional sebesar 13.904 unit terhadap kerugian penurunan kualitas menggunakan hibrida *Genetic Algorithm* (GA) dan *Black Widow Optimization*. Di sektor logistik nasional, Saputra dan Sukmono (2024) serta Shuen dan Johar (2023) membuktikan bahwa metaheuristik mampu menekan biaya operasional secara masif, seperti penghematan bahan bakar mencapai Rp16.748.400 per bulan melalui rekayasa rute yang sistematis. Koordinasi antara waktu penyelesaian produk (*makespan*) dan keberangkatan rute menjadi faktor krusial dalam menjaga siklus hidup produk yang pendek. Hatim dan Ahmad (2022) menerapkan GA dengan aturan *dispatching SPT* untuk mereduksi *makespan* sebesar 20,24%, yang secara langsung meningkatkan kesiapan logistik hilir. Sinkronisasi temporal ini diperkuat oleh Qiu et al. (2023) yang menunjukkan bahwa *Memetic Algorithm* (MA) mampu memangkas waktu tunggu antara produksi dan distribusi hingga 11,21% lebih baik daripada algoritma standar, menyoroti pentingnya integrasi jadwal operasional yang ketat.

Penanganan barang yang mudah rusak (*perishable*) menuntut ketepatan jendela waktu (*time windows*) yang kaku untuk meminimalkan degradasi kualitas. Liu et al. (2024) menggunakan ALNS untuk menjaga kesegaran produk agrikultur, sementara Agrawal et al. (2022) membuktikan bahwa penggunaan GA pada model MINLP mampu memangkas waktu komputasi dari 28.800 detik menjadi di bawah 1 detik untuk menangani penalti keterlambatan.

Implementasi praktis pada produk medis seperti vaksin oleh Putra et al. (2024) menunjukkan penurunan jarak tempuh sebesar 18% melalui rute terklaster. Senada dengan itu, Putri et al. (2025) menyimpulkan bahwa penggabungan metode *clustering* dan perutean mampu menekan ongkos operasional hingga 17,33% pada distribusi produk es kristal. Secara teknis, ALNS terbukti tangguh namun memerlukan desain operator yang cerdas untuk menghindari konvergensi prematur. Muhammad et al. (2025) menemukan bahwa ALNS standar berisiko terjebak pada optimum lokal dibandingkan *Simulated Annealing* (SA) jika hanya mengandalkan *greedy repair*. Namun, Li et al. (2025) membuktikan bahwa modifikasi ALNS dengan strategi *Slack-aware Execution* (SES) mampu mengurangi penalti ketidaktepatan waktu hingga 89,44%. Peningkatan performa juga dicapai oleh Ma dan Yang (2025) melalui integrasi kriteria penerimaan SA ke dalam ALNS (IALNS-SA) yang berhasil memperbaiki 29 *best known solutions* pada data *benchmark*. Selain itu, Sadati (2025) dan Vincent et al. (2022) menegaskan bahwa heuristik berbasis pencarian lingkungan (*neighborhood search*) sangat vital untuk menyelesaikan masalah rute berskala besar dengan batasan waktu yang kaku. Berbeda dengan sebagian besar penelitian yang berfokus pada logistik komersial berbasis *third party logistics* (3PL), penelitian ini menerapkan model *first party logistics* (1PL) pada distribusi program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Ngemplak guna menjaga kontrol kualitas makanan secara langsung. Kebaruan penelitian terletak pada penyelesaian *Location Routing Problem* dengan skema kunjungan ganda dalam satu siklus rute, yaitu pengantaran makanan panas sekaligus pengambilan ompreng kosong menggunakan armada yang sama. Penelitian ini menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) karena dinilai lebih fleksibel dalam menangani kombinasi kendala lokasi, *time windows*, dan *multi-trip* secara adaptif. Dibandingkan GA yang lebih kompleks dalam pengaturan parameter serta SA yang terbatas pada satu mekanisme pencarian lingkungan, ALNS lebih efektif untuk permasalahan distribusi dinamis dengan kebutuhan ketepatan waktu dan efisiensi operasional yang tinggi.. Selain itu, ALNS memiliki mekanisme adaptif yang mampu menyesuaikan strategi pencarian berdasarkan umpan balik selama proses iterasi, sehingga dapat meminimalkan risiko terjebak pada optimum lokal dan meningkatkan kualitas solusi yang dihasilkan secara lebih efektif (X. Zhang et al., 2025).

Dalam konteks distribusi logistik perkotaan untuk komoditas *durable*, penelitian yang dilakukan oleh Yang et al. (2026) berfokus pada penyelesaian *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) guna meminimalkan total jarak tempuh kendaraan dengan batas kapasitas

tertentu. Penelitian tersebut mengusulkan algoritma *Clustered Simulated Annealing* (CSA), yaitu pendekatan hibrida yang mengombinasikan metode *Clustered Clarke–Wright Savings* berbasis K-Means untuk membentuk solusi awal, kemudian dioptimalkan menggunakan *Improved Simulated Annealing Hyper-Heuristic* (ISAHH) dan operator *Improved Tabu* (ITabuLLH). Berdasarkan pengujian pada benchmark Uchoa, algoritma CSA mampu menghasilkan peningkatan kualitas solusi lebih dari 20% dibandingkan sebelas algoritma pembanding lainnya. Dengan demikian, CSA terbukti efektif dalam mempercepat proses komputasi, meningkatkan kualitas rute distribusi berskala besar, serta mengurangi risiko algoritma terjebak pada optimum lokal.

Perbandingan distribusi antara industri layanan, manufaktur, dan barang cepat rusak (*perishable*) penting karena perbedaan karakteristik produk dan saluran distribusi yang signifikan. Layanan bersifat tak berwujud dan dikonsumsi bersamaan pada saat produksi, sehingga saluran distribusi layanan cenderung pendek dan langsung dengan penekanan pada aksesibilitas tempat dan waktu (Kaur & Prakash Singh, 2021). Berbeda dengan itu, industri manufaktur menghasilkan barang tahan lama yang umumnya disimpan dalam persediaan *multi-echelon*, dengan fokus pada efisiensi biaya dan cakupan pasar sehingga memerlukan jaringan distribusi berjenjang (Li et al., 2025). Sementara itu, barang *perishable* memiliki masa simpan terbatas dan sangat peka terhadap penurunan kualitas, sehingga memerlukan pengiriman cepat dan strategi pengelolaan persediaan fifo untuk meminimalkan kerusakan (B. Zhang & Mohammad, 2024). Perbedaan karakteristik ini tercermin pula pada indikator kinerja, misalnya, layanan mengukur kepuasan pelanggan dan waktu tanggap, manufaktur mengukur tingkat pemenuhan pesanan dan perputaran persediaan, sedangkan barang *perishable* mengukur tingkat pembusukan dan kesegaran produk. Membandingkan ketiga industri ini memungkinkan tinjauan pustaka yang komprehensif untuk mengidentifikasi sejauh mana strategi distribusi, pengelolaan persediaan, dan kebijakan logistik dapat diadaptasi atau harus disesuaikan berdasarkan sifat produk, sehingga memberikan wawasan yang lebih luas dalam penelitian lintas-sektor (Osman et al., 2023).

Tabel 2.1 Posisi Penelitian

Penulis	Obyek (Industri)				Metode		
	Jasa		Manufaktur		GA	ALNS	SA
	<i>Perishable</i>	<i>Durable</i>	<i>Perishable</i>	<i>Durable</i>			
(B. Li et al., 2025)				√		√	

Penulis	Obyek (Industri)				Metode		
	Jasa		Manufaktur		GA	ALNS	SA
	<i>Perishable</i>	<i>Durable</i>	<i>Perishable</i>	<i>Durable</i>			
(Shuen & Johar, 2023)	√						√
(Liu et al., 2024)			√			√	
(Pasandideh et al., 2023)			√				√
(Suanpang et al., 2022)		√			√		√
(Ma & Yang, 2025)		√				√	√
(Qiu et al., 2023)				√	√	√	
(Agrawal et al., 2022)			√		√		
(Muhammad et al., 2025a)		√				√	√
(Putra et al., 2024)			√		√		
(Saputra & Sukmono, 2024)		√			√		
(Putri et al., 2025)			√		√		
(Hatim & Ahmad, 2022)				√	√		
(Sadati, 2025)	√				√		√
(Vincent et al., 2022)	√	√					√
(C. Li et al., 2025)		√				√	
(Yang et al., 2026)		√					√
(Putradharma, 2026)			√			√	

2.1 Landasan Teori

Landasan teori berisikan tentang istilah, teori atau formula yang terkait dengan topik penelitian.

Landasan teori disusun dengan bersumber pada jurnal bereputasi dan/atau buku.

2.1.1 *Supply Chain Management*

Manajemen Rantai Pasok (*Supply Chain Management*) merupakan integrasi menyeluruh dari berbagai tahapan bisnis, mulai dari fase pengembangan produk dan pengadaan bahan baku

hingga proses distribusi ke tangan konsumen. Sistem ini menyelaraskan perencanaan, operasional, dan logistik untuk memastikan seluruh rangkaian produksi berjalan secara efektif dan efisien demi memenuhi ekspektasi pelanggan secara berkualitas (Yusuf & Soediantono, 2022).



Gambar 2.1 General SCM Process (Taj et al., 2023)

Pengelolaan rantai pasok yang efektif berfokus pada koordinasi tiga elemen krusial. Pertama adalah aliran material yang bergerak maju dari pemasok hingga ke tangan pengguna akhir. Kedua adalah aliran dana yang bergerak secara terbalik dari konsumen menuju pemasok sebagai bentuk transaksi. Terakhir adalah aliran informasi yang bersifat timbal balik, di mana transmisi data yang akurat dari kedua arah menjadi kunci keberhasilan operasional Perusahaan (Nevita et al., 2024). Risiko dalam manajemen rantai pasok muncul akibat adanya kerentanan (*vulnerability*) pada alur distribusi yang berpotensi memicu kerugian material maupun hambatan operasional. Fenomena ini dipengaruhi oleh dua variabel utama: faktor internal yang berada dalam kendali perusahaan (seperti manajemen SDM dan keandalan sistem informasi), serta faktor eksternal yang berada di luar kendali perusahaan (seperti anomali cuaca dan performa pemasok) (Nadhira et al., 2019). *Supply Chain Management* mencakup koordinasi menyeluruh dari setiap fase operasional, mulai dari analisis permintaan dan pengadaan bahan baku hingga layanan purna jual. Pengelolaan rantai pasok yang terintegrasi memungkinkan perusahaan untuk memaksimalkan efisiensi, menekan biaya, dan menjaga keberlanjutan bisnis demi kepuasan pelanggan yang optimal. Sebaliknya, ketiadaan sistem yang terorganisir berisiko memicu berbagai kendala serius, seperti kelangkaan material, ketidakpastian logistik, hingga keterlambatan produksi. Jika tidak dimitigasi, kegagalan sistemik ini akan berdampak buruk pada kredibilitas perusahaan serta kinerja bisnis secara keseluruhan di mata konsumen (Nisa et al., 2023).

2.1.2 Logistik

Logistik didefinisikan sebagai manajemen strategis terhadap pergerakan barang, jasa, serta informasi terkait dari titik awal hingga ke tangan konsumen. Proses ini mencakup perencanaan, implementasi, dan pengawasan aliran yang sistematis guna memastikan efektivitas operasional. Fokus utamanya terletak pada pemenuhan kebutuhan pelanggan melalui prinsip ketepatan, yaitu memastikan ketersediaan barang dalam kuantitas, waktu, lokasi, dan efisiensi biaya yang optimal (Pamungkas et al., 2023). Klasifikasi layanan logistik dibedakan menjadi beberapa kategori berdasarkan spesialisasi dan tujuan operasional dalam mengelola alur distribusi organisasi. Salah satu model dasar yang digunakan adalah 1PL (*First Party Logistics*), yaitu bentuk logistik mandiri di mana instansi mengelola seluruh aktivitas operasional secara internal, mulai dari kepemilikan armada transportasi hingga pengelolaan fasilitas produksi tanpa melibatkan pihak ketiga (Zai et al., 2022). Implementasi program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak dikategorikan ke dalam model 1PL karena seluruh operasional distribusi, mulai dari penyediaan unit armada hingga penentuan jadwal pengantaran, dilakukan sepenuhnya oleh pihak dapur sebagai pengelola utama. Penggunaan model 1PL dalam program ini bersifat strategis untuk menjamin kendali mutu produk yang bersifat *perishable* serta memastikan ketepatan waktu pengiriman dalam batasan *time windows* yang ketat melalui koordinasi internal yang lebih responsif.

2.1.3 Adaptive Large Search Neighborhood

Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) merupakan evolusi dari metode LNS konvensional yang dirancang untuk mengatasi kendala stagnasi pada solusi optimum lokal. Karakteristik utama yang membedakan ALNS adalah integrasi mekanisme pemilihan adaptif pada operator penghancur (*destroy*) dan perbaikan (*repair*). Melalui proses pencatatan performa secara berkala di setiap iterasi, algoritma ini mampu mengevaluasi kontribusi setiap operator terhadap kualitas solusi. Operator yang secara historis menunjukkan kinerja unggul akan diberikan probabilitas pemilihan yang lebih besar, sehingga meningkatkan peluang algoritma dalam mencapai solusi optimum global (Muhammad et al., 2025b). Algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) memberikan fleksibilitas dalam menerapkan berbagai operator penghancuran dan penyisipan secara bergantian untuk menghasilkan solusi dengan kualitas tinggi. Proses ALNS diawali dengan sebuah solusi awal yang layak, meskipun urutan kunjungan pelanggan belum optimal. Selanjutnya, algoritma ini bekerja dengan mengeluarkan sejumlah pelanggan dari solusi yang ada, kemudian menyisipkannya kembali ke posisi lain

guna membentuk solusi baru dalam lingkungan pencarian yang lebih luas. Pada setiap iterasi, pemilihan operator penghancuran dan penyisipan dilakukan secara adaptif berdasarkan kinerja historis masing-masing operator dalam menghasilkan solusi yang lebih baik (Kumar, 2023).

```

(1) Generate a  $S^{initial}$  and assign it to  $S^{best}$ ;
(2)  $S^{initial} = S^{current} = S^{best}$ ;
(3)  $n(pro)_i = 1$ ;
(4)  $T = T_0(R(S^{current}))$ ;
(5) while the maximum number of iterations is not reached, i.e.,  $n(pro)_i \leq n(pro)_{max}$  do
(6)   if  $n(pro)_i \equiv 0 \pmod{a}$  then
(7)      $SNC(S^{current}, k_{max})$  (Algorithm 2)  $\rightarrow S^{current}$ ;
(8)   end if
(9)   Choose destroy operator  $s \in \varepsilon^-$  (customer, travel, station) based on  $Weight_i^t$ ;
(10)  if travel is removed then
(11)    Select repair operator  $rep \in \varepsilon^+$  for the travel;
(12)    Update  $n(pro)_i$  for the route operator;
(13)  else if a station is removed then
(14)    Select repair operator  $rep \in \varepsilon^+$  for stations;
(15)    Update  $n(pro)_i$  for the station operator;
(16)  else if a customer is removed then
(17)    Select repair operator  $rep \in \varepsilon^+$  for customers;
(18)    Update  $n(pro)_i$  for the customer operator;
(19)  else if a recharging technology is removed then
(20)    Select repair operator  $rep \in \varepsilon^+$  for charge technologies;
(21)    Update  $n(pro)_i$  for the recharging technology operator;
(22)  end if
(23)  if the energy level shows that the solution is not possible then
(24)    Nearest CS Insertion operator;
(25)  end if
(26)  if  $R(S^{candidate}) \leq R(S^{current})$  then
(27)    Update  $S^{current}$ ;
(28)  else
(29)    Generate a number randomly  $ran \in [0,1]$ ;
(30)    if  $ran < e^{-(R(S^{candidate}) - R(S^{current}))/T}$  then
(31)      Update  $S^{current}$ ;
(32)      Update  $s(pro)_i$  and  $W_i^t$  for each operator;
(33)      Update  $Weight_i^t$  for each operator;
(34)    end if
(35)  end if
(36)  if  $R(S^{current}) < R(S^{best})$  then
(37)    Update  $S^{current}$ ;
(38)    Update  $S^{best}$ ;
(39)    Update  $s(pro)_i$  and  $W_i^t$  for each operator;
(40)    Update  $Weight_i^t$  for each operator;
(41)  else if  $R(S^{current})$  compared to the previous iteration, it has enhanced then
(42)    Update  $S^{current}$ ;
(43)    Update  $s(pro)_i$ ,  $W_i^t$  for each operator;
(44)    Update  $Weight_i^t$  for each operator;
(45)  end if
(46)  if  $n(pro)_i \equiv 0 \pmod{pro}$  then
(47)    Update  $Weight_i^t$  for operators using the adaptive weight adjustment;
(48)  end if
(49)   $n(pro)_i = n(pro)_i + 1$ ;
(50)   $T = T * \tau$ ;
(51) end while
Output:  $S^{best}$ 

```

Gambar 2.2 General framework of the ALNS (Duan et al., 2023)

Algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) pada *pseudocode* tersebut diawali dengan pembentukan solusi awal yang layak dan penetapannya sebagai solusi terbaik sementara, kemudian dilakukan proses iteratif hingga mencapai batas iterasi maksimum. Pada setiap iterasi, algoritma memilih operator penghancuran (*destroy*) dan perbaikan (*repair*) berdasarkan bobot adaptif yang mencerminkan kinerja historis masing-masing operator, sehingga sebagian elemen solusi dihapus dan disusun kembali untuk menghasilkan solusi kandidat baru. Solusi kandidat tersebut kemudian dievaluasi menggunakan fungsi objektif, dan keputusan penerimaan solusi dilakukan melalui kriteria penerimaan berbasis probabilitas yang dipengaruhi oleh nilai temperatur, sehingga solusi yang lebih buruk masih memiliki peluang

diterima untuk menghindari jebakan solusi lokal. Selanjutnya, bobot operator diperbarui secara adaptif berdasarkan kontribusinya terhadap perbaikan solusi, dan solusi terbaik global diperbarui apabila ditemukan solusi dengan nilai objektif yang lebih baik. Proses ini berulang secara sistematis hingga kondisi penghentian terpenuhi, dengan keluaran akhir berupa solusi terbaik yang diperoleh selama proses pencarian.

a. *Destroy Operator*

Operator *Destroy* merupakan langkah untuk memecah atau membongkar sebagian dari solusi yang sudah ada dengan tujuan untuk menciptakan variasi baru dalam solusi tersebut (Wang et al., 2024). Beberapa jenis *destroy operator* yang sering digunakan sebagai komponen utama dalam prosedur ALNS (Mara et al., 2022):

Tabel 2.2 Jenis-jenis operator destroy

<i>Destroy Operator</i>	Penjelasan
<i>Random Removal</i>	Teknik penghapusan elemen solusi (permintaan) yang dilakukan secara acak dan seragam. Meskipun berisiko menghapus bagian solusi yang sudah efisien, metode ini sangat efektif dalam menjaga aspek diversifikasi algoritma agar tidak terjebak pada optimum lokal.
<i>Worst Removal</i>	Mekanisme yang menargetkan penghapusan pada elemen dengan kontribusi biaya tertinggi dalam solusi. Penentuan elemen "terburuk" dihitung berdasarkan selisih total biaya sebelum dan sesudah penghapusan, dengan tujuan agar fungsi <i>repair</i> dapat merekonstruksi bagian tersebut secara lebih ekonomis.
<i>Related Removal</i>	Operator yang bekerja berdasarkan prinsip kemiripan atau keterkaitan antar bagian dalam solusi. Dengan menghapus elemen-elemen yang saling terkait, algoritma memiliki peluang lebih besar untuk menukar posisi elemen tersebut ke dalam rangkaian yang lebih menguntungkan.
<i>History-Based Removal</i>	Metode penghapusan yang memanfaatkan rekaman data historis dari iterasi sebelumnya. Informasi ini digunakan untuk mengidentifikasi bagian solusi yang memiliki potensi optimasi tinggi untuk kemudian dihapus dan disusun ulang kembali.
<i>Route Removal</i>	Strategi penghapusan yang dilakukan dengan mengeliminasi satu atau beberapa rute secara utuh beserta seluruh titik (<i>node</i>) di dalamnya secara acak. Hal ini bertujuan untuk memberikan ruang kosong yang luas bagi algoritma dalam merestrukturisasi rute yang lebih optimal.
<i>Neighborhood Removal</i>	Teknik penghapusan iteratif pada titik-titik yang dianggap signifikan berdasarkan jarak rata-rata dalam sebuah rute. Fokus utamanya adalah meningkatkan efisiensi rute secara keseluruhan

<i>Destroy Operator</i>	Penjelasan
	dengan mengevaluasi pengaruh keberadaan titik tersebut terhadap performa rute.
<i>Cluster Removal</i>	Operator yang menggunakan pendekatan pengelompokan (<i>clustering</i>) untuk membagi solusi menjadi dua bagian besar. Salah satu klaster kemudian dipilih secara acak untuk dihapus seluruh titiknya, memberikan kesempatan bagi fungsi perbaikan untuk mengonfigurasi ulang wilayah tersebut.
<i>Shaw Removal</i>	Bekerja dengan menghapus kelompok pelanggan atau titik-titik yang memiliki keterkaitan erat berdasarkan dimensi ruang dan waktu (<i>spatio-temporal relatedness</i>). Berbeda dengan penghapusan acak, operator ini secara strategis mengidentifikasi dan membongkar struktur solusi pada pelanggan yang "serupa" untuk memberikan ruang bagi algoritma dalam mengeksplorasi konfigurasi rute yang lebih efisien dan optimal (Yu et al., 2026).

b. *Repair Operator*

Operator *Repair* merupakan langkah yang dilakukan untuk memperbaiki atau membangun kembali solusi yang rusak akibat dari proses penghancuran guna menghasilkan solusi berikutnya (Wang et al., 2024). Beberapa jenis *repair operator* yang sering digunakan sebagai komponen utama dalam prosedur ALNS (Mara et al., 2022):

Tabel 2.3 Jenis-jenis operator *repair*

<i>Repair Operator</i>	Penjelasan
<i>Greedy Insertion</i>	Memasukkan kembali titik-titik yang terhapus satu per satu secara berulang. Fokus utamanya adalah selalu memilih titik yang memberikan biaya tambahan paling kecil dibandingkan titik lainnya.
<i>Regret Insertion</i>	Memasukkan titik berdasarkan nilai "penyesalan" (<i>regret</i>). Nilai ini dihitung dari selisih biaya antara posisi terbaik pertama dan posisi terbaik ke- <i>k</i> . Titik dengan selisih biaya terbesar akan didahulukan.
<i>Random Insertion</i>	Memilih titik dari daftar terhapus secara acak, namun tetap menempatkannya pada posisi rute yang menghasilkan biaya tambahan paling minimal.
<i>Sequential Insertion</i>	Teknik penyisipan yang dilakukan secara berurutan dengan mencari posisi yang membutuhkan sumber daya paling sedikit, seperti jarak tempuh terpendek atau waktu tersingkat.
<i>Zone Insertion</i>	Mirip dengan <i>Greedy Insertion</i> , namun prioritasnya bukan pada jarak, melainkan pada ketepatan jadwal waktu. Titik dimasukkan dengan memastikan seluruh rute selesai tepat waktu.
<i>Swap Insertion</i>	Teknik ini dilakukan dengan memilih dua titik secara acak dari solusi yang sudah ada, kemudian menukar posisi keduanya untuk mencari hasil yang lebih baik.
<i>Multi-Trip Internal Depot Insertion</i>	Menyisipkan kembali titik kunjungan ke dalam rute kendaraan dengan mempertimbangkan siklus perjalanan majemuk. Operator ini bekerja secara spesifik dengan memvalidasi kelayakan waktu kembali kendaraan ke depo serta ketersediaan fasilitas pemuatan sebelum memulai perjalanan berikutnya (Xu et al., 2023).

```

input : Initial solution  $x_0$ , initial temperature  $T$ 
output: Best solution  $x_{best}$ 
1 while  $i < maxIter$  do
2   Generate a new solution  $x'$  after removal and insertion processes
3    $\frac{F(x)-F(x')}{T}$ 
4   if  $rand(0, 1) \leq e^{\frac{F(x)-F(x')}{T}}$  then
5      $x = x'$ 
6   end
7   if  $F(x) < F(x')$  then
8      $x_{best} = x$ 
9   end
10  Update  $T$ 
11   $i = i + 1$ 
12 end

```

Gambar 2.3 Pseudocode of the simulated annealing in ALNS

Algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) menerapkan metode *Simulated Annealing* (SA) sebagai standar dalam menentukan penerimaan suatu solusi. Konsep utama penggunaan SA dalam ALNS adalah sistem ini tidak hanya menyetujui solusi yang lebih baik dari sebelumnya, tetapi juga memberikan peluang bagi solusi yang lebih buruk untuk tetap diterima. Berdasarkan kriteria penerimaan tersebut, peluang diterimanya sebuah solusi baru x' ditentukan melalui persamaan berikut:

$$e^{\frac{F(x)-F(x')}{T}}$$

Dalam algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), suhu merupakan parameter kontrol yang menentukan tingkat toleransi sistem dalam menerima solusi yang lebih buruk demi menghindari jebakan optimum lokal. Pada awal iterasi, suhu diatur tinggi agar algoritma dapat mengeksplorasi ruang solusi secara luas dengan probabilitas penerimaan solusi buruk yang besar. Seiring berjalannya proses, suhu ini akan diturunkan secara bertahap menggunakan rasio pendinginan (seperti 0,999) hingga mencapai kondisi stabil, di mana algoritma menjadi lebih selektif dan hanya fokus pada perbaikan solusi yang paling optimal. Dalam perhitungan di atas, $T > 0$ merepresentasikan suhu saat ini. Parameter suhu ini dimulai dari nilai awal $T_0 > 0$ dan akan mengalami penurunan secara bertahap pada setiap iterasi yang dilakukan. Pembaruan nilai suhu dilakukan dengan menggunakan rumus $T = T \cdot c$, di mana c merupakan rasio pendinginan (*cooling ratio*) (Kuyu & Vatansever, 2024).

2.1.4 Location Routing Problem

Location Routing Problem (LRP) adalah sebuah metode yang menggabungkan keputusan penentuan lokasi dengan keputusan rute kendaraan. Secara khusus, LRP membahas bagaimana menentukan lokasi terbaik untuk fasilitas distribusi (seperti gudang atau pusat distribusi) yang akan menyalurkan barang ke pelanggan. LRP secara mendasar berbeda dari *Inventory Routing Problems* (IRPs), *Production Routing Problems* (PRPs), maupun *Vehicle Routing Problems* (VRPs) pada umumnya. Perbedaan ini terletak pada kemampuannya dalam mengintegrasikan keputusan operasional (perutean) langsung dengan keputusan taktis atau strategis (penentuan Lokasi) (Archetti et al., 2025). *Location Routing Problem* (LRP), di mana keputusan strategis dan keputusan operasional dipertimbangkan secara bersamaan pada tahap awal pengambilan keputusan. Kendati demikian, dalam beberapa aplikasi di dunia nyata, batasan waktu yang disebabkan oleh berbagai faktor harus dimasukkan ke dalam model. Beberapa contohnya meliputi sistem distribusi barang yang mudah rusak (*perishable*), target perusahaan untuk

mencapai tingkat layanan pelanggan yang tinggi, atau situasi darurat dan bencana alam. Oleh karena itu, terdapat gabungan *location routing problem* (LRP) dengan kendala jendela waktu (*time window constraints*) (Maghfiroh et al., 2023a).

Berbagai aspek dari masalah ini, seperti lokasi, penugasan (*assignment*), dan perutean (*routing*), umumnya dipelajari secara terpisah. Hal ini terjadi karena penentuan lokasi merupakan keputusan strategis jangka panjang, sedangkan perutean adalah aspek operasional yang dapat diubah secara dinamis berkali-kali dalam jangka pendek. Namun, sudah diketahui secara luas bahwa keputusan-keputusan ini saling berkaitan. Faktanya, keputusan dalam menentukan lokasi sebuah depo sering kali dipengaruhi oleh biaya transportasi, dan begitu pula sebaliknya. Prosedur Pemecahan (*Splitting Procedure*) didasarkan pada gagasan bahwa total biaya perjalanan dapat dikurangi dengan menambahkan rute baru dan menetapkan ke depo yang berbeda. Berikut merupakan contoh dari *splitting procedure* (Escobar et al., 2013):



Gambar 2. 4 *Splitting Procedure*

2.1.5 Transportasi

Transportasi memegang peran penting dalam menjamin ketepatan waktu distribusi karena menentukan seberapa cepat dan akurat produk berpindah dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Oleh karena itu, manajemen transportasi perlu menyeimbangkan kualitas layanan dengan efisiensi biaya agar pengiriman tetap andal tanpa membebani anggaran. Ketika produk tidak tersedia pada saat dibutuhkan, berbagai dampak negatif dapat muncul, mulai dari hilangnya peluang penjualan, menurunnya kepuasan pelanggan, hingga terganggunya proses produksi. Dalam jangka panjang, konsekuensi paling serius adalah menurunnya kepercayaan pelanggan terhadap perusahaan (Goni et al., 2022). Masalah transportasi merupakan salah satu topik dalam *operations research* yang berfokus pada upaya meminimalkan biaya distribusi barang dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Permasalahan ini muncul ketika perlu ditentukan pola pengiriman suatu produk dari beberapa sumber yang memiliki kapasitas penawaran menuju beberapa tujuan dengan tingkat permintaan tertentu. Setiap perusahaan berupaya menekan biaya transportasi

serendah mungkin, sehingga dibutuhkan strategi penyelesaian yang sistematis untuk memperoleh solusi optimal. Dengan perencanaan dan pengelolaan yang tepat, proses distribusi dapat berjalan lebih efisien dan biaya operasional dapat ditekan (Arofah & Gesthantiara, 2021). Rute transportasi adalah jalur atau lintasan yang digunakan untuk mengangkut barang, jasa, atau orang dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Penentuan rute transportasi yang optimal bertujuan untuk meminimalkan biaya, waktu, atau jarak tempuh, sekaligus memastikan efisiensi operasional (Nazry et al., 2025).

a. Komponen Utama

Komponen utama dalam rute transportasi terdiri atas beberapa elemen yang berperan dalam perencanaan dan pengelolaan distribusi barang maupun perjalanan. Dalam optimasi rute, komponen tersebut meliputi variabel keputusan, fungsi objektif, kendala (*constraints*), data masukan (*input data*), metode atau teknik optimasi, solusi dan evaluasi, serta implementasi. Berikut adalah komponen-komponen utama yang sering terlibat dalam perencanaan rute transportasi, yaitu:

1. Pusat Distribusi (Hub)

Titik utama yang berfungsi sebagai tempat konsolidasi atau pendistribusian barang ke berbagai tujuan.

2. Node (*Node*)

Lokasi-lokasi yang terlibat dalam jaringan transportasi, seperti gudang, terminal, atau pelanggan.

3. Edge (Lintasan)

Jalur penghubung antara dua node, seperti jalan raya, rel kereta api, jalur udara, atau jalur laut.

4. Kendaraan

Sarana transportasi yang digunakan untuk proses pengangkutan, seperti truk, kapal, kereta api, atau pesawat.

b. Langkah-Langkah Penentuan Rute Transportasi

Penentuan rute transportasi yang optimal, baik untuk pengiriman barang maupun perjalanan, dilakukan melalui tahapan yang sistematis guna mencapai efisiensi biaya dan waktu. Berikut adalah langkah-langkah dalam menentukan rute transportasi:

1. Identifikasi Lokasi

Menentukan titik awal, tujuan, serta node yang terlibat dalam jaringan transportasi.

2. Pemetaan Jaringan

Merepresentasikan node dan edge dalam bentuk peta atau graf untuk menggambarkan hubungan antar lokasi.

3. Formulasi Masalah

- a. Variabel keputusan: rute yang akan dipilih atau dilalui.

- b. Fungsi objektif: meminimalkan jarak, biaya, atau waktu tempuh.

- c. Kendala: kapasitas kendaraan, batas waktu pengiriman, serta batasan operasional lainnya.

- c. Penerapan Model Optimasi

Penerapan model optimasi pada rute transportasi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dengan menentukan rute terbaik yang mampu menurunkan biaya, waktu, atau jarak perjalanan. Model optimasi digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan dalam sistem transportasi secara terstruktur dan kuantitatif.

2.1.6 Distribusi

Distribusi merupakan kegiatan pemindahan barang dari pihak pemasok (*supplier*) kepada agen atau pihak perantara dalam tahapan proses *supply chain*. Distribusi memegang peranan penting dalam penciptaan keuntungan perusahaan, karena pelaksanaannya secara langsung memengaruhi besarnya biaya pada *supply chain* serta pemenuhan kebutuhan agen atau pelanggan. Oleh karena itu, pengelolaan distribusi yang efektif dan efisien diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara tingkat pelayanan dan pengendalian biaya operasional (Sitek et al., 2021). Keputusan terkait penjadwalan pengiriman serta penentuan rute yang akan ditempuh oleh setiap tipe kendaraan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besarnya biaya distribusi. Namun demikian, biaya bukan merupakan satu-satunya faktor yang dipertimbangkan dalam proses pengiriman, karena aspek lain seperti ketepatan waktu, keandalan layanan, kapasitas kendaraan, dan tingkat kepuasan pelanggan juga turut memengaruhi efektivitas sistem distribusi secara keseluruhan (Tebaldi et al., 2020). Penentuan jadwal dan rute pengiriman perlu mempertimbangkan berbagai kendala operasional, seperti ketersediaan armada dan kapasitas masing-masing kendaraan. Secara umum, permasalahan penjadwalan dan penentuan rute bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja distribusi dengan meminimalkan waktu, jarak tempuh,

dan biaya pengiriman (Patmawati & Nugroho, 2022). Proses distribusi dilaksanakan melalui beberapa jenjang, dimulai dari lokasi penyimpanan di pusat produksi, pusat distribusi, pedagang grosir, hingga pengecer. Untuk mewujudkan manajemen distribusi yang efektif, diperlukan perencanaan yang didukung oleh data permintaan pada setiap titik konsumen, serta informasi pendukung lainnya seperti jarak, waktu tempuh, dan biaya distribusi. Secara umum, tujuan distribusi adalah menyalurkan produk yang dihasilkan perusahaan ke berbagai wilayah sehingga dapat menjangkau segmen pasar yang ditargetkan secara tepat.

Dalam sistem distribusi yang dinamis, karakteristik utama yang membedakan *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP) dari model konvensional adalah fleksibilitas armada untuk menjalankan serangkaian sub-rute yang terintegrasi dalam satu jadwal kendaraan (*vehicle schedule*). Secara teknis, setiap armada memulai siklus distribusi pertama dari depo menuju lokasi tujuan, kemudian kembali ke fasilitas asal untuk melakukan pengisian ulang atau persiapan sebelum memulai perjalanan berikutnya, selama masih berada dalam batas waktu mengemudi maksimum yang diizinkan (Wong & Jamaian, 2022). Penerapan model *Multi-Trip Location-Routing Problem with Time Windows* (MTLRP-TW) sangat krusial dalam mengelola manajemen distribusi yang kompleks, terutama pada layanan yang memiliki prioritas waktu ketat dan keterbatasan anggaran. Fokus utama dalam perancangan jaringan distribusi ini adalah sinkronisasi antara ketersediaan armada dengan jendela waktu layanan pelanggan. Fungsi tujuan dari skema distribusi rute majemuk ini tidak hanya berorientasi pada minimasi total waktu tempuh, tetapi juga bertujuan menekan frekuensi pelanggaran batasan waktu (*time windows*) serta memitigasi risiko lingkungan di area populasi melalui pengurangan jumlah armada yang beroperasi (Tirkolaee et al., 2021).

2.1.7 Circuity Factor

Circuity factor merupakan pengali yang digunakan pada jarak garis lurus hasil perhitungan koordinat untuk mendekati jarak tempuh aktual di jaringan jalan. Karena jarak perjalanan nyata tidak mungkin lebih pendek dibandingkan jarak garis lurus, maka nilai *circuity factor* harus bernilai sama dengan atau lebih besar dari 1. Nilai ini diperoleh dari rasio antara jarak perjalanan aktual terhadap jarak hasil perhitungan koordinat (Ballou et al., 2002). Metrik ini sangat krusial dalam perumusan *Location Routing Problem* (LRP) karena jarak *Euclidean* sering kali tidak merepresentasikan kondisi geografis nyata yang dibatasi oleh infrastruktur jalan, topografi, maupun kepadatan jaringan jalan di lapangan. Sirkuitas perjalanan (*travel*

circuity) didefinisikan sebagai rasio antara jarak tempuh aktual melalui jaringan dengan jarak garis lurus (*Euclidean*) untuk pasangan asal-tujuan tertentu. Secara matematis, sirkuitas perjalanan dihitung sebagai berikut:

$$C_{ij} = \frac{D_{ij}^n}{D_{ij}^e}$$

Dalam persamaan tersebut, C_{ij} merepresentasikan tingkat sirkuitas untuk perjalanan dari titik asal i ke tujuan j . Variabel D_{ij}^n melambangkan jarak tempuh aktual di lapangan, sementara D_{ij}^e melambangkan jarak garis lurus (*Euclidean*) antara kedua titik tersebut. Nilai sirkuitas teoretis terendah adalah 1, yang tercapai ketika jarak jaringan aktual sama dengan jarak garis lurus. Dengan demikian, semakin mendekati nilai 1, maka efisiensi perjalanan dinilai semakin optimal (Cao et al., 2017).

2.1.8 Analisis Sensitivitas

Dalam konteks masalah *routing* dan distribusi pada penelitian ini, analisis sensitivitas dapat dipahami sebagai uji ketahanan model untuk melihat seberapa jauh hasil solusi berubah ketika parameter kunci diubah, sehingga peneliti dapat menilai apakah solusi usulan benar-benar stabil, layak, dan realistis untuk dipakai di lapangan. Pada model distribusi pangan *perishable* seperti ini, sensitivitas menjadi sangat penting karena keputusan rute, lokasi, kapasitas armada, dan *time windows* saling memengaruhi, sementara biaya transportasi dan penalti keterlambatan langsung membentuk total biaya jaringan. Karena itu, perubahan kecil pada bobot tujuan, tingkat keyakinan kendala, atau nilai penalti dapat menggeser ruang solusi secara signifikan. Peningkatan bobot suatu tujuan akan memperbaiki tujuan tersebut tetapi menurunkan tujuan lain, bahwa kenaikan *confidence level* membuat kendala makin ketat dan mempersempit *feasible region*, serta bahwa kenaikan *penalty cost* menaikkan total biaya jaringan, bahkan variasi biaya persediaan terbukti lebih berpengaruh terhadap total biaya dibanding *goodwill loss* (Hashemi-Amiri et al., 2023). Analisis sensitivitas dalam penelitian ini dibangun di atas kerangka metodologis *One-At-a-Time* (OAT) atau *local sensitivity analysis*, di mana satu parameter diubah pada satu waktu sementara seluruh parameter lainnya dipertahankan pada nilai *baseline*, sebagaimana direkomendasikan oleh Shepherd (2009) sebagai pendekatan yang tepat untuk masalah optimasi dengan ruang parameter berdimensi tinggi. Penetapan ambang batas (*threshold*) klasifikasi ketahanan solusi terhadap perubahan jarak dan jumlah *trip* dalam kajian sistematis terhadap *dynamic vehicle routing problem* menetapkan bahwa perubahan nilai

objective atau jarak sebesar $\leq 10\%$ dikategorikan tidak signifikan (*robust*), 10 - 25% dikategorikan moderat (*moderate*), dan lebih dari 25% dikategorikan degradasi berat (*rapuh*) (Pillac et al., 2013), sementara pelanggaran pertama pada *hard constraint* kapasitas kendaraan secara langsung menggeser klasifikasi ke *rapuh* (Ropke & Pisinger, 2006).

Untuk menilai stabilitas stokastik algoritma ALNS, penelitian ini mengadopsi ambang batas koefisien variasi (CV) yang dikemukakan oleh Turkeš et al. (2021) dalam meta-analisis terhadap 211 artikel ALNS di *European Journal of Operational Research*, yaitu CV < 5% dikategorikan sangat stabil (*robust*), CV 5 - 15% cukup stabil (*moderate*), dan CV > 15% menunjukkan ketidakstabilan yang memerlukan replikasi tambahan. Untuk komponen sensitivitas biaya, meliputi harga BBM, konsumsi kendaraan, biaya operasi armada, dan biaya pembukaan dapur ambang batas *materiality* yang digunakan mengacu pada World Bank (2023) dalam *Public Financial Management for Results* yang menetapkan perubahan biaya $\leq 15\%$ sebagai tidak material (*robust*), 15 - 30% sebagai material yang memerlukan revisi anggaran minor (*moderate*), dan >30% sebagai sangat material yang memerlukan perancangan ulang operasional (*rapuh*), sedangkan analisis *total cost of ownership* (TCO) dapur mempertimbangkan amortisasi *opening cost* selama lima tahun sebagaimana diusulkan oleh Tordecilla et al. (2023) dalam kajian *location routing problem* dengan keputusan *facility sizing* di *International Transactions in Operational Research*. Selain itu, penilaian pemerataan beban antardapur menggunakan ambang batas CV *demand* yang diadaptasi dari Roosta et al. (2023) dalam *Journal of Project Management*, di mana CV < 0,20 menunjukkan distribusi merata dengan risiko rendah, CV 0,20 - 0,40 menunjukkan ketimpangan moderat yang perlu dipantau, dan CV > 0,40 mengindikasikan risiko *overload* depot yang tinggi.

2.1.9 Center of Gravity

Metode *Center of Gravity* merupakan teknik matematis yang teruji efektivitasnya dalam memitigasi kompleksitas pemilihan lokasi pusat distribusi guna mencapai titik koordinat yang paling optimal (Winoto & Arifin, 2024). Metode ini menggunakan teknik penentuan lokasi pusat distribusi yang mengintegrasikan koordinat geografis pelanggan dengan volume permintaan mereka. Efektivitas pendekatan ini membuatnya banyak diterapkan di berbagai sektor, mulai dari manajemen rantai pasok dan logistik hingga perencanaan tata kota (Šlebir, 2022). Metode *Center of Gravity* (COG) kemudian menggunakan informasi dari matriks jarak

tersebut untuk mengidentifikasi titik koordinat fasilitas distribusi yang paling strategis. Perhitungan matriks jarak diperoleh dengan rumus:

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

Matriks jarak *Euclidean* adalah representasi matematis dalam bentuk tabel atau matriks yang menyajikan informasi jarak tempuh antara setiap pasangan titik (*node*) dalam sebuah jaringan menggunakan perhitungan garis lurus pada bidang datar. Jarak ini dihitung berdasarkan posisi koordinat setiap titik, di mana dalam sistem koordinat dua dimensi, rumusnya didasarkan pada teorema *Pythagoras* untuk mencari jarak terpendek antara dua lokasi. Secara teknis, penggunaan matriks ini sangat efektif untuk pemodelan distribusi di wilayah yang relatif kecil karena perhitungannya yang sederhana namun akurat jika data lokasi telah dikonversi ke dalam sistem koordinat metrik seperti UTM (*Universal Transverse Mercator*). Dalam riset operasi dan logistik, matriks jarak Euclidean menjadi basis data fundamental yang memungkinkan algoritma untuk menghitung estimasi waktu tempuh serta biaya transportasi secara presisi guna menentukan rute distribusi yang paling efisien.

Dengan menghitung pusat gravitasi permintaan melalui model matematis, diperoleh titik koordinat optimal untuk pusat distribusi. Implementasi hasil perhitungan ini bertujuan untuk mencapai efisiensi maksimal dalam hal jarak rata-rata pengiriman dan penghematan biaya operasional transportasi (Xia et al., 2023). Menurut Russell et al. (2019), metode *center of gravity* mengandalkan data jumlah pengiriman tahunan dan jarak tempuh linear untuk mencari koordinat fasilitas yang paling efisien. Volume barang yang mengalir dari pabrik menuju konsumen dalam periode tertentu bertindak sebagai variabel pembobot utama, sementara jarak antar titik diukur dalam satuan kilometer guna menentukan lokasi di pusat aktivitas geografis. Metode center of gravity dirumuskan sebagai berikut:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Dengan keterangan:

x: Titik koordinat fasilitas baru pada sumbu x

y : Titik koordinat fasilitas baru pada sumbu y

x_i : Titik koordinat lokasi i pada sumbu x

y_i : Titik koordinat lokasi i pada sumbu y

W_i : Bobot pengiriman tahunan

Untuk mengidentifikasi lokasi fasilitas yang paling efisien menggunakan teknik *center of gravity*, langkah-langkah sistematis yang perlu ditempuh adalah sebagai berikut:

1. Menetapkan posisi lintang dan bujur bagi setiap titik lokasi tujuan dalam jaringan distribusi.
2. Menghitung total volume pengiriman atau jumlah unit barang yang didistribusikan ke setiap lokasi tujuan selama periode satu tahun.
3. Mengalikan koordinat setiap lokasi dengan bobot pengirimannya, kemudian membagi total hasil perkalian tersebut dengan akumulasi seluruh beban pengiriman.
4. Menggunakan hasil akhir perhitungan sebagai koordinat koordinat baru yang merepresentasikan titik pusat gravitasi paling optimal secara geografis.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah subjek ilmiah yang menjadi fokus pengumpulan data demi menjamin hasil penelitian yang memenuhi kriteria objektivitas, validitas, dan reliabilitas. Dalam penelitian ini adalah optimasi perencanaan lokasi dapur program Makan Bergizi Gratis (MBG) dan rute distribusi makanan bergizi ke sekolah-sekolah dasar di Kecamatan Ngemplak. Fokus penelitian mencakup penentuan lokasi optimal dapur MBG dan rute kendaraan pengantaran secara bersamaan, dengan memperhatikan jendela waktu pelayanan (*time windows*). Secara konseptual, masalah ini dikategorikan sebagai *Location Routing Problem* (LRP), di mana pengambilan keputusan strategis (pemilihan lokasi fasilitas) dan operasional (penentuan rute) dilakukan secara simultan. Model yang dikembangkan menggabungkan konsep *Set Covering Problem* (SCP) untuk menjamin seluruh sekolah dasar tercakup oleh lokasi dapur sebanyak mungkin dengan penggunaan fasilitas minimal, serta *Vehicle Routing Problem* (VRP) untuk penentuan rute distribusi kendaraan secara optimal. Pendekatan solusi menggunakan algoritma metaheuristik *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) yang mampu menangani kompleksitas kombinatorial permasalahan tersebut.

3.2 Instrumen Penelitian

Penelitian ini melibatkan berbagai instrumen perangkat keras dan perangkat lunak, antara lain:

1. Layanan Pemetaan Digital (*Google Maps*): Digunakan sebagai basis data utama untuk menentukan titik lokasi sekolah dan kandidat lokasi dapur secara presisi. Melalui layanan ini, dilakukan ekstraksi data spasial berupa koordinat geografis (*latitude* dan *longitude*) dari setiap titik lokasi yang diteliti.
2. Bahasa pemrograman Python digunakan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan algoritma optimasi ALNS, dalam proses penyelesaian dan penentuan rute distribusi yang optimal.
3. Perangkat lunak pendukung lain: Perangkat lunak statistik atau *excel* digunakan untuk pengolahan data numerik, konversi data titik koordinat, dan analisis hasil simulasi.
4. Dataset yang digunakan memuat data-data yang diperlukan dalam proses pengolahan dan analisis, meliputi koordinat lokasi setiap titik permintaan, batasan waktu pelayanan (*time windows*), serta besaran permintaan pada masing-masing lokasi.

3.3 Sumber Data Primer dan Sekunder

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder sebagai sumber utama dalam proses analisis dan pengolahan data.

1. Data primer diperoleh langsung dari lapangan melalui survei dan observasi kepada sumbernya. Dalam penelitian ini, data primer mencakup hasil survei lapangan. Peneliti melakukan pengamatan langsung untuk mengidentifikasi lokasi geografis penerima manfaat. Wawancara dapat dilakukan untuk mendapatkan informasi tambahan mengenai logistik program MBG seperti jadwal pengiriman, kapasitas dapur, kapasitas kendaraan, permintaan tiap sekolah, batas waktu pengantaran, dan jumlah kendaraan.
2. Data sekunder diperoleh dari dokumentasi atau literatur yang sudah tersedia. Sumber sekunder penelitian ini meliputi dokumentasi program MBG pemerintah, data spasial, serta literatur ilmiah atau laporan terdahulu yang relevan. Data sekunder ini digunakan untuk memperkuat dan melengkapi data primer, serta sebagai input dalam model optimasi.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Data dikumpulkan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam proses pengolahan dan analisis guna mencapai tujuan penelitian. Proses pengumpulan data dilakukan melalui beberapa metode yang disesuaikan dengan karakteristik objek penelitian dan kebutuhan analisis yang telah ditetapkan. Adapun metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan dengan menelaah jurnal ilmiah, buku teks, dan laporan penelitian yang relevan. Kegiatan ini bertujuan untuk memperoleh landasan teori yang digunakan dalam penelitian.
2. Observasi Lapangan
Observasi lapangan dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi aktual di Kecamatan Ngemplak, khususnya terkait lokasi penerima Makan Bergizi Gratis.
3. Wawancara
Wawancara dilakukan dengan pihak-pihak yang terlibat dalam pengelolaan dan pelaksanaan program Makan Bergizi Gratis, seperti pengelola dapur, pihak sekolah, atau pemangku kepentingan terkait. Wawancara bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan operasional, pola distribusi, serta batasan-batasan yang relevan dalam perencanaan lokasi dan rute distribusi.

4. Ekstraksi dan Pengolahan Data Titik Koordinat

Penentuan titik lokasi sekolah dan kandidat dapur dilakukan secara presisi dengan memanfaatkan layanan *Google Maps* sebagai basis data spasial utama. Proses ini melibatkan ekstraksi koordinat geografis berupa *latitude* dan *longitude* dari setiap objek penelitian untuk mendapatkan data lokasi yang akurat. Data lokasi sekolah dan kandidat dapur yang diperoleh melalui layanan peta digital dalam bentuk derajat desimal (*Decimal Degrees*) dikonversi menjadi koordinat UTM (*Universal Transverse Mercator*) menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel. Proses konversi ini dilakukan untuk mengubah data spasial berbasis sudut menjadi satuan metrik (meter), guna memfasilitasi perhitungan matriks jarak dan waktu tempuh yang lebih akurat dalam model matematis. Dengan koordinat UTM, perhitungan jarak antar titik di Kecamatan Ngemplak dapat dilakukan secara linear, yang selanjutnya menjadi input utama dalam pengolahan data menggunakan algoritma ALNS.

3.5 Populasi dan Sampel

Populasi dan sampel ditetapkan untuk menggambarkan ruang lingkup data yang digunakan dalam pemodelan optimasi distribusi Makan Bergizi Gratis, sehingga hasil penelitian dapat merepresentasikan kondisi sistem distribusi di wilayah penelitian secara akurat.

3.5.1 Populasi

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh titik lokasi yang terlibat dalam sistem distribusi Program Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak. Titik lokasi tersebut meliputi sekolah penerima MBG sebagai titik permintaan, serta calon lokasi dapur MBG sebagai fasilitas distribusi. Seluruh titik koordinat ini menjadi dasar dalam pemodelan dan optimasi *Location Routing Problem* yang dikembangkan dalam penelitian ini.

3.5.2 Sampel

Sampel penelitian terdiri atas sejumlah titik lokasi terpilih di Kecamatan Ngemplak yang merepresentasikan sekolah penerima MBG dan calon dapur MBG. Titik-titik sampel ini digunakan dalam proses simulasi untuk menggambarkan kondisi distribusi secara nyata namun tetap dalam skala yang terukur. Selain itu, dapur MBG berfungsi sebagai fasilitas distribusi yang menjadi titik awal dan akhir rute pengantaran makanan ke sekolah-sekolah penerima. Pemilihan sampel dilakukan untuk mendukung proses optimasi lokasi dan rute distribusi sehingga solusi yang dihasilkan relevan dan aplikatif terhadap kondisi lapangan.

3.6 Persamaan Model Matematika

3.6.1 Struktur LRP Sebagai Dasar Pembangunan Model

Permasalahan distribusi dasar yang berawal dari *Traveling Salesman Problem* (TSP) telah berkembang menjadi *Vehicle Routing Problem* (VRP) seiring dengan penggunaan armada kendaraan yang lebih dari satu. Dalam konteks distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak, permasalahan ini bertransformasi menjadi *Location Routing Problem* (LRP) karena adanya kebutuhan untuk mengintegrasikan keputusan strategis pemilihan lokasi dapur pusat dengan keputusan taktis penyusunan rute distribusi secara simultan guna menangkap interdependensi antar keduanya. Pembangunan model LRP dalam penelitian ini mengacu pada kerangka kerja yang dikembangkan oleh Maghfiroh et al. (2023a), yang menekankan pada sinkronisasi antara penentuan fasilitas depo dan efisiensi lintasan armada untuk mencapai total biaya logistik yang minimum. Serta terdapat penyesuaian serta tambahan terkait aspek *multi trip* yang digunakan pada penelitian (Doğuş İyican, 2023).

- Tujuan penelitian ini adalah merumuskan fungsi objektif yang mengintegrasikan biaya tetap pembukaan dapur baru dengan biaya variabel perjalanan rute secara simultan untuk memastikan pemilihan lokasi fasilitas dan jumlah dapur yang dioperasikan menghasilkan total pengeluaran logistik yang paling efisien. Pendekatan penggabungan aspek strategis dan taktis ini merujuk pada kerangka penelitian Maghfiroh et al. (2023b), yang menekankan bahwa efisiensi sistem logistik publik tidak hanya bergantung pada rute yang pendek, tetapi juga pada optimalisasi jumlah fasilitas aktif guna menjaga keberlanjutan fiskal program.

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

dengan keterangan:

z = Nilai total biaya distribusi yang ingin diminimalkan

O_i = Biaya Pembukaan depo $i \in I$

y_i = Variabel keputusan biner; bernilai 1 jika depo di lokasi i dibuka, dan 0 jika tidak dibuka

C_{ij} = Biaya perjalanan antara *node* i dan j

x_{ijk} = Variabel keputusan rute; bernilai 1 jika kendaraan k melakukan perjalanan langsung dari titik i ke titik j , dan 0 jika tidak

- Batasan yang digunakan adalah sebagai berikut:
 1. Setiap sekolah harus dikunjungi tepat satu kali untuk pengantaran dan satu kali untuk pengambilan.
 2. Memastikan muatan pada setiap rute tidak melebihi kapasitas kendaraan.
 3. Total permintaan pelanggan (sekolah) yang dialokasikan ke suatu depo (dapur MBG) tidak boleh melebihi kapasitas depo (dapur MBG) tersebut.
 4. Menjamin kendaraan yang masuk ke sebuah *node* harus keluar dari *node* yang sama.
 5. Menjamin setiap rute dimulai dan diakhiri di depo (dapur MBG) yang sama, serta dua kendaraan digunakan per dapur.
 6. Mencegah terbentuknya rute tertutup yang tidak terhubung dengan depo (dapur MBG).
 7. Menjamin penerima manfaat hanya dialokasikan ke depo (dapur MBG) jika terdapat rute yang menghubungkan mereka.
 8. Membatasi total waktu perjalanan, waktu layanan, dan waktu tunggu agar tidak melebihi jam kerja pengemudi.
 9. Menghitung waktu kedatangan di titik penerima manfaat berikutnya berdasarkan waktu kedatangan sebelumnya, waktu tempuh, layanan, dan tunggu.
 10. Memastikan kendaraan tiba di setiap *node* dalam rentang waktu yang diizinkan.
 11. Menetapkan nilai awal waktu untuk keberangkatan dari depo (dapur MBG).
 12. Jika kendaraan *k* melayani pengantaran di sekolah *j*, maka kendaraan *k* yang sama juga harus melayani pengambilan di sekolah *j* tersebut.
 13. Jumlah total rute yang keluar dari depo yang aktif tidak boleh lebih dari 2 *unit* armada.
 14. *Dual Time Windows*:

Tabel 3.1 *Time Windows*

Tipe <i>Time windows</i>	Klaster Jenjang Pendidikan	Waktu Pengantaran Ompreng	Waktu Penjemputan Ompreng
<i>Time windows 1</i>	PAUD dan TK	07.30 WIB - 08.30 WIB	09.30 WIB - 11.00 WIB

Tipe <i>Time windows</i>	Klaster Jenjang Pendidikan	Waktu Pengantaran Ompreng	Waktu Penjemputan Ompreng
<i>Time windows 2</i>	Sekolah Dasar (SD)	08.30 WIB - 10.00 WIB	11.00 WIB - 12.30 WIB
<i>Time windows 3</i>	SMP dan SMA	11.30 WIB - 12.30 WIB	12.30 WIB - 14.00 WIB

15. Menjamin kendaraan tidak melakukan *trip* kedua jika *trip* pertama tidak dijalankan, serta memastikan *trip* berikutnya dimulai setelah *trip* sebelumnya kembali ke dapur MBG.

16. Satu armada bisa mengantar di *Trip 1* dan mengambil ompreng di *Trip 2*.

3.6.1 Nilai *Circuitry Factor*

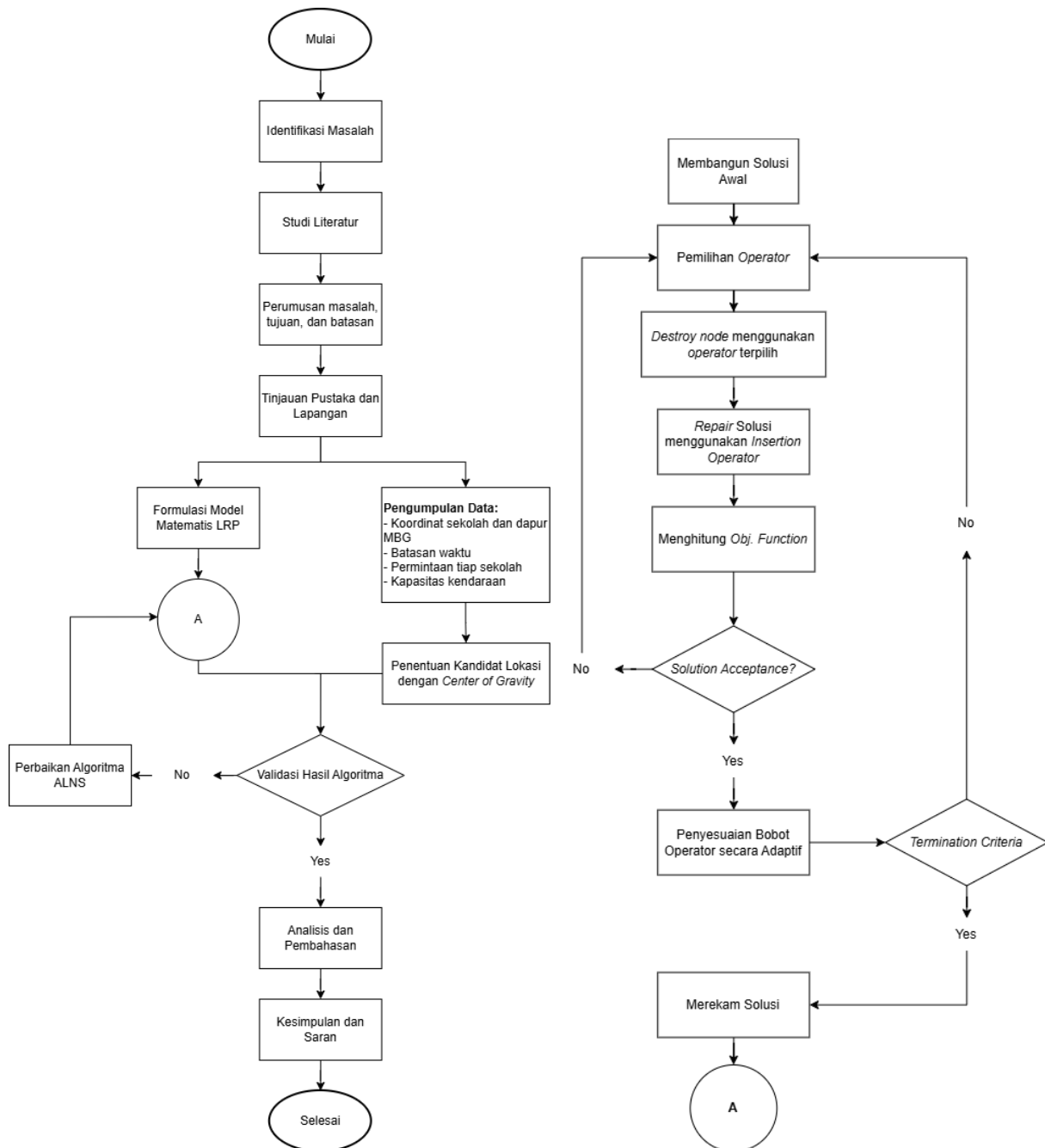
Dalam pemodelan distribusi, jarak garis lurus belum mampu merepresentasikan jarak tempuh aktual pada jaringan jalan. Oleh karena itu, digunakan *Circuitry Factor* (CF), yaitu koefisien pengali untuk mengubah jarak geometris menjadi estimasi network distance yang lebih realistis. Nilai CF dipengaruhi oleh konektivitas jalan, tata guna lahan, dan karakteristik wilayah. Pada kawasan sub-urban seperti Kecamatan Ngemplak, pola jaringan jalan menyebabkan jarak aktual cenderung lebih panjang dibandingkan jarak Euclidean. Berdasarkan penelitian Ballou et al. (2002), nilai *Circuitry Factor* untuk jaringan jalan di Indonesia sebesar 1,43, sehingga seluruh matriks jarak pada penelitian ini dikalikan dengan nilai tersebut agar lebih mendekati kondisi operasional nyata.

3.6.2 Waktu Pelayanan

Proses distribusi tidak hanya melibatkan waktu perjalanan, namun juga melibatkan waktu pelayanan (*service time*) di setiap lokasi penerima. *Service time* adalah durasi total yang diperlukan untuk menuntaskan satu siklus pelayanan (Fadlilah et al., 2017). Dalam konteks penelitian ini, aktivitas tersebut meliputi proses bongkar muat dan pengecekan paket makanan sebelum diserahkan. Mengingat setiap lokasi memiliki volume permintaan yang beragam, penelitian ini mengasumsikan *service time* standar sebesar 10 menit. Angka ini merujuk pada waktu pelayanan di lokasi dengan jumlah pesanan terbanyak, sehingga durasi tersebut dapat digunakan sebagai standar waktu maksimal sekaligus cadangan waktu aman untuk menjamin ketepatan rute pendistribusian.

3.7 Alur Penelitian

Alur penelitian ini memetakan seluruh rangkaian kegiatan pengembangan dan perancangan studi secara kronologis. Kerangka kerja operasional yang mencakup seluruh proses penelitian dapat dilihat pada diagram di bawah ini:



Gambar 3.1 Alur Penelitian

Berikut merupakan tahapan yang dilalui dalam melakukan penelitian ini:

1. Mulai

2. Identifikasi Masalah: Pada tahap ini, peneliti melakukan identifikasi masalah terkait implementasi program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak. Permasalahan utama yang ditemukan adalah belum adanya penentuan lokasi dapur umum yang optimal dan perencanaan rute distribusi yang masih bersifat manual. Hal ini berisiko pada keterlambatan pengiriman makanan yang bersifat *perishable* (mudah rusak), sehingga diperlukan pendekatan ilmiah untuk menjamin makanan sampai tepat waktu dan dalam kondisi kualitas yang terjaga.

3. Tahap selanjutnya adalah melakukan studi literatur untuk mencari informasi dan teori pendukung dalam memecahkan masalah. Peneliti mempelajari konsep *Location Routing Problem* (LRP), penggunaan metode *Center of Gravity* untuk penentuan titik berat fasilitas, serta mekanisme kerja algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) dalam menyelesaikan optimasi rute dengan batasan waktu yang kompleks.

4. Berdasarkan identifikasi masalah, peneliti merumuskan ruang lingkup penelitian yang difokuskan pada minimasi total jarak tempuh distribusi di Kecamatan Ngemplak. Peneliti juga menentukan batasan masalah agar penelitian lebih terarah, seperti penggunaan titik koordinat riil dari *Google Maps*, pemenuhan kapasitas armada mobil, serta batasan *dual time windows* (jadwal antar makanan dan jadwal jemput wadah makanan).

5. Tinjauan Pustaka dan Lapangan: Tahap ini mencakup persiapan teknis sebelum pengolahan data dilakukan, yang terbagi menjadi dua jalur paralel:

- Formulasi Model Matematis LRP: Peneliti merancang fungsi tujuan (minimasi jarak) dan batasan-batasan matematis yang mencakup keterkaitan antara lokasi fasilitas dan rute kendaraan.
- Pengumpulan Data: Peneliti mengumpulkan data riil yang meliputi koordinat sekolah dan kandidat dapur (dalam format UTM), batasan jendela waktu setiap sekolah, jumlah permintaan makan tiap sekolah (*demand*), serta kapasitas angkut kendaraan.

6. Penentuan Kandidat Lokasi dengan *Center of Gravity*: Setelah data terkumpul, peneliti menggunakan metode *Center of Gravity* untuk menghitung titik berat geografis berdasarkan sebaran permintaan sekolah. Hasil dari tahap ini adalah penentuan kandidat lokasi dapur MBG yang paling strategis secara spasial sebelum diolah lebih lanjut dalam perencanaan rute.

7. Pengolahan Data Menggunakan Algoritma ALNS. Tahap ini merupakan inti dari pemecahan masalah (yang direpresentasikan melalui konektor A). Setelah data kandidat lokasi dari tahap

Center of Gravity dan data operasional terkumpul, peneliti menggunakan Python untuk menyelesaikan *Location Routing Problem* (LRP). Algoritma ALNS diimplementasikan untuk menentukan lokasi dapur MBG yang terpilih sekaligus merancang rute distribusi paling optimal yang meminimalkan total jarak dengan tetap mematuhi batasan kapasitas armada dan *time windows* sekolah. Berikut merupakan langkah-langkah detail pengolahan data menggunakan algoritma ALNS:

1) Input Data dan Inisialisasi Parameter

Pada tahap awal (Konektor A), dilakukan input data teknis yang meliputi matriks jarak UTM antar koordinat, data permintaan (*demand*) makan tiap sekolah, serta jendela waktu (*time windows*) pengantaran dan penjemputan. Peneliti juga menentukan nilai parameter ALNS.

2) Membangun Solusi Awal

Peneliti membentuk solusi/rute pertama sebagai basis pencarian rute usulan. Solusi awal ini menghubungkan kandidat dapur terpilih dengan sekolah-sekolah di Kecamatan Ngemplak sedemikian rupa sehingga seluruh permintaan terpenuhi tanpa melanggar batasan kapasitas kendaraan.

3) Pemilihan Operator

Dalam setiap iterasi, algoritma ALNS memilih sepasang operator *Destroy* dan *Repair*. Peluang terpilihnya suatu operator didasarkan pada bobot probabilitas yang mencerminkan performa operator tersebut dalam menemukan solusi yang lebih baik pada iterasi-iterasi sebelumnya.

4) *Destroy Node* Menggunakan Operator Terpilih

Tahap ini dilakukan untuk menghancurkan sebagian solusi saat ini dengan menghapus beberapa titik (sekolah) dari rute yang ada.

5) *Repair* Solusi Menggunakan *Insertion Operator*

Titik-titik sekolah yang telah dihapus kemudian dimasukkan kembali ke dalam rute menggunakan operator perbaikan.

6) Menghitung *Objective Function*

Setelah solusi diperbaiki, peneliti menghitung nilai fungsi tujuan berupa total jarak tempuh keseluruhan rute. Pada tahap ini, algoritma juga memastikan bahwa solusi baru tetap mematuhi batasan *time windows* agar makanan tetap segar saat diterima oleh siswa.

7) *Solution Acceptance*

Solusi baru akan dievaluasi, jika solusi baru lebih baik, maka solusi tersebut otomatis diterima (*Yes*); namun jika lebih buruk (*No*), solusi tersebut tetap memiliki peluang untuk diterima berdasarkan nilai probabilitas tertentu guna mencegah algoritma terjebak dalam solusi lokal (*local optima*).

8) Penyesuaian Bobot Operator secara Adaptif

Algoritma melakukan pembaruan skor dan bobot bagi operator *Destroy* dan *Repair* yang baru saja digunakan. Operator yang berhasil menemukan solusi terbaik global atau solusi yang lebih baik dari sebelumnya akan mendapatkan peningkatan bobot yang lebih besar, sehingga lebih sering terpilih pada iterasi berikutnya.

9) *Termination Criteria*

Peneliti menetapkan batas iterasi maksimal sebagai kriteria penghentian algoritma. Jika batas tersebut belum tercapai (*No*), algoritma kembali ke tahap pemilihan operator; namun jika sudah terpenuhi (*Yes*), proses pencarian rute berakhir.

10) Merekam Solusi

Tahap akhir dari pengolahan data adalah menyimpan solusi terbaik yang ditemukan selama seluruh proses iterasi. Solusi ini mencakup konfigurasi lokasi dapur terpilih dan desain rute distribusi optimal di Kecamatan Ngemplak yang akan digunakan dalam tahap analisis dan pembahasan.

8. Validasi Hasil Algoritma: Setelah solusi ditemukan, dilakukan tahap validasi untuk memastikan hasil algoritma ALNS bersifat efektif dan layak. Jika hasil tidak memenuhi batasan atau dianggap belum stabil (*No*), maka peneliti akan kembali ke tahap sebelumnya. Perbaiki Algoritma ALNS untuk menyesuaikan parameter atau logika sistem. Jika hasil sudah tervalidasi (*Yes*), proses dilanjutkan ke tahap berikutnya.

10. Analisis dan Pembahasan: Pada tahap ini, peneliti melakukan analisis mendalam terhadap solusi rute usulan yang terbentuk. Pembahasan mencakup perbandingan efisiensi antara kondisi awal dengan hasil optimasi ALNS untuk mengetahui persentase minimasi jarak tempuh serta dampak penghematan biaya operasional bagi pengelola program MBG.

11. Kesimpulan dan Saran Peneliti menyusun kesimpulan yang menjawab rumusan masalah mengenai lokasi dapur dan rute distribusi yang paling optimal di Kecamatan Ngemplak. Selain itu, diberikan saran strategis bagi pemerintah sebagai bahan pertimbangan operasional program nasional dan rekomendasi bagi peneliti selanjutnya.

12. Selesai

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Profil Program

Badan Gizi Nasional (BGN) dibentuk melalui Peraturan Presiden Nomor 83 Tahun 2024 sebagai otoritas pusat di bawah Presiden untuk mengatasi tantangan malnutrisi kronis di Indonesia. Dengan alokasi anggaran Rp71 triliun pada tahun 2025, lembaga ini mengemban mandat transformasi tata kelola gizi, termasuk pengalihan fungsi kerawanan gizi dari Badan Pangan Nasional guna memastikan intervensi gizi mikro yang lebih fokus dan terakreditasi. Secara operasional, kebijakan ini dilaksanakan melalui 25.574 unit Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) per Maret 2026 yang menerapkan model desentralisasi produksi. Infrastruktur logistik ini bertujuan mengatasi kendala geografis serta memastikan kualitas organoleptik makanan agar tetap segar dan hangat saat disajikan kepada populasi sasaran seperti peserta didik, ibu hamil, ibu menyusui, dan balita. Program Makan Bergizi Gratis (MBG) mengintegrasikan standar klinis dengan digitalisasi melalui pelibatan tenaga ahli gizi untuk kalkulasi Angka Kecukupan Gizi (AKG) yang presisi. Dari sisi akuntabilitas fiskal, BGN menyalurkan 93% anggaran langsung ke daerah melalui mekanisme *virtual account* untuk memastikan operasional yang transparan. Selain protokol keamanan pangan yang ketat melalui sertifikasi SLHS dan prinsip HACCP, program ini menciptakan *multiplier effect* ekonomi dengan mewajibkan penyerapan komoditas dari produsen pangan lokal di sekitar SPPG. Melalui estimasi perputaran modal sebesar Rp1 miliar per bulan di setiap unit layanan, MBG bertransformasi menjadi instrumen penguatan ekonomi kerakyatan sekaligus menjaga ketahanan pangan nasional secara berkelanjutan.

Implementasi kebijakan nasional ini secara spesifik dapat ditelaah lebih mendalam melalui unit-unit layanan teknis di tingkat lokal. Fokus pembahasan selanjutnya akan diarahkan pada analisis operasional terhadap 8 unit SPPG yang menjadi pilar utama distribusi Makan Bergizi Gratis di wilayah Kecamatan Ngemplak.

4.1.2 Formulasi Masalah

Pada penelitian yang dilakukan yaitu menyelesaikan optimasi *Location Routing Problem* (LRP) pada distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak untuk meningkatkan efisiensi operasional dan ketepatan layanan melalui pendekatan saintifik. Fokus utama

permasalahannya yaitu mengintegrasikan keputusan strategis pemilihan lokasi dapur pusat dengan keputusan taktis penyusunan rute distribusi secara simultan guna menangkap interdependensi antar keduanya. Urgensi penelitian ini didasarkan pada karakteristik makanan matang yang bersifat *perishable* atau mudah rusak, sehingga distribusi menjadi aspek krusial untuk memastikan makanan tiba tepat waktu dalam kondisi layak agar tujuan pemenuhan gizi tercapai. Tantangan nyata di lapangan menunjukkan bahwa praktik penjadwalan yang masih manual dan mengandalkan kebiasaan pelaksana berpotensi menimbulkan keterlambatan serta jarak tempuh yang tidak efisien. Dengan melibatkan 8 unit Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) sebagai fasilitas distribusi dan 169 titik penerima manfaat, penelitian ini merinci berbagai batasan ketat seperti kapasitas kendaraan yang homogen, kapasitas setiap depo, serta batasan *dual time windows* yang mengatur jadwal pengantaran makanan panas dan penjemputan kembali wadah kosong dalam satu siklus rute. Hambatan operasional diperumit dengan kebutuhan skema *multi-trip*, di mana armada terbatas harus melakukan serangkaian perjalanan majemuk untuk menjamin seluruh sekolah tercakup tanpa menyebabkan pembengkakan jumlah kendaraan yang tidak perlu.

Berdasarkan kompleksitas masalah tersebut, penelitian ini diklasifikasikan ke dalam jenis kasus *Multi-Trip Location-Routing Problem with Time Windows* (MTLRP-TW). Untuk menyelesaikan permasalahan ini, digunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) karena kemampuannya yang unggul dalam menangani masalah kelas *NP-hard* yang tidak praktis jika diselesaikan dengan metode eksak. ALNS dipilih karena fleksibilitasnya dalam memilih operator penghancuran (*destroy*) dan perbaikan (*repair*) secara adaptif berdasarkan kinerja historis, sehingga sangat efektif untuk merestrukturisasi rute yang kompleks dengan batasan waktu yang kaku. Selain itu, integrasi kriteria penerimaan berbasis probabilistik dari *Simulated Annealing* (SA) ke dalam ALNS memungkinkan algoritma untuk mengeksplorasi ruang solusi secara luas dan menghindari jebakan optimum lokal, sehingga mampu menghasilkan solusi distribusi yang paling efisien, rasional, dan solutif bagi keberlanjutan program nasional ini.

4.1.3 Data Penelitian

Data yang diintegrasikan dalam pengolahan model *Location Routing Problem* (LRP) menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) ini mencakup parameter teknis yang meliputi titik koordinat Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) dan

sekolah, batasan *dual time windows*, kapasitas armada, besaran permintaan (*demand*) per sekolah, serta standar waktu pelayanan (*service time*). Ekstraksi titik koordinat tersebut digunakan sebagai input untuk membangun matriks jarak berbasis satuan metrik UTM guna menentukan rute distribusi paling efisien dengan mempertimbangkan ketepatan jadwal pengantaran makanan dan pengambilan kembali wadah di setiap titik penerima manfaat. Objek penelitian ini difokuskan pada sistem distribusi di wilayah Kecamatan Ngemplak yang melibatkan 8 unit SPPG sebagai fasilitas utama dan 169 titik penerima manfaat sebagai lokasi permintaan. Berikut merupakan data titik koordinat setiap *node*:

Tabel 4.1 Titik Koordinat UTM

Nama Node	Kode	Decimal Degrees		UTM	
		Latitude	Longitude	East (X)	North (Y)
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1	A	-7.672197425	110.4170315	435705.997	9151897.283
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 2	B	-7.680444733	110.4181044	435825.565	9150985.659
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 3	C	-7.672185375	110.4170295	435705.775	9151898.615
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 4	D	-7.673429803	110.4199116	436023.83	9151761.467
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1	E	-7.695831616	110.4687609	441414.497	9149291.823
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2	F	-7.687632576	110.4556801	439970.741	9150196.453
SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTANI 1	H	-7.680617535	110.4181396	435829.473	9150966.56
SPPG NGAGLIK 02	I	-7.684754873	110.425169	436605.35	9150510.202
KB Bintang Mulia	1	-7.678677675947610	110.4138858437920	435360.038	9151180.383
KB Among Siwi	2	-7.665155356062900	110.4186085289460	435878.875	9152676.057
SPS Puspita VIII	3	-7.678586562986290	110.4089244623020	434812.837	9151189.705
...	...	...	...	...	...

SD Alam Anak Prima	167	- 7.7415600000000000	110.4186200000000000	435891.629	9144229.104
MTS Anwar Futuhiyyah	168	-7.7373846000000000	110.41978520000000	436019.49	9144690.894
SMK YPKK 3 Yogyakarta	169	- 7.7397100000000000	110.4143200000000000	435417.174	9144432.982

Selain titik koordinat, dalam penelitian ini juga terdapat batasan waktu yang telah ditetapkan berdasarkan pilihan waktu pengantaran dan kebutuhan tiap penerima manfaat. Berikut merupakan *time windows* tersedia:

Tabel 4.2 Tipe *Time Windows*

	Waktu Pengantaran	Waktu Penjemputan
<i>Time Windows 1</i>	07.30 WIB - 08.30 WIB	09.30 WIB - 11.00 WIB
<i>Time Windows 2</i>	08.30 WIB - 10.00 WIB	11.00 WIB - 12.30 WIB
<i>Time Windows 3</i>	11.30 WIB - 12.30 WIB	12.30 WIB - 14.00 WIB

Selain itu, pada setiap penerima manfaat juga memiliki data *delivery demand* dalam bentuk satuan porsi. Berikut merupakan data *earliest time* dan *latest time* beserta dengan *demand* dari masing masing *node* yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 4.3 *Time Windows* dan *Demand*

Kode	<i>Time Windows</i>	Time Windows Antar	Time Windows Jemput	Porsi per Sekolah
1	1	0, 60 menit	120, 210 menit	24
2	1	0, 60 menit	120, 210 menit	35
3	1	0, 60 menit	120, 210 menit	22
4	1	0, 60 menit	120, 210 menit	83
5	1	0, 60 menit	120, 210 menit	32
...	...	...	...	...
166	2	60, 150 menit	210, 300 menit	185
167	2	60, 150 menit	210, 300 menit	59
168	3	240, 300 menit	300, 390 menit	155
169	3	240, 300 menit	300, 390 menit	107

Berdasarkan tabel 4.3 merupakan batasan waktu pelayanan (*time windows*) yang telah ditetapkan sehingga proses pendistribusian MBG harus sesuai batasan waktu yang

diperbolehkan. Terdapat 84 penerima manfaat dengan aturan *time windows* 1, 42 penerima manfaat dengan aturan *time windows* 2, dan 43 penerima manfaat dengan aturan *time windows* 3. Pada proses distribusi juga tiap SPPG diasumsikan rata rata waktu pelayanan pada masing masing penerima manfaat selama 10 menit. Selain itu terdapat data lainnya yang mendukung pengolahan data pada penelitian ini, sebagai berikut:

Tabel 4.4 Data Pendukung

Jenis kendaraan	Daihatsu Grandmax
Jumlah kendaraan	2 kendaraan/SPPG
Kapasitas kendaraan	1015 porsi
Rata-rata kecepatan kendaraan	24,1 km/jam
Waktu layanan rata-rata	10 menit
Rasio konsumsi BBM	1:10,6
Harga BBM/liter	Rp10.000,00

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Rute Dapur

Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, diperoleh gambaran awal mengenai pola distribusi Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak yang saat ini digunakan sebagai acuan operasional. Rute distribusi tersebut disusun menjadi dasar pembandingan dalam proses evaluasi dan pengembangan rute usulan pada penelitian ini.

Tabel 4.5 Rute Awal

SPPG	Vehicle	Trip	Rute	Trip Load	Total Jarak (km)
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1	1	1	15 - 9 - 6 - 11 -	1011	2.083335
			8 - 12 - 17 - 2 -		
			18		
	1	2	13	828	8.220047
	2	1	5 - 10 - 16 - 7 -	909	6.893651
			14 - 1 - 3 - 4		

SPPG	Vehicle	Trip	Rute	Trip Load	Total Jarak (km)
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 2	1	1	23 - 22 - 19 - 20	912	7.411824
	2	1	24	718	6.487985
	2	2	21	614	6.571988
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 3	1	1	39 - 38 - 27 - 37 - 36 - 32 - 30 - 26 - 25	1009	11.439168
	1	2	34	359	20.83735
	2	1	35 - 28 - 29 - 33	845	15.601581
	2	2	31	685	20.83735
	1	1	68 - 46 - 45 - 44 - 51 - 67 - 66 - 65 - 59 - 54 - 49 - 62 - 52 - 55 - 47 - 56	1001	18.80229
SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 4	2	1	60 - 40 - 61 - 41 - 48 - 42 - 63 - 43 - 53 - 50	995	16.93561
	2	2	57 - 58 - 64	231	16.531803
	1	1	91 - 70 - 93 - 80 - 84 - 69 - 87 - 88 - 79 - 90 - 76 - 96 - 73 - 71	1008	6.959055
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 1	2	1	86 - 98 - 89 - 94 - 95 - 92 - 75	999	5.902026
	2	2	78 - 77 - 74 - 81 - 83 - 97 - 82 - 72 - 85	748	53.246795
	1	1	114 - 99 - 100 - 113 - 111 - 112 - 106 - 107 - 108 - 102	1007	9.47372
SPPG SLEMAN NGEMPLAK BIMOMARTANI 2	2	1	115 - 101 - 105 - 103 - 110 - 109	982	15.007488
	2	2	104	121	21.37322

SPPG	Vehicle	Trip	Rute	Trip Load	Total Jarak (km)
SPPG SLEMAN NGEMPLAK WEDOMARTANI 1	1	1	131 - 126 - 121 - 116 - 120 - 117 - 125 - 127 - 124 - 118	1002	11.651653
			122 - 28		
			135 - 136 - 130 - 133 - 134 - 132 - 137 - 119 - 129 - 123		
	2	1	122 - 28	218	7.851341
SPPG NGAGLIK 02	1	1	147 - 157 - 148 - 164 - 158 - 159 - 138 - 162 - 155 - 146 - 143 - 141 - 169 - 139 - 160 - 140 - 167 - 144	1015	19.068927
			149 - 142 - 163 - 168 - 165 - 153 - 42 - 151 - 156 - 145 - 150		
			154 - 161 - 166		
	2	2	154 - 161 - 166	452	20.298965

4.2.2 Matriks Jarak

Berdasarkan hasil pengumpulan data yang dilakukan, diperoleh sebanyak 177 titik koordinat yang terdiri atas 8 dapur sebagai titik distribusi (hub) dan 169 titik penerima manfaat dalam program Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak. Data koordinat tersebut kemudian diolah untuk menghitung jarak antar setiap pasangan titik, sehingga dihasilkan sebuah matriks jarak yang merepresentasikan hubungan spasial antar seluruh lokasi yang terlibat. Matriks jarak ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan rute distribusi yang efisien bagi setiap kendaraan. Selain itu, matriks jarak juga dimanfaatkan untuk mengestimasi waktu tempuh antar titik dengan mempertimbangkan kecepatan rata-rata kendaraan, sehingga dapat diketahui waktu kedatangan kendaraan pada setiap lokasi tujuan. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa proses distribusi dapat memenuhi batasan *time windows* yang telah ditetapkan pada masing-masing sekolah. Proses pengolahan data koordinat menjadi matriks jarak dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

i/j	SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMAR TANI 1	SPPG SLEMAN NGEMPL AK UMBULM ARTANI 2	SPPG SLEMAN NGEMPLA K UMBULMA RTANI 3	SPPG SLEMAN NGEMPLA K UMBULMA RTANI 4	KB Bintang Mulia	KB Among Siwi	SPS Puspita VIII	SMK YPKK 3 Yogyak arta
SMK YPKK 3 Yogyakarta	7469.886756	6565.39100 7	7471.209181	7353.551788	6747.642 905	8255.994 99	6783.695 815	... 0

4.2.3 Estimasi Network Distance Berbasis Circuity Factor

Dalam proses konversi jarak *Euclidean* ke estimasi jarak jaringan jalan, penelitian ini menggunakan pendekatan circuity factor dengan rumus:

$$D_{net\ estimasi} = 1,43 \times D_{euc}$$

Sebagai contoh, jarak *Euclidean* sebesar 0,978 km antara TK Harjobinangun dan SPPG Sleman Ngemplak Umbulmartani 4 dikonversi menjadi jarak jaringan estimasi sebesar 1,39854 km atau dibulatkan menjadi 1,40 km. Konversi ini dilakukan agar nilai jarak yang digunakan dalam pemodelan lebih merepresentasikan kondisi perjalanan aktual pada jaringan jalan yang dilalui kendaraan distribusi.

4.2.4 Waktu Tempuh

Dalam proses penentuan rute distribusi Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak, waktu tempuh digunakan untuk menghitung total durasi perjalanan antar titik distribusi, sehingga dapat dievaluasi apakah waktu tersebut masih berada dalam batasan *time windows* yang telah ditetapkan. Waktu tempuh diperoleh dengan membagi jarak antar dua titik dengan kecepatan rata-rata kendaraan yang digunakan dalam proses distribusi. Pada penelitian ini, satuan waktu yang digunakan adalah menit. Berikut merupakan contoh perhitungan waktu tempuh antara titik SPPG SLEMAN NGEMPLAK UMBULMARTANI 1 (Catering Box 3 Putri 1) dan KB Among Siwi:

$$\text{Jarak} = 0.797731625 \text{ km}$$

$$\text{Kecepatan rata-rata kendaraan} = 24,1 \text{ km/jam}$$

$$\text{Waktu tempuh} = \frac{\text{jarak tempuh}}{\text{kecepatan rata-rata}} = \frac{0.797731625}{24,1} = 0,033 \text{ jam} = 1.986 \text{ menit}$$

4.2.5 Penentuan Titik Kandidat Dapur dengan Center of Gravity

Penentuan lokasi fasilitas distribusi dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan matematis menggunakan metode *Center of Gravity* (COG) untuk mengidentifikasi titik

koordinat dapur yang paling strategis berdasarkan sebaran geografis sekolah penerima manfaat. Metode ini mengintegrasikan data koordinat lokasi tujuan dengan besaran volume permintaan (*demand*) sebagai variabel pembobot utama guna meminimalkan total biaya transportasi dan jarak tempuh rata-rata dalam jaringan distribusi. Secara operasional, penentuan lokasi dapur program Makan Bergizi Gratis (MBG) ini mengacu pada penghitungan pusat gravitasi permintaan yang direpresentasikan melalui persamaan berikut:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

dengan keterangan:

x = Titik koordinat fasilitas baru pada sumbu x

y : Titik koordinat fasilitas baru pada sumbu y .

x_i : Titik koordinat lokasi sekolah i pada sumbu x .

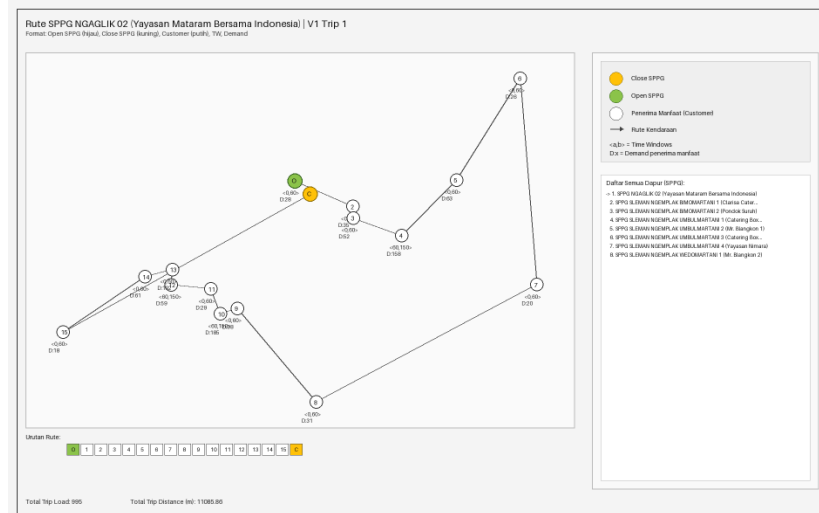
y_i : Titik koordinat lokasi sekolah i pada sumbu y

W_i : Bobot atau volume pengiriman porsi harian pada lokasi i .

sehingga diperoleh titik koordinat sebagai berikut:

Tabel 4.7 Titik Koordinat Kandidat Dapur

SPPG	x	y
SPPG 1	435654.62	9152452.36
SPPG 2	437429.07	9145669.62
SPPG 3	441422.95	9148760.8
SPPG 4	432129.49	9147642.78
SPPG 5	435126.69	9144478.6
SPPG 6	433193.28	9149957.43
SPPG 7	439020.43	9149866.71
SPPG 8	436153.52	9149248.27



Gambar 4.1 Solusi Representatif

Visualisasi rute pada gambar tersebut merepresentasikan contoh solusi rute operasional untuk unit SPPG yang dirancang menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS). Rute ini menempuh total jarak distribusi sebesar 11.085,86 meter dengan total muatan (*trip load*) mencapai 995 porsi, yang secara presisi tetap berada di bawah kapasitas maksimum armada sebesar 1015 porsi.

4.2.6 Proses Algoritma Adaptive Large Neighborhood Search

Algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) digunakan untuk mencari solusi yang mendekati optimal dalam penentuan rute distribusi dengan memanfaatkan pendekatan *local search*, di mana pencarian solusi dilakukan dalam lingkungan yang dibentuk dari solusi awal. Dalam konteks penelitian ini, ALNS diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan distribusi Makan Bergizi Gratis di Kecamatan Ngemplak melalui implementasi menggunakan bahasa pemrograman *Python*. Proses penerapannya dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Inisialisasi Data

Tahap ini merupakan proses penginputan data spasial dan parameter operasional program MBG di Kecamatan Ngemplak sebagai landasan perhitungan algoritma. Data yang diinisialisasi meliputi matriks jarak berdasarkan titik koordinat metrik (UTM) dari 8 kandidat dapur (hasil *Center of Gravity*) dan 169 sekolah penerima manfaat, besaran permintaan (porsi) tiap sekolah, serta batasan operasional berupa *dual time windows* (jendela waktu pengantaran dan penjemputan).

Tabel 4.8 *Pseudocode* Inisialisasi Data

<i>Pseudocode</i>	<i>Fungsi</i>
<pre> Algorithm 1: Data Initialization Input: Coordinate data of 169 beneficiaries, coordinate data of 8 initial kitchens, coordinate data of 8 COG kitchen candidates, school time windows, and demand data Output: Initialized dataset in UTM coordinates Import beneficiary data from Daftar SPPG dan Penerima Manfaat.csv Import initial kitchen coordinate data Import COG kitchen candidate coordinate data Import school time windows data Import demand data B ← set of beneficiaries D ← set of initial kitchens G ← set of COG kitchen candidates for each beneficiary b ∈ B do Read latitude and longitude of beneficiary b Convert latitude and longitude into UTM coordinates Store UTM coordinate of beneficiary b end for each initial kitchen d ∈ D do Read latitude and longitude of initial kitchen d Convert latitude and longitude into UTM coordinates Store UTM coordinate of initial kitchen d end for each COG kitchen candidate g ∈ G do Read latitude and longitude of COG kitchen candidate g Convert latitude and longitude into UTM coordinates Store UTM coordinate of COG kitchen candidate g end for each beneficiary b ∈ B do Assign school time window to beneficiary b Assign demand value to beneficiary b end Generate initialized dataset using UTM coordinates return initialized dataset </pre>	Pada tahap ini, sistem mengimpor data primer penelitian yang meliputi: data koordinat 169 penerima manfaat (dari Daftar SPPG dan Penerima Manfaat.csv), data koordinat 8 Dapur Awalan dan 8 Kandidat Dapur COG (beserta nilai UTM-nya), data <i>Time Windows</i> (Jam Buka/Tutup sekolah), dan besaran <i>Demand</i> (porsi). Di tahap ini pula dilakukan konversi koordinat Latitude/Longitude menjadi koordinat UTM (<i>Universal Transverse Mercator</i>) agar perhitungan jarak diubah dari derajat bumi menjadi satuan ukur linear (kilometer/meter).

2. Penentuan Parameter

Penentuan parameter pada tahap ini difokuskan pada pengaturan variabel kontrol pencarian dan kriteria penerimaan *Simulated Annealing* (SA) sebagai indikator keberhasilan evaluasi.

Tabel 4.9 *Pseudocode* Penentuan Parameter

<i>Pseudocode</i>	Fungsi
Algorithm 2: Parameter Configuration Input: Operational constraints, penalty values, and ALNS search settings Output: Configured parameters for optimization process Initialize operational parameters $V_{\max} \leftarrow$ maximum number of vehicles assigned to each kitchen $V_{\max} \leftarrow 2$ $Q \leftarrow$ vehicle capacity Penalty $\leftarrow$ penalty value for constraint violation Initialize ALNS parameters $MaxIter \leftarrow 3000$ $SegmentLength \leftarrow 100$ $ReplicationSeed \leftarrow 3$ Initialize simulated annealing parameters $T_0 \leftarrow 1000$ $CoolingRate \leftarrow 0.99$ for each parameter p in operational parameters do Set parameter value according to real operational constraints end for each parameter a in ALNS parameters do Set parameter value according to experimental design end for each seed $r \in \{1, 2, \dots, ReplicationSeed\}$ do Set random seed r $T \leftarrow T_0$ for iteration $i \in \{1, 2, \dots, MaxIter\}$ do Execute ALNS search process Evaluate candidate solution using penalty mechanism if candidate solution violates operational constraints then Add Penalty to objective function value end Update temperature using simulated annealing cooling schedule $T \leftarrow CoolingRate \times T$ end end return configured parameters	Tahap ini mengkonfigurasi nilai batas (kendala) operasional dan parameter pencarian. Nilai-nilai batasan dunia nyata dimasukkan seperti kapasitas kendaraan (maks 2 unit/dapur) serta nilai penalti jika terjadi pelanggaran. Untuk ALNS, parameter pencarian diatur seperti: jumlah iterasi (3.000), panjang segmen pembaruan bobot (100), jumlah <i>seed</i> replikasi (3), serta parameter Suhu Awal (<i>Initial Temperature</i> = 1000) dan Faktor Pendingin (<i>Cooling Rate</i> = 0.99) untuk <i>Simulated Annealing</i>.

3. Perhitungan Total Jarak, Kapasitas Kendaraan, dan Waktu Kedatangan

Berdasarkan data yang telah diinputkan, fungsi evaluasi matematis dijalankan untuk mengalkulasi total jarak tempuh dari setiap sub-rute majemuk (*multi-trip*) yang terbentuk. Tahap ini juga menghitung akumulasi muatan untuk memastikan kesesuaian dengan kapasitas maksimum armada Grandmax (1015 porsi), serta mengestimasi waktu kedatangan di setiap sekolah berdasarkan kecepatan kendaraan dan waktu layanan (*service time*) guna mengevaluasi kepatuhan jadwal.

Tabel 4.10 *Pseudocode* Total Jarak, Kapasitas, dan Waktu

<i>Pseudocode</i>	<i>Fungsi</i>
Algorithm 3: Distance, Vehicle Capacity, and Arrival Time Calculation Input: UTM coordinates, distribution routes, beneficiary demand, vehicle capacity, departure time, service time, and vehicle speed Output: Total travel distance, vehicle load, capacity feasibility, and arrival time at each beneficiary <pre> R ← set of routes Q ← vehicle capacity v ← average vehicle speed for each route r ∈ R do d_total(r) ← 0 load(r) ← 0 t_current ← departure_time(r) i ← starting kitchen of route r for each beneficiary j ∈ r do d(i,j) ← Euclidean distance between location i and location j d_total(r) ← d_total(r) + d(i,j) travel_time(i,j) ← d(i,j) / v arrival_time(j) ← t_current + travel_time(i,j) load(r) ← load(r) + demand(j) t_current ← arrival_time(j) + service_time(j) i ← j end d(i,k) ← Euclidean distance between last beneficiary i and kitchen k d_total(r) ← d_total(r) + d(i,k) if load(r) ≤ Q then capacity_feasible(r) ← TRUE else capacity_feasible(r) ← FALSE capacity_violation(r) ← load(r) - Q Add penalty for capacity violation end Store d_total(r), load(r), capacity_feasible(r), and arrival_time(j) end TotalDistance ← Σ_{r∈R} d_total(r) return TotalDistance, load, capacity_feasible, and arrival_time </pre>	Berdasarkan Matriks Jarak, algoritma secara matematis menghitung panjang rute yang dilewati kendaraan dari keberangkatan di Dapur, berkeliling ke sekolah-sekolah (akumulasi jarak), hingga kembali lagi ke Dapur. Seiring Bergeraknya kendaraan, kapasitas tampung dipantau dengan mengakumulasi <i>Demand</i> tiap sekolah. Algoritma simulasi waktu (jam kedatangan) juga dihitung secara serial (Waktu Tiba = Waktu Berangkat + Waktu Tempuh + Waktu Bongkar Muat).

4. Uji Kelayakan Solusi (*Feasibility Check*)

Tahap ini memvalidasi kelayakan operasional dari rute yang terbentuk. Uji kelayakan (*feasibility test*) difokuskan pada pemenuhan batasan kapasitas armada dan *dual time windows*. Rute dievaluasi dengan pendekatan *soft constraint*, di mana pelanggaran waktu atau kapasitas selama proses pencarian akan menghasilkan penalti, namun solusi optimal akhir diwajibkan bernilai penalti nol (*strictly feasible*).

Tabel 4.11 *Pseudocode Feasibility Check*

Pseudocode	Fungsi
Algorithm 4: Solution Feasibility Check Input: route solution, vehicle load, arrival time, time windows, vehicle limit, and operational constraints Output: feasibility status and total penalty <pre> Feasible ← TRUE TotalPenalty ← 0 for r ∈ R do if load_r > Q then Feasible ← FALSE capacity_violation_r ← load_r - Q TotalPenalty ← TotalPenalty + P_capacity × capacity_violation_r end for b ∈ r do if arrival_time_b < open_time_b then Feasible ← FALSE early_violation_b ← open_time_b - arrival_time_b TotalPenalty ← TotalPenalty + P_time × early_violation_b end if arrival_time_b > close_time_b then Feasible ← FALSE late_violation_b ← arrival_time_b - close_time_b TotalPenalty ← TotalPenalty + P_time × late_violation_b end end end for d ∈ D do vehicle_used_d ← Count vehicle assigned to kitchen d if vehicle_used_d > Vmax then Feasible ← FALSE vehicle_violation_d ← vehicle_used_d - Vmax TotalPenalty ← TotalPenalty + P_vehicle × vehicle_violation_d end end for b ∈ B do visit_count_b ← Count visit of beneficiary b if visit_count_b ≠ 1 then Feasible ← FALSE assignment_violation_b ← visit_count_b - 1 TotalPenalty ← TotalPenalty + P_assignment × assignment_violation_b end end return Feasible and TotalPenalty </pre>	Tahap ini memeriksa kelayakan dari rute yang dievaluasi di Langkah 3 dengan cara membandingkannya terhadap aturan Parameter dari Langkah 2. Algoritma mengecek: apakah <i>current load</i> > <i>vehicle capacity</i>? Apakah <i>current time</i> > <i>Due Time</i> sekolah? Jika ada batasan yang dilanggar, algoritma akan menambahkan <i>Penalty Cost</i> ke dalam nilai Fungsi Objektif. Sebuah rute dikatakan <i>Feasible</i> (Valid) hanya jika seluruh <i>penalty</i>-nya bernilai nol.

5. Pembangkitan Solusi Awal (*Initial Solution Generation*)

Langkah awal dalam algoritma ALNS dimulai dengan membentuk solusi distribusi dasar. Solusi awal ini memetakan alokasi sekolah ke kandidat dapur terdekat dan menyusun urutan rute awal, yang selanjutnya akan menjadi *baseline* untuk proses optimasi pada iterasi-iterasi berikutnya.

Tabel 4.12 *Pseudocode* Solusi Awal dengan NN

<i>Pseudocode</i>	<i>Fungsi</i>
Algorithm 5: Initial Solution Generation Input: beneficiary data, kitchen candidate data, demand, capacity, time windows, and operational constraints Output: initial solution $B \leftarrow$ set of beneficiaries $D \leftarrow$ set of kitchen candidates $R \leftarrow \emptyset$ for $b \in B$ do $d^* \leftarrow$ nearest kitchen candidate to beneficiary b Assign b to d^* end for $d \in D$ do $B_d \leftarrow$ set of beneficiaries assigned to kitchen d Unvisited $\leftarrow B_d$ while Unvisited $\neq \emptyset$ do $r \leftarrow$ new route starting from kitchen d load_r $\leftarrow 0$ current_node $\leftarrow d$ while Unvisited $\neq \emptyset$ do $b^* \leftarrow$ nearest beneficiary from current_node if load_r + demand_$b^* \leq Q$ then Insert b^* into route r load_r $\leftarrow$ load_r + demand_b^* current_node $\leftarrow b^*$ Remove b^* from Unvisited else exit while end end Add r to R end end Calculate total distance of R Calculate load and arrival time of each route Check feasibility of R InitialSolution $\leftarrow R$ return InitialSolution	Sebelum pencarian berjalan, ALNS membutuhkan rute dasar untuk dirusak dan diperbaiki. Algoritma memasang setiap sekolah ke Dapur terdekat berdasarkan jarak <i>Euclidean</i>, lalu merangkai sekolah-sekolah tersebut ke dalam rute kendaraan dengan selalu memilih titik terdekat berikutnya, selama kapasitas kendaraan masih mencukupi.

6. Pembentukan Solusi Area Pencarian (*Destroy-Repair Mechanism*)

Tahap inti dari ALNS di mana modifikasi struktur rute dilakukan secara iteratif. Solusi akan dibongkar menggunakan operator *Worst Removal* atau *Spatio-Temporal (Shaw) Removal* untuk menghapus beberapa titik sekolah dari rute. Selanjutnya, rute direkonstruksi menggunakan operator *Regret-2 Insertion* atau *Multi-Trip Internal Depot Insertion* untuk

menyisipkan kembali titik tersebut ke posisi yang lebih optimal dan meminimalkan total jarak.

Tabel 4.13 *Pseudocode Operator Destroy & Repair*

Pseudocode	Fungsi
Algorithm 6: Destroy-Repair Mechanism in ALNS Input: Current solution S, destroy operator set O_d, repair operator set O_r, number of removed beneficiaries q, demand, capacity, time windows, and operational constraints Output: Candidate solution S' $S_{\text{partial}} \leftarrow S$ $\text{Removed} \leftarrow \emptyset$ Select destroy operator $od \in O_d$ based on adaptive operator weight Select repair operator $or \in O_r$ based on adaptive operator weight if $od = \text{WorstRemoval}$ then for $h \in \{1, 2, \dots, q\}$ do $b^* \leftarrow$ beneficiary with the largest cost contribution in S_{partial} Remove b^* from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b^*\}$ end end if $od = \text{SpatioTemporalShawRemoval}$ then $b_0 \leftarrow$ randomly selected beneficiary from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b_0\}$ Remove b_0 from S_{partial} while $\text{Removed} < q$ do $b^* \leftarrow$ beneficiary with the highest spatial-temporal relatedness to Removed Remove b^* from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b^*\}$ end end if $or = \text{Regret2Insertion}$ then while $\text{Removed} \neq \emptyset$ do for each beneficiary $b \in \text{Removed}$ do $c_1(b) \leftarrow$ best insertion cost of beneficiary b $c_2(b) \leftarrow$ second best insertion cost of beneficiary b $\text{regret}(b) \leftarrow c_2(b) - c_1(b)$ end $b^* \leftarrow$ beneficiary with the largest regret value Insert b^* into its best position in S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \setminus \{b^*\}$ end end if $or = \text{MultiTripInternalDepotInsertion}$ then while $\text{Removed} \neq \emptyset$ do for each beneficiary $b \in \text{Removed}$ do Evaluate feasible insertion positions in existing routes Evaluate insertion into new trip from the assigned kitchen Calculate insertion cost and operational feasibility end $b^* \leftarrow$ beneficiary with the minimum feasible insertion cost Insert b^* into selected position or trip $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \setminus \{b^*\}$ end end $S' \leftarrow S_{\text{partial}}$ Evaluate total distance, vehicle load, arrival time, and penalty of S' return S'	Berdasarkan solusi awal yang ada, <i>Destroy Operator</i> (Shaw Removal atau Worst Removal) akan menghapus sejumlah persentase sekolah dari rute saat ini secara strategis. Sekolah-sekolah yang terhapus ini kemudian akan dimasukkan kembali (<i>re-inserted</i>) oleh <i>Repair Operator</i> (Regret-2 atau <i>Multi-Trip Internal Depot Insertion</i>) ke posisi atau rute dapur lain yang secara perhitungan menghasilkan penambahan biaya (<i>delta cost</i>) paling murah.

<i>Pseudocode</i>	<i>Fungsi</i>
Algorithm 10: Worst Removal Operator Input: current solution S, number of removed beneficiaries q, objective function $f(\cdot)$ Output: partial solution S_{partial} and removed beneficiary set Removed <pre> $S_{\text{partial}} \leftarrow S$ $\text{Removed} \leftarrow \emptyset$ for $i \in \{1, 2, \dots, q\}$ do for each beneficiary $b \in S_{\text{partial}}$ do $S_{\text{without}_b} \leftarrow \text{Remove } b \text{ from } S_{\text{partial}}$ $\text{contribution}_b \leftarrow f(S_{\text{partial}}) - f(S_{\text{without}_b})$ end $b^* \leftarrow \text{beneficiary with maximum contribution}_b$ Remove b^* from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b^*\}$ end return S_{partial} and Removed </pre>	Operator <i>Worst Removal</i> digunakan untuk menghapus titik yang memberikan kontribusi biaya terbesar terhadap fungsi objektif.
Algorithm 11: Spatio-Temporal Shaw Removal Operator Input: current solution S, number of removed beneficiaries q, beneficiary coordinates, time windows, and demand Output: partial solution S_{partial} and removed beneficiary set Removed <pre> $S_{\text{partial}} \leftarrow S$ $\text{Removed} \leftarrow \emptyset$ $b_0 \leftarrow \text{randomly selected beneficiary from } S_{\text{partial}}$ Remove b_0 from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b_0\}$ while $\text{Removed} < q$ do for each beneficiary $b \in S_{\text{partial}}$ do $\text{relatedness}_b \leftarrow \text{CalculateRelatedness}(b, \text{Removed})$ end $b^* \leftarrow \text{beneficiary with the highest relatedness value}$ Remove b^* from S_{partial} $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \cup \{b^*\}$ end return S_{partial} and Removed </pre>	Operator <i>Spatio-Temporal Shaw Removal</i> digunakan untuk menghapus kelompok titik yang memiliki kedekatan lokasi, kemiripan waktu layanan, atau karakteristik <i>demand</i> yang serupa.

Pseudocode	Fungsi
Algorithm 12: Regret-2 Insertion Operator Input: partial solution S_{partial}, removed beneficiary set Removed, demand, vehicle capacity, time windows, and objective function $f(\cdot)$ Output: repaired solution S_{repaired} $S_{\text{repaired}} \leftarrow S_{\text{partial}}$ while $\text{Removed} \neq \emptyset$ do for each beneficiary $b \in \text{Removed}$ do Evaluate all feasible insertion positions for b in S_{repaired} Sort insertion positions by insertion cost $c1_b \leftarrow$ minimum insertion cost of b $c2_b \leftarrow$ second minimum insertion cost of b $\text{regret_b} \leftarrow c2_b - c1_b$ end $b^* \leftarrow$ beneficiary with maximum regret_b Insert b^* into position with minimum insertion cost $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \setminus \{b^*\}$ end return S_{repaired}	Operator <i>Regret-2 Insertion</i> digunakan untuk menyisipkan kembali titik berdasarkan selisih biaya antara posisi terbaik dan posisi kedua terbaik.
Algorithm 13: Multi-Trip Internal Depot Insertion Operator Input: partial solution S_{partial}, removed beneficiary set Removed, kitchen set D, demand, vehicle capacity, time windows, vehicle limit, and objective function $f(\cdot)$ Output: repaired solution S_{repaired} $S_{\text{repaired}} \leftarrow S_{\text{partial}}$ while $\text{Removed} \neq \emptyset$ do for each beneficiary $b \in \text{Removed}$ do $\text{best_cost_b} \leftarrow \infty$ $\text{best_position_b} \leftarrow \text{null}$ for each route $r \in S_{\text{repaired}}$ do for each insertion position p in route r do Insert b temporarily into position p Calculate additional distance, load, arrival time, and penalty if insertion cost $<$ best_cost_b then $\text{best_cost_b} \leftarrow$ insertion cost $\text{best_position_b} \leftarrow$ position p in route r end Remove temporary insertion of b end end for each kitchen $d \in D$ do if $\text{vehicle_used}(d) < V_{\text{max}}$ or additional trip is allowed then Create temporary new trip from kitchen d to beneficiary b Calculate distance, load, arrival time, and penalty if new trip cost $<$ best_cost_b then $\text{best_cost_b} \leftarrow$ new trip cost $\text{best_position_b} \leftarrow$ new trip from kitchen d end end end $b^* \leftarrow$ beneficiary with minimum best_cost_b Insert b^* into best_position_b $\text{Removed} \leftarrow \text{Removed} \setminus \{b^*\}$ end return S_{repaired}	Operator <i>Multi-Trip Internal Depot Insertion</i> digunakan untuk menyisipkan titik dengan mempertimbangkan rute eksisting maupun kemungkinan pembentukan trip tambahan dari dapur yang sama.

7. Perhitungan Fungsi Evaluasi

Setelah rute direkonstruksi oleh operator, solusi baru tersebut dievaluasi nilai fungsi objektifnya. Tahapan ini terdiri dari dua mekanisme utama:

a. Pembaruan Bobot Adaptif

Operator pembongkaran dan perbaikan yang berhasil menghasilkan rute optimal akan diberikan *reward* (peningkatan bobot). Mekanisme ini memastikan algoritma secara adaptif akan lebih sering memilih operator yang terbukti efektif pada iterasi berikutnya dibandingkan operator yang kinerjanya kurang baik.

Setelah sejumlah iterasi dalam satu segmen, bobot operator diperbarui dengan rerata *reward* segmen, lalu dikombinasikan dengan bobot lama menggunakan skema *moving update*. Secara matematis:

$$w_i^{(t+1)} = (1 - \rho)w_i^{(t)} + \rho\bar{s}_i$$

dengan:

$w_i^{(t)}$: bobot operator i pada segmen ke t

$\bar{s}_i$: rerata skor operator i pada segmen berjalan

$\rho \in (0,1) =$

```

Algorithm 7: Adaptive Operator Weight Updating

Input: Destroy operators Od, repair operators Or, segment length
       operator scores, operator usage counters, reaction factor
       and reward values
Output: Updated destroy and repair operator weights

Initialize weight_o for each operator o ∈ Od ∪ Or
Initialize score_o ← 0 for each operator o ∈ Od ∪ Or
Initialize usage_o ← 0 for each operator o ∈ Od ∪ Or

for iteration i ∈ {1, 2, ..., MaxIter} do
    Select destroy operator od ∈ Od based on its adaptive weight
    Select repair operator or ∈ Or based on its adaptive weight

    Generate candidate solution S' using od and or
    Evaluate objective value and feasibility of S'

    if S' improves the best-known solution then
        reward ← σ1
    else if S' improves the current solution then
        reward ← σ2
    else if S' is accepted as the current solution then
        reward ← σ3
    else
        reward ← 0
    end

    score_od ← score_od + reward
    score_or ← score_or + reward
    usage_od ← usage_od + 1
    usage_or ← usage_or + 1

    if i mod L = 0 then
        for each operator o ∈ Od ∪ Or do
            if usage_o > 0 then
                π_o ← score_o / usage_o
                weight_o ← (1 - ρ) × weight_o + ρ × π_o
            end
        end

        score_o ← 0
        usage_o ← 0
    end
end

return updated operator weights

```

Gambar 4.2 Pseudocode Pembaruan Bobot Adaptif

b. Acceptance Criteria

Mekanisme ini bertujuan menyeimbangkan dua kebutuhan utama pencarian: intensifikasi (memperkuat solusi yang lebih baik) dan diversifikasi (memberi peluang keluar dari jebakan lokal). Secara operasional, setiap solusi kandidat hasil kombinasi operator *destroy-repair* dibandingkan dengan solusi saat ini melalui selisih nilai fungsi objektif:

$$\Delta = f(s') - f(s)$$

dengan:

s: solusi saat ini

s': solusikandidat

f(·): fungsi objektif

Aturan penerimaannya adalah:

1. Jika $\Delta \leq 0$ maka solusi kandidat selalu diterima (karena lebih baik atau setara).

2. Jika $\Delta > 0$ maka solusi kandidat yang lebih buruk masih dapat diterima dengan probabilitas:

$$P(\text{terima}) = \exp\left(-\frac{\Delta}{T}\right)$$

Dimana T ada temperatur saat iterasi tersebut.

Nilai temperatur diturunkan secara bertahap dengan skema pendinginan:

$$T_{k+1} = c \cdot T_k, \quad 0 < c < 1$$

sehingga pada fase awal (temperatur tinggi), algoritma lebih toleran terhadap solusi memburuk (eksplorasi), sedangkan pada fase akhir (temperatur rendah), proses menjadi lebih selektif (eksploitasi). Dengan mekanisme ini, algoritma memiliki kemampuan untuk meningkatkan peluang menemukan solusi global atau mendekati global optimum pada ruang solusi yang kompleks.

```

Algorithm 8: Acceptance Criteria Using Simulated Annealing

Input: Current solution S, candidate solution S', best-known solution Sbest,
       current temperature T, cooling rate α, and objective function f(.)
Output: Updated current solution S and best-known solution Sbest

Calculate f(S)
Calculate f(S')
Calculate f(Sbest)

if f(S') < f(S) then
    Accept S' as the new current solution
    S ← S'

    if f(S') < f(Sbest) then
        Update best-known solution
        Sbest ← S'
    end

else
    Δ ← f(S') - f(S)
    P_accept ← exp(-Δ / T)
    u ← Generate random number between 0 and 1

    if u < P_accept then
        Accept worse solution for diversification
        S ← S'
    else
        Reject S'
        S ← S
    end

end

Update temperature
T ← α × T

return S and Sbest

```

Gambar 4.3 Pseudocode Acceptance Criteria

8. Eksekusi Iterasi ALNS

Tahap eksekusi ALNS merupakan tahap utama yang menjalankan seluruh proses optimasi secara iteratif. Pada setiap iterasi, algoritma memilih operator pembongkaran dan perbaikan berdasarkan bobot adaptif, kemudian membentuk solusi kandidat melalui mekanisme *destroy-repair*. Solusi kandidat selanjutnya dievaluasi berdasarkan total jarak, kapasitas kendaraan, waktu kedatangan, serta nilai penalti apabila terjadi pelanggaran kendala. Solusi kandidat kemudian diproses melalui mekanisme *acceptance criteria* berbasis *Simulated Annealing* untuk menentukan apakah solusi tersebut diterima sebagai solusi saat ini. Operator yang menghasilkan perbaikan solusi diberikan reward, yang kemudian digunakan untuk memperbarui bobot operator secara adaptif pada setiap segmen iterasi. Proses ini dilakukan hingga batas iterasi maksimum tercapai, dan solusi terbaik yang diperoleh selama proses pencarian ditetapkan sebagai solusi distribusi MBG yang paling efisien.

Algorithm 9: Adaptive Large Neighborhood Search Execution

Input: Initial solution S_0 , destroy operator set O_d , repair operator set O_r , maximum iteration $MaxIter$, segment length L , initial temperature T_0 , cooling rate α , reward values, and operational constraints

Output: Best distribution solution S_{best}

```

 $S \leftarrow S_0$ 
 $S_{best} \leftarrow S_0$ 
 $T \leftarrow T_0$ 

Initialize weight, score, and usage counter for each operator  $o \in O_d \cup O_r$ 

for iteration  $i \in \{1, 2, \dots, MaxIter\}$  do
    Select destroy operator  $od \in O_d$  based on adaptive weight
    Select repair operator  $or \in O_r$  based on adaptive weight

     $S' \leftarrow$  Generate candidate solution using destroy-repair mechanism
    Calculate total distance of  $S'$ 
    Calculate vehicle load and arrival time of  $S'$ 
    Evaluate feasibility of  $S'$ 
    Calculate objective value  $f(S')$  including penalty value

    if  $f(S') < f(S)$  then
         $S \leftarrow S'$ 

        if  $f(S') < f(S_{best})$  then
             $S_{best} \leftarrow S'$ 
            reward  $\leftarrow \sigma_1$ 
        else
            reward  $\leftarrow \sigma_2$ 
        end
    else
         $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ 
         $P_{accept} \leftarrow \exp(-\Delta / T)$ 
         $u \leftarrow$  random value in  $[0,1]$ 

        if  $u < P_{accept}$  then
             $S \leftarrow S'$ 
            reward  $\leftarrow \sigma_3$ 
        else
            reward  $\leftarrow 0$ 
        end
    end

    score_od  $\leftarrow$  score_od + reward
    score_or  $\leftarrow$  score_or + reward
    usage_od  $\leftarrow$  usage_od + 1
    usage_or  $\leftarrow$  usage_or + 1

    if  $i \bmod L = 0$  then
        for each operator  $o \in O_d \cup O_r$  do
            if usage_o  $> 0$  then
                 $\pi_o \leftarrow$  score_o / usage_o
                weight_o  $\leftarrow (1 - \rho) \times$  weight_o +  $\rho \times \pi_o$ 
            end

            score_o  $\leftarrow 0$ 
            usage_o  $\leftarrow 0$ 
        end
    end

     $T \leftarrow \alpha \times T$ 
end

return  $S_{best}$ 

```

Gambar 4.4 Pseudocode Running ALNS

4.2.7 Hasil Rute Terbaik

Berdasarkan proses pengolahan data menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) untuk menyelesaikan permasalahan *Multi-Trip Location-Routing Problem with Time Windows* (MTLRP-TW) pada distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak, telah diperoleh konfigurasi distribusi yang optimal. Algoritma ini berhasil

menyusun rute operasional untuk melayani 169 titik penerima manfaat yang teralokasi pada 8 fasilitas dapur (SPPG) aktif terpilih. Berikut merupakan rekapitulasi rute usulan yang dihasilkan dari masing-masing unit kendaraan:

Tabel 4.14 Tabel Rute Usulan

SPPG	Vehicle	Trip	Rute	Trip Load	Total Jarak euclidean (km)
SPPG SLEMAN NGEMPL AK UMBULM ARTANI 1	1	1	11 - 8 - 12 - 14 - 17 - 2 - 18	567	1.6581
	1	2	15 - 16	227	1.3975
	2	1	6 - 9 - 4 - 5 - 10	925	4.3849
SPPG SLEMAN NGEMPL AK UMBULM ARTANI 2	1	1	21 - 128 - 126	834	7.0617
	2	1	44 - 51 - 127 - 22 - 23	998	6.3434
SPPG SLEMAN NGEMPL AK UMBULM ARTANI 3	1	1	1 - 45 - 33 - 20 - 32 - 149 - 7 - 39	996	12.756
	2	1	30 - 26 - 35 - 25 - 28 - 72 - 85 - 82 - 104 - 29 - 37	965	26.7679
	2	2	97 - 36	754	7.1523
SPPG SLEMAN NGEMPL AK UMBULM ARTANI 4	1	1	40 - 42 - 46 - 120 - 49 - 54 - 62 - 38 - 27	852	20.2193
	2	1	117 - 125 - 56 - 63 - 59 - 65	533	12.2514
	2	2	66 - 67 - 68 - 124 - 24 - 3	890	11.4364
SPPG SLEMAN NGEMPL AK	1	1	86 - 92 - 75 - 78 - 77 - 74 - 88 - 80 - 93 - 84 - 69 - 87 - 96 - 89 - 98	906	14.225
	2	1	70 - 76 - 154 - 81 - 90 - 79 - 91	614	5.363
	2	2	73 - 106 - 94 - 71 - 95 - 102	812	4.2355

SPPG	Vehicle	Trip	Rute	Trip Load	Total Jarak euclidean (km)
BIMOMA RTANI 1					
SPPG SLEMAN NGEMPL AK	1	1	99 - 101 - 52 - 48 - 41 - 108 - 57 - 109 - 148 - 58 - 53 - 50 - 43	959	15.7789
BIMOMA RTANI 2	1	2	113	95	1.2454
	2	1	100 - 105 - 147 - 61 - 47 - 55 - 111 - 112	910	8.5837
	2	2	114 - 13 - 115	890	6.9643
SPPG SLEMAN NGEMPL AK WEDOMA RTANI 1					
	1	1	116 - 121 - 130 - 131 - 132 - 133 - 134 - 135 - 136 - 137	421	14.6686
	2	1	118 - 123 - 83 - 139 - 160 - 140 - 144 - 34 - 19 - 122	991	20.9839
	2	2	60 - 129 - 107 - 119	958	8.1023
SPPG NGAGLIK 02					
	1	1	103 - 138 - 141 - 153 - 165 - 159 - 158 - 164 - 150 - 64 - 157	960	14.5598
	1	2	31 - 168 - 163	1004	17.0033
	1	3	110	523	8.2055
	2	1	142 - 146 - 143 - 145 - 42 - 151 - 156 - 166 - 167 - 161 - 169 - 162 - 155	1004	14.6387

Berikut merupakan jarak total rute awal yang menggunakan jarak *euclidean* setelah disesuaikan dengan dikalikan dengan nilai *circuitry factor*:

Tabel 4. 15 Konversi Rute Awal

Indikator Pengukuran	Rute Awal	Nilai CF	Jarak Setelah Penyesuaian
Total Jarak Sekali Jalan (Hanya Antar)	367.73 km	1.43	525.85 km
Total Jarak Operasional (Antar + Jemput Rantang)	735.46 km	1.43	1,051.71 km

Berikut merupakan jarak total rute akhir dengan ALNS yang menggunakan jarak *euclidean* setelah disesuaikan dengan dikalikan dengan nilai *circuitry factor*:

Tabel 4. 16 Konversi Rute Final (ALNS)

Indikator Pengukuran	Rute Final (ALNS)	Nilai CF	Jarak Setelah Penyesuaian
Total Jarak Sekali Jalan (Hanya Antar)	265.99 km	1.43	380.365 km
Total Jarak Operasional (Antar + Jemput Rantang)	531.97 km	1.43	760.717 km

4.2.8 Analisis Sensitivitas

Berikut merupakan pengkategorian tingkat sensitivitas solusi pada penelitian ini yang disusun berdasarkan konsep *robustness analysis* dan interpretasi sensitivitas pada studi optimasi distribusi.

Tabel 4. 17 Kategori Uji Sensitivitas

Kategori	Keterangan
ROBUST	Solusi tetap layak secara operasional meskipun parameter berubah.
MODERATE	Solusi masih dapat dioperasikan dengan penyesuaian minor.
RAPUH	Solusi tidak dapat digunakan langsung; memerlukan redesign.
BASELINE	Nilai aktual dari rute final ALNS

1. Sensitivitas Permintaan

Berikut merupakan hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan permintaan, yang digunakan untuk melihat sejauh mana solusi usulan tetap stabil dan layak ketika terjadi fluktuasi jumlah penerima manfaat. Berdasarkan skenario yang diuji, perubahan permintaan dianalisis dengan membandingkan dampak terhadap total jarak operasional, jumlah trip, estimasi biaya, serta klasifikasi ketahanan solusi.

Tabel 4. 18 Sensitivitas Permintaan

Skenario	Total Permintaan	Jarak (km)	Trip	Selisih Jarak (%)	Kategori
<i>Demand -15%</i>	16650	692.252	22	-9.00%	<i>ROBUST</i>
<i>Demand -10%</i>	17629	715.074	23	-6.00%	<i>ROBUST</i>
<i>Demand -5%</i>	18609	737.895	24	-3.00%	<i>ROBUST</i>
<i>Baseline</i>	19588	760.717	25	+0.00%	<i>BASELINE</i>
<i>Demand +5%</i>	20567	798.753	27	+5.00%	<i>ROBUST</i>
<i>Demand +10%</i>	21547	836.789	28	+10.00%	<i>MODERATE</i>
<i>Demand +15%</i>	22526	874.825	29	+15.00%	<i>MODERATE</i>

2. Sensitivitas Harga BBM

Berikut merupakan hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan harga BBM yang digunakan untuk menguji ketahanan solusi usulan ALNS dalam menghadapi variasi biaya transportasi. Melalui skenario kenaikan dan penurunan harga BBM, tabel ini menunjukkan apakah solusi tetap efisien, tetap unggul dibanding rute awal.

Tabel 4. 19 Sensitivitas Harga BBM

Skenario Harga BBM	Harga (Rp/L)	Rp/km	BBM ALNS (L)	Biaya BBM ALNS/hari (Rp)	Hemat BBM (Rp/hari)	Δ Biaya ALNS - Baseline (%)	Kategori
Rp6.500	6,500	613.21	71.766	466,477	178,439	-4.9%	<i>ROBUST</i>
Rp7.650	7,650	721.70	71.766	549,008	210,009	-3.3%	<i>ROBUST</i>
Rp8.000	8,000	754.72	71.766	574,126	219,617	-2.8%	<i>ROBUST</i>

Rp9.000	9,000	849.06	71.766	645,892	247,070	-1.4%	<i>ROBUST</i>
<i>BASELINE</i>							
- Rp10.000	10,000	943.40	71.766	717,658	274,522	+0.0%	<i>BASELINE</i>
Rp12.000	12,000	1,132.08	71.766	861,189	329,426	+2.8%	<i>ROBUST</i>
Rp15.000	15,000	1,415.09	71.766	1,076,486	411,783	+7.0%	<i>ROBUST</i>
Rp18.000	18,000	1,698.11	71.766	1,291,784	494,139	+11.2%	<i>ROBUST</i>

3. Sensitivitas Kapasitas Kendaraan

Berikut merupakan hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan kapasitas angkut kendaraan, yang digunakan untuk menilai sejauh mana solusi usulan ALNS tetap layak dan stabil ketika kapasitas operasional mengalami penyesuaian. Melalui skenario penurunan dan kenaikan kapasitas, tabel ini menunjukkan dampak perubahan kapasitas terhadap jumlah trip, jarak operasional, serta klasifikasi ketahanan solusi.

Tabel 4. 20 Sensitivitas Kapasitas Kendaraan

Skenario	Q (porsi)	Est. Trip	Est. Jarak Op (km)	Δ Trip (%)	Δ Jarak (%)	Kategori
Q -10%	914	28	852.003	+12.0%	+12.0%	<i>MODERATE</i>
Q -5%	964	27	821.574	+8.0%	+8.0%	<i>ROBUST</i>
<i>Baseline</i>	1015	25	760.717	+0.0%	+0.0%	<i>BASELINE</i>
Q +5%	1066	24	730.288	-4.0%	-4.0%	<i>ROBUST</i>
Q +10%	1116	23	699.86	-8.0%	-8.0%	<i>ROBUST</i>

4. Sensitivitas Gabungan Sensitivitas Biaya – *Total Cost Ownership* Harian

Berikut merupakan hasil analisis sensitivitas gabungan yang menguji perubahan harga BBM dan biaya operasional armada secara simultan untuk merepresentasikan kondisi riil di lapangan, di mana kenaikan harga bahan bakar umumnya diikuti oleh peningkatan biaya perawatan dan operasional kendaraan. Pengujian ini digunakan untuk menilai apakah solusi ALNS tetap lebih efisien dibandingkan rute awal pada berbagai kondisi ekonomi, sekaligus untuk melihat sejauh mana ketahanan solusi usulan ketika dua variabel biaya utama berubah secara bersamaan.

Tabel 4. 21 Sensitivitas Biaya – *Total Cost Ownership* Harian

Skenario Gabungan	Harga BBM	Ops. Armada	Total Biaya (Rp)	Selisih Hemat (Rp/hari)	Δ Biaya	Kategori
					ALNS - <i>Baseline</i> (%)	
Kondisi Ideal (BBM murah dan armada efisien)	7,650	25,000	4,549,008	210,009	-11.1%	<i>ROBUST</i>
Kondisi Normal-Rendah	9,000	35,000	4,805,892	247,070	-6.1%	<i>ROBUST</i>
<i>BASELINE</i>	10,000	50,000	5,117,658	274,522	+0.0%	<i>BASELINE</i>
Kondisi Moderat (BBM naik dan armada sedang)	12,000	75,000	5,661,189	329,426	+10.6%	<i>ROBUST</i>
Kondisi Berat (BBM tinggi dan armada sering rusak)	15,000	100,000	6,276,486	411,783	+22.6%	<i>MODERATE</i>
Kondisi Krisis (BBM mahal dan armada buruk)	18,000	150,000	7,291,784	494,139	+42.5%	<i>RAPUH</i>
Kondisi Ekstrem (BBM tanpa subsidi dan armada tua)	18,000	200,000	8,091,784	494,139	+58.1%	<i>RAPUH</i>

BAB V

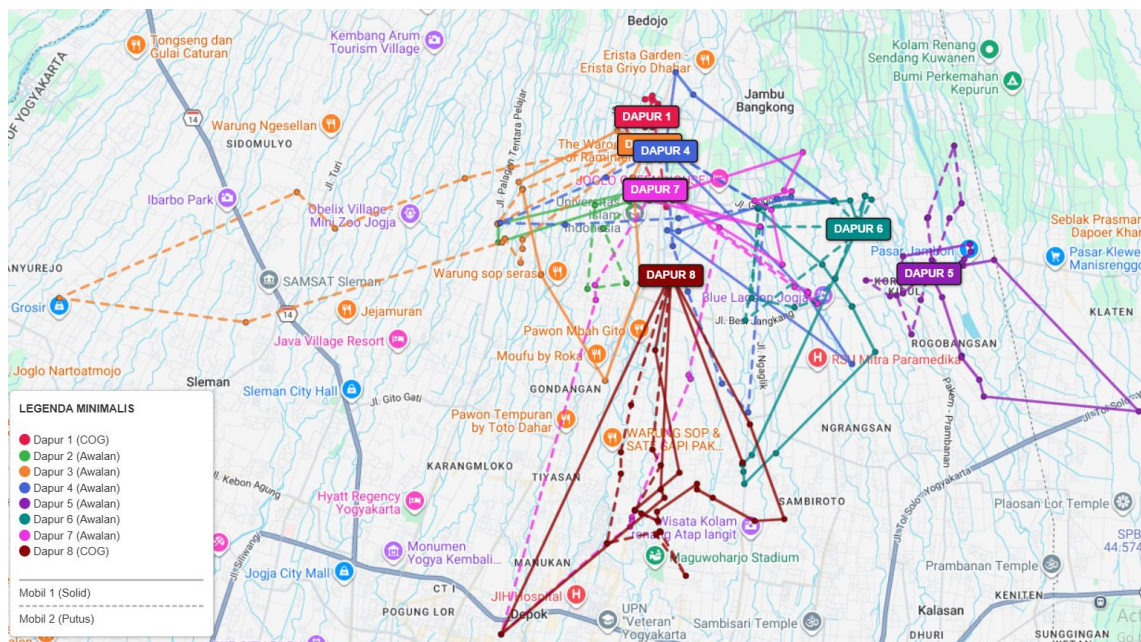
PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil Usulan

Hasil implementasi algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) dalam menyelesaikan permasalahan *Multi-Trip Location-Routing Problem with Time Windows* (MTLRP-TW) untuk distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak menunjukkan bahwa algoritma tersebut mampu merumuskan solusi rute yang sangat efisien. Solusi yang dihasilkan terbukti valid dan secara ketat mematuhi seluruh kendala operasional, termasuk batasan kapasitas muatan armada serta kepatuhan terhadap *dual time windows* (jendela waktu pengantaran dan penjemputan). Mengacu pada sebaran data permintaan di 169 titik penerima manfaat, dengan memobilisasi armada Daihatsu Grandmax berkapasitas maksimum 1015 porsi, tahapan optimasi ini berhasil mengonfigurasi rute distribusi utama yang beroperasi dari 8 fasilitas dapur (SPPG) aktif. Rincian pembentukan rute tersebut adalah sebagai berikut:

5.1.1 Perbandingan Efisiensi Rute Jarak

Berikut merupakan rute usulan yang terbentuk hasil pengolahan menggunakan algoritma ALNS:



Gambar 5.1 Rute Usulan

Tahap evaluasi kinerja distribusi dilakukan dengan membandingkan hasil optimasi algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) terhadap rute awal. Perbandingan ini difokuskan pada efisiensi jarak tempuh operasional harian yang mencakup siklus *multi-trip*, yaitu fase pengantaran makanan dan fase penjemputan kembali omprang. Penilaian ini menjadi krusial untuk mengukur sejauh mana implementasi operator destruksi dan perbaikan pada ALNS mampu memberikan reduksi jarak serta peningkatan efektivitas layanan distribusi Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak. Ringkasan hasil komparasi antara kondisi operasional awal dengan solusi usulan rute final disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5.1 Perbandingan Rute

Indikator Pengukuran	Rute Awal	Rute Final (ALNS)	Selisih Jarak	Persentase Penghematan
Total Jarak Sekali Jalan (Hanya Antar)	525.85 km	380.365 km	145.48 km	27.60%
Total Jarak Operasional (Antar + Jemput Rantang)	1,051.71 km	760.717 km	290.99 km	

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, terlihat adanya peningkatan efisiensi distribusi yang sangat signifikan setelah diterapkannya algoritma ALNS. Pada indikator perhitungan total jarak operasional penuh (antar dan jemput), di mana algoritma ALNS berhasil menghemat jarak tempuh harian hingga 203,49 km. Angka ini kemudian dikonversi dengan nilai *circuitry factor* 1.43, sehingga dengan model penyesuaian tersebut, selisih jarak antara rute awal dengan rute final yaitu:

$$D_{net\ estimasi} = 1.43 \times D_{euc}$$

$$D_{net\ estimasi} = 1.43 \times 203.49$$

$$D_{net\ estimasi} = 290.9907\ km$$

Secara keseluruhan, implementasi model usulan ini menghasilkan persentase penghematan sebesar 27,60% dibandingkan dengan rute awal. Implementasi strategi *sequential multi-trip* pada rute final terbukti efektif dalam memaksimalkan utilisasi armada Daihatsu Grandmax. Dengan jarak operasional yang lebih pendek, risiko keterlambatan pengiriman makanan panas dapat dimitigasi secara optimal, sehingga kualitas makanan tetap terjaga hingga ke tangan penerima manfaat. Secara manajerial, penghematan jarak sebesar 290.9907 km per hari ini memberikan dampak langsung terhadap reduksi biaya bahan bakar dan biaya perawatan

kendaraan, yang pada akhirnya memperbesar ruang fiskal pengelola program MBG untuk dialokasikan pada peningkatan kualitas gizi makanan bagi para penerima manfaat.

Berdasarkan total jarak operasional dan kecepatan rata-rata kendaraan sebesar 24,1 km/jam, diperoleh total waktu tempuh kumulatif sebesar:

Waktu tempuh = Total jarak operasional / Kecepatan rata-rata

Waktu tempuh rute awal = $1,051.71 / 24,1 = 43,64$ jam

Waktu tempuh rute ALNS = $760.717 / 24,1 = 31.56$ jam

Nilai ini merupakan akumulasi waktu perjalanan seluruh kendaraan pada seluruh rute, bukan durasi distribusi secara kronologis dalam satu hari. Karena kendaraan beroperasi secara paralel, total waktu tempuh kumulatif dapat melebihi 24 jam. Oleh karena itu, angka tersebut lebih tepat diinterpretasikan sebagai beban waktu perjalanan armada, yang digunakan untuk membandingkan efisiensi antara skenario awal dan skenario usulan. Sehingga, penghematan waktu tempuh yang diperoleh Adalah 12,08 jam. Selanjutnya, analisis biaya bahan bakar dilakukan dengan asumsi rasio konsumsi BBM kendaraan sebesar 1 liter untuk 10,6 km dan harga bahan bakar sebesar Rp10.000/liter. Perhitungan kebutuhan BBM adalah sebagai berikut:

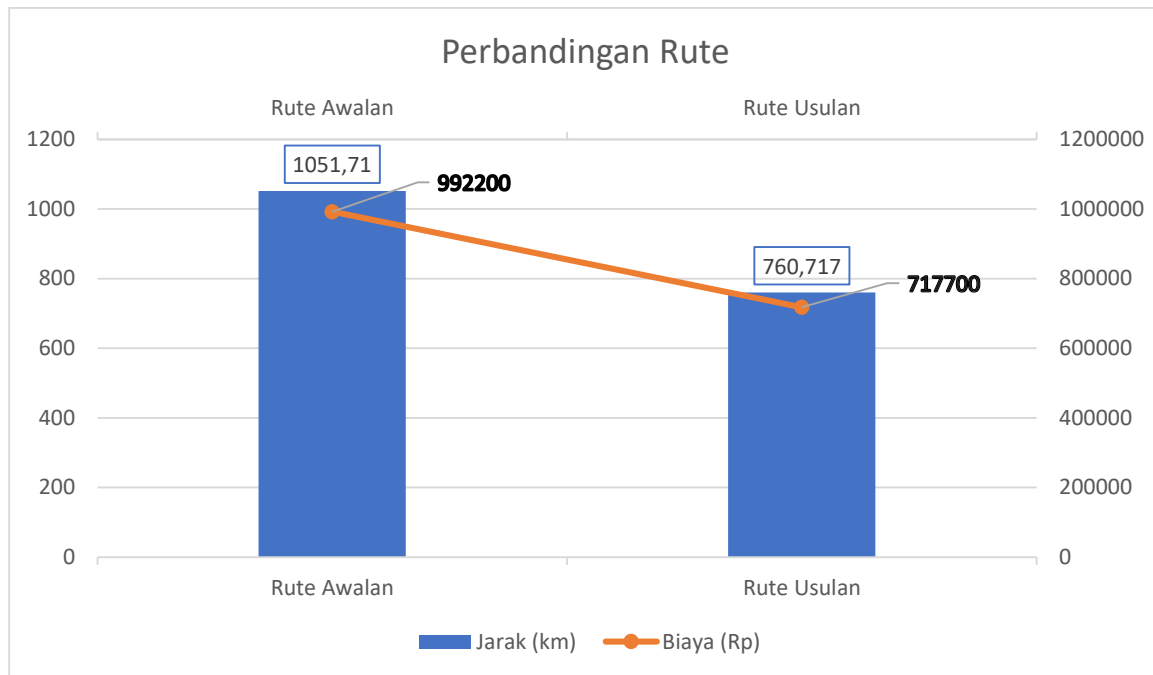
Kebutuhan BBM = Total jarak operasional / Rasio konsumsi BBM

Biaya BBM rute awal = $99.22 \times \text{Rp}10.000 = \text{Rp}992.200$

Biaya BBM rute ALNS = $71.77 \times \text{Rp}10.000 = \text{Rp}717.700$

Penghematan biaya BBM = $\text{Rp}992.200 - \text{Rp}717.700 = \text{Rp}274.500$

Berikut merupakan perbandingan rute antara awalan dan rute usulan:



Gambar 5.2 Grafik Perbandingan Route

Implementasi algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) dalam penyelesaian *Location Routing Problem* (LRP) di Kecamatan Ngemplak terbukti memberikan dampak positif yang signifikan terhadap efisiensi sistem distribusi Makan Bergizi Gratis.

5.1.2 Analisis Pemilihan Lokasi Fasilitas

Berdasarkan hasil komputasi menggunakan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), diperoleh bahwa penggunaan seluruh titik dapur awal belum sepenuhnya efisien secara spasial. Model menunjukkan perlunya relokasi pada beberapa fasilitas, khususnya Dapur 1 dan Dapur 8, ke titik kandidat yang lebih representatif terhadap sebaran sekolah, sehingga mampu menurunkan total jarak tempuh distribusi. Sementara itu, sebagian dapur lainnya tetap dipertahankan karena telah berada pada posisi yang relatif optimal terhadap wilayah layanannya. Dari sisi operasional, terdapat perbedaan beban distribusi antar dapur, di mana beberapa fasilitas mengalami beban tinggi yang memerlukan skema pengiriman lebih dari satu kali akibat keterbatasan kapasitas kendaraan.

Kondisi tersebut berdampak pada potensi peningkatan waktu tempuh dan risiko keterlambatan pemenuhan *time windows*, terutama pada titik layanan yang berada pada urutan akhir distribusi. Hal ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan antara kapasitas armada dan besaran permintaan pada beberapa wilayah layanan. Oleh karena itu, diperlukan

pertimbangan lebih lanjut terkait pengaturan kapasitas distribusi, baik melalui penyesuaian jumlah armada maupun evaluasi kebutuhan penambahan fasilitas dapur pada area dengan beban tinggi.

Dengan diterapkannya *capacity penalty*, algoritma memberikan toleransi terhadap sedikit peningkatan jarak tempuh untuk memastikan beban kerja pada setiap dapur tetap berada dalam batas kapasitas yang wajar. Hal ini penting mengingat keterbatasan kapasitas operasional dapur dan tenaga kerja di kondisi nyata. Berikut merupakan hasil penentuan lokasi dan konfigurasi dapur berdasarkan model yang dikembangkan:

Tabel 5.2 Hasil Optimasi Lokasi Fasilitas SPPG dan Beban Permintaan

Dapur	Status Lokasi	Nama Dapur	Jumlah Penerima Manfaat	Total Demand	Titik Koordinat (UTM)	
					X	Y
1	COG	Titik Baru (Menggantikan Catering Box 3 Putri 1)	14	1719	435654.62	9152452.36
2	AWALAN	SPPG UMBULMA RTANI 2 (Mr. Blangkon 1)	8	1832	435825.565	9150985.659
3	AWALAN	SPPG UMBULMA RTANI 3 (Catering Box 3 Putri 2)	21	2715	435705.775	9151898.615
4	AWALAN	SPPG UMBULMA RTANI 4 (Yayasan Nimara)	21	2275	436023.83	9151761.467
5	AWALAN	SPPG BIMOMART ANI 1 (Clarisa Catering Tambakan)	28	2332	441414.497	9149291.823
6	AWALAN	SPPG BIMOMART ANI 2 (Pondok Suruh)	25	2854	439970.741	9150196.453
7	AWALAN	SPPG WEDOMART ANI 1 (Mr. Blangkon 2)	24	2370	435829.473	9150966.56
8	COG	Titik Baru (Menggantikan Yayasan Mataram)	28	3491	436153.52	9149248.27

Dalam proses optimasi distribusi yang dilakukan, terdapat 53 sekolah yang mengalami perubahan alokasi dapur. Realokasi ini dilakukan sebagai bagian dari upaya menyeimbangkan beban kerja antar dapur sekaligus meningkatkan efisiensi rute distribusi secara keseluruhan. Dengan redistribusi ini, sistem tidak hanya berfokus pada minimasi jarak tempuh, tetapi juga mempertimbangkan keterpenuhan kapasitas operasional setiap dapur serta kepatuhan terhadap batasan *time windows*. Perpindahan alokasi sekolah tersebut menunjukkan adanya penyesuaian struktur distribusi yang lebih adaptif terhadap kondisi spasial dan beban permintaan di lapangan. Dengan demikian, diharapkan proses pengantaran dapat berlangsung lebih merata, mengurangi potensi keterlambatan, serta meningkatkan kinerja distribusi secara keseluruhan. Berikut merupakan rincian data sekolah yang mengalami realokasi tersebut:

Tabel 5.3 Realokasi Penerima Manfaat

Nama Penerima Manfaat	Dapur Awal	Dapur Usulan
SD Brengosan 2	Dapur 7	Dapur 2 (Awalan)
SD Krawitan	Dapur 7	Dapur 2 (Awalan)
TK Sultan Agung	Dapur 4	Dapur 2 (Awalan)
KB Badan Wakaf UII	Dapur 4	Dapur 2 (Awalan)
SD Candirejo	Dapur 7	Dapur 2 (Awalan)
KB Bintang Mulia	Dapur 1	Dapur 3 (Awalan)
TK Al-Barokah Ngangkruk	Dapur 4	Dapur 3 (Awalan)
SD N Ngaglik	Dapur 2	Dapur 3 (Awalan)
RA/BA/TA Al Ihsan Gandok	Dapur 8	Dapur 3 (Awalan)
SD N Pakem 2	Dapur 1	Dapur 3 (Awalan)
SPS Permata Bunda	Dapur 5	Dapur 3 (Awalan)
TK Masyithoh 1	Dapur 5	Dapur 3 (Awalan)
SPS Tunas Melati	Dapur 5	Dapur 3 (Awalan)
SDN Banjarharjo	Dapur 6	Dapur 3 (Awalan)
SMAN 1 Ngemplak	Dapur 5	Dapur 3 (Awalan)
KB Aisyiyah Hasanah	Dapur 7	Dapur 4 (Awalan)
SLB N 1 Sleman	Dapur 3	Dapur 4 (Awalan)
SD N Pakem 1	Dapur 3	Dapur 4 (Awalan)
TK Indriasari	Dapur 7	Dapur 4 (Awalan)
SD Muhammadiyah 1 Ngaglik	Dapur 7	Dapur 4 (Awalan)
SD Rejosari	Dapur 7	Dapur 4 (Awalan)
SMAN 1 Ngaglik	Dapur 2	Dapur 4 (Awalan)
SPS Puspita VIII	Dapur 1	Dapur 4 (Awalan)

Nama Penerima Manfaat	Dapur Awal	Dapur Usulan
RA Masyithoh Bina Putra 1		
Ngemplak	Dapur 8	Dapur 5 (Awalan)
SDN Randusari	Dapur 6	Dapur 5 (Awalan)
TK/Daycare Embun Jingga	Dapur 6	Dapur 5 (Awalan)
RA Ki Ageng Wonolelo	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
KB IT Khalifah Centre	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
TK IT Khalifah Centre	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
SPS Aster	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
TK PKK Indriarini	Dapur 8	Dapur 6 (Awalan)
TPA AllifaTerpadu	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
RA Allifa Terpadu	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
KB Allifa Terpadu	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
TK Aba Pokoh	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
PAUD Al Amin	Dapur 8	Dapur 6 (Awalan)
SD N Ngemplak 4	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
KB Among Putro	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
SPS Makarti	Dapur 4	Dapur 6 (Awalan)
SMA N 2 Ngaglik	Dapur 1	Dapur 6 (Awalan)
SPS Tunas Mulia	Dapur 5	Dapur 7 (Awalan)
PAUD Islam Terpadu Insan		
Mulia Dua	Dapur 8	Dapur 7 (Awalan)
KB Alam Anak Prima	Dapur 8	Dapur 7 (Awalan)
KB Aisyah Krajan	Dapur 8	Dapur 7 (Awalan)
PAUD Terpadu Nurul Dzikri	Dapur 8	Dapur 7 (Awalan)
SMA Sahabatqu	Dapur 3	Dapur 7 (Awalan)
SD Sardonoharjo 1	Dapur 2	Dapur 7 (Awalan)
SD N Karanganyar	Dapur 4	Dapur 7 (Awalan)
SDN Ngemplak 1	Dapur 6	Dapur 7 (Awalan)
RA Ibnu Abbas Ngemplak	Dapur 6	Dapur 8 (COG)
SD Sempu	Dapur 4	Dapur 8 (COG)
SMP Sahabatqu	Dapur 3	Dapur 8 (COG)
MTSn 3 Sleman	Dapur 6	Dapur 8 (COG)

Hasil optimasi dengan ALNS menunjukkan bahwa relokasi Dapur 1 dan Dapur 8 ke titik kandidat COG berpotensi meningkatkan efisiensi jarak, beban operasional, dan kesesuaian *time windows*, tetapi hasil tersebut harus dipahami sebagai rekomendasi teoretis dari model, bukan

keputusan implementatif langsung. Implementasinya tetap bergantung pada berbagai kendala nyata, seperti biaya investasi, ketersediaan lahan, perizinan, akses jalan, utilitas dasar, kesiapan tenaga kerja, serta kesesuaian dengan aturan setempat dan rantai pasok lokal. Karena itu, temuan ini lebih tepat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan strategis yang perlu diuji lebih lanjut melalui studi kelayakan teknis, finansial, dan institusional agar dapat diterapkan secara realistis dan berkelanjutan.

5.1.3 Hasil Analisis Sensitivitas

Pada sensitivitas demand dan kapasitas, solusi ALNS menunjukkan ketahanan yang cukup baik pada perubahan moderat, tetapi mulai melemah ketika gangguan operasional membesar. Saat demand turun, seluruhnya masih masuk kategori *robust*. Pada kenaikan demand +5%, solusi masih *robust* dengan 798,753 km, 27 trip, dan biaya BBM Rp753.540, tetapi pada +10% dan +15% klasifikasinya bergeser menjadi *moderate* karena jarak naik menjadi 836,789 km dan 874,825 km, *trip* menjadi 28 dan 29, serta biaya BBM meningkat menjadi Rp789.423 dan Rp825.306. Pola serupa muncul pada kapasitas kendaraan, penurunan kapasitas 10% menjadi 914 porsi mendorong trip naik ke 28 dan jarak ke 852,003 km sehingga masuk *moderate*, sedangkan penurunan 5% masih *robust* dengan 27 trip dan 821,574 km; sebaliknya, kenaikan kapasitas 5% dan 10% justru memperbaiki efisiensi menjadi 24 dan 23 trip dengan jarak 730,288 km dan 699,86 km. Ini selaras dengan karakter masalah LRP-VRPTW *perishable* yang sangat dipengaruhi oleh ketatnya waktu layanan, kapasitas armada, dan penalti operasional.

Pada sensitivitas harga BBM, ALNS tetap unggul di seluruh skenario Rp6.500 - Rp18.000/liter karena jarak operasionalnya tetap 760,717 km, lebih pendek daripada rute awal NN 1.051,71 km, sehingga konsumsi BBM ALNS hanya 71,766 L dibanding NN 99,218 L. Pada skenario gabungan, pola keunggulan ini tetap bertahan. Pada kondisi ekstrem dengan BBM Rp18.000/liter dan biaya armada Rp200.000/kend/hari, ALNS masih menghemat Rp494.139/hari hanya dari komponen BBM, sehingga secara keseluruhan solusi usulan tetap layak dijadikan *baseline* operasional, meskipun pada skenario berat - ekstrem klasifikasinya mulai bergeser dari *robust* menjadi *moderate* bahkan rapuh.

5.1.4 Hasil Analisis Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan finansial terhadap usulan pada penelitian ini melibatkan *trade-off* mendasar antara pengeluaran modal awal (*Capital Expenditure/CAPEX*) dan penghematan biaya operasional harian (*Operational Expenditure/OPEX*). Dalam konteks ini, CAPEX didefinisikan

sebagai total investasi satu kali yang dibutuhkan untuk membangun fasilitas dapur baru, mencakup sewa lahan, renovasi bangunan berstandar industri, pengadaan alat, hingga pengurusan izin higienitas pangan. Sebaliknya, keunggulan rute usulan ALNS yang mampu memangkas jarak distribusi sebesar 290,99 km/hari secara langsung mereduksi beban OPEX melalui penghematan biaya bahan bakar harian. Proyek relokasi fasilitas Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) ini dinilai layak secara finansial apabila seluruh efisiensi harian yang dikumpulkan berhasil mencapai titik impas atau balik modal (*payback period*) dalam kurun waktu horizon investasi maksimal lima tahun ke depan.

Estimasi CAPEX dibangun berdasarkan asumsi rasional untuk pembangunan dapur komersial skala menengah di kawasan sub-urban, dengan mempertimbangkan standar fasilitas produksi pangan program Makan Bergizi Gratis. Tabel 5.4 menyajikan rincian komponen CAPEX dengan tiga skenario: konservatif, moderat, dan optimistik.

Tabel 5. 4 Estimasi Komponen CAPEX Pembangunan Satu Unit SPPG

No.	Komponen Biaya	Rendah (Rp)	Menengah (Rp)	Tinggi (Rp)
1	Sewa Lahan (2 tahun, $\geq 200 \text{ m}^2$)	Rp 65.000.000	Rp 80.000.000	Rp 100.000.000
2	Renovasi / Konstruksi Dapur Komersial	Rp 70.000.000	Rp 110.000.000	Rp 150.000.000
3	Peralatan Dapur Industri	Rp 50.000.000	Rp 100.000.000	Rp 130.000.000
4	Instalasi Utilitas (listrik, air, gas)	Rp 10.000.000	Rp 40.000.000	Rp 55.000.000
5	Perizinan & Sertifikasi (PIRT, hygiene, halal)	Rp 15.000.000	Rp 20.000.000	Rp 25.000.000
6	Modal Kerja Awal (1 bulan operasional)	Rp 20.000.000	Rp 30.000.000	Rp 30.000.000
7	Biaya Tak Terduga / Contingency	Rp 20.000.000	Rp 20.000.000	Rp 10.000.000
	TOTAL CAPEX SATU UNIT SPPG	Rp 250.000.000	Rp 400.000.000	Rp 500.000.000

Keterangan:

- Skenario Rendah: Menyewa bangunan komersial eksisting dengan utilitas tersedia.
- Skenario Menengah: Membangun dapur baru di lahan kosong, seluruh utilitas dan peralatan baru.
- Skenario Tinggi: Lokasi dengan kapasitas produksi lebih besar, konstruksi penuh.

Penghematan operasional harian disetahunkan dengan asumsi 260 hari kerja efektif per tahun (5 hari kerja $\times$ 52 minggu), yang merupakan konvensi standar dalam perencanaan operasional distribusi pangan. Tabel 5.5 menyajikan konversi penghematan harian ke penghematan tahunan untuk tiga skenario ekonomi.

Tabel 5. 5 Proyeksi Penghematan OPEX Tahunan dan Akumulasi 5 Tahun

Skenario	Hemat/Hari (Rp)	Hari Kerja/Tahun	Hemat/Tahun (Rp)	Hemat 5 Tahun (Rp)
<i>Baseline</i>	±Rp 274.522	260	Rp 71.375.720	±Rp 356.878.600
<i>Worst-Case</i>	±Rp 210.000	260	Rp 54.600.000	±Rp 273.000.000
<i>Best-Case</i>	±Rp 494.139	260	Rp 128.476.140	±Rp 642.380.700

Tabel 5.6 menyajikan simulasi arus kas sederhana selama 5 tahun untuk CAPEX rendah pada skenario *baseline*.

Tabel 5. 6 Amortisasi dengan Skenario *baseline* dan CAPEX Rendah

Thn	Hemat/Thn	Akumulasi Hemat	CAPEX	Saldo Investasi	Status
0	—	—	Rp 250.000.000	(Rp 250.000.000)	Investasi Awal
1	Rp 71.375.720	Rp 71.375.720	Rp 250.000.000	(Rp 178.624.280)	Belum BEP
2	Rp 71.375.720	Rp 142.751.440	Rp 250.000.000	(Rp 107.248.560)	Belum BEP
3	Rp 71.375.720	Rp 214.127.160	Rp 250.000.000	(Rp 35.872.840)	Belum BEP
4	Rp 71.375.720	Rp 285.502.880	Rp 250.000.000	+Rp 35.502.880 (Surplus)	BEP TERCAPAI
5	Rp 71.375.720	Rp 356.878.600	Rp 250.000.000	+Rp 106.878.600 (Surplus)	BEP TERCAPAI

Tabel berikut menyajikan matriks kelayakan finansial hasil perhitungan *Payback Period* dan *Return on Investment* (ROI) 5 tahun untuk seluruh kombinasi skenario penghematan OPEX dan estimasi CAPEX yang telah ditetapkan. Terdapat sembilan kombinasi yang dievaluasi, dibentuk dari persilangan tiga skenario penghematan: *Worst-Case* (WC) sebesar Rp 54.600.000/tahun, *Baseline* (BL) sebesar Rp 71.375.720/tahun, dan *Best-Case* (BC) sebesar Rp 128.476.140/tahun dengan tiga skenario CAPEX yakni Rendah (Rp 250.000.000), Menengah (Rp 400.000.000), dan Tinggi (Rp 500.000.000). *Payback Period* dihitung menggunakan formula $PP = CAPEX \div \text{Penghematan OPEX per Tahun}$, sedangkan ROI 5 tahun diformulasikan sebagai $ROI = [(Total \text{ Penghematan } 5 \text{ Tahun} - CAPEX) \div CAPEX] \times 100\%$. *Threshold* kelayakan yang ditetapkan mengacu pada horizon investasi yang disyaratkan, yakni *Payback Period* tidak melebihi 5 tahun dan ROI bernilai positif. Seluruh perhitungan menggunakan metode arus kas tidak terdiskonto (*undiscounted cash flow*) dengan asumsi biaya konstan sepanjang periode analisis, serta hanya mempertimbangkan komponen biaya distribusi bahan bakar sebagai sumber penghematan, sehingga hasil yang ditampilkan bersifat indikatif dan merepresentasikan batas atas (*upper bound*) kelayakan finansial.

Tabel 5. 7 Matriks *Payback Period* dan ROI 5 Tahun

Skenario	CAPEX	Hemat/Tahun	Payback Period	ROI 5 Tahun	Kelayakan
WC + CAPEX Rendah	Rp 250 jt	Rp 54.600.000	4,58 thn	9,2%	Marginal
WC + CAPEX Menengah	Rp 400 jt	Rp 54.600.000	7,33 thn	-31,8%	Tidak <i>Feasible</i>
WC + CAPEX Tinggi	Rp 500 jt	Rp 54.600.000	9,16 thn	-45,4%	Tidak <i>Feasible</i>
BL + CAPEX Rendah	Rp 250 jt	Rp 71.375.720	3,50 thn	42,8%	<i>FEASIBLE</i>
BL + CAPEX Menengah	Rp 400 jt	Rp 71.375.720	5,60 thn	-10,8%	Marginal
BL + CAPEX Tinggi	Rp 500 jt	Rp 71.375.720	7,01 thn	-28,6%	Tidak <i>Feasible</i>
BC + CAPEX Rendah	Rp 250 jt	Rp 128.476.140	1,95 thn	157,0%	SANGAT <i>FEASIBLE</i>
BC + CAPEX Menengah	Rp 400 jt	Rp 128.476.140	3,11 thn	60,6%	<i>FEASIBLE</i>
BC + CAPEX Tinggi	Rp 500 jt	Rp 128.476.140	3,89 thn	28,5%	<i>FEASIBLE</i>

Hasil evaluasi terhadap sembilan kombinasi skenario menunjukkan bahwa kelayakan finansial relokasi fasilitas SPPG sangat dipengaruhi oleh dua variabel penentu secara simultan, yakni besaran CAPEX awal dan skenario penghematan OPEX yang terealisasi. Dari sembilan kombinasi yang dianalisis, empat kombinasi dinyatakan layak (*feasible*) dalam horizon 5 tahun, satu kombinasi dikategorikan sangat layak (*sangat feasible*), dua kombinasi berstatus marginal, dan dua kombinasi tidak layak (*tidak feasible*). Seluruh skenario *Best-Case* (BC) dengan penghematan Rp 128.476.140 per tahun menghasilkan *Payback Period* di bawah 4 tahun pada semua tingkat CAPEX, dengan rentang 1,95 tahun hingga 3,89 tahun, menjadikannya satu-satunya kelompok skenario yang *feasible* tanpa syarat terhadap besaran CAPEX. Pada skenario *Baseline* (BL), kelayakan hanya tercapai apabila CAPEX ditekan pada level Rendah Rp 250.000.000 dengan *Payback Period* 3,50 tahun dan ROI +42,8%; peningkatan CAPEX ke level Menengah Rp 400.000.000 mendegradasi status menjadi marginal (PP 5,60 tahun, ROI -10,8%), dan pada CAPEX Tinggi Rp 500.000.000 investasi sepenuhnya tidak layak (PP 7,01 tahun, ROI -28,6%). Kondisi paling tidak menguntungkan terjadi pada skenario *Worst-Case* (WC) di mana bahkan CAPEX terendah pun hanya menghasilkan status marginal (PP 4,58 tahun, ROI +9,2%), sementara CAPEX Menengah dan Tinggi masing-masing menghasilkan PP 7,33 dan 9,16 tahun, jauh melampaui *threshold* yang ditetapkan.

Interpretasi terhadap keseluruhan hasil di atas harus dilakukan dengan memperhatikan dua batasan metodologis yang melekat secara inheren pada analisis ini. Pertama, seluruh komponen biaya, baik CAPEX maupun penghematan OPEX harian diasumsikan bersifat konstan sepanjang horizon 5 tahun tanpa penyesuaian inflasi, eskalasi harga bahan bakar, kenaikan upah tenaga kerja, maupun perubahan tarif sewa; dalam kondisi riil, variabel-variabel tersebut berpotensi menggeser nilai *Payback Period* secara material ke arah yang lebih panjang maupun lebih pendek tergantung pada dinamika ekonomi yang terjadi. Kedua, penghematan OPEX yang diperhitungkan secara eksklusif hanya mencakup komponen biaya bahan bakar kendaraan distribusi sebagai fungsi langsung dari reduksi jarak 290,99 km/hari, sementara faktor-faktor biaya operasional lainnya yang relevan, meliputi biaya tenaga kerja produksi, pemeliharaan dan penyusutan armada, overhead administrasi, pelatihan SDM, penyusutan peralatan dapur, serta perizinan berkala tidak diikutsertakan dalam model, konsekuensinya, nilai ROI yang tersaji merepresentasikan *upper bound* kelayakan dan harus diperlakukan sebagai estimasi awal (*preliminary estimate*) yang bersifat indikatif. Dengan kedua batasan tersebut diperhitungkan, rekomendasi yang dapat ditarik secara prudent adalah memprioritaskan strategi sewa aset dapur komersial eksisting guna merealisasikan CAPEX Rendah yang terbukti menghasilkan kelayakan bahkan pada skenario penghematan yang paling konservatif, dan pertimbangkan pembangunan fasilitas baru hanya apabila proyeksi penghematan mendekati kondisi *Best-Case* dengan batas CAPEX tidak melebihi Rp 400.000.000.

5.2 Analisis Hasil Algoritma

5.2.1 Perbandingan Iterasi

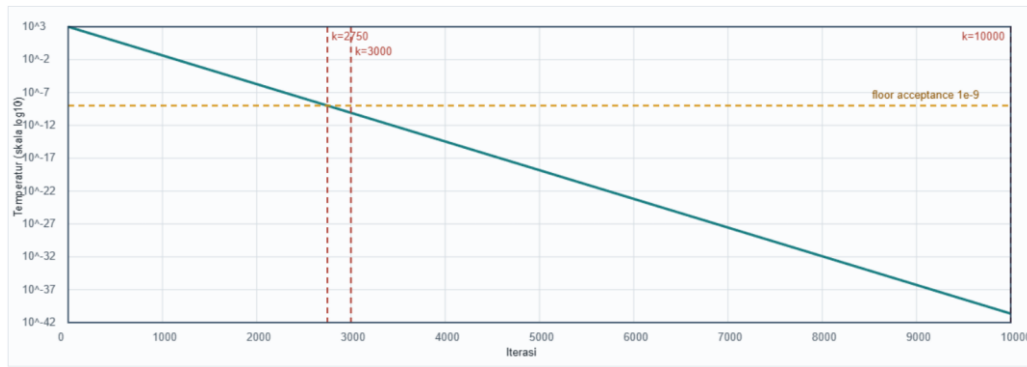
Perbandingan iterasi dilakukan untuk melihat sensitivitas ALNS terhadap batas penghentian pencarian. Iterasi 3000 merepresentasikan *threshold* praktis yang lebih efisien, sedangkan iterasi 10000 digunakan sebagai pembanding untuk melihat apakah tambahan pencarian masih memberikan penghematan biaya distribusi dan *opening cost* yang sebanding.

Tabel 5.8 Perbandingan Iterasi

Indikator	3000 Iterasi	10000 Iterasi
Jumlah iterasi	3000	10000
Segment length	100	100
Seed/replikasi	42, 77, 99	42

Waktu komputasi	28.196 detik seed terpilih	96114.349 detik atau 26.698 jam
<i>Delivery Distance</i> (km)	531.9736	560.919236
Jumlah <i>trip</i>	25	31

Hasil 3000 iterasi lebih representatif secara stokastik karena menggunakan *multi-seed*, sedangkan hasil 10000 iterasi merupakan *single-seed*. Pada metaheuristik, *multi-seed* penting karena hasil pencarian dipengaruhi pemilihan operator acak, ukuran *destroy*, dan probabilitas penerimaan solusi. Tambahan iterasi dari 3000 ke 10000 meningkatkan waktu komputasi secara sangat besar, sementara biaya distribusi justru lebih tinggi pada 10000 iterasi. Kondisi ini menunjukkan *diminishing return*, yaitu tambahan komputasi tidak memberikan perbaikan sebanding terhadap tujuan biaya. Iterasi 3000 dipilih karena menghasilkan biaya distribusi lebih rendah, jarak lebih pendek, serta waktu komputasi yang jauh lebih rasional. Iterasi 10000 tidak otomatis lebih optimal karena tambahan pencarian menghasilkan rute lebih panjang dan biaya BBM lebih tinggi. Hasil iterasi 3000 memiliki keunggulan pada efisiensi operasional karena menghasilkan jarak distribusi, total perjalanan, dan kebutuhan trip yang lebih rendah sehingga lebih hemat dalam penggunaan armada dan biaya distribusi. Selain itu, solusi ini tetap mampu melayani seluruh titik tanpa melanggar kapasitas kendaraan. Namun, kelemahan iterasi 3000 adalah masih terdapat pelanggaran *time window* dan *shift*, sehingga ketepatan waktu distribusi belum sepenuhnya optimal. Sebaliknya, hasil iterasi 10000 unggul dalam aspek waktu karena mampu menurunkan pelanggaran *time window* secara signifikan serta menghilangkan pelanggaran *shift*. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencarian solusi yang lebih panjang membuat algoritma lebih adaptif terhadap kendala waktu operasional. Akan tetapi, iterasi 10000 memiliki kelemahan berupa meningkatnya total jarak distribusi, jumlah trip, dan kebutuhan operasi armada, sehingga efisiensi distribusinya lebih rendah dibandingkan iterasi 3000. Oleh karena itu, kedua iterasi menunjukkan *trade-off* antara efisiensi jarak dan kepatuhan terhadap kendala waktu distribusi.



Gambar 5. 3 Perbandingan Temperatur

Mekanisme *cooling rate* pada SA di dalam ALNS bersifat eksponensial, kira-kira mengikuti pola $T_{k+1} = 0,99 T_k$. Artinya, suhu turun cepat dari 1000 pada iterasi 0 (fase eksploratif, solusi yang sedikit lebih buruk masih cukup mudah diterima) menjadi sekitar 0,993 pada iterasi 688, lalu turun ke $9,96 \times 10^{-4}$ pada iterasi 1375, sehingga penerimaan solusi buruk sudah nyaris hilang dan pencarian bergeser ke fase eksploitasi kuat. Saat suhu mencapai $9,93 \times 10^{-10}$ pada iterasi 2750, tabel menunjukkan kondisi melewati *floor* kode karena sudah berada di bawah ambang minimum penerimaan 1×10^9 . Secara praktis, SA sudah “membeku” meskipun nilai suhu belum nol. Pada iterasi 3000 dan 10000, suhu memang masih tercatat positif, tetapi secara numerik sudah terlalu kecil sehingga proses lebih banyak mengandalkan kandidat yang langsung membaik. Semakin kecil suhu, semakin kecil peluang menerima solusi yang lebih buruk, ALNS berubah dari pencarian luas menjadi pencarian lokal yang sangat selektif. Semakin besar nilai *delta objective* (artinya kandidat makin buruk) dan semakin kecil temperatur, maka peluang diterimanya solusi tersebut makin turun. Di awal iterasi ($k = 0$, temperatur tinggi), solusi buruk masih relatif mudah diterima: delta 1 hampir pasti diterima (99,90%), delta 10 (99,00%), delta 100 (90,48%), dan bahkan delta 1000 masih punya peluang (36,79%). Ini menunjukkan fase awal bersifat eksploratif yaitu algoritma menerima solusi kurang baik untuk keluar dari jebakan optimum lokal.

Saat iterasi bertambah, temperatur turun sehingga peluang *acceptance* ikut menyusut. Misalnya untuk delta 1, peluang tinggal sekitar 10% pada $k = 771$ dan menjadi nyaris nol pada $k = 1018$. Untuk delta yang lebih besar, peluang hilang lebih cepat; delta 1000 sudah mencapai probabilitas sangat kecil pada iterasi jauh lebih awal ($k = 331$). ALNS-SA bergerak dari mencari ruang solusi secara luas di awal menjadi sangat selektif di tahap akhir.

5.2.2 Operator ALNS

Berdasarkan hasil pemantauan kinerja algoritma selama proses optimasi, terlihat adanya dominasi yang signifikan dari penggunaan operator *Regret-2 Insertion* dan *Shaw Removal* sebagai pendorong utama pencarian optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pencarian rute distribusi MBG sangat bergantung pada kombinasi destruksi kembali berbasis kedekatan (*Shaw*) dan rekonstruksi berkualitas global melalui mekanisme *regret* (*Regret-2*). Secara teknis, dominasi kedua operator ini menunjukkan bahwa performa terbaik dalam sistem distribusi di Kecamatan Ngemplak dicapai saat algoritma mampu membongkar kembali yang kurang tepat, kemudian menyusunnya kembali secara presisi untuk menekan total biaya serta meminimalkan pelanggaran jendela waktu.

Tabel 5.9 Bobot Akhir Operator ALNS

Operator	Bobot Akhir	Probabilitas (%)
Worst Removal	1.48423	41.9
Shaw Removal	2.054095	58.1
Regret-2 Insertion	2.082133	58.7
Multi-Trip Internal Depot Insertion	1.46362	41.3

Di sisi lain, operator *Worst Removal* dan *Multi-Trip Insertion* berfungsi sebagai penyeimbang atau *stabilizer* dalam menjaga kualitas solusi. *Worst Removal* tetap memainkan peran krusial untuk membongkar segmen rute yang memiliki biaya tinggi secara spesifik, sementara *Multi-Trip Insertion* memastikan struktur operasional armada tetap kompatibel dengan batasan *trip* berulang yang diwajibkan.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini menghasilkan simpulan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut:

1. Optimalisasi penentuan lokasi fasilitas dapur dan rute distribusi pada program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Ngemplak berhasil diwujudkan melalui integrasi metode *Center of Gravity* (COG) dan algoritma *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS). Berdasarkan hasil evaluasi model, dua fasilitas utama, yakni Dapur 1 dan Dapur 8, direkomendasikan untuk direlokasi ke titik koordinat baru yang lebih merepresentasikan pusat permintaan, sementara enam fasilitas lainnya tetap dipertahankan di lokasi asalnya. Guna menyeimbangkan beban operasional, algoritma ini juga merealokasikan 53 sekolah penerima manfaat ke fasilitas dapur yang berbeda. Lebih lanjut, penentuan rute disempurnakan melalui penerapan skema perjalanan majemuk (*sequential multi-trip*) yang memastikan armada berkapasitas 1015 porsi dapat menjalankan pengantaran makanan sekaligus penjemputan wadah secara efisien, tanpa melanggar batasan kapasitas muatan maupun *dual time windows* yang berlaku. Berdasarkan model yang dibangun, relokasi Dapur 1 dan Dapur 8 merupakan rekomendasi berbasis hasil optimasi untuk meningkatkan efisiensi spasial dan menurunkan jarak distribusi, namun keputusan implementasi tetap memerlukan kajian kelayakan lapangan dan evaluasi teknis-institusional lebih lanjut.
2. Solusi distribusi yang diusulkan melalui model *Location Routing Problem* dengan algoritma ALNS terbukti secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional dibandingkan rute awal yang sebelumnya diterapkan. Peningkatan efisiensi ini terlihat secara menyeluruh pada skala operasional penuh (pengantaran dan penjemputan), di mana total jarak tempuh harian menurun secara drastis dari 1,051.71 km menjadi 760.717 km. Secara akumulatif, algoritma ALNS mampu menghasilkan penghematan jarak sebesar 290.99 km per hari, yang setara dengan peningkatan efisiensi sebesar 27,60%. Dari perspektif manajerial, penghematan jarak yang masif ini berdampak langsung pada penekanan biaya operasional kendaraan dan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya memberikan kelonggaran anggaran bagi pengelola untuk meningkatkan kualitas gizi program MBG. Model LRP dengan ALNS menunjukkan potensi penghematan jarak dan biaya operasional, sehingga dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi kebijakan. Akan tetapi, penerapannya perlu didukung studi

kelayakan teknis dan institusional agar hasil matematis dapat dioperasionalkan secara realistis.

3. Algoritma ALNS memberikan dampak yang sangat krusial dalam menyelesaikan kerumitan masalah penentuan rute berkelas NP-*hard* pada jaringan distribusi yang melibatkan 169 titik layanan. Keberhasilan algoritma ini sangat ditunjang oleh kemampuannya dalam beradaptasi, di mana efisiensi tertinggi dicapai melalui kolaborasi operator *Shaw Removal* dengan tingkat pemilihan 58,1% dan *Regret-2 Insertion* sebesar 58,7%. Hal ini membuktikan bahwa strategi perombakan rute berdasarkan kedekatan jarak dan waktu (*spatio-temporal*) yang diikuti dengan penyisipan kembali berbasis kualitas global (*regret*) merupakan pendekatan yang paling sesuai untuk karakteristik tata ruang wilayah Ngemplak. Di samping itu, penggabungan kriteria penerimaan *Simulated Annealing* (SA) terbukti tangguh dalam menghindarkan algoritma dari jebakan optimum lokal, sehingga solusi akhir yang dihasilkan bersifat layak secara operasional (*strictly feasible*) dengan nol penalti terhadap pelanggaran batasan kapasitas armada dan waktu layanan.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan serta keterbatasan yang ditemukan selama proses pengolahan dan analisis data, penelitian ini memberikan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dan pengembangan kedepannya:

1. Bagi Pemerintah dan Pengelola Program MBG

- Melakukan evaluasi kapasitas dan realokasi fasilitas, karena berdasarkan hasil komputasi menemukan adanya ketimpangan beban kerja antar fasilitas yang mengharuskan beberapa dapur melakukan pengiriman berulang, pengelola program disarankan untuk secara berkala mengevaluasi kapasitas operasional dapur. Hasil pemetaan menggunakan titik *Center of Gravity* (COG) dapat dijadikan landasan strategis oleh pemerintah daerah untuk menentukan lokasi pembangunan unit dapur baru yang lebih sentral di masa mendatang.
- Pemerintah disarankan untuk melakukan kajian finansial komprehensif dengan mengonversi persentase penghematan jarak sebesar 27,60% ini ke dalam kalkulasi *Total Logistics Cost* (Rupiah). Visibilitas penghematan anggaran dari efisiensi bahan bakar

dan perawatan kendaraan ini nantinya dapat direalokasikan secara langsung untuk meningkatkan kualitas atau porsi gizi bagi para penerima manfaat.

- Mengingat hasil relokasi fasilitas pada model ini bersifat rekomendasi matematis, disarankan bagi pemerintah atau pengelola program untuk melakukan Studi Kelayakan (*Feasibility Study*) yang komprehensif sebelum mengeksekusi pembangunan unit dapur baru. Studi tersebut harus mengintegrasikan kalkulasi biaya investasi bangunan (*opening cost*), survei kesesuaian infrastruktur dan utilitas (air, jalan, listrik), serta pemenuhan izin regulasi lingkungan.

2. Bagi Akademisi dan Peneliti Selanjutnya

- Pengembangan model waktu tempuh dinamis (*Time-Dependent*), penelitian ini masih mengasumsikan bahwa waktu tempuh berbanding lurus dengan jarak tanpa mempertimbangkan fluktuasi lalu lintas, peneliti selanjutnya sangat disarankan untuk mengembangkan model *Location Routing Problem* dengan variabel waktu tempuh stokastik atau *Time-Dependent Travel Times* (TD-LRP). Hal ini penting untuk merepresentasikan kepadatan lalu lintas aktual pada jam keberangkatan sekolah.
- Untuk penelitian lanjutan berbasis metaheuristik, disarankan untuk memodifikasi fungsi objektif matematis agar tidak hanya berfokus pada minimasi jarak tempuh. Penambahan variabel keputusan yang mengakomodasi keseimbangan beban kerja (*workload imbalance*) antar dapur atau keputusan terkait ekspansi kapasitas fasilitas akan membuat model matematis menjadi jauh lebih komprehensif dan aplikatif untuk skenario logistik publik (*public supply chain*).

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A. K., Yadav, S., Gupta, A. A., & Pandey, S. (2022). A genetic algorithm model for optimizing vehicle routing problems with perishable products under time-window and quality requirements. *Decision Analytics Journal*, 5, 100139.
- Akpunar, Ö. Ş., & Akpınar, Ş. (2021). A hybrid adaptive large neighbourhood search algorithm for the capacitated location routing problem. *Expert Systems with Applications*, 168, 114304.
- Archetti, C., Coelho, L. C., Speranza, M. G., & Vansteenwegen, P. (2025). Beyond fifty years of vehicle routing: Insights into the history and the future. *European Journal of Operational Research*.
- Arofah, I., & Gesthantiara, N. N. (2021). Optimasi biaya distribusi barang dengan menggunakan model transportasi. *JMT (Jurnal Matematika Dan Terapan)*, 3(1), 1–9.
- Ayuningtias, M. D., Putri, R. R., & Sahara, S. (2023). Pengaruh Tingkat Kualitas Pelayanan Oleh Petugas Dalam Transportasi Umum Transjakarta The Influence of the Level of Service Quality By Officers in Transjakarta Bus Public Transportation. *Jurnal Publikasi Sistem Informasi Dan Manajemen Bisnis*, 2(2).
- Ballou, R. H., Rahardja, H., & Sakai, N. (n.d.). *Selected country circuitry factors for road travel distance estimation*. Retrieved <http://www.iti.fr>;
- Cao, X., Liang, F., Chen, H., & Liu, Y. (2017). Circuitry characteristics of urban travel based on GPS data: A case study of Guangzhou. *Sustainability (Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/su9112156>
- Doğuş İyican, Ç. (2023). *A LOCATION-ROUTING PROBLEM WITH MULTIPLE TRIPS ARISING IN E-COMMERCE DELIVERY*.
- Duan, Y., Hu, Y., & Wu, P. (2023). An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle routing problems with time windows and recharging strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2023(1), 1200526.
- Escobar, J. W., Linfati, R., & Toth, P. (2013). A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 40(1), 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.05.008>
- Fadlilah, M. P. N., Sugito, S., & Rahmawati, R. (2017). Sistem Antrian Pada Pelayanan Customer Service Pt. Bank X. *Jurnal Gaussian*, 6(1), 71–80.
- Goni, A. G., Palendeng, I. D., & Pondaag, J. J. (2022). Analisis Rantai Pasok (Supply Chain) Minuman Cap Tikus (Studi Pada Petani Desa Palamba Kecamatan Langowan Selatan). *Jurnal EMBA: Jurnal Riset Ekonomi, Manajemen, Bisnis Dan Akuntansi*, 10(2), 358–367.
- Hashemi-Amiri, O., Ghorbani, F., & Ji, R. (2023). Integrated supplier selection, scheduling, and routing problem for perishable product supply chain: A distributionally robust approach. *Computers and Industrial Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108845>

- Hatim, H. A., & Ahmad, F. (2022). Pendekatan Algoritma Genetika Dalam Upaya Optimalisasi Penjadwalan Di Pt. Nuansa Indah. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 9(2), 145–154.
- Himstedt, B., & Meisel, F. (2025). Combining multiple delivery systems for urban logistics by ALNS-based route planning. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1–34.
- Kaur, H., & Prakash Singh, S. (2021). Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. *International Journal of Production Economics*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107830>
- Khamsing, N., Chindaprasert, K., Pitakaso, R., Sirirak, W., & Theeraviriya, C. (2021). Modified ALNS algorithm for a processing application of family tourist route planning: A case study of Buriram in Thailand. *Computation*, 9(2), 23.
- Kumar, S. (2023). *Adaptive large neighborhood search algorithm–performance evaluation under parallel schemes & applications*. Mississippi State University.
- Kuyu, Y. Ç., & Vatansever, F. (2024). A hybrid approach of ALNS with alternative initialization and acceptance mechanisms for capacitated vehicle routing problems. *Cluster Computing*, 27(10), 13583–13606.
- Li, B., Wu, W., Wang, S., & Li, D. (2025). Slack-aware scheduling of AGVs in just-in-time matrix manufacturing systems via adaptive large neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 107340.
- Li, C., Yu, F., & Chen, Q. (2025). Multi-depot collaborative vehicle route problem with shared customer, delivery options and flexible transshipment. *Computers & Industrial Engineering*, 111755.
- Liu, L., Chen, Y., & Li, A. (2024). Optimization of Distribution Routes in Agricultural Product Supply Chain Decision Management Based on Improved ALNS Algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 15(8).
- Ma, H., & Yang, T. (2025). Improved Adaptive Large Neighborhood Search Combined with Simulated Annealing (IALNS-SA) Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup and Time Windows. *Electronics*, 14(12), 2375.
- Madani, F. R. S., & Sahara, S. (2023). Analisis Efisiensi Perbandingan Penggunaan Transportasi Laut Dan Transportasi Udara Dalam Pengiriman Barang Antar Provinsi. *EKONOMIKA45: Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi Bisnis, Kewirausahaan*, 10(2), 569–574.
- Maghfiroh, M. F. N., Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., & Abdallah, B. N. (2023a). A location routing problem with time windows consideration: A metaheuristics approach. *Applied Sciences*, 13(2), 843.
- Maghfiroh, M. F. N., Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., & Abdallah, B. N. (2023b). A location routing problem with time windows consideration: A metaheuristics approach. *Applied Sciences*, 13(2), 843.

- Mahdavi, L., Mansour, S., & Sajadieh, M. S. (2022). Sustainable multi-trip periodic redesign-routing model for municipal solid waste collection network: the case study of Tehran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35944–35963.
- Mara, S. T. W., Norcahyo, R., Jodiawan, P., Lusiantoro, L., & Rifai, A. P. (2022). A survey of adaptive large neighborhood search algorithms and applications. *Computers & Operations Research*, 146, 105903.
- Moon, I., Salhi, S., & Feng, X. (2020). The location-routing problem with multi-compartment and multi-trip: formulation and heuristic approaches. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(3), 501–528.
- Muhammad, A. Z. A., Kafi, M. E. P., Hasibuan, N. R., Rahmawatie, N. A., & Rifai, A. P. (2025a). Optimasi Open Location Routing Problem Menggunakan Metode Metaheuristik Simulated Annealing, Large Neighborhood Search, dan Adaptive Large Neighborhood Search. *Jurnal Optimasi Teknik Industri (JOTI)*, 7(1), 9–16.
- Muhammad, A. Z. A., Kafi, M. E. P., Hasibuan, N. R., Rahmawatie, N. A., & Rifai, A. P. (2025b). Optimasi Open Location Routing Problem Menggunakan Metode Metaheuristik Simulated Annealing, Large Neighborhood Search, dan Adaptive Large Neighborhood Search. *Jurnal Optimasi Teknik Industri (JOTI)*, 7(1), 9–16.
- Nadhira, A. H. K., Oktiarso, T., & Harsoyo, T. D. (2019). Manajemen risiko rantai pasok produk sayuran menggunakan metode supply chain operation reference dan model house of risk. *Kurawal-Jurnal Teknologi, Informasi Dan Industri*, 2(2), 101–117.
- Nazry, H. W. N. S., Riza, F., Rizky, F., Gultom, Z. A., Haris, M., & Barus, M. D. B. (2025). Model Optimasi Model Optimasi Rute Transportasi Berbasis Pemrograman Linear. *Jurnal Sistem Informasi Triguna Dharma (JURSI TGD)*, 4(1), 75–81.
- Nevita, A. P., Santoso, R., & Munawi, H. A. (2024). Analisis Efektivitas Manajemen Rantai Pasok dalam UMKM Kerupuk Singkong Sadariyah di Desa Puhjajar. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(1), 146–154.
- Nisa, F. Z., Wati, S. F. A., Rahmadani, A., Setiawan, A. D., & Sekti, M. P. (2023). Studi Literatur: Strategi dan Tantangan dalam Penerapan Supply Chain Management. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Dan Sistem Informasi*, 3(1), 21–33.
- Osman, S. A., Xu, C., Akufu, M., & Paul, E. R. (2023). Perishable Food Supply Chain Management: Challenges and the Way Forward. *Open Journal of Social Sciences*, 11(07), 349–364. <https://doi.org/10.4236/jss.2023.117025>
- Pamungkas, B. P., Yamanda, S. C., Permana, B., Hendrawan, B., & Sahara, S. (2023). Analisis Dari Dampak Yang Terlihat Pada Perkembangan E-Commerce Di Era Digitalisasi Dan Rantai Pasok Logistik. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(15), 616–621.
- Pasandideh, S. H. R., Rahbari, M., & Sadati-Keneti, Y. (2023). A Lagrangian relaxation algorithm and hybrid genetic algorithm-black widow optimization for perishable products supply chain with sustainable development goals consideration. *Annals of Operations Research*, 1–36.

- Patmawati, H., & Nugroho, Y. A. (2022). Optimalisasi Rute Distribusi Matras Pada Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem Dengan Metode Algoritma Genetika. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, 1(11), 2745–2756.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11.
- Putra, M. R., Pambudi, H. K., & Nurdiansyah, Y. (2024). Perancangan Rute Distribusi Dengan Menggunakan Metode Algoritma Genetika Untuk Meminimasi Biaya Transportasi Pada Pengiriman Vaksin Dan Alat Penunjang Pada Pt Pos Logistik. *EProceedings of Engineering*, 11(4).
- Putri, N. R., Christata, B. R., & Primadasa, R. (2025). Usulan Rute Pengiriman Es Kristal Menggunakan Algoritme Sweep dan Algoritme Nearest Neighbor (Studi Kasus: UMKM XYZ Kudus). *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, 7(2).
- Qiu, F., Geng, N., & Wang, H. (2023). An improved memetic algorithm for integrated production scheduling and vehicle routing decisions. *Computers & Operations Research*, 152, 106127.
- Rayhan, M. (2025). Implementasi Jaminan Halal pada Program Makan Bergizi Gratis (MBG) di Kecamatan Medan Timur. *AL-SULTHANIYAH*, 14(2), 370–380.
- Ridwan, M., & Gaffar, M. R. (2022). Efisiensi persediaan dan distribusi melalui integrasi supply chain management. *Applied Business And Administration Journal*, 1(2), 36–44.
- Roosta, S., Mirnajafi Zadeh, S. M., & Bazargan Harandi, H. (2023). Development of a robust multi-objective model for green capacitated location-routing under crisis conditions with time value of money. *Journal of Decisions and Operations Research*, 8(2), 370–390.
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40(4), 455–472.
- Sadati, İ. (2025). An efficient matheuristic integration with benders decomposition for unmanned aerial vehicle routing problem in forest fire surveillance. *Computers & Industrial Engineering*, 204, 111087.
- Saputra, N. Q., & Sukmono, T. (2024). Analisa Optimalisasi Rute Distribusi Untuk Mengefisiensikan Logistik Menggunakan Algoritma Genetika. *Matrik: Jurnal Manajemen Dan Teknik Industri–Produksi*, 25(1), 67–78.
- Shepherd, B. E. (2009). *Global Sensitivity Analysis. The Primer* by SALTELLI, A., RATTO, M., ANDRES, T., CAMPOLONGO, F., CARIBONI, J., GATELLI, D., SAISANA, M., and TARANTOLA, S. Oxford University Press.
- Shuen, H. N., & Johar, F. (2023). Optimization of Capacitated Vehicle Routing Problem for Municipal Solid Waste Collection Using Simulated Annealing Algorithm. *Optimization*, 16, 136–145.

- Sitek, P., Wikarek, J., Rutczyńska-Wdowiak, K., Bocewicz, G., & Banaszak, Z. (2021). Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach. *Neurocomputing*, 423, 670–678.
- Šlebir, M. (2022). Re-examining the center of gravity: Theoretical and structural analysis of the concept. *Revista Científica General José María Córdova*, 20(40), 1024–1044.
- Song, L., & Wu, Z. (2023). An integrated approach for optimizing location-inventory and location-inventory-routing problem for perishable products. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(1), 148–172.
- Suanpang, P., Jamjuntr, P., Jermstittiparsert, K., & Kaewyong, P. (2022). Tourism service scheduling in smart city based on hybrid genetic algorithm simulated annealing algorithm. *Sustainability*, 14(23), 16293.
- Suprpto, F. A., Praditya, E., Dewi, R. M., & Adiyoso, W. (2025). A policy implementation review of the Free Nutritious Meal (MBG) Program. *The Journal of Indonesia Sustainable Development Planning*, 6(2), 297–312.
- Tadaros, M., & Migdalas, A. (2022). Bi-and multi-objective location routing problems: Classification and literature review. *Operational Research*, 22(5), 4641–4683.
- Taj, S., Imran, A. S., Kastrati, Z., Daudpota, S. M., Memon, R. A., & Ahmed, J. (2023). IoT-based supply chain management: A systematic literature review. *Internet of Things*, 24, 100982.
- Tebaldi, L., Murino, T., & Bottani, E. (2020). An adapted version of the water wave optimization algorithm for the capacitated vehicle routing problem with time windows with application to a real case using probe data. *Sustainability*, 12(9), 3666.
- Tirkolaee, E. B., Abbasian, P., & Weber, G.-W. (2021). Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak. *Science of the Total Environment*, 756, 143607.
- Tordecilla, R. D., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., Panadero, J., & Juan, A. A. (2023). The location routing problem with facility sizing decisions. *International Transactions in Operational Research*, 30(2), 915–945.
- Turkeš, R., Sörensen, K., & Hvattum, L. M. (2021). Meta-analysis of metaheuristics: Quantifying the effect of adaptiveness in adaptive large neighborhood search. *European Journal of Operational Research*, 292(2), 423–442.
- Vincent, F. Y., Susanto, H., Jodiawan, P., Ho, T.-W., Lin, S.-W., & Huang, Y.-T. (2022). A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with parcel lockers. *IEEE Access*, 10, 20764–20782.
- Wang, Y., Wang, J., Hao, J.-K., & Feng, J. (2024). Efficient adaptive large neighborhood search for sensor–weapon–target assignment. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 54(10), 6397–6409.

- Winoto, E. S., & Arifin, M. (2024). Penentuan Lokasi Pusat Distribusi Alternatif Gudang Beras Di Kerisedenan Surakarta Melalui Pendekatan Metode Center of Gravity. *Jurnal Teknik Industri, Bisnis Digital, Dan Teknik Logistik*, 3(1), 1–8.
- Wong, Y. Y., & Jamaian, S. S. (2022). A multi-trip vehicle routing problem with time windows for waste collection in bidor region. *Enhanced Knowledge in Sciences and Technology*, 2(1), 464–473.
- Xia, G., Zhang, C., Tang, X., Zhang, Y., & Zhao, L. (2023). Center of gravity position estimation of counterbalanced forklift truck based on multi model data fusion. *International Journal of Automotive Technology*, 24(5), 1335–1347.
- Xu, R., Li, S., & Wu, J. (2023). Multi-trip vehicle routing problem with time windows and resource synchronization on heterogeneous facilities. *Systems*, 11(8), 412.
- Yang, M., Wang, Y., Lu, Y., Yin, L., & Gao, F. (2026). Investigating Capacitated Vehicle Routing Problem Using Clustered Simulated Annealing Algorithm. *Mathematics*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/math14040587>
- Yu, S., Chen, T., & Liu, L. (2026). Large Language Model-Driven Full-Component Evolution of Adaptive Large Neighborhood Search. *ArXiv Preprint ArXiv:2603.06996*.
- Yuliana, A., Saputra, A. S., Fadilla, R., Rahmawati, N., & Fistianingsih, Q. (2025). IMPLEMENTASI PROGRAM MAKAN BERGIZI GRATIS (MBG) DI BERBAGAI WILAYAH INDONESIA DALAM MENINGKATKAN KESEHATAN DAN STATUS GIZI ANAK: STUDI LITERATUR. *Triwikrama: Jurnal Ilmu Sosial*, 11(9), 1501–1510.
- Yusuf, A., & Soediantono, D. (2022). Supply chain management and recommendations for implementation in the defense industry: a literature review. *International Journal of Social and Management Studies*, 3(3), 63–77.
- Zai, I., Widiyanto, E., Fernando, F., Fu, K., Wendy, W., Sylvia, S., & Fernando, F. (2022). Perbandingan Elemen Model Bisnis Third-Party Logistics (3PL) dan Fourth-Party Logistics (4PL) Pada Logistik Angkutan Laut. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Bisnis*, 13(2), 122–131.
- Zhang, B., & Mohammad, J. (2024). Sustainability of Perishable Food Cold Chain Logistics: A Systematic Literature Review. In *SAGE Open* (Vol. 14, Number 3). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
- Zhang, X., Dai, X., Lou, P., & Hu, J. (2025). A multi-strategy alns for the vrp with flexible time windows and delivery locations. *Applied Sciences*, 15(9), 4995.

LAMPIRAN

A - Coordinate Converter (Latitude Longitude – UTM)

The screenshot displays an Excel spreadsheet titled "coordinate_converter" with the following content:

Conversion of Coordinates in Decimal Degrees to UTM

Enter your coordinates

DATUM WGS84

a (semi major axis)	6378137
b (semi minor axis)	6356752.314
Eccentricity	0.081819191
2 nd Eccentric. (e')	0.082094438
e' ²	0.006739497
c (polar radius of curvature)	6399593.626

ENTRY DATA

Latitude	-7.66717953
Longitude	110.4121709
Hemisphere	S

Decimal Degrees

Latitude	Longitude	East (X)	North (Y)	Zone	Band
-7.678677676	110.4138858	435360.038	9151180.383	49	M
-7.665155356	110.4186085	435878.875	9152676.057	49	M
-7.678586563	110.4089245	434812.837	9151189.705	49	M
-7.684076589	110.4200739	436043.321	9150584.432	49	M
-7.66884606	110.4125265	435186.572	9152267.087	49	M
-7.667989422	110.4176822	435777.128	9152862.598	49	M
-7.670096906	110.4110866	435050.004	9152128.612	49	M
-7.666287595	110.4169493	435696.040	9152550.634	49	M
-7.668259224	110.4178903	435800.125	9152332.801	49	M
-7.668654627	110.4121571	435167.853	9152288.225	49	M
-7.667203719	110.4167982	435679.512	9152449.329	49	M
-7.664526202	110.4175928	435766.754	9152745.462	49	M
-7.704875423	110.4348008	437670.553	9148287.184	49	M
-7.664425778	110.4162781	435621.732	9152756.367	49	M
-7.669465987	110.4174944	435756.644	9152199.327	49	M
-7.66717953	110.4121709	435169.157	9152451.307	49	M
-7.663633622	110.4176508	435773.014	9152844.150	49	M
-7.669476057	110.4162008	435613.969	9152198.020	49	M

Degrees, minutes and seconds

Latitude	Longitude	UTM waypoint Garmin
7° 40' 43.24" S	110° 24' 49.989" E	49 M 435360 9151180
7° 39' 54.559" S	110° 25' 6.991" E	49 M 435879 9152676
7° 40' 42.912" S	110° 24' 32.128" E	49 M 434813 9151190
7° 41' 2.676" S	110° 25' 12.266" E	49 M 436043 9150584
7° 40' 7.846" S	110° 24' 44.375" E	49 M 435187 9152267
7° 40' 4.762" S	110° 25' 3.656" E	49 M 435777 9152862
7° 40' 12.349" S	110° 24' 39.912" E	49 M 435050 9152129
7° 39' 58.635" S	110° 25' 1.017" E	49 M 435696 9152551
7° 40' 5.733" S	110° 25' 4.405" E	49 M 435800 9152333
7° 40' 7.157" S	110° 24' 43.765" E	49 M 435168 9152288
7° 40' 1.933" S	110° 25' 0.473" E	49 M 435680 9152449
7° 39' 52.294" S	110° 25' 3.334" E	49 M 435767 9152745
7° 42' 17.552" S	110° 26' 5.283" E	49 M 437671 9148287
7° 39' 51.933" S	110° 24' 58.601" E	49 M 435622 9152756
7° 40' 10.078" S	110° 25' 2.98" W	49 M 435757 9152199
7° 40' 1.846" S	110° 24' 43.815" E	49 M 435169 9152451
7° 39' 49.081" S	110° 25' 3.543" E	49 M 435773 9152844
7° 40' 10.114" S	110° 24' 58.323" E	49 M 435614 9152198

B – Pengolahan Matriks Jarak

[illegible]

C- Pseudocode Perhitungan Jarak Rute Awal

```
def nearest_feasible_customer(
    current_x: float,
    current_y: float,
    remaining_capacity: float,
    unserved: List[Customer],
) -> Customer | None:
    feasible = [c for c in unserved if c.demand <= remaining_capacity + 1e-9]
    if not feasible:
        return None

    # Nearest Neighbor + tie-break demand besar agar kapasitas lebih terpakai.
    return min(
        feasible,
        key=lambda c: (
            euclidean_km(current_x, current_y, c.x, c.y),
            -c.demand,
            c.name,
        ),
    )

def build_initial_routes_for_sppg(data: SPPGData) -> List[Trip]:
    if any(c.demand > VEHICLE_CAPACITY for c in data.customers):
        over = [c.name for c in data.customers if c.demand > VEHICLE_CAPACITY]
        raise ValueError(
            f"Terdapat demand melebihi kapasitas kendaraan di {data.file_name}: {over[:5]}"
        )

    unserved = data.customers.copy()
    trips: List[Trip] = []

    vehicle_available_time: Dict[int, float] = {
```

Python

```
    vehicle_id: int, float] = {
        v: 0.0 for v in range(1, VEHICLES_PER_SPPG + 1)
    }

    vehicle_trip_count: Dict[int, int] = {v: 0 for v in range(1, VEHICLES_PER_SPPG + 1)}

    while unserved:
        vehicle_id = min(
            range(1, VEHICLES_PER_SPPG + 1),
            key=lambda v: (vehicle_available_time[v], v),
        )
        vehicle_trip_count[vehicle_id] += 1
        trip_id = vehicle_trip_count[vehicle_id]
        start_min = vehicle_available_time[vehicle_id]

        current_x, current_y = data.depot.x, data.depot.y
        current_time = start_min
        remaining_capacity = VEHICLE_CAPACITY

        total_demand = 0.0
        total_distance_km = 0.0
        total_travel_min = 0.0
        total_service_min = 0.0
        num_customer_stops = 0

        stops: List[Stop] = [
            Stop(
                sequence=0,
                node_type="DEPOT_START",
                node_name=data.depot.name,
                demand=0.0,
                leg_distance_km=0.0,
                leg_travel_min=0.0,
                arrival_min=start_min
            )
```

Python

```
seq = 1
while True:
    nxt = nearest_feasible_customer(current_x, current_y, remaining_capacity, unserved)
    if nxt is None:
        break

    leg_distance_km = euclidean_km(current_x, current_y, nxt.x, nxt.y)
    leg_travel_min = (leg_distance_km / AVG_SPEED_KMH) * 60.0
    arrival_min = current_time + leg_travel_min
    departure_min = arrival_min + SERVICE_TIME_MIN

    remaining_capacity -= nxt.demand
    total_demand += nxt.demand
    total_distance_km += leg_distance_km
    total_travel_min += leg_travel_min
    total_service_min += SERVICE_TIME_MIN

    stops.append(
        Stop(
            sequence=seq,
            node_type="CUSTOMER",
            node_name=nxt.name,
            demand=nxt.demand,
            leg_distance_km=leg_distance_km,
            leg_travel_min=leg_travel_min,
            arrival_min=arrival_min,
            departure_min=departure_min,
            remaining_capacity=remaining_capacity,
        )
    )

    seq += 1
    current_x, current_y = nxt.x, nxt.y
    current_time = departure_min
    remaining_capacity = remaining_capacity
```

Python

```

    )
    unserved.remove(nxt)
    num_customer_stops += 1
    seq += 1

    current_x, current_y = nxt.x, nxt.y
    current_time = departure_min

if num_customer_stops == 0 and unserved:
    raise ValueError(
        f"Trip kosong terjadi di {data.file_name}; cek data demand/kapasitas."
    )

return_distance_km = euclidean_km(current_x, current_y, data.depot.x, data.depot.y)
return_travel_min = (return_distance_km / AVG_SPEED_KMH) * 60.0
finish_min = current_time + return_travel_min

total_distance_km += return_distance_km
total_travel_min += return_travel_min
total_duration_min = total_travel_min + total_service_min

stops.append(
    Stop(
        sequence=seq,
        node_type="DEPOT_END",
        node_name=data.depot.name,
        demand=0.0,
        leg_distance_km=return_distance_km,
        leg_travel_min=return_travel_min,
        arrival_min=finish_min,
    )
)

```

Python

```

trips.append(
    Trip(
        file_name=data.file_name,
        dapur_id=data.dapur_id,
        sppg_name=data.depot.name,
        vehicle_id=vehicle_id,
        trip_id=trip_id,
        start_min=start_min,
        finish_min=finish_min,
        total_demand=total_demand,
        total_distance_km=total_distance_km,
        total_travel_min=total_travel_min,
        total_service_min=total_service_min,
        total_duration_min=total_duration_min,
        stops=stops,
    )
)

vehicle_available_time[vehicle_id] = finish_min

return trips

```

Python

D - Pseudocode Algoritma ALNS – MTLRPTW

```
def evaluate_and_run(
    depots: Dict[int, Dict[str, Any]],
    customers: Dict[int, Dict[str, Any]],
    initial_state: Dict[str, Any],
    depot_customer_km: Dict[Tuple[int, int], float],
    customer_customer_km: Dict[Tuple[int, int], float],
    ops: Dict[str, Any],
    cfg: Dict[str, Any],
    penalty: Dict[str, Any],
):
    t0 = time.time()
    best_state, best_eval, stats = solve_alns_sa(
        initial_state=clone_state(initial_state),
        depots=depots,
        customers=customers,
        depot_customer_km=depot_customer_km,
        customer_customer_km=customer_customer_km,
        operations=ops,
        alns_config=cfg,
        penalty_config=penalty,
    )
    elapsed = time.time() - t0
    return best_state, best_eval, stats, elapsed
```

Python

```
def better(a: Dict[str, Any], b: Dict[str, Any]) -> Dict[str, Any]:
    af, bf = bool(a["eval"]["feasible"]), bool(b["eval"]["feasible"])
    if af and not bf:
        return a
    if bf and not af:
        return b
    if af and bf:
        return a if a["eval"]["total_distance_km"] <= b["eval"]["total_distance_km"] else b
    return a if a["eval"]["objective"] <= b["eval"]["objective"] else b

def route_rows(state, customers, depot_customer_km, customer_customer_km):
    rows = []
    for d_id, vehicles in state["routes"].items():
        for v_id, trips in vehicles.items():
            for t_idx, trip in enumerate(trips, start=1):
                seq = trip["customers"]
                if not seq:
                    continue
                trip_load = sum(float(customers[c]["demand"]) for c in seq)
                d_km = route_distance_km(d_id, seq, depot_customer_km, customer_customer_km)
                rows.append(
                    {
                        "depot id": d_id,
```

Python

```
def assignment_from_state(state):
    out = {}
    for d_id, vehicles in state["routes"].items():
        for _, trips in vehicles.items():
            for trip in trips:
                for c_id in trip["customers"]:
                    out[c_id] = d_id
    return out

def run_perhitungan_rute_alns():
    base_dir = BASE_DIR

    # Konfigurasi "optimal-praktis": multi-seed + iterasi menengah (jauh lebih efektif dari 1 seed 10k)
    seeds = [42, 77, 99, 123, 2026]
    max_iterations = 2000

    ops = dict(OPERATIONS)
    ops["max_active_depots"] = 6
    ops["depot_opening_cost"] = 25.0
    ops["max_candidate_depots"] = 4

    cfg = dict(ALNS_CONFIG)
```

Python

```
for sd in seeds:
    cfg_run = dict(cfg)
    cfg_run["random_seed"] = sd
    state, ev, stats, elapsed = evaluate_and_run(
        depots, customers, initial_state, depot_customer_km, customer_customer_km, ops, cfg_run, penalty
    )
    rec = {"seed": sd, "state": state, "eval": ev, "stats": stats, "elapsed": elapsed}
    all_runs.append(rec)
    selected = rec if selected is None else better(selected, rec)
    print(
        f"[seed={sd}] dist={ev['total_distance km']:.3f} | obj={ev['objective']:.3f} | "
        f"bw={ev['bw violation']:.3f} CAP={ev['capacity violation']:.3f} SHFT={ev['shift violation']:.3f} "
        f"feasible={int(ev['feasible'])} time={elapsed:.1f}s"
    )

best_state, best_eval, best_stats = selected["state"], selected["eval"], selected["stats"]
old_assign = {c_id: int(c["source_dapur_id"]) for c_id, c in customers.items()}
new_assign = assignment_from_state(best_state)

tag = str(int(time.time()))
summary_fp = base_dir / f"skripsi_final_summary_{tag}.csv"
routes_fp = base_dir / f"skripsi_final_routes_{tag}.csv"
```

Python

```

init_active = set(active depot_ids(initial state))
best_active = set(active depot_ids(best state))
with depot_fp.open("w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    w = csv.writer(f)
    w.writerow(["depot_id", "depot_name", "initial_active", "alns_active", "status"])
    for d_id in sorted(depots.keys()):
        ia = int(d_id in init_active)
        ba = int(d_id in best_active)
        if ia and ba:
            status = "BERTAHAN"
        elif (not ia) and ba:
            status = "DIBUKA"
        elif ia and (not ba):
            status = "DITUTUP"
        else:
            status = "NON_AKTIF"
        w.writerow([d_id, depots[d_id]["name"], ia, ba, status])

with op_fp.open("w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    w = csv.writer(f)
    w.writerow(["operator_type", "operator_name", "final_weight"])
    for k, v in best_stats["destroy_weights"].items():

```

Python

E – Parameter ALNS

4. Parameter Operasional

Pada `alns\_mtlrp\_tw\_sa\_procedural.py`, terdapat:

```

python
OPERATIONS = {
    "vehicle_capacity": 1015.0,
    "speed_kmph": 24.1,
    "service_minutes": 10.0,
    "loading_time_minutes": 15.0,
    "max_vehicles_per_depot": 2,
    "shift_limit_minutes": 480.0,
    "max_active_depots": 8,
    "depot_opening_cost": 0.0,
    "max_candidate_depots": 8,
}

```

5. Penalty atau Hukuman Pelanggaran

Kode ALNS tidak hanya menghitung jarak, tetapi juga menghitung pelanggaran.

Bagian penalty:

```

python
PENALTY_CONFIG = {
    "time_window": 250.0,
    "capacity": 500.0,
    "depot_capacity": 800.0,
    "shift": 120.0,
    "assignment": 3000.0,
    "consistency": 3000.0,
    "active_depot": 400.0,
}

```

6. Parameter ALNS

```

python
ALNS_CONFIG = {
    "max_iterations": 10000,
    "random_seed": 42,
    "temperature_init": 1000.0,
    "cooling_rate": 0.99,
    "reaction_factor": 0.1,
    "segment_length": 100,
    "remove_ratio_min": 0.05,
    "remove_ratio_max": 0.2,
    "sigma1": 33.0,
    "sigma2": 20.0,
    "sigma3": 13.0,
    "require_feasible_solution": False,
}

```

F – Asumsi Data Kendaraan

Traffic Index

Overview

Ranking

World championship

Indonesia

Average congestion level	49.8%
Average speed	24.1 km/h
Average distance driven in 15 min	6.0 km
Highway trip ratio	40.9%

ASTRA

DAIHATSU

Member of ASTRA

JAKARTA PUSAT

Log in

DAIHATSU

Daftar Penjualan Resmi

ASTRA

Mobil BaruPurna JualPromoOutletFleetBeritaTentang Kami

Tanya Dailay +62 21-650-5555

4. Mesin Tangguh, Tetap Irit

Pilih mesin 1.3L atau 1.5L VVT-i sesuai kebutuhan. Tetap hemat dengan konsumsi BBM sekitar 10,6 km/liter, ramah di kantong!