

Implementasi Heuristik School Bus Routing Problem untuk Alokasi Armada Antar-Jemput Siswa

Imam Chalish Rafidhul Haque*, Rosa Ariani Sukamto, Yudi Ahmad Hambali

Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

Email: ^{1,*}imamchalish@upi.edu, ²rosa.ariani@upi.edu, ³yudi.a.hambali@upi.edu

Email Penulis Korespondensi: imamchalish@upi.edu*

Submitted: 09/07/2026; Accepted: 25/07/2026; Published: 30/09/2026

Abstrak—Layanan antar-jemput siswa membutuhkan alokasi armada dan penyusunan rute yang terukur serta sesuai dengan aturan operasional. Pada studi kasus sebuah koperasi di wilayah Lembang, pembagian siswa sebelumnya dilakukan melalui rekap data, *spreadsheet*, komunikasi WhatsApp, dan koordinasi dengan pengemudi. Penelitian ini mengimplementasikan heuristik *School Bus Routing Problem* pada sistem berbasis web untuk mengotomatisasi alokasi siswa ke rit dan menyusun urutan antar-jemput. Algoritma menggunakan *trip-based insertion cost*, *capacity penalty*, *outlier penalty*, *local move improvement*, *soft rebalance*, *Nearest Neighbor*, dan 2-Opt dengan estimasi jarak Haversine. Pengujian dilakukan menggunakan data operasional periode Maret 2026 yang terdiri atas 348 siswa, 17 armada aktif, 17 rit pagi, dan 32 rit pulang. Pengujian dijalankan pada lingkungan lokal Windows 11, PHP 8.2.12, Laravel 11.48.0, dan RAM 16 GB. Seluruh 155 siswa rute pagi dan 322 siswa rute pulang berhasil dialokasikan tanpa pelanggaran aturan operasional. Waktu *generate* aplikasi adalah $8,4552 \pm 0,8638$ detik untuk rute pagi dan $10,2788 \pm 0,4206$ detik untuk rute pulang. Dibandingkan *baseline Sweep-Nearest Neighbor*, metode final mengurangi estimasi jarak Haversine sebesar 40,63% pada rute pagi dan 7,58% pada rute pulang. Metode final juga mengonsolidasikan rute pagi dari 17 menjadi 15 rit dengan utilisasi rit yang digunakan sebesar 90,64%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan alokasi yang memenuhi aturan operasional dengan estimasi jarak lebih rendah daripada *baseline*, meskipun jarak yang dihasilkan belum merepresentasikan jaringan jalan aktual.

Kata Kunci: Alokasi Armada; Antar-Jemput Siswa; Heuristik; School Bus Routing Problem; Sistem Informasi

Abstract—Student shuttle services require measurable fleet allocation and route sequencing that comply with operational constraints. In the case study of a cooperative in the Lembang area, student assignments were previously prepared using operational records, spreadsheets, WhatsApp communication, and driver coordination. This study implements a *School Bus Routing Problem* heuristic in a web-based system to automate student-to-trip allocation and pickup or drop-off sequencing. The algorithm applies trip-based insertion cost, capacity penalty, outlier penalty, local move improvement, soft rebalancing, Nearest Neighbor, and 2-Opt using Haversine distance estimation. The evaluation used March 2026 operational data consisting of 348 students, 17 active fleets, 17 morning trips, and 32 return trips. Testing was conducted in a local environment running Windows 11, PHP 8.2.12, Laravel 11.48.0, and 16 GB of RAM. All 155 eligible morning-route students and 322 eligible return-route students were successfully allocated without violating operational constraints. The application generation time was 8.4552 ± 0.8638 seconds for morning routes and 10.2788 ± 0.4206 seconds for return routes. Compared with the Sweep-Nearest Neighbor baseline, the final method reduced the estimated Haversine distance by 40.63% for morning routes and 7.58% for return routes. The final method also consolidated the morning service from 17 to 15 trips, with 90.64% utilization of the trips used. These results demonstrate that the system can produce operationally feasible allocations with lower estimated distances than the baseline, although the resulting distances do not yet represent actual road-network travel.

Keywords: Fleet Allocation; Heuristic; School Bus Routing Problem; Student Shuttle; Web-Based Information System

1. PENDAHULUAN

Layanan antar-jemput siswa merupakan bagian penting dari sistem pendukung pendidikan karena berkaitan langsung dengan mobilitas harian peserta didik, ketepatan waktu keberangkatan dan kepulangan, kenyamanan orang tua, serta efektivitas pengelolaan armada. Pada layanan dengan jumlah siswa yang banyak dan lokasi tempat tinggal yang tersebar, proses penentuan armada dan urutan rute tidak dapat dilakukan secara sederhana. Pengelola harus mempertimbangkan alamat siswa, kapasitas kendaraan, jenis layanan, jadwal masuk dan pulang sekolah, serta ketersediaan armada. Semakin luas sebaran lokasi siswa dan semakin beragam jadwal kepulangan, semakin tinggi pula kompleksitas dalam proses alokasi armada dan penyusunan rute.

Pada studi kasus sebuah koperasi penyedia layanan antar-jemput siswa di wilayah Lembang, proses pembagian siswa ke armada sebelumnya dilakukan melalui rekap operasional, *spreadsheet*, komunikasi WhatsApp, dan koordinasi dengan pengemudi. Pengelola perlu memeriksa data siswa, jenis layanan, alamat, kapasitas kendaraan, status pembayaran, dan jam kepulangan, kemudian menyesuaikan pembagian berdasarkan pengetahuan lapangan pengemudi. Berdasarkan wawancara dengan pengelola, rangkaian pemeriksaan dan koordinasi tersebut dapat berlangsung selama beberapa hari, bergantung pada kelengkapan data dan perubahan kebutuhan layanan. Informasi tersebut merupakan keterangan kualitatif dan tidak berasal dari pengukuran waktu yang terstandar. Selain membutuhkan koordinasi berulang, proses manual tersebut belum menghasilkan informasi urutan titik, estimasi jarak, dan pemanfaatan rit secara otomatis.

Permasalahan tersebut dapat dipandang sebagai bagian dari *School Bus Routing Problem* (SBRP), yaitu permasalahan optimasi rute transportasi siswa yang berkaitan dengan pembentukan rute, penjadwalan, pemilihan titik layanan, dan pemenuhan batasan operasional [1], [2]. Dalam SBRP, proses perencanaan tidak hanya dipengaruhi oleh jarak, tetapi juga oleh batasan seperti kapasitas kendaraan, lokasi siswa, waktu layanan, status kelayakan siswa, dan ketersediaan armada [3], [4]. Permasalahan routing kendaraan juga berkaitan dengan keluarga *Vehicle Routing Problem* (VRP), yaitu permasalahan penentuan rute kendaraan untuk melayani sejumlah titik dengan batasan tertentu [5]. Pada kasus operasional yang lebih realistis, batasan waktu seperti jam masuk dan jam pulang menjadi aspek penting karena rute harus disusun sesuai jadwal layanan [6].

Penelitian terdahulu telah mengembangkan berbagai pendekatan untuk menyelesaikan SBRP dan VRP. Sciortino, Lewis, dan Thompson [3] mengembangkan heuristik SBRP yang mempertimbangkan armada heterogen dan pemilihan halte serta mengevaluasinya menggunakan instansi dunia nyata. Penelitian tersebut berfokus pada pembentukan rute dan pemilihan halte, bukan pada integrasi kelayakan data siswa dengan sistem operasional. Hegde dan Vaze [7] mengembangkan heuristik *cluster-then-route* berbasis jaringan jalan untuk kasus layanan bus sekolah di wilayah perdesaan. Sementara itu, Caceres dkk. [8] mengevaluasi kebijakan *open offer* melalui simulasi menggunakan data sintesis dan data distrik sekolah nyata. Kedua penelitian tersebut mempertimbangkan kondisi operasional transportasi, tetapi tidak berfokus pada pembayaran, jenis layanan, sesi kepulangan, dan perubahan status rit.

Pada konteks VRP, Liu dkk. [9] mengulas perkembangan metode heuristik dan menunjukkan bahwa pendekatan heuristik dapat menghasilkan solusi yang memadai dengan biaya komputasi yang lebih terjangkau. Arce-Ortega dkk. [10] mengevaluasi *Simulated Annealing* pada CVRP homogen menggunakan instansi *benchmark*. Pendekatan tersebut digunakan untuk menguji kualitas algoritma optimasi, tetapi belum merepresentasikan keterkaitan antara hasil algoritma dan aturan administratif pada sistem layanan. Rosyida, Sugianto, dan Efendi [11] mengombinasikan *Sweep* dan *Nearest Neighbor* untuk mengelompokkan titik dan menyusun rute distribusi. *Sweep* membentuk kelompok berdasarkan sudut terhadap satu titik pusat, tetapi dapat kurang sesuai untuk rute pagi antar-jemput siswa apabila kendaraan memiliki basis awal yang berbeda.

Sistem berbasis web juga telah digunakan untuk mengintegrasikan pengelolaan data, optimasi rute, dan penyajian informasi perjalanan [12], [13]. Meskipun demikian, pengelola layanan antar-jemput siswa tidak hanya membutuhkan urutan perjalanan. Proses *generate* perlu menghubungkan data operasional berupa status pembayaran, jenis layanan, koordinat siswa, kapasitas per rit, status aktif armada, dan sesi kepulangan. Tanpa integrasi tersebut, siswa yang belum memenuhi syarat dapat ikut teralokasi, kapasitas dapat terlampaui, atau siswa dapat ditempatkan pada rit dengan waktu keberangkatan yang tidak sesuai.

Penelitian ini mengimplementasikan heuristik SBRP pada sistem berbasis web untuk mengotomatisasi alokasi siswa ke rit dan penyusunan urutan antar-jemput. Rute pagi memproses siswa dengan layanan *full* dan *pickup_only* dari basis armada menuju siswa dan berakhir di sekolah. Rute pulang memproses siswa dengan layanan *full* dan *dropoff_only* dari sekolah menuju siswa berdasarkan sesi kepulangannya. Algoritma menggunakan *trip-based insertion cost* untuk mengevaluasi tambahan jarak setiap siswa terhadap rit, dilanjutkan dengan *local move improvement*, *soft rebalance*, *Nearest Neighbor*, dan 2-Opt [14], [15].

Kontribusi utama penelitian bukan berupa usulan metaheuristik baru, melainkan adaptasi dan evaluasi kombinasi heuristik pada proses operasional berbasis rit. Berbeda dengan pengelompokan *school-centric*, rute pagi mempertimbangkan basis masing-masing armada sebagai titik awal. Kapasitas dihitung per rit, bukan hanya per kendaraan, dan proses alokasi dibatasi oleh pembayaran, jenis layanan, koordinat, status aktif, serta sesi kepulangan. Metode final juga dibandingkan dengan *baseline Sweep-Nearest Neighbor* menggunakan snapshot data dan ukuran evaluasi yang sama. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengukur estimasi jarak, pemanfaatan kapasitas, rit yang digunakan, dan waktu komputasi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengimplementasikan dan mengevaluasi heuristik SBRP untuk alokasi armada serta penyusunan rute antar-jemput siswa pada sistem berbasis web. Evaluasi dilakukan berdasarkan keberhasilan alokasi, kepatuhan terhadap aturan operasional, stabilitas waktu *generate*, estimasi jarak dibandingkan dengan *baseline*, utilisasi rit, respons terhadap skenario negatif, dan kemampuan sistem melakukan *generate* ulang ketika data berubah. Melalui penerapan tersebut, sistem diharapkan dapat membantu pengelola menentukan alokasi armada dan urutan rute berdasarkan indikator yang terukur, seperti estimasi jarak, kapasitas kendaraan, dan pemanfaatan rit. Solusi yang dihasilkan tetap merupakan solusi heuristik berdasarkan estimasi jarak antarkoordinat, bukan solusi optimal global maupun jarak tempuh aktual pada jaringan jalan.

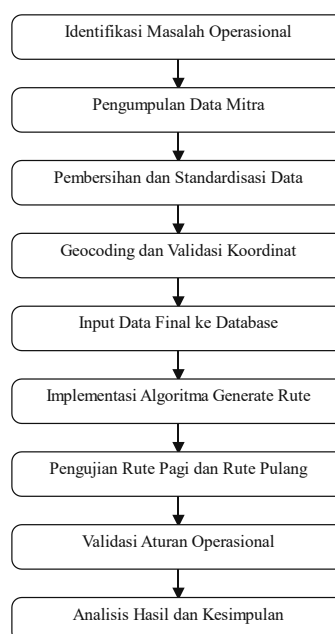
2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus pada layanan antar-jemput siswa yang dikelola oleh sebuah koperasi di wilayah Lembang. Fokus penelitian diarahkan pada implementasi dan evaluasi heuristik *School Bus Routing Problem* (SBRP) untuk membantu proses alokasi armada dan penyusunan urutan rute antar-jemput siswa berbasis web. Penelitian ini tidak membahas seluruh modul sistem informasi secara mendalam, tetapi difokuskan

pada modul generate rute pagi dan rute pulang, validasi aturan operasional, pengukuran waktu generate, serta pengujian generate ulang ketika terjadi perubahan data.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1. Alur tersebut menggambarkan proses mulai dari identifikasi masalah operasional, pengolahan data, implementasi algoritma, pengujian sistem, hingga analisis hasil pengujian.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan secara berurutan melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah identifikasi kebutuhan operasional melalui pengamatan terhadap proses manual layanan antar-jemput siswa. Pada tahap ini diperoleh informasi bahwa proses pembagian siswa ke armada masih dilakukan melalui rekap data, *spreadsheet*, komunikasi dengan sopir, dan penyesuaian manual berdasarkan wilayah serta jadwal layanan.

Tahap kedua adalah pengumpulan data operasional periode Maret 2026 yang diperoleh dari rekap layanan mitra. Data tersebut memuat siswa, armada, sesi layanan, alamat, jenjang, kelas, dan jenis layanan. Penggabungan data awal menghasilkan 479 baris karena seorang siswa dapat muncul pada rekap layanan atau pengemudi yang berbeda. Tahap ketiga adalah prapemrosesan data yang meliputi normalisasi nama dan jenjang, standardisasi jenis layanan, deduplikasi, pelengkapan alamat, *geocoding*, validasi area koordinat, dan pemeriksaan manual melalui peta. Setelah proses tersebut diperoleh *dataset* final sebanyak 348 siswa unik. Rincian *dataset* dan validasi koordinat dijelaskan pada Subbab 2.2.

Tahap keempat adalah implementasi sistem berbasis web yang menyimpan data siswa, armada, rit, jenis layanan, status pembayaran, koordinat, dan jam kepulangan siswa. Sistem menjalankan modul *generate* rute untuk dua arah layanan, yaitu rute pagi dari basis armada menuju siswa dan berakhir di sekolah serta rute pulang dari sekolah menuju siswa berdasarkan sesi kepulangan. Tahap kelima adalah pengujian menggunakan *dataset* final yang telah dibekukan. Pengujian mencakup pengulangan proses *generate*, perbandingan metode final dengan baseline *Sweep-Nearest Neighbor*, validasi aturan operasional, serta skenario negatif berupa kapasitas tidak mencukupi, koordinat tidak valid, dan rit yang tidak tersedia. Tahap terakhir adalah analisis jumlah siswa teralokasi, rit yang digunakan, utilisasi kapasitas, estimasi jarak berbasis *Haversine*, waktu proses, dan respons sistem ketika terjadi perubahan data.

2.2 Dataset Penelitian

Dataset penelitian berasal dari data operasional mitra periode Maret 2026 yang diberikan oleh pengelola melalui komunikasi elektronik dalam konteks pengembangan dan pengujian sistem. Data awal berasal dari rekap layanan pengemudi yang memuat siswa, armada, alamat, jenjang, kelas, jenis layanan, dan jadwal kepulangan. Penggabungan rekap menghasilkan 479 baris data. Setelah normalisasi dan deduplikasi berdasarkan identitas serta informasi layanan, diperoleh 348 siswa unik sebagai *dataset* final.

Alamat yang belum lengkap terlebih dahulu dilengkapi dengan informasi wilayah administratif. Proses *geocoding* dilakukan menggunakan add-on Geocode by Awesome Table pada Google Sheets. Berdasarkan status pada data import final, 298 dari 348 siswa (85,63%) memperoleh koordinat yang diterima secara otomatis, 46 data (13,22%) ditandai untuk pemeriksaan manual, dua data (0,57%) menggunakan hasil koreksi manual, dan dua data (0,57%) menggunakan titik kumpul. Seluruh titik pada *dataset* akhir selanjutnya ditinjau melalui peta, terutama untuk alamat yang pendek, ambigu, atau berupa patokan umum. Koreksi dilakukan menggunakan Google Maps apabila hasil *geocoding* tidak sesuai dengan alamat atau wilayah layanan.

Koordinat dinyatakan valid apabila *latitude* dan *longitude* tersedia dalam format numerik, berada pada rentang global yang valid, yaitu -90 sampai 90 untuk *latitude* dan -180 sampai 180 untuk *longitude*, serta secara visual masih sesuai dengan alamat atau titik kumpul pada wilayah layanan Lembang, Parongpong, dan sekitarnya. Setelah tahap pemeriksaan, seluruh 348 siswa memiliki koordinat final yang lengkap. Persentase 100% tersebut menunjukkan kelengkapan koordinat setelah pemeriksaan dan koreksi, bukan tingkat keberhasilan *geocoding* otomatis.

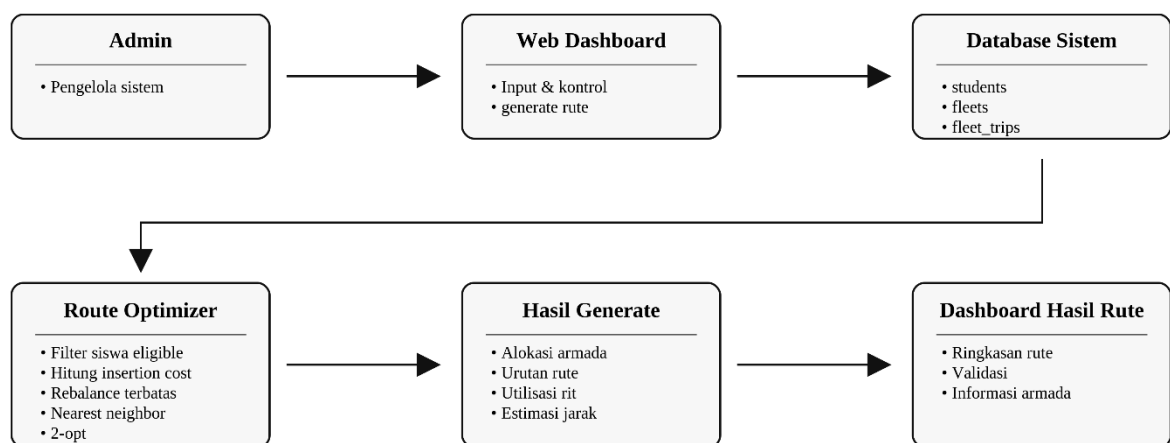
Dataset final terdiri atas 129 siswa layanan *full*, 26 siswa layanan *pickup_only*, dan 193 siswa layanan *dropoff_only*. Rute pagi memproses siswa dengan layanan *full* dan *pickup_only* sehingga terdapat 155 siswa *eligible*. Rute pulang memproses siswa dengan layanan *full* dan *dropoff_only* sehingga terdapat 322 siswa *eligible*. Siswa rute pulang dikelompokkan ke dalam lima sesi kepulangan, yaitu pukul 13:00, 13:30, 14:30, 15:30, dan 15:45. Sumber daya operasional yang tersedia terdiri atas 17 armada aktif, 17 rit pagi aktif, dan 32 rit pulang aktif.

Untuk menjaga kerahasiaan data, identitas siswa dan pengemudi hanya digunakan pada tahap internal pengembangan sistem. Artikel tidak menampilkan nama, nomor kontak, alamat rinci, identitas pengemudi, nomor kendaraan, maupun koordinat individual. Seluruh hasil pengujian disajikan dalam bentuk agregat. *Dataset* operasional tidak dipublikasikan sebagai data terbuka karena memuat informasi layanan siswa.

2.3 Perancangan Sistem dan Algoritma

Sistem yang dikembangkan berbasis web dan memiliki komponen utama berupa pengelolaan data siswa, armada, rit, pembayaran, dan modul generate rute. Data siswa berisi nama, jenjang, kelas, alamat, koordinat *latitude* dan *longitude*, jenis layanan, status pembayaran, serta jam pulang. Data armada berisi identitas armada, kapasitas, status aktif, dan informasi rit yang tersedia. Proses generate rute hanya memproses siswa yang memenuhi syarat, yaitu siswa berstatus lunas, memiliki koordinat valid, memiliki jenis layanan yang sesuai dengan arah layanan, serta memiliki jadwal pulang untuk rute pulang.

Arsitektur sistem generate rute ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem memanfaatkan data siswa, armada, rit, dan pembayaran sebagai input utama. Data tersebut disimpan pada *database* sistem dan diproses oleh *route optimizer* untuk menghasilkan alokasi armada, urutan siswa, estimasi jarak, dan ringkasan pemanfaatan rit.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Generate Rute

Algoritma menerapkan pendekatan *trip-based insertion cost*. Setiap rit aktif diperlakukan sebagai wadah kapasitas tersendiri karena satu armada dapat memiliki lebih dari satu rit. Sebelum proses alokasi, sistem memilih siswa berdasarkan status pembayaran, jenis layanan, validitas koordinat, dan sesi kepulangan. Siswa yang tidak memenuhi syarat tidak dimasukkan ke dalam proses *assignment*.

Arah optimasi utama adalah menghasilkan alokasi yang memenuhi aturan operasional dengan estimasi total jarak serendah mungkin. Secara umum, fungsi evaluasi jarak dinyatakan sebagai:

$$\min Z = \sum_{k \in K} D(R_k) \quad (1)$$

dengan $D(R_k)$ sebagai estimasi jarak rit k dan K sebagai himpunan rit yang diproses. Fungsi tersebut tidak digunakan untuk mengklaim solusi optimal global, tetapi sebagai arah evaluasi pada proses konstruktif dan perbaikan lokal. Pada rute pagi, jarak rit dihitung dari basis armada menuju urutan siswa dan berakhir di sekolah:

$$D_{\text{pagi}}(R_k) = H(b_k, r_1) + \sum_{j=1}^{m-1} H(r_j, r_{j+1}) + H(r_m, s) \quad (2)$$

Pada rute pulang, jarak dihitung dari sekolah menuju urutan siswa terakhir:

$$D_{\text{pulang}}(R_k) = H(s, r_1) + \sum_{j=1}^{m-1} H(r_j, r_{j+1}) \quad (3)$$

dengan H sebagai jarak Haversine, b_k sebagai koordinat basis armada pada rit k , s sebagai koordinat sekolah, r_j sebagai siswa pada urutan ke- j , dan m sebagai jumlah siswa pada rit tersebut. Perhitungan menggunakan radius bumi 6.371 km. Pendekatan Haversine digunakan sebagai estimasi jarak antarkoordinat dan telah diterapkan pada berbagai sistem informasi geografis berbasis lokasi [16], [17], [18], [19]. Dengan formulasi ini, rute pagi mempertimbangkan posisi awal armada dan tidak hanya mengelompokkan siswa berdasarkan arah dari sekolah.

Siswa valid diurutkan berdasarkan jaraknya dari sekolah secara menurun agar siswa yang relatif jauh diproses sebelum kapasitas rit banyak terisi. Untuk setiap siswa i , sistem mencoba seluruh rit k yang masih memiliki kapasitas. Tambahan jarak atau *insertion cost* dihitung sebagai:

$$\Delta d_{ik} = D(R_k \oplus i) - D(R_k) \quad (4)$$

dengan $R_k \oplus i$ sebagai estimasi rute setelah siswa i dimasukkan ke rit k . Skor *assignment* kemudian dihitung menggunakan:

$$\text{Score}_{ik} = \Delta d_{ik} + 0,3u_k + 0,15H(i, c_k) \quad (5)$$

dengan $u_k = \frac{n_k}{C_k}$ sebagai rasio keterisian rit, n_k sebagai jumlah siswa sementara, C_k sebagai kapasitas rit,

dan c_k sebagai *centroid* siswa yang telah berada pada rit. Jika rit masih kosong, penalti *centroid* bernilai nol. Rit dengan skor paling kecil dipilih selama kapasitasnya masih tersedia. *Insertion cost* menjadi komponen utama untuk menilai pengaruh siswa terhadap keseluruhan rute, sedangkan *capacity penalty* dan *outlier penalty* berfungsi sebagai penalti lunak untuk mencegah pemusatan berlebihan dan penggabungan titik yang terlalu jauh dari kelompok utama. Nilai *Score* merupakan nilai peringkat heuristik, bukan jarak fisik murni, sedangkan koefisien 0,3 dan 0,15 merupakan bobot penalti yang digunakan dalam implementasi untuk membandingkan kandidat rit.

Setelah *assignment* awal, *local move improvement* mengevaluasi pemindahan seorang siswa dari satu rit ke rit lainnya. Perpindahan diterima apabila rit tujuan masih memiliki kapasitas dan total estimasi jarak kedua rit setelah perpindahan lebih kecil daripada sebelumnya. Perbaikan dijalankan paling banyak lima iterasi dan menggunakan nilai *epsilon* 10^{-6} untuk menentukan perbaikan jarak yang bermakna.

Sistem selanjutnya menjalankan *soft rebalance* secara terbatas. Rit dengan keterisian lebih dari 90% dapat menjadi sumber perpindahan, sedangkan rit dengan keterisian kurang dari 65% dapat menjadi tujuan. Setelah perpindahan, rit sumber tidak boleh memiliki keterisian kurang dari 65% dan rit tujuan tidak boleh melampaui kapasitas. Tambahan jarak maksimum yang dapat diterima adalah 1,5 km untuk rute pagi dan 2,0 km untuk rute pulang. Proses dibatasi maksimal 20 iterasi untuk rute pagi dan 10 iterasi untuk setiap sesi rute pulang. Mekanisme ini tidak bertujuan menyamakan jumlah siswa pada seluruh rit; perpindahan hanya dilakukan jika tidak mengorbankan jarak secara berlebihan.

Setelah alokasi selesai, urutan awal perjalanan disusun menggunakan *Nearest Neighbor*. Pada rute pagi, pencarian dimulai dari basis armada dan berakhir di sekolah, sedangkan pada rute pulang pencarian dimulai dari sekolah. Urutan tersebut diperbaiki menggunakan *2-Opt* dengan membalik segmen rute apabila menghasilkan jarak yang lebih pendek. Proses *2-Opt* dihentikan ketika satu pemeriksaan penuh tidak lagi menemukan pertukaran yang dapat menurunkan estimasi jarak.

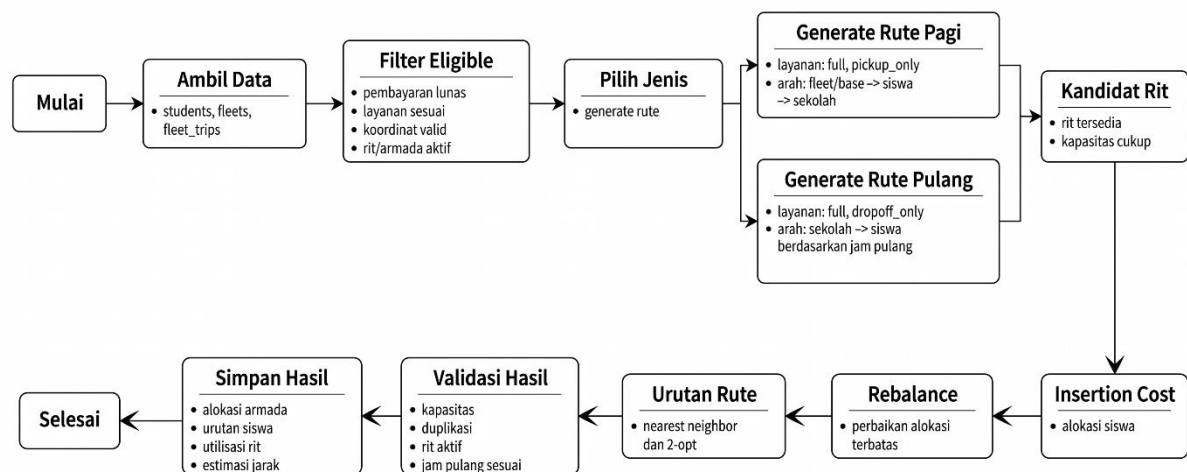
Rute pulang diproses secara terpisah untuk setiap *session_out*. Siswa hanya dibandingkan dengan rit aktif yang memiliki waktu keberangkatan sesuai dengan sesi kepulangannya. Dengan demikian, fungsi objektif jarak tetap dijalankan di dalam batasan pembayaran, jenis layanan, koordinat, kapasitas, status aktif, dan kesesuaian sesi. Rincian parameter yang digunakan pada algoritma final disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Algoritma Final

Parameter	Pagi	Pulang
Bobot <i>capacity penalty</i>	0,3	0,3
Bobot <i>outlier penalty</i>	0,15	0,15
Maksimum iterasi <i>local move</i>	5	5
<i>Epsilon</i> perbaikan	10^{-6}	10^{-6}
Batas rit <i>underfilled</i>	< 65%	< 65%
Batas rit <i>overfilled</i>	> 90%	> 90%

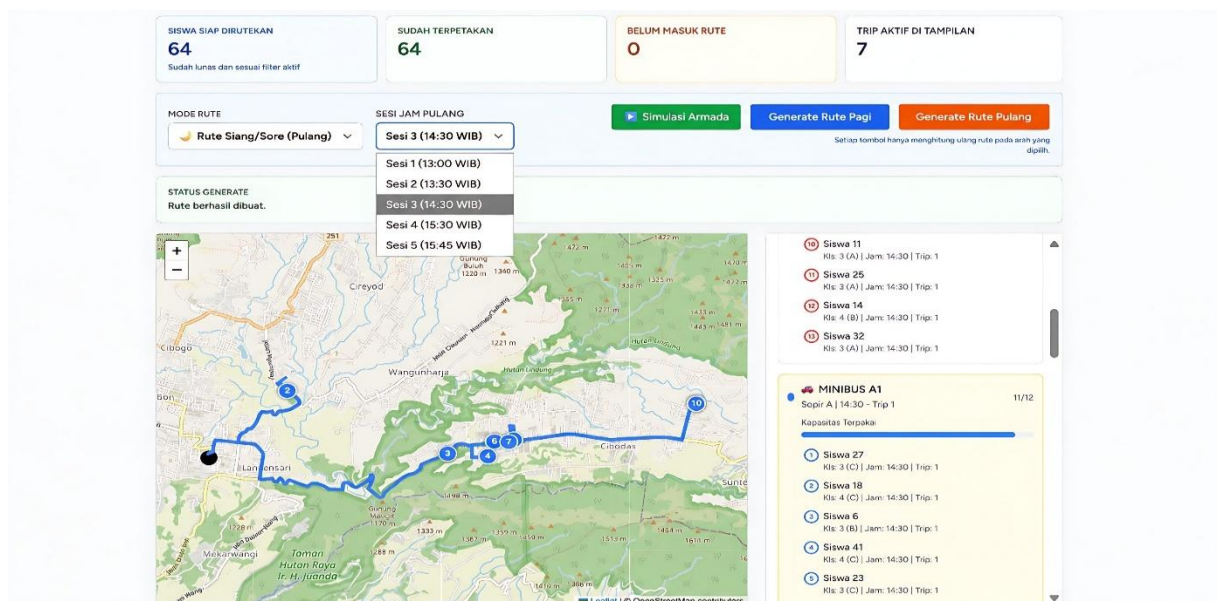
Maksimum tambahan jarak <i>rebalance</i>	1,5 km	2,0 km
Maksimum iterasi <i>rebalance</i>	20	10 per sesi
Kondisi berhenti 2-Opt	Tidak ditemukan rute yang lebih pendek dalam satu pemeriksaan penuh	Tidak ditemukan rute yang lebih pendek dalam satu pemeriksaan penuh

Alur algoritma generate rute ditunjukkan pada Gambar 3. Proses dimulai dari pengambilan data dan filter siswa *eligible*, kemudian dibedakan menjadi generate rute pagi dan generate rute pulang. Perbedaan utama kedua proses terletak pada arah perjalanan dan pengelompokan layanan, di mana rute pagi bergerak dari armada menuju siswa lalu ke sekolah, sedangkan rute pulang bergerak dari sekolah menuju siswa berdasarkan sesi jam pulang.



Gambar 3. Alur Algoritma Generate Rute

Tampilan implementasi modul *generate* rute ditunjukkan pada Gambar 4. Modul ini menampilkan mode rute, sesi jam pulang, peta hasil rute, ringkasan status alokasi, serta daftar penugasan armada yang berisi urutan siswa pada setiap rit. Tampilan tersebut digunakan oleh pengelola untuk menjalankan proses *generate* rute pagi maupun rute pulang dan memeriksa hasil alokasi siswa pada setiap rit.



Gambar 4. Tampilan Modul Generate Rute dan Penugasan Armada

2.4 Skenario Pengujian

Pengujian terdiri atas pengujian *generate* aplikasi, *benchmark* metode, validasi aturan operasional, skenario negatif, dan pengujian *generate* ulang. Pengujian *generate* aplikasi dilakukan sebanyak sepuluh kali menggunakan *dataset* yang sama. Parameter yang dicatat meliputi siswa diproses, siswa teralokasi, siswa tidak teralokasi, rit

aktif, rit digunakan, dan waktu *generate*. Waktu pada pengujian ini mencakup proses *optimizer* dan penyimpanan hasil *assignment* ke *database*.

Pengujian perbandingan dilakukan antara metode final dan baseline *Sweep-Nearest Neighbor* (*sweep_nn*). Baseline mengurutkan siswa berdasarkan sudut terhadap sekolah, membaginya ke rit dengan memperhatikan kapasitas, dan menyusun urutan perjalanan menggunakan *Nearest Neighbor*. Baseline tersebut merepresentasikan tahap pengembangan sebelumnya yang masih *school-centric* dan belum menggunakan *trip-based insertion cost*, *local move improvement*, serta *soft rebalance*. Pada rute pagi, keterbatasan baseline adalah pengelompokan dari sudut sekolah belum memperhitungkan posisi awal setiap armada.

Kedua metode dijalankan menggunakan *snapshot* data yang sama sebanyak sepuluh kali. *Snapshot* dimuat sebelum pencatatan waktu dimulai dan urutan eksekusi metode dipertukarkan berdasarkan nomor percobaan untuk mengurangi bias *cache* atau urutan eksekusi. Parameter evaluasi meliputi jumlah siswa teralokasi, jumlah rit yang digunakan, estimasi total jarak Haversine, utilisasi kapasitas rit yang digunakan, pelanggaran aturan operasional, serta rata-rata dan standar deviasi waktu algoritma.

Benchmark dijalankan pada komputer lokal dengan Windows 11, prosesor AMD Ryzen 7 8845HS, dan RAM 16 GB. Lingkungan perangkat lunak menggunakan PHP 8.2.12, Laravel 11.48.0, dan SQLite 3.39.2. Waktu *benchmark* hanya mengukur eksekusi metode setelah *snapshot* data dimuat sehingga tidak disamakan dengan waktu *generate* aplikasi yang juga mencakup penyimpanan hasil.

Validasi aturan operasional dilakukan untuk memeriksa pembayaran, jenis layanan, validitas koordinat, kapasitas rit, status aktif armada dan rit, duplikasi siswa, duplikasi nomorurut, serta kesesuaian sesi kepulangan. Pengujian negatif menggunakan *fixture database* terisolasi yang tidak mengubah data produksi. Skenarionya mencakup tiga kondisi: kapasitas tersedia lebih kecil daripada jumlah siswa *eligible*, siswa memiliki koordinat di luar rentang valid, dan tidak terdapat rit aktif pada sesi kepulangan siswa. Sistem dinilai benar apabila siswa yang tidak dapat dilayani dicatat sebagai tidak teralokasi tanpa menghasilkan *assignment* yang melanggar aturan.

Pengujian *generate* ulang dilakukan pada *database* salinan dengan perubahan berupa penambahan satu siswa uji, perubahan status pembayaran, dan penonaktifan rit atau armada. Siswa tambahan hanya digunakan dalam skenario pengujian dan tidak menjadi bagian dari *dataset* kanonik 348 siswa. Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem memperbarui hasil *assignment* ketika data operasional berubah.

Persentase perbaikan jarak dihitung terhadap metode *baseline* menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Improvement} = \frac{D_{\text{baseline}} - D_{\text{final}}}{D_{\text{baseline}}} \times 100\% \quad (6)$$

dengan D_{baseline} sebagai estimasi jarak yang dihasilkan metode *Sweep-Nearest Neighbor* dan D_{final} sebagai estimasi jarak metode final. Nilai *Improvement* yang positif menunjukkan bahwa metode final menghasilkan estimasi jarak yang lebih rendah daripada *baseline*. Utilisasi kapasitas rit yang digunakan dihitung berdasarkan jumlah siswa yang teralokasi dibandingkan dengan total kapasitas rit yang benar-benar digunakan.

$$U_{\text{rit digunakan}} = \frac{N}{\sum_{k \in K_{\text{used}}} C_k} \times 100\% \quad (7)$$

Pada persamaan tersebut, N menyatakan jumlah siswa teralokasi, K_{used} menyatakan himpunan rit yang digunakan, dan C_k menyatakan kapasitas rit k .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem alokasi armada dan penyusunan rute antar-jemput siswa berbasis heuristik *School Bus Routing Problem*. Pengujian dilakukan menggunakan *dataset* final yang telah melalui proses pembersihan, validasi koordinat, dan input ke *database* sistem. Evaluasi difokuskan pada profil *dataset*, hasil *generate* rute pagi, hasil *generate* rute pulang, validasi aturan operasional, pemanfaatan rit, serta kemampuan sistem dalam melakukan *generate* ulang ketika terjadi perubahan data. Proses pengujian dilakukan melalui modul *generate* rute sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan data hasil pengujian disajikan secara terstruktur pada tabel dan uraian pembahasan berikut.

3.1 Profil Dataset

Dataset pengujian terdiri dari 348 siswa yang telah memiliki status pembayaran lunas dan koordinat valid. Data tersebut berasal dari rekap operasional mitra yang sebelumnya tersebar pada beberapa *sheet* sopir, kemudian digabungkan dan dibersihkan menjadi data master. Proses pembersihan data dilakukan sebelum pengujian agar sistem dapat memproses data dengan format yang seragam. Jenis layanan siswa dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu *full*, *pickup_only*, dan *dropoff_only*. Kategori *full* menunjukkan siswa yang menggunakan layanan antar dan jemput, *pickup_only* menunjukkan siswa yang hanya menggunakan layanan berangkat, sedangkan *dropoff_only* menunjukkan siswa yang hanya menggunakan layanan pulang.

Distribusi jenis layanan menunjukkan bahwa terdapat 129 siswa layanan *full*, 26 siswa layanan *pickup_only*, dan 193 siswa layanan *dropoff_only*. Dengan demikian, siswa yang memenuhi syarat untuk rute pagi adalah siswa *full* dan *pickup_only*, yaitu sebanyak 155 siswa. Sementara itu, siswa yang memenuhi syarat untuk rute pulang adalah siswa *full* dan *dropoff_only*, yaitu sebanyak 322 siswa. Perbedaan jumlah siswa antara rute pagi

dan rute pulang menunjukkan bahwa kebutuhan layanan pulang lebih besar dibandingkan layanan pagi. Hal ini juga berdampak pada jumlah rit yang digunakan, karena rute pulang harus memproses siswa dalam beberapa sesi jam kepulangan.

Tabel 2 menunjukkan profil *dataset* yang digunakan dalam pengujian.

Tabel 2. Profil Dataset Pengujian

Data	Nilai
Jumlah siswa final	348 siswa
Siswa layanan <i>full</i>	129 siswa
Siswa layanan <i>pickup_only</i>	26 siswa
Siswa layanan <i>dropoff_only</i>	193 siswa
Siswa berstatus lunas	348 siswa
Siswa dengan koordinat valid	348 siswa
Armada aktif	17 armada
Rit pagi aktif	17 rit
Rit pulang aktif	32 rit
Siswa memenuhi syarat rute pagi	155 siswa
Siswa memenuhi syarat rute pulang	322 siswa

Selain berdasarkan jenis layanan, dataset juga diklasifikasikan berdasarkan jenjang sekolah. Jumlah siswa jenjang TK adalah 36 siswa, SD sebanyak 205 siswa, dan SMP sebanyak 107 siswa. Distribusi ini menunjukkan bahwa mayoritas siswa berasal dari jenjang SD. Informasi jenjang digunakan sebagai bagian dari data operasional, sedangkan proses generate rute lebih banyak dipengaruhi oleh jenis layanan, koordinat, kapasitas armada, dan jam pulang.

Pada rute pulang, siswa dikelompokkan berdasarkan jam kepulangan. Terdapat lima sesi kepulangan, yaitu pukul 13:00, 13:30, 14:30, 15:30, dan 15:45. Jumlah siswa terbanyak terdapat pada sesi 15:45, yaitu 96 siswa, sedangkan jumlah siswa paling sedikit terdapat pada sesi 13:00, yaitu 34 siswa. Pengelompokan berdasarkan jam pulang penting dilakukan agar sistem tidak hanya menghasilkan rute yang layak dari sisi kapasitas, tetapi juga sesuai dengan jadwal operasional sekolah.

Tabel 3 menunjukkan distribusi siswa berdasarkan sesi kepulangan.

Tabel 3. Distribusi Siswa Berdasarkan Jam Pulang

Jam Pulang	Jumlah Siswa
13:00	34 siswa
13:30	61 siswa
14:30	64 siswa
15:30	67 siswa
15:45	96 siswa
Total	322 siswa

Berdasarkan profil dataset tersebut, data pengujian telah memenuhi kebutuhan awal sistem karena seluruh siswa memiliki status pembayaran lunas dan koordinat valid. Hal ini memungkinkan pengujian difokuskan pada kemampuan algoritma dalam mengalokasikan siswa ke rit, menyusun urutan rute, memenuhi aturan operasional, dan menghasilkan waktu proses yang terukur.

3.2 Hasil Generate Rute Pagi

Pengujian *generate* rute pagi dan pulang masing-masing dilakukan sebanyak sepuluh kali menggunakan *dataset* dan lingkungan pengujian yang sama. Rute pagi memproses 155 siswa dengan layanan *full* dan *pickup_only*, sedangkan rute pulang memproses 322 siswa dengan layanan *full* dan *dropoff_only* yang dikelompokkan berdasarkan lima sesi kepulangan. Ringkasan hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian *Generate* Rute

Arah	Percobaan	Teralokasi	Rit Digunakan	Rentang Waktu (detik)	Rata-Rata $\pm$ SD (detik)
Pagi	10	155/155	15/17	6,5583–9,0393	8,4552 $\pm$ 0,8638
Pulang	10	322/322	32/32	9,3605–10,9153	10,2788 $\pm$ 0,4206

Berdasarkan Tabel 4, seluruh siswa yang memenuhi syarat berhasil dialokasikan secara konsisten pada sepuluh percobaan. Rute pagi menggunakan 15 dari 17 rit aktif tanpa melampaui kapasitas, sedangkan rute pulang menggunakan seluruh 32 rit karena siswa hanya dapat ditempatkan pada rit yang sesuai dengan sesi kepulangannya. Algoritma tidak bertujuan memaksa seluruh rit digunakan apabila kebutuhan siswa masih dapat dipenuhi oleh rit lain yang tersedia.

Koefisien variasi waktu pengujian pagi adalah 10,22%, sedangkan pengujian pulang sebesar 4,09%. Variasi waktu tidak mengubah jumlah siswa teralokasi maupun jumlah rit yang digunakan. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh proses penyimpanan *assignment* dan penggunaan sumber daya komputer selama pengujian. Waktu pada tabel merupakan waktu aplikasi yang mencakup eksekusi *optimizer* dan penyimpanan hasil ke *database*, sehingga berbeda dari waktu komputasi metode pada pengujian *benchmark*.

3.3 Validasi Aturan Operasional

Validasi aturan operasional dilakukan untuk memastikan bahwa hasil generate rute tidak hanya cepat, tetapi juga sesuai dengan batasan yang ditetapkan dalam sistem. Validasi dilakukan terhadap rute pagi dan rute pulang. Aspek yang diperiksa meliputi status pembayaran siswa, kesesuaian jenis layanan, kelengkapan koordinat, nomorurut rute, duplikasi siswa atau nomorurut dalam rit, kapasitas kendaraan, status aktif rit atau armada, serta kesesuaian jam pulang untuk rute pulang.

Tabel 5 menunjukkan hasil validasi aturan operasional pada hasil generate rute.

Tabel 5. Hasil Validasi Aturan Operasional

Pemeriksaan	Jumlah Pelanggaran	Status
Siswa belum lunas masuk rute	0	Sesuai
Siswa salah jenis layanan	0	Sesuai
Siswa tanpa koordinat valid	0	Sesuai
Siswa tanpa nomorurut rute	0	Sesuai
Duplikasi siswa atau nomorurut dalam rit	0	Sesuai
Armada atau rit melebihi kapasitas	0	Sesuai
Siswa masuk rit atau armada nonaktif	0	Sesuai
Siswa salah jam pulang	0	Sesuai

Berdasarkan hasil validasi, tidak ditemukan pelanggaran terhadap aturan operasional pada rute pagi maupun rute pulang. Seluruh siswa yang masuk ke hasil rute telah memenuhi syarat pembayaran, memiliki jenis layanan yang sesuai, memiliki koordinat valid, serta memperoleh nomorurut rute. Selain itu, tidak ditemukan duplikasi siswa atau duplikasi nomorurut dalam satu rit. Validasi kapasitas juga menunjukkan bahwa tidak ada armada atau rit yang melebihi kapasitas kendaraan. Pada rute pulang, seluruh siswa ditempatkan pada rit yang sesuai dengan jam kepulangannya.

Hasil ini menunjukkan bahwa proses generate telah terintegrasi dengan aturan operasional yang dibutuhkan oleh pengelola layanan antar-jemput siswa. Dengan demikian, sistem tidak hanya menghasilkan pembagian siswa ke armada, tetapi juga melakukan penyaringan dan pemeriksaan terhadap data yang diproses. Integrasi aturan operasional ini penting karena proses alokasi rute pada layanan antar-jemput siswa tidak cukup hanya mempertimbangkan jarak atau kedekatan lokasi, tetapi juga harus memastikan bahwa siswa yang diproses memenuhi syarat layanan dan ditempatkan pada jadwal yang sesuai.

3.4 Pengujian Skenario Negatif

Pengujian pada dataset final menunjukkan seluruh siswa dapat dialokasikan karena kapasitas dan rit yang tersedia mencukupi. Untuk mengevaluasi respons sistem ketika solusi lengkap tidak dapat dibentuk, dilakukan pengujian negatif menggunakan *fixture* database terisolasi. Skenario mencakup kapasitas tidak mencukupi, koordinat tidak valid, dan rit yang tidak tersedia. Hasil pengujian negatif disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Skenario Negatif

Skenario	Kondisi Data	Diproses	Teralokasi	Tidak Teralokasi	Pelanggaran Kapasitas	Status
Kapasitas tidak cukup	3 siswa eligible, 1 rit pagi aktif berkapasitas 2	3	2	1	0	Berhasil
Koordinat tidak valid	2 siswa eligible dengan koordinat di luar rentang valid	2	0	2	0	Berhasil
Rit tidak tersedia	2 siswa pulang sesi 13:00 tanpa rit aktif pada sesi tersebut	2	0	2	0	Berhasil

Pada skenario kapasitas tidak mencukupi, sistem mengalokasikan dua siswa sesuai kapasitas rit dan mencatat satu siswa sebagai tidak teralokasi tanpa menghasilkan pelanggaran kapasitas. Pada skenario koordinat tidak valid, kedua siswa tetap dihitung sebagai siswa eligible pada snapshot pengujian, tetapi tidak dimasukkan ke rit karena koordinat berada di luar rentang valid. Pada skenario rit tidak tersedia, siswa tidak dialokasikan ke rit

pada sesi lain. Ketiga skenario menunjukkan bahwa sistem mempertahankan aturan operasional ketika seluruh siswa tidak dapat memperoleh rute. Pengujian menggunakan database terisolasi dan tidak menulis perubahan ke database produksi.

3.5 Perbandingan Metode dan Kualitas Rute

Pengujian perbandingan dilakukan untuk mengevaluasi kualitas rute metode final terhadap *baseline Sweep-Nearest Neighbor*. Kedua metode memproses snapshot dataset yang sama sebanyak sepuluh kali. Metode *baseline* membentuk kelompok berdasarkan sudut siswa terhadap sekolah, sedangkan metode final mengevaluasi tambahan jarak setiap siswa terhadap rute yang dibentuk dari basis armada atau sekolah. Jarak yang dibandingkan merupakan estimasi Haversine berdasarkan urutan hasil masing-masing metode.

Perbandingan estimasi jarak, jumlah rit, dan persentase perbaikan disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Jarak Metode Final dan *Sweep-Nearest Neighbor*

Arah/Sesi	Siswa	Rit Final/Sweep	Final (km)	Sweep (km)	Perbaikan
Pagi	155	15/17	107,5026	181,0843	40,63%
Pulang 13:00	34	3/3	25,9465	28,0915	7,64%
Pulang 13:30	61	6/6	34,8025	41,8315	16,80%
Pulang 14:30	64	7/7	44,4203	45,1727	1,67%
Pulang 15:30	67	6/6	43,6013	46,5698	6,37%
Pulang 15:45	96	10/10	59,6505	63,8536	6,58%
Total pulang	322	32/32	208,4211	225,5192	7,58%

Berdasarkan Tabel 7, metode final menghasilkan estimasi jarak yang lebih rendah pada seluruh kelompok pengujian. Perbedaan terbesar terdapat pada rute pagi, yaitu dari 181,0843 km menjadi 107,5026 km atau berkurang 40,63%. Pada seluruh sesi rute pulang, pengurangan jarak berada pada rentang 1,67–16,80%, dengan pengurangan agregat sebesar 7,58%. Jika kedua arah layanan dijumlahkan, estimasi jarak metode final adalah 315,9237 km, sedangkan *baseline* menghasilkan 406,6035 km. Dengan demikian, pengurangan estimasi jarak untuk kedua arah layanan adalah 22,30%.

Perbedaan pada rute pagi berkaitan dengan karakteristik *Sweep* yang mengurutkan siswa berdasarkan sudut terhadap sekolah. Kelompok yang tampak searah dari sekolah belum tentu sesuai dengan posisi awal armada. Akibatnya, armada yang berbasis di satu wilayah dapat menerima kelompok siswa yang relatif jauh dari basisnya. Metode final menghitung rute pagi dari basis armada menuju siswa dan berakhir di sekolah. Pendekatan *trip-based insertion cost* kemudian memilih rit berdasarkan tambahan jarak terhadap rute yang sedang dibentuk, bukan hanya berdasarkan sudut siswa terhadap sekolah.

Waktu algoritma kedua metode disajikan pada Tabel 8 dalam bentuk rata-rata dan standar deviasi dari sepuluh eksekusi. Pengukuran dilakukan setelah snapshot data dimuat sehingga hanya merepresentasikan waktu komputasi metode.

Tabel 8. Waktu Komputasi Metode Final dan *Baseline*

Arah/Sesi	Final, Mean $\pm$ SD (ms)	Sweep-NN, Mean $\pm$ SD (ms)
Pagi	5.228,19 $\pm$ 871,73	18,20 $\pm$ 2,68
Pulang 13:00	83,99 $\pm$ 12,76	3,87 $\pm$ 0,80
Pulang 13:30	732,11 $\pm$ 141,16	7,67 $\pm$ 2,16
Pulang 14:30	1.073,44 $\pm$ 200,35	7,35 $\pm$ 1,52
Pulang 15:30	811,75 $\pm$ 136,39	7,82 $\pm$ 1,13
Pulang 15:45	1.809,60 $\pm$ 307,40	10,38 $\pm$ 1,73

Metode final membutuhkan waktu komputasi lebih besar karena setiap siswa dievaluasi terhadap beberapa rit, dilanjutkan dengan *local move improvement*, *soft rebalance*, dan 2-Opt. Sebaliknya, *baseline* menggunakan pengelompokan sudut dan penyusunan urutan yang lebih sederhana. Meskipun metode final lebih lambat, waktu komputasinya masih berada dalam hitungan detik dan menghasilkan estimasi jarak yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan adanya pertukaran antara kompleksitas komputasi dan kualitas estimasi rute.

Pada rute pagi, metode final menggunakan 15 rit dengan total kapasitas 171 kursi untuk melayani 155 siswa. Metode *baseline* menggunakan seluruh 17 rit dengan total kapasitas 196 kursi. Perbandingan pemanfaatan kapasitas tersebut disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Pemanfaatan Kapasitas Rute Pagi

Parameter	Final	Sweep-NN
Siswa teralokasi	155	155
Rit aktif	17	17
Rit digunakan	15	17

Kapasitas rit digunakan	171 kursi	196 kursi
Kursi kosong pada rit digunakan	16 kursi	41 kursi
Utilisasi rit digunakan	90,64%	79,08%

Berdasarkan Tabel 9, metode final melayani jumlah siswa yang sama menggunakan 15 rit, sedangkan *Sweep–Nearest Neighbor* menggunakan seluruh 17 rit. Penggunaan 15 rit meningkatkan utilisasi kapasitas rit yang dijalankan dari 79,08% menjadi 90,64% dan mengurangi jumlah kursi kosong dari 41 menjadi 16 kursi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode final dapat mengonsolidasikan penggunaan kapasitas tanpa memaksa seluruh rit aktif digunakan. *Soft rebalance* tetap diterapkan untuk mencegah ketimpangan ekstrem apabila perpindahan siswa tidak melanggar kapasitas dan tidak menambah estimasi jarak secara berlebihan.

Hasil tersebut juga tidak digunakan untuk mengklaim penghematan biaya operasional secara langsung. Penelitian ini tidak mengukur konsumsi bahan bakar, waktu perjalanan jalan aktual, maupun biaya pengemudi. Penggunaan rit yang lebih sedikit hanya menunjukkan konsolidasi kapasitas pada hasil algoritma untuk dataset yang diuji.

3.6 Pengujian Generate Ulang

Pengujian *generate* ulang dilakukan pada *database* salinan untuk mengevaluasi kemampuan sistem menyesuaikan alokasi ketika data operasional berubah. Tiga skenario yang diuji meliputi penambahan satu siswa, perubahan status pembayaran menjadi belum lunas, serta penonaktifan rit atau armada. Siswa tambahan hanya digunakan sebagai data uji dan tidak termasuk dalam *dataset* final yang terdiri atas 348 siswa. Ringkasan hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Pengujian Generate Ulang

Skenario	Kondisi Awal	Kondisi Setelah Perubahan	Hasil
Penambahan siswa baru	Pagi 155 siswa; pulang 322 siswa	Pagi 156 siswa; pulang 323 siswa	Siswa baru berhasil dialokasikan
Perubahan status pembayaran	Pagi 155 siswa; pulang 322 siswa	Pagi 154 siswa; pulang 321 siswa	Siswa belum lunas tidak diproses
Penonaktifan rit atau armada	17 rit pagi aktif	16 rit pagi aktif	Rit nonaktif tidak digunakan dan seluruh siswa tetap teralokasi

Berdasarkan Tabel 10, sistem berhasil membentuk ulang alokasi sesuai dengan kondisi data terbaru. Siswa baru yang memenuhi persyaratan dimasukkan ke dalam rute, siswa yang berstatus belum lunas dikeluarkan dari proses alokasi, dan rit yang dinonaktifkan tidak digunakan pada hasil berikutnya. Seluruh siswa yang masih memenuhi persyaratan tetap berhasil dialokasikan tanpa pelanggaran kapasitas maupun aturan operasional. Pengujian dilakukan pada *database* salinan sehingga tidak mengubah data produksi.

Hapus tiga paragraf lama yang menguraikan waktu setiap skenario satu per satu. Waktu tersebut tidak diperlukan untuk menjawab komentar reviewer karena tujuan pengujian ini adalah membuktikan kemampuan adaptasi terhadap perubahan data, bukan membandingkan performa waktu.

3.7 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil mengalokasikan seluruh 155 siswa rute pagi dan 322 siswa rute pulang tanpa pelanggaran aturan operasional. Konsistensi jumlah siswa dan rit pada sepuluh percobaan menunjukkan bahwa algoritma menghasilkan struktur alokasi yang stabil pada dataset yang sama. Variasi terjadi pada waktu eksekusi, yaitu $8,4552 \pm 0,8638$ detik untuk *generate* rute pagi dan $10,2788 \pm 0,4206$ detik untuk rute pulang. Pengukuran tersebut mencakup eksekusi *optimizer* dan penyimpanan hasil ke database.

Perbandingan dengan *Sweep–Nearest Neighbor* menunjukkan bahwa metode final menghasilkan estimasi jarak yang lebih rendah pada seluruh kelompok pengujian. Pengurangan terbesar terjadi pada rute pagi sebesar 40,63%, sedangkan pengurangan agregat rute pulang adalah 7,58%. Perbedaan tersebut menunjukkan pentingnya memperhitungkan titik awal armada pada perjalanan pagi. Pendekatan *Sweep* membentuk kelompok berdasarkan arah dari sekolah, tetapi tidak memastikan bahwa kelompok tersebut sesuai dengan basis armada yang menerima kelompok. Metode final memperhitungkan rute dari basis armada menuju siswa dan sekolah melalui *trip-based insertion cost* sehingga siswa ditempatkan berdasarkan dampaknya terhadap keseluruhan rute.

Penggunaan *Sweep–Nearest Neighbor* sebagai *baseline* sejalan dengan pendekatan pada penelitian [11] yang menggunakan kedua metode tersebut untuk membentuk kelompok dan menyusun urutan rute pada permasalahan CVRP. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan tersebut tetap dapat menghasilkan solusi yang layak, tetapi memiliki keterbatasan ketika terdapat beberapa titik awal armada yang berbeda. Dalam konteks armada heterogen, Sciortino *et al.* [3] mengembangkan heuristik SBRP yang mengakomodasi perbedaan armada dan pemilihan halte. Penelitian ini memiliki kesamaan dalam mempertimbangkan perbedaan kapasitas armada, tetapi juga mengintegrasikan aturan operasional berupa status pembayaran, jenis layanan, status aktif

armada dan rit, serta sesi kepulauan siswa ke dalam proses alokasi. Selain itu, hasil heuristik diintegrasikan ke dalam sistem berbasis web dan dievaluasi menggunakan data operasional mitra. Berbeda dengan pengujian algoritmik pada CVRP homogen [10], evaluasi dalam penelitian ini menggunakan data operasional dengan karakteristik dan aturan layanan yang berbeda. Oleh karena itu, pembahasan tersebut tidak dimaksudkan sebagai perbandingan performa secara langsung karena dataset dan tujuan setiap penelitian berbeda.

Pada rute pagi, metode final melayani jumlah siswa yang sama menggunakan 15 rit, sedangkan *baseline* menggunakan 17 rit. Utilisasi kapasitas rit yang digunakan meningkat dari 79,08% menjadi 90,64%. Hasil ini menunjukkan konsolidasi kapasitas, bukan kewajiban untuk menggunakan seluruh armada atau membagi siswa secara merata pada setiap rit. Pemerataan beban dan pendapatan pengemudi tidak termasuk dalam fungsi objektif penelitian karena pemindahan siswa hanya dilakukan apabila kapasitas tetap terpenuhi dan tambahan estimasi jarak masih berada dalam batas yang ditetapkan.

Skenario negatif memperlihatkan bahwa sistem tidak memaksakan terbentuknya solusi ketika batasan tidak dapat dipenuhi. Siswa dicatat sebagai tidak teralokasi ketika kapasitas tidak mencukupi, koordinat tidak valid, atau rit sesuai sesi tidak tersedia. Hasil tersebut melengkapi pengujian pada dataset final, yang seluruh siswanya dapat dialokasikan. Pengujian *generate* ulang juga menunjukkan bahwa sistem dapat memperbarui alokasi ketika terdapat siswa baru, perubahan status pembayaran, atau penonaktifan rit dan armada.

Informasi bahwa proses manual sebelumnya dapat berlangsung beberapa hari diperoleh secara lisan melalui wawancara dengan pengelola dan tidak berasal dari pengukuran waktu yang terstandar. Oleh karena itu, informasi tersebut hanya digunakan sebagai konteks permasalahan dan tidak dibandingkan secara kuantitatif dengan waktu algoritma. Efisiensi yang dapat dibuktikan dalam penelitian ini adalah kemampuan sistem menghasilkan alokasi dalam hitungan detik dan pengurangan estimasi jarak Haversine terhadap *baseline* pada dataset yang sama.

Estimasi jarak penelitian masih menggunakan Haversine sehingga tidak merepresentasikan jarak tempuh aktual pada jaringan jalan. Hasil pengurangan sebesar 40,63% pada rute pagi, 7,58% pada rute pulang, dan 22,30% pada gabungan kedua arah harus dipahami sebagai pengurangan jarak antarkoordinat berdasarkan urutan hasil algoritma. Sistem belum mempertimbangkan kemacetan, penutupan jalan, cuaca, maupun posisi kendaraan secara *real-time*. Penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan layanan *routing* jaringan jalan dan informasi kondisi lalu lintas sebagaimana digunakan pada pengembangan optimasi rute berbasis prediksi lalu lintas [20], kemudian membandingkan hasilnya dengan rute aktual yang terdokumentasi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengimplementasikan heuristik *School Bus Routing Problem* pada sistem berbasis web untuk membantu alokasi siswa ke rit dan penyusunan urutan antar-jemput. Pengujian menggunakan data operasional periode Maret 2026 yang terdiri atas 348 siswa, 17 armada aktif, 17 rit pagi, dan 32 rit pulang. Sistem berhasil mengalokasikan seluruh 155 siswa rute pagi dan 322 siswa rute pulang tanpa pelanggaran pembayaran, jenis layanan, validitas koordinat, kapasitas, duplikasi, status aktif rit, maupun kesesuaian sesi kepulauan. Waktu *generate* aplikasi adalah $8,4552 \pm 0,8638$ detik untuk rute pagi dan $10,2788 \pm 0,4206$ detik untuk rute pulang. Dibandingkan *baseline Sweep-Nearest Neighbor*, metode final mengurangi estimasi jarak Haversine sebesar 40,63% pada rute pagi dan 7,58% pada rute pulang, atau 22,30% untuk gabungan kedua arah layanan. Pada rute pagi, metode final mengalokasikan siswa menggunakan 15 dari 17 rit dengan utilisasi kapasitas rit yang digunakan sebesar 90,64%, sedangkan *baseline* menggunakan seluruh 17 rit dengan utilisasi 79,08%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode final dapat mengonsolidasikan pemanfaatan rit sekaligus menghasilkan estimasi jarak yang lebih rendah tanpa melanggar kapasitas. Pengujian negatif juga menunjukkan bahwa sistem mencatat siswa sebagai tidak teralokasi ketika kapasitas tidak mencukupi, koordinat tidak valid, atau rit sesuai sesi tidak tersedia. Selain itu, sistem mampu memperbarui hasil ketika terdapat siswa baru, perubahan status pembayaran, dan penonaktifan rit atau armada. Estimasi jarak masih menggunakan Haversine sehingga belum merepresentasikan jarak tempuh aktual pada jaringan jalan. Penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan layanan *routing* jalan, kondisi lalu lintas, dan data perjalanan aktual serta mengevaluasi aspek biaya operasional dan pemerataan beban kerja pengemudi.

REFERENCES

- [1] J. Díaz-Ramírez, A. M. Rosas, B. García-Colis, and P. S. Valencia-Torres, "The school bus routing problem: A systematic literature review," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 114, pp. 79–94, 2025, doi: 10.17533/udea.redin.20240518.
- [2] N. I. L. Mohd Azmi, A. H. Md Mahdzir, H. Y. Xuan, N. X. Yu, T. M. Tiean, and T. Y. Kun, "The Review of Recent Trend for School Bus Routing Problem," *J. Eng. Technol. Appl. Phys.*, vol. 6, no. 1, pp. 67–75, 2024, doi: 10.33093/jetap.2024.6.1.9.
- [3] M. Sciortino, R. Lewis, and J. Thompson, "A School Bus Routing Heuristic Algorithm Allowing Heterogeneous Fleets and Bus Stop Selection," *SN Comput. Sci.*, vol. 4, p. 74, 2023, doi: 10.1007/s42979-022-01466-6.
- [4] Z. Jiang, J. Wang, S. Huang, and H. D. Xu, "A solution to the Single-School school bus routing problem considering accessibility and economy," *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 32, p. 101506, 2024, doi:

- 10.1016/j.trip.2025.101506.
- [5] A. A. Jolfaei, M. Alinaghian, R. Bahrami, and E. B. Tirkolae, "Generalized vehicle routing problem: Contemporary trends and research directions," *Heliyon*, vol. 9, no. 12, p. e22733, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22733.
 - [6] A. Chen and T. Li, "Modeling and Solving the Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Soft and Fuzzy Time Windows," *Systems*, vol. 12, no. 12, p. 560, 2024, doi: 10.3390/systems12120560.
 - [7] P. Hegde and V. Vaze, "Rural School Bus Routing and Scheduling," *arXiv Prepr. arXiv2507.19538*, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2507.19538.
 - [8] H. Caceres, M. Duran, H. Lespay, J. P. Contreras, and R. Batta, "School Bus Routing Problem with Open Offer Policy: A case study in a New York school district," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 210, p. 111526, 2025, doi: 10.1016/j.cie.2025.111526.
 - [9] F. Liu, C. Lu, L. Gui, Q. Zhang, X. Tong, and M. Yuan, "Heuristics for Vehicle Routing Problem: A Survey and Recent Advances," *arXiv Prepr. arXiv2303.04147*, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2303.04147.
 - [10] D. V Arce-Ortega, F. Alonso-Pecina, M. A. Cruz-Chávez, and J. del C. Peralta-Abarca, "A Simulated Annealing Approach for the Homogeneous Capacitated Vehicle Routing Problem," *Mathematics*, vol. 13, no. 19, p. 3209, 2025, doi: 10.3390/math13193209.
 - [11] E. E. Rosyida, Sugianto, and I. B. Efendi, "Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) with Sweep and Nearest Neighbor Algorithm," *Sinergi Int. J. Logist.*, vol. 2, no. 1, pp. 17–29, 2024, doi: 10.61194/sijl.v2i1.187.
 - [12] A. P. Ying, J. A. Jothi, and N. ARM, "WeRoute: Route Optimization Web-Based System and Driver Mobile Application," *Int. J. Artif. Intell.*, vol. 8, no. 2, pp. 78–87, 2021, doi: 10.36079/lamintang.ijai-0802.314.
 - [13] A. Aurelia, Wasino, D. Chandra, and T. B. Jap, "Developing Website-Based Information System Applications to Map PT. XYZ's Properties Using NextJS Framework with Haversine Method," *Int. J. Appl. Sci. Technol. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 59–64, 2023, doi: 10.24912/ijaste.v1.i1.59-64.
 - [14] F. Prabowo, A. Imran, and H. Prasetyo, "Penentuan Rute Distribusi Menggunakan Metode Savings Matrix, Nearest Neighbor, dan 2-Opt pada CV X," *J. Optimasi Tek. Ind.*, vol. 5, no. 2, pp. 47–52, 2023, doi: 10.30998/joti.v5i2.15620.
 - [15] D. J. Panjaitan, R. Aprilia, and S. Anjeli, "Vehicle Routing Problem as a Solution for Determining Goods Delivery Routes PT. Kreasi Beton Nusa Persada," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 12, no. 3, pp. 622–632, 2023, doi: 10.23887/jstundiksha.v12i3.67809.
 - [16] M. Hasanah and A. Suharso, "Algoritma Haversine pada Sistem Informasi Geografis: Tinjauan Literatur Sistematis," *Nuansa Inform.*, vol. 17, no. 2, pp. 135–143, 2023, doi: 10.25134/ilkom.v17i2.10.
 - [17] M. D. Mughni and P. A. R. Devi, "Implementation Of Teacher Presence System Using Mobile-Based Geofencing & Haversine Formula Methods," *Appl. Technol. Comput. Sci. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 31–40, 2023, doi: 10.33086/atcsj.v6i1.4119.
 - [18] V. H. Nabilla, D. Fitria, D. Permana, and F. Fitri, "Comparison of Haversine and Euclidean Distance Formula for Calculating Distance Between Regencies in West Sumatra," *UNP J. Stat. Data Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 120–125, 2023, doi: 10.24036/ujsds/vol1-iss3/39.
 - [19] V. Tundjungsari, "Development of Location-Based Emergency Mobile Application during Disaster with Haversine Formula and QGIS," *Technovasia J. Technol. Comput. Res. Innov. Sci. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 48–56, 2025.
 - [20] X. Wang and S. Wang, "Traffic Forecast and Hybrid Optimization-Based Vehicle Route Planning for Cold Chain Logistics," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 5, p. 2479, 2026, doi: 10.3390/app16052479.