

Perancangan Rute Pengiriman Barang Untuk Meminimasi Keterlambatan Pengiriman Barang *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem With Time Windows (Hfvrptw)* Dengan *Saving Matrix* Dan *Mixed Integer Linear Programing (Milp)* Di Pt Alqosbah

1st Fathia Zafira
Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

fathiazfr@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Iphov Kumala Sriwana
Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

iphovkumala@telkomuniversity.ac.id

3rd Ari Yanuar Ridwan
Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

ariyanuar@telkomuniversity.ac.id

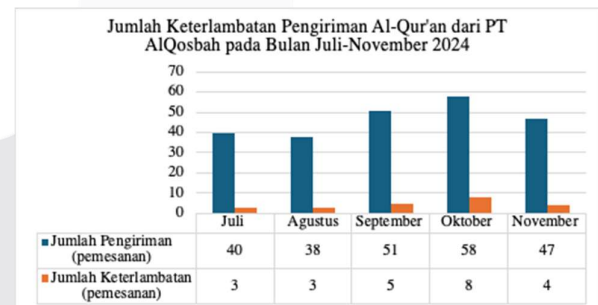
Abstrak — PT Al-Qosbah merupakan perusahaan produksi dan distribusi Al-Qur'an yang menghadapi keterlambatan pengiriman sebesar 21% pada Oktober, berdampak pada kepuasan pelanggan dan biaya transportasi. Penelitian ini bertujuan merancang rute pengiriman yang efisien dengan mempertimbangkan *Heterogeneous Fleet* dan *time windows* melalui tiga metode yaitu *Saving Matrix*, *Mixed Integer Linear Programming (MILP)*, dan *direct shipment*. *Saving Matrix* menggabungkan titik pengiriman berdasarkan efisiensi jarak dan kapasitas kendaraan. MILP dioptimasi menggunakan *solver Gurobi* untuk meminimalkan biaya transportasi dengan mempertimbangkan kapasitas armada, *time windows*, dan jarak tempuh. Sementara itu, *direct shipment* menguji dampak pengiriman langsung dari gudang ke pelanggan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Saving Matrix* mengurangi jarak tempuh sebesar 16% dan biaya transportasi 6%, sedangkan MILP lebih optimal dengan pengurangan jarak tempuh sebesar 21%, biaya 9%, serta eliminasi keterlambatan. *Direct shipment* mempercepat pengiriman tetapi meningkatkan biaya hingga 48%. Penelitian ini juga menghasilkan sistem berbasis Excel sebagai alat bantu perencanaan rute. Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis data mampu meningkatkan efisiensi operasional dan layanan pelanggan di PT Al-Qosbah.

Kata kunci— Keterlambatan, Direct Shipment, Saving Matrix, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Perencanaan Rute Pengiriman

I. PENDAHULUAN

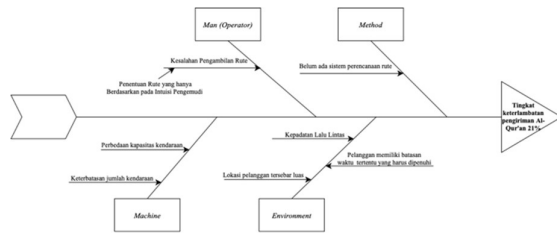
Kualitas transportasi sangat bergantung pada keberhasilan distribusi, di mana kecepatan dan ketepatan pengiriman menjadi faktor utamanya (Auliasari et al., 2018). PT AlQosbah, yang berfokus pada produksi dan distribusi Al-Qur'an, menjadikan proses pengiriman sebagai bagian krusial dalam

operasionalnya. Namun, proses ini masih menghadapi tantangan berupa keterlambatan pengiriman. Keterlambatan pengiriman barang dapat dilihat pada Gambar 1.



GAMBAR 1
(KETERLAMBATAN PENGIRIMAN)

Bulan Oktober memiliki jumlah pengiriman terbanyak diantar bulan yang lain, pengiriman bulan oktober memiliki rata-rata keterlambatan bulan Oktober yaitu 21% hal ini mencerminkan tantangan yang dihadapi oleh perusahaan dalam proses pengiriman. Proses pengiriman di PT AlQosbah menunjukkan fluktuasi setiap bulannya, yang dipengaruhi oleh dinamika tren pasar. Peningkatan permintaan sering kali berdampak pada peningkatan volume pengiriman untuk memenuhi kebutuhan pelanggan. Namun, peningkatan volume pengiriman ini juga dapat menimbulkan kendala yang berpotensi menyebabkan keterlambatan.



GAMBAR 2
(FISHBONE PERMASALAHAN KETERLAMBATAN)

Gambar 2 merupakan *fishbone* yang menunjukkan permasalahan keterlambatan pengiriman yang disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kepadatan lalu lintas, sebaran lokasi pelanggan yang luas, serta adanya batasan waktu penerimaan barang (*time windows*). Selain itu, keterbatasan jumlah armada dengan kapasitas berbeda (*heterogeneous fleet*) dan belum adanya sistem perencanaan rute yang terstruktur turut memperburuk kondisi. Pengambilan keputusan rute yang masih bergantung pada intuisi pengemudi menyebabkan pengiriman menjadi tidak efisien dan sulit dikendalikan. Oleh karena itu, diperlukan solusi perencanaan rute yang mampu mengakomodasi berbagai batasan agar proses distribusi dapat dilakukan secara optimal dan tepat waktu.

Pendekatan *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows* (HVRPTW) digunakan untuk mengoptimalkan rute pengiriman di PT Al-Qosbah melalui metode *Saving Matrix* dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). *Saving Matrix* memanfaatkan efisiensi jarak dengan menggabungkan tujuan dalam satu kendaraan, serta mempertimbangkan kapasitas armada [1]. Di sisi lain, MILP menghasilkan solusi optimal dengan memperhitungkan kapasitas kendaraan, alokasi armada, batas waktu pelayanan, dan waktu tempuh [2]. Pendekatan VRPTW ini relevan untuk pengiriman ke pelanggan yang tersebar secara geografis dan memiliki batasan waktu tertentu [3]. Sebagai pembandingan, strategi *Direct Shipment* juga dianalisis karena dapat meminimalkan keterlambatan melalui pengiriman *point-to-point*, meskipun berisiko meningkatkan biaya operasional [4]. Oleh karena itu, perbandingan ketiga metode menjadi penting untuk menentukan strategi pengiriman yang paling efisien dan tepat waktu.

II. KAJIAN TEORI

A. Transportasi dan Distribusi

Transportasi dan distribusi merupakan bagian penting dalam rantai pasokan yang memastikan produk sampai ke konsumen secara tepat waktu dan dalam kondisi baik. Transportasi mencakup pemindahan barang menggunakan moda tertentu sesuai dengan kebutuhan logistik [5], sedangkan distribusi memastikan pengelolaan proses agar pelayanan kepada pelanggan berjalan efektif. Pemilihan rute yang efisien, pemanfaatan teknologi pelacakan, dan perencanaan yang tepat sangat diperlukan untuk menghindari keterlambatan dan menekan biaya [6].

B. Vehicle Routing Problem (VRP)

Vehicle Routing Problem (VRP) adalah permasalahan optimasi rute kendaraan dari dan ke depot untuk memenuhi permintaan pelanggan dengan tetap memperhatikan batasan

yang ada, seperti kapasitas dan waktu layanan, serta bertujuan meminimalkan biaya transportasi [6]. Di PT AlQosbah, permasalahan yang dihadapi berkaitan dengan VRP *Time windows* dan *Heterogeneous Fleet VRP* karena adanya perbedaan kapasitas kendaraan dan batasan waktu layanan pelanggan.

C. Saving Matrix

Saving Matrix merupakan metode heuristik klasik yang digunakan untuk merancang rute pengiriman dengan menghitung penghematan jarak jika dua pelanggan dikunjungi dalam satu rute dibandingkan secara terpisah dari depot [7]. Penggabungan rute dilakukan berdasarkan nilai penghematan terbesar, dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan dan batasan lainnya, sehingga menghasilkan rute yang efisien [8].

D. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

Mixed Integer Linear Programming (MILP) adalah metode optimasi yang menggabungkan variabel bilangan bulat dan kontinu untuk menyelesaikan permasalahan alokasi sumber daya terbatas dengan fungsi objektif dan kendala linear [8]. Dalam konteks perencanaan rute kendaraan, MILP memungkinkan pencarian solusi optimal secara sistematis dengan memperhatikan batasan seperti kapasitas kendaraan dan jendela waktu layanan [9].

E. Direct Shipment

Direct shipment adalah metode pengiriman *point-to-point* dari gudang langsung ke pelanggan tanpa melalui pusat distribusi, sehingga mempercepat waktu pengiriman [4]. Strategi ini menawarkan fleksibilitas tinggi dan *lead time* yang lebih singkat, cocok untuk permintaan besar atau mendesak. Namun, *direct shipment* memiliki kelemahan berupa biaya transportasi per unit yang lebih tinggi, terutama jika volume pengiriman kecil atau lokasi pelanggan tersebar.

III. METODE

Berikut merupakan metode yang digunakan dalam penelitian ini.

A. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang diperlukan dalam penyusunan model perencanaan rute pengiriman guna meminimalkan keterlambatan. Data yang dihimpun mencakup data jenis kendaraan yang berisi jumlah dan kapasitas masing-masing kendaraan yang tersedia yaitu data konsumen dan permintaan barang tahun 2024 yang terbatas pada pelanggan tetap di wilayah Jawa Barat dan Jawa Tengah, serta data biaya transportasi yang meliputi komponen operasional seperti biaya bahan bakar, konsumsi sopir, dan perawatan kendaraan. Selain itu, dikumpulkan pula data jarak antar lokasi pengiriman, data jendela waktu (*time windows*) yang menetapkan batas waktu pengiriman ke setiap pelanggan, serta data keterlambatan yang mencatat lokasi dan jumlah barang yang terlambat dikirimkan. Seluruh data ini menjadi dasar dalam proses perancangan solusi optimasi pengiriman.

B. Metode Pengolahan Data

Pengolahan data diawali dengan penyusunan rute pengiriman menggunakan pendekatan *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows* (HFVRPTW) guna mengatasi keterlambatan dan biaya transportasi yang tinggi. Penelitian ini membandingkan tiga metode metode *Saving Matrix* untuk merancang rute awal berdasarkan nilai penghematan dan kapasitas kendaraan, MILP untuk menghasilkan rute optimal dengan mempertimbangkan *time windows* dan batasan operasional, serta *Direct Shipment* sebagai pembanding strategi *point-to-point*. Kombinasi ketiganya memberikan gambaran menyeluruh terhadap skema pengiriman yang efisien bagi PT Al-Qosbah.

C. Model Analisis

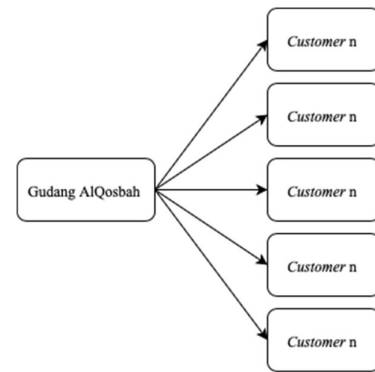
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa metode *direct shipment* efektif menghilangkan keterlambatan karena pola *point-to-point*, namun menyebabkan peningkatan jarak tempuh dan biaya operasional. *Saving Matrix* menghasilkan rute lebih efisien secara jarak dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan. Sementara itu, MILP memberikan hasil paling optimal karena mampu meminimalkan jarak tempuh, biaya transportasi, dan keterlambatan secara simultan melalui pertimbangan terhadap *time windows* dan batasan operasional lainnya

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyusunan rute pengantaran Al-Qur'an di PT Al-Qosbah menggunakan pendekatan *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows* (HFVRPTW) guna mengatasi keterlambatan pengiriman dan tingginya biaya transportasi. Tiga metode diterapkan, yakni *Saving Matrix*, *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), dan *Direct Shipment*. *Saving Matrix* merancang rute awal berdasarkan nilai penghematan tertinggi antar pelanggan dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan yang berbeda, sehingga menghasilkan rute yang efisien dari sisi jarak tempuh. Metode MILP kemudian mengoptimalkan rute dengan memasukkan batasan seperti *time window*, kapasitas armada, dan jam operasional, untuk meminimalkan keterlambatan dan biaya. Sebagai pembanding, *Direct Shipment* digunakan untuk mengkaji pengiriman satu titik satu kendaraan secara langsung dari gudang, yang meskipun mampu mengurangi risiko keterlambatan, memiliki konsekuensi biaya operasional lebih tinggi. Kombinasi pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh terhadap skema pengiriman optimal yang mampu meningkatkan ketepatan waktu, efisiensi operasional, dan menekan biaya transportasi.

A. Direct Shipment

Metode *direct shipment* merupakan strategi *point-to-point*, di mana pengiriman dilakukan langsung dari gudang ke pelanggan tanpa penggabungan rute. Biaya yang timbul mencakup transportasi dari dan kembali ke gudang. Proses ini lebih cepat dan sederhana, sehingga efektif dalam mengurangi risiko keterlambatan.



GAMBAR 3
(DIRECT SHIPMENT)

Perhitungan total jarak tempuh ditentukan dengan rumus:

$$D = d_{oi} + d_{io}$$

Dimana d_{oi} adalah jarak gudang ke pelanggan dan d_{io} adalah jarak kembali ke gudang. Biaya transportasi dihitung sebagai:

$$\text{Biaya Variabel} = \text{Biaya BBM (km/liter) (Rp)} \times D$$

Biaya variabel diperoleh dari konsumsi BBM kendaraan dikalikan total jarak tempuh. Untuk pickup, biaya BBM adalah Rp813/km, sedangkan untuk double engkel Rp584,8/km. Biaya tetap masing-masing sebesar Rp545.763 dan Rp561.212. Jika tidak melalui tol, maka biaya tol = Rp0. Berikut merupakan hasil perhitungan *direct shipment*.

TABEL 1
(HASIL PERHITUNGAN DIRECT SHIPMENT)

Lokasi	Kendaraan	Jarak (km)	Biaya	Total Biaya	Muatan (pcs)
C5	Pickup	48,5	Rp585.193	Rp2.055.269	105
C15	Pickup	191,6	Rp852.534		50
C7	Pickup	72,3	Rp617.543		90
C8	Double E	237	Rp950.809	Rp2.642.499	205
C21	Double E	303	Rp929.406		4500
C20	Double E	219	Rp762.283		509
Total Biaya Transportasi/hari				Rp4.697.768	

Tabel 1 merupakan hasil perhitungan *direct shipment* untuk tanggal 3 Oktober 2024. Total biaya transportasi diperoleh dari penjumlahan biaya variabel, biaya tetap, dan biaya tol. Pada hari tersebut, hanya lokasi C5 yang tidak melewati jalan tol sehingga biaya tol untuk lokasi tersebut adalah Rp0,00. Berdasarkan perhitungan dengan metode *direct shipment*, total biaya transportasi yang dihasilkan adalah sebesar Rp4.697.768.

B. Saving Matrix

Metode *Saving Matrix* digunakan untuk menghitung potensi penghematan jarak jika dua lokasi pengiriman (i dan j) digabungkan dalam satu rute. Tujuannya adalah meminimalkan total jarak tempuh dan jumlah perjalanan ke gudang, sehingga mengurangi risiko keterlambatan. Dalam penelitian ini, rumus dan kode program *Saving Matrix* diimplementasikan dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, permintaan pelanggan, dan matriks jarak antar lokasi guna menghasilkan rute yang lebih efisien. Berikut tahapan penyelesaian *saving matrix* menggunakan algoritma.

1. Memasukan data

Penentuan rute dengan metode *Saving Matrix* menggunakan data berupa jumlah node (pelanggan), kapasitas kendaraan, biaya transportasi, permintaan pelanggan, dan matriks jarak antar lokasi. Kendaraan yang digunakan terdiri dari pickup (C[1], kapasitas 2.000 pcs) dan double engkel (C[2], kapasitas 8.000 pcs). Biaya tetap masing-masing sebesar Rp528.123 untuk pickup dan Rp536.928 untuk double engkel, sedangkan biaya variabel per kilometer sebesar Rp813 dan Rp585. Data permintaan dan matriks jarak bersifat dinamis, menyesuaikan jumlah serta lokasi pelanggan pada hari pengiriman, dan menjadi dasar dalam penyusunan rute yang optimal.

2. Menghitung nilai *Saving Matrix*

$$S_{(i,j)} = (D_{(0i)} + D_{(0j)}) - D_{(ij)}$$

Dimana $S_{(i,j)}$ merupakan *saving* menunjukkan penghematan jarak saat rute dari gudang ke lokasi i dan j digabung menjadi satu rute kunjungan. Kemudian $D_{(0i)}$ merupakan jarak dari gudang ke lokasi i , $D_{(0j)}$ yaitu jarak dari gudang ke lokasi j , dan $D_{(ij)}$ yaitu jarak langsung antara lokasi i dan lokasi j .

3. Mengurutkan nilai *saving* dari yang tertinggi ke terendah.

$$S_{ij}^{sorted} = S_{(i_1,j_1)} \geq S_{(i_2,j_2)} \geq \dots \geq S_{(i_n,j_n)}$$

Pada tahap ini, nilai *saving* yang telah dihitung akan diurutkan dari yang tertinggi ke yang terendah. Pengurutan ini bertujuan agar pasangan lokasi dengan nilai penghematan terbesar dapat diprioritaskan untuk diproses terlebih dahulu.

4. Mengalokasikan nilai *saving*

Nilai total permintaan untuk setiap pasangan pelanggan dihitung menggunakan rumus $p_{ij} = q_i + q_j$ dan dibandingkan dengan kapasitas kendaraan C_k , sehingga $p_{ij} \leq C_k$. Jika melebihi kapasitas kendaraan pertama, pasangan dialihkan ke kendaraan berikutnya.

5. Mengalokasikan lokasi yang belum dimasukkan ke rute kendaraan

$$L_k + q_n \leq C_k$$

Pelanggan yang belum teralokasi akan dimasukkan ke rute kendaraan dengan kapasitas tersisa. Sistem terlebih dahulu memeriksa apakah muatan kendaraan 1 ($L[1]$) ditambah permintaan pelanggan n ($q[n]$) masih $\leq$ kapasitas kendaraan 1 ($C[1]$). Jika ya, pelanggan dialokasikan ke kendaraan 1. Jika tidak, pelanggan dipindahkan ke kendaraan 2 selama kapasitasnya masih mencukupi.

6. Kendaraan memulai dari gudang dan kembali ke Gudang

$$R_k = [0, \dots, n_1, n_2, \dots, 0]$$

Setelah seluruh pelanggan dialokasikan, rute lengkap disusun untuk setiap kendaraan. Setiap rute dimulai dan diakhiri di gudang (node 0), dengan urutan kunjungan sesuai alokasi pelanggan. Node 0 ditambahkan di akhir rute untuk memastikan kendaraan kembali ke gudang setelah menyelesaikan pengiriman.

7. Hitung total jarak masing-masing kendaraan.

$$D_k = \sum_{t=0}^{|R_k|-2} d_{r_t, r_{t+1}}$$

Tahap ini bertujuan untuk menghitung total jarak tempuh setiap kendaraan berdasarkan rute yang telah terbentuk. Perhitungan dilakukan dengan menjumlahkan jarak antar titik secara berurutan dalam rute, termasuk jarak kembali ke gudang. Untuk setiap kendaraan, jarak dihitung dari pasangan titik (r_t, r_{t+1}) dengan iterasi $t=0$ hingga $n-2$. Nilai total jarak yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung biaya variabel pengiriman pada tahap berikutnya.

8. Menghitung biaya transportasi

$$\text{Biaya Variabel} = CV_k + D_k$$

$$\text{Total Biaya Transportasi} = CV_k + CF_k$$

Biaya transportasi kendaraan k dihitung dari penjumlahan biaya tetap dan biaya variabel, di mana biaya variabel diperoleh dengan mengalikan tarif per kilometer dengan total jarak tempuh kendaraan.

C. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

Permasalahan pada PT Al-Qosbah terkait tingginya keterlambatan pengiriman dan biaya transportasi diatasi dengan pendekatan Mixed Integer Linear Programming (MILP) untuk memodelkan Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows (HVRPTW). Model ini bertujuan meminimalkan total biaya transportasi dengan mempertimbangkan biaya tetap, biaya variabel, kapasitas kendaraan, jumlah armada, kecepatan, waktu tempuh, dan time windows pelanggan. Formulasi dilakukan melalui fungsi objektif, variabel keputusan, dan constraint yang merepresentasikan kondisi riil pengiriman, guna menghasilkan rute dan jadwal pengiriman yang optimal serta tepat kendaraan. Berikut merupakan model matematis dari MILP.

Parameter :

C_k	Kapasitas maksimum muatan kendaraan jenis k (pcs). CP=2000 pcs, CDE=8000 pcs.
C_k^F	Biaya tetap (<i>fixed cost</i>) penggunaan kendaraan jenis k (Rp/hari).
C_k^V	Biaya variabel per unit jarak kendaraan jenis k .
V_k	Kecepatan kendaraan k (km/jam), yang menghitung waktu tempuh kendaraan.
q_i	Permintaan pelanggan i (pcs). $q_0 = 0$.
d_{ij}	Jarak antara lokasi i dan lokasi j (km).
T_{ij}	Waktu tempuh dari node i ke node j menggunakan kendaraan k (menit).
St_{ij}	Waktu pelayanan di lokasi i (menit). $s_0 = 0$.
Et_i	Waktu awal kendaraan tiba di node i .
Lt_i	Waktu akhir kendaraan tiba di node i .
M	Angka yang sangat besar (Big M).

Variabel Keputusan :

x_{ijk}	Variabel biner yang bernilai 1 jika kendaraan jenis k bergerak dari node i ke node j , dan 0 apabila kondisi tersebut tidak terjadi.
Q_{ik}	Variabel kontinu yang menunjukkan muatan kendaraan jenis k setelah mengunjungi node i .
A_{ik}	Variabel kontinu yang menunjukkan waktu kedatangan kendaraan jenis k di node i .

Fungsi Tujuan :

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} CF_k \cdot x_{0jk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_d} \sum_{j \in N_d, j \neq i} CV_k \cdot D_{ij} \cdot x_{ijk}$$

Fungsi pembatas :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N_d, i \neq j} \sum_{k \in K} x_{ijk} &= 1 & \forall j \in N \\ \sum_{i \in N_d, i \neq j} \sum_{k \in K} x_{jik} &= 1 & \forall j \in N \\ \sum_{i \in N_d, i \neq h} x_{ihk} &= \sum_{j \in N_d, j \neq h} x_{jhk} & \forall h \in N, \forall k \in N \\ Q_{jk} &\geq Q_{ik} - q_j + M(1 - x_{ijk}) & \forall i \in N_d, \forall j \in N_d, j \neq i, \forall k \in K \\ Q_{ik} &\geq q_i \cdot \sum_{j \in N_d, j \neq i} x_{jik} & \forall i \in N, \forall k \in K \\ Q_{ik} &\leq C_k & \forall i \in N_d, \forall k \in K \\ A_{ik} &\geq Et_i & \forall i \in N_d, \forall k \in K \\ A_{ik} &\leq Lt_i & \forall i \in N_d, \forall k \in K \\ A_{jk} &\geq A_{ik} + T_{ij} + St_{ij} - M(1 - x_{ijk}) & \forall i \in N_d, \forall j \in N, \forall k \in K, i \neq j \\ \sum_{j \in N} x_{0jk} &\leq 1, & \forall k \in K \\ \sum_{j \in N} x_{j0k} &\leq 1, & \forall k \in K \\ x_{iik} &= 0 & \forall i \in N_d, \forall k \in K \\ A_{ik} + T_{i0k} &\leq Lt_0 + M(1 - x_{ijk}) & \forall i \in N, \forall k \in K \\ \sum_{i \in N_d} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijk} &\geq 2 & \forall k \in K \end{aligned}$$

D. Hasil Rancangan

Analisis hasil rancangan dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas masing-masing metode dalam mencapai tujuan penelitian. Direct Shipment digunakan sebagai pembandingan dan terbukti efektif menghilangkan keterlambatan, namun memiliki jarak tempuh dan biaya operasional lebih tinggi. Untuk mengatasi hal tersebut, metode Saving Matrix diterapkan guna merancang rute yang lebih efisien dengan menggabungkan pelanggan berdasarkan nilai penghematan dan kapasitas kendaraan. Rute tersebut kemudian disempurnakan melalui pemodelan MILP menggunakan solver Gurobi dengan mempertimbangkan batasan realistis seperti kapasitas kendaraan, *time windows*, serta komponen biaya, sehingga diperoleh solusi yang optimal dari segi ketepatan waktu dan efisiensi biaya.

1. Analisis Keterlambatan Pengiriman

Hasil analisis menunjukkan perbedaan signifikan dalam risiko keterlambatan antara metode *Direct Shipment*, *Saving Matrix*, dan MILP. *Direct Shipment* bersifat *point-to-point*, efektif menghindari keterlambatan karena setiap pelanggan dilayani langsung tanpa penggabungan rute, meskipun keterbatasan armada bisa menjadi kendala untuk wilayah jauh. *Saving Matrix*, meski tidak mempertimbangkan

time windows secara eksplisit, mampu mengurangi jarak tempuh dan menekan risiko keterlambatan secara tidak langsung. Sementara itu, MILP dengan pendekatan HFVRPTW menghasilkan solusi paling optimal dengan mempertimbangkan seluruh batasan operasional termasuk *time windows*, sehingga tidak ditemukan keterlambatan pada rute yang dihasilkan.

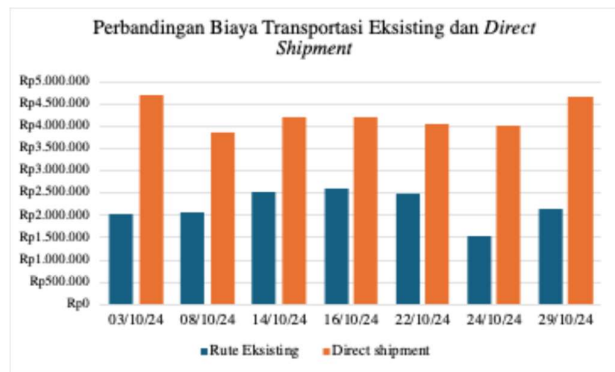
TABEL 2
(PERBANDINGAN KETERLAMBATAN)

Tanggal	Kendaraan	Total Keterlambatan		Persentase Keterlambatan	
		Eksisting	Usulan	Eksisting	Usulan
03/10/24	Pickup	0	0	17%	0%
	Double Engkel	1	0		
08/10/24	Pickup	1	0	20%	0%
	Double Engkel	0	0		
14/10/24	Pickup	0	0	20%	0%
	Double Engkel	1	0		
16/10/24	Pickup	0	0	40%	0%
	Double Engkel	2	0		
22/10/24	Pickup	0	0	14%	0%
	Double Engkel	1	0		
24/10/24	Pickup	0	0	17%	0%
	Double Engkel	1	0		
29/10/24	Pickup	0	0	20%	0%
	Double Engkel	1	0		
Rata-rata Persentase Keterlambatan				21%	0%

Tabel 2 menunjukkan penurunan rata-rata keterlambatan dari 21% pada rute eksisting menjadi 0% pada yang menggunakan MILP. Optimasi dengan solver Gurobi mempertimbangkan faktor *time windows*, kapasitas kendaraan, permintaan, dan jarak antar pelanggan. Keberhasilan ini dicapai melalui penyusunan urutan pengiriman yang lebih efisien berdasarkan hasil optimasi.

2. Perbandingan Eksisting dan Direct Shipment

Rute eksisting menggunakan metode *routing*, yakni pengiriman ke beberapa lokasi dalam satu perjalanan. Pola ini rentan terhadap efek domino keterlambatan, karena keterlambatan di satu titik berdampak pada titik berikutnya. Sebaliknya, metode *direct shipment* mengirimkan Al-Qur'an ke satu lokasi per perjalanan, sehingga keterlambatan dapat diminimalkan dan waktu tempuh lebih terprediksi.

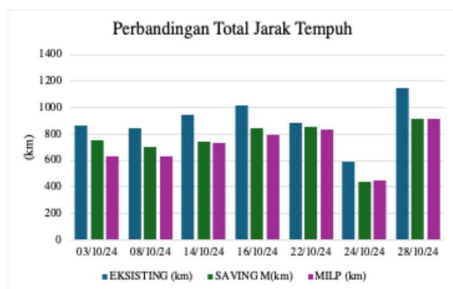


Gambar 4 menunjukkan perbandingan biaya transportasi antara rute eksisting dan metode *Direct Shipment*. Rata-rata, biaya transportasi *Direct Shipment* tercatat 49% lebih tinggi dibandingkan rute eksisting. Selain itu, total waktu tempuh juga lebih panjang karena setiap pengiriman harus kembali ke gudang sebelum melayani pelanggan berikutnya.

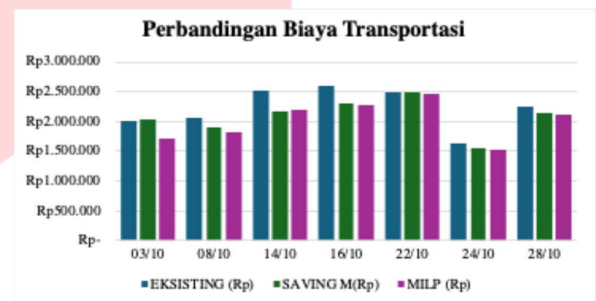
TABEL 3
(WAKTU KOMPUTASI)

Tanggal	Waktu Komputasi (detik)	
	<i>Saving Matrix</i>	MILP
03/10/24	0,000173	1,073130
08/10/24	0,000149	0,382347
14/10/24	0,000149	0,182741
16/10/24	0,000153	0,402821
Rata-rata	0,000156	0,510260

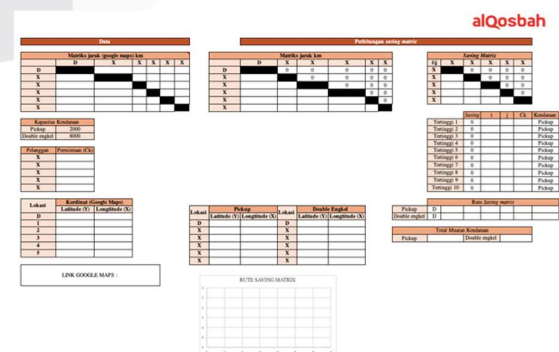
4. Perbandingan Jarak Tempuh



Gambar 5. menunjukkan hasil perbandingan menunjukkan bahwa rancangan rute usulan yang dihasilkan oleh kedua metode, yaitu *Saving Matrix* dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), berhasil menurunkan total jarak tempuh kendaraan secara signifikan dibandingkan dengan rute eksisting. *Saving Matrix* menghasilkan penurunan jarak tempuh rata-rata sebesar 16%, sedangkan MILP mencapai 21%. Meskipun *Saving Matrix* lebih sederhana dan cepat, metode ini belum mempertimbangkan seluruh batasan operasional. Sebaliknya, MILP mampu mengoptimalkan rute secara lebih menyeluruh dengan mempertimbangkan kapasitas kendaraan, dan jenis kendaraan sehingga mendukung efisiensi penggunaan aset dan operasional perusahaan.



Gambar 6. menunjukkan bahwa metode *Saving Matrix* dan MILP mampu memberikan penghematan dibandingkan rute eksisting, masing-masing sebesar 6% dan 9% .Penghematan ini terutama disebabkan oleh penurunan jarak tempuh dan minimisasi keterlambatan. MILP memberikan hasil lebih optimal karena mempertimbangkan variabel seperti kapasitas kendaraan, biaya tetap dan variabel, serta *time window* pelanggan. Sementara itu, *Saving Matrix* tetap menjadi alternatif praktis dengan komputasi cepat meskipun tidak mempertimbangkan seluruh batasan operasional. Penerapan rute usulan, terutama dari MILP, berpotensi meningkatkan efisiensi dan profitabilitas perusahaan.



Gambar 7 menampilkan rancangan Excel untuk perhitungan *Saving Matrix*, di mana pengguna memasukkan jarak antar lokasi dan data permintaan pelanggan. Rancangan ini mempermudah identifikasi penghematan jarak antar pasangan pelanggan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar penentuan rute distribusi yang lebih efisien.

GAMBAR 8
(RANCANGAN EXCEL MILP)

Gambar 8 menampilkan rancangan Excel untuk perhitungan MILP, yang memuat input jarak antar lokasi, permintaan pelanggan, dan waktu tutup layanan. Meskipun belum terintegrasi dengan *Solver*, template ini menyajikan data secara terstruktur, mencakup alokasi kendaraan, urutan pengiriman, dan *time window*. Rancangan ini berfungsi sebagai alat bantu bagi perusahaan dalam menganalisis alternatif rute pengiriman secara manual berdasarkan parameter yang tersedia.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode *Saving Matrix* dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) mampu meningkatkan efisiensi distribusi di PT Al-Qosbah. MILP terbukti paling optimal karena berhasil menghilangkan keterlambatan pengiriman dari 21% menjadi 0% serta mengurangi total jarak tempuh hingga 21%. Sementara itu, *Saving Matrix* juga memberikan kontribusi signifikan dengan penghematan jarak tempuh sebesar 16%. Efisiensi ini turut berdampak pada penurunan biaya transportasi, yaitu sebesar 9% pada MILP dan 6% pada *Saving Matrix*. Meskipun strategi *direct shipment* efektif mengatasi keterlambatan dengan pengiriman *point-to-point*, metode ini cenderung meningkatkan biaya operasional karena jarak tempuh yang lebih panjang. Untuk mendukung implementasi di lapangan, perancangan rute juga dilengkapi dengan sistem informasi berbasis Excel yang memudahkan perusahaan dalam melakukan perencanaan rute secara mandiri, praktis, dan efisien.

REFERENSI

- [1] Hermanto, K., Utami, S. F., & Jabbar, W. A. A. (2021). Aplikasi Model VRP dan Metode *Saving Matrix* untuk Mengoptimalkan Rute Pendistribusian Pupuk di CV. Al-Zaman. *Tekinfor: Jurnal Ilmiah Teknik Industri Dan Informasi*, 10(1), 44–53.
- [2] Tanjung, L. S., Hadiguna, R. A., & B.A, A. H. (2021). Model Mixed Integer Liner Programming untuk Perencanaan Pengangkutan Sampah di kota Pekanbaru. *Jurnal Daya Saing*, 7(3), 293–300.
- [3] Hanafiah, H., Ardaniswarie, P., Tri Susilo, F. A., & Rahadi, D. R. (2024). *Optimization of Solving the Vehicle Routing Problem with Time Windows in Multiple Product and Multiple Route Distribution* (Case Study: PT Subang Mulya Sejahtera). *International Journal of Scientific and Management Research*, 07(05), 37–56.
- [4] Margaretha, M., Manajemen, S., Bisnis, F., & Ekonomika, D. (2015). Rancangan Sistem Distribusi pada CV Putra-Putri di Jombang.
- [5] Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation 6th Edition* (SIXTH).
- [6] Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*.
- [7] Eliyati, N., & Agus Lukowi, dan. (2016). Penentuan Rute Optimal pada Pengangkutan Sampah di Kota Palembang dengan Menggunakan Metode *Saving Matrix*. In *Jurnal Penelitian Sains* (Vol. 18).
- [8] Sari, R. D., Farizal, F., & Gabriel, D. S. (2020). Optimasi Penyaluran Bahan Bakar Minyak di Wilayah Maluku Indonesia. *Eigen Mathematics Journal*, 106–109.
- [9] Mehlbeer, F., & Anh Vien, N. (2014). *Mixed-Integer Linear Programming Applied to Temporal Planning of Concurrent Actions*.