

Pengembangan Model Sinkronisasi Distribusi Dua Eselon pada *Urban Consolidation Center* (UCC) di Sistem Logistik Perkotaan

Titi Iswari^{1*}

¹⁾ Pusat Studi Rantai Pasok, Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Rekayasa, Universitas
Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit no 94, Bandung, Indonesia
Email: titiiswari@unpar.ac.id

(Diterima: 25-05-2025; Direvisi: 04-08-2025; Disetujui: 05-08-2025)

Abstrak

Distribusi logistik dua eselon di kawasan perkotaan menghadapi tantangan kompleks, seperti keterbatasan kapasitas kendaraan, kapasitas penyimpanan, dan optimasi rute distribusi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematis untuk menyinkronkan distribusi dua eselon pada sistem *Urban Consolidation Center* (UCC), dengan mengintegrasikan aspek inventori dan perutean kendaraan secara simultan. Model mencakup tiga skema distribusi pada eselon pertama (*Direct & No Inventory*, *Direct–Inventory*, dan *Route–Inventory*). Optimasi pada eselon pertama diselesaikan menggunakan AMPL dengan solver CPLEX, sedangkan persoalan distribusi pada eselon kedua diselesaikan dengan pendekatan *Economic Order Quantity* (EOQ) dan algoritma *Large Neighborhood Search* (LNS). Eksperimen dilakukan dengan berbagai skenario, seperti jumlah *retailer*, *supplier*, dan biaya penyimpanan. Skema ketiga (*Route & Inventory*) terbukti menghasilkan total biaya logistik paling rendah, dengan efisiensi biaya yang konsisten di berbagai konfigurasi, mencapai penghematan sebesar 20 - 60%. Model ini berkontribusi dalam perancangan sistem logistik perkotaan yang lebih hemat biaya dan efisien.

Kata kunci: sinkronisasi; multi-eselon; *urban consolidation center*; inventori; penentuan rute; optimasi

Abstract

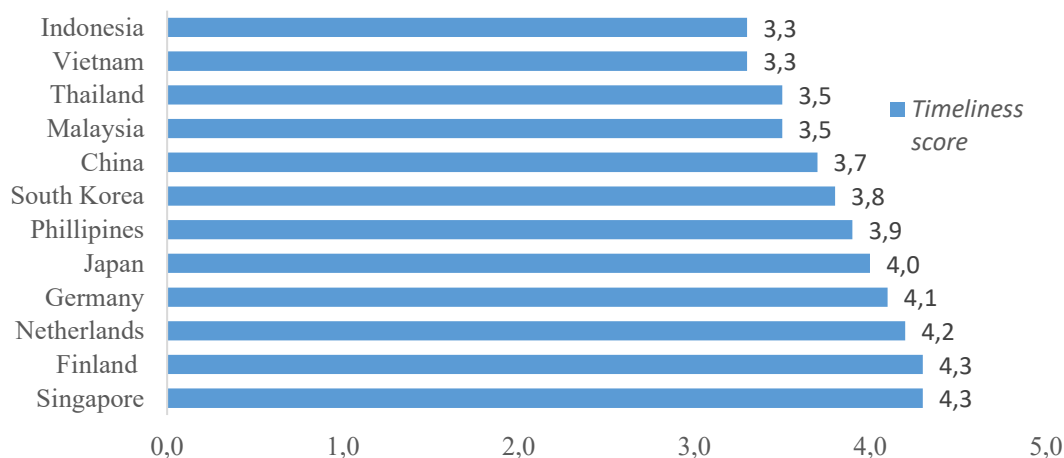
Two-echelon logistics distribution in urban areas faces complex challenges, such as limited vehicle capacity, storage constraints, and the need for route optimization. This study aims to develop a mathematical model to synchronize two-echelon distribution within an Urban Consolidation Center (UCC) system by simultaneously integrating inventory management and vehicle routing aspects. The model includes three distribution schemes at the first echelon: Direct & No Inventory, Direct–Inventory, and Route–Inventory. Optimization for the first echelon is solved using AMPL with the CPLEX solver, while the distribution problem at the second echelon is addressed using the Economic Order Quantity (EOQ) approach and the Large Neighborhood Search (LNS) algorithm. Numerical experiments are conducted under various scenarios of retailer and supplier numbers as well as different storage cost levels. The third scheme (Route & Inventory) has been proven to yield the lowest total logistics cost, with consistent cost efficiency across various configurations, achieving savings of 20–60%. This model contributes to the design of more cost-effective and efficient urban logistics systems.

Keywords: *synchronization; multi-echelon; urban consolidation center; inventory; routing; optimization*

PENDAHULUAN

Distribusi logistik merupakan bagian penting dari rantai pasok yang semakin menantang di wilayah perkotaan akibat urbanisasi dan meningkatnya volume perdagangan. Konsep logistik perkotaan hadir untuk mengatasi masalah ini dengan mempertimbangkan keterbatasan infrastruktur, kemacetan, konsumsi energi, dan dampak lingkungan melalui perencanaan dan koordinasi yang baik. Salah satu solusi efektif adalah sistem distribusi *multi-echelon*, khususnya jaringan dua-eselon, di mana barang dikirim dari pemasok ke *urban consolidation center* (UCC) menggunakan kendaraan besar, lalu didistribusikan ke pelanggan akhir dengan kendaraan kecil. Pendekatan ini mampu menekan biaya, waktu pengiriman, jumlah kendaraan, dan emisi. Pemanfaatan fasilitas perantara dalam jaringan dua-eselon umumnya masih terbatas pada fungsi konsolidasi, padahal fasilitas ini berpotensi digunakan sebagai tempat penyimpanan sementara untuk mendukung distribusi B2B ke *retailer* dalam kota (Johansson & Björklund, 2017). Strategi ini memungkinkan *retailer* menghemat biaya ruang penyimpanan di lokasi strategis perkotaan, serta memungkinkan pengisian ulang inventori yang kecil dan sering, sehingga meningkatkan fleksibilitas layanan dan efisiensi operasional (Aastrup et al., 2012; Browne et al., 2005).

Meskipun penting, aspek integrasi antara keputusan inventori dan penentuan rute distribusi dalam konteks logistik perkotaan dua-eselon masih relatif kurang mendapat perhatian dalam literatur (Farias et al., 2021). Terlebih lagi, tantangan logistik perkotaan yang kompleks—seperti batasan jendela waktu, kendaraan heterogen, permintaan *pick-up* dan *delivery* yang simultan, serta *multi-trip* membutuhkan pendekatan pemodelan yang lebih realistis dan komprehensif. Penelitian ini berkontribusi dengan mengembangkan model sinkronisasi yang menggabungkan aspek optimasi inventori dan perutean kendaraan dalam sistem distribusi dua eselon di lingkungan perkotaan, dengan mempertimbangkan fungsi penyimpanan sementara di fasilitas perantara, seperti *Urban Consolidation Center*.



Gambar 1. Skor *Timeliness* - *Logistics Performance Index* (The World Bank, 2023)

Berdasarkan *Logistics Performance Index* dari The World Bank (2023) yang ada pada Gambar 1, terdapat kesenjangan signifikan dalam skor *timeliness* antar negara. Negara-negara berkembang seperti Indonesia dan Vietnam hanya memperoleh skor 3,3, jauh di bawah negara maju seperti Singapura dan Finlandia yang mencapai skor 4,3. Hal ini mencerminkan masih rendahnya tingkat ketepatan waktu pengiriman di kawasan Asia Tenggara, yang menjadi indikasi adanya tantangan dalam sistem distribusi logistik, khususnya di wilayah perkotaan. Kondisi ini memperkuat urgensi untuk merancang sistem

distribusi yang lebih efisien dan responsif, salah satunya melalui pendekatan distribusi dua eselon yang mengintegrasikan perencanaan inventori dan perutean kendaraan secara simultan.

Transportasi barang merupakan elemen krusial dalam mendukung pembangunan ekonomi di kawasan perkotaan. Namun, ada beberapa tantangan yang muncul terkait transportasi barang ini, khususnya dalam hal biaya, dampak lingkungan, dan konsumsi energi. Menyikapi masalah transportasi produk di wilayah perkotaan ini, muncul konsep logistik urban. Logistik urban atau *City Logistics* didefinisikan oleh (Taniguchi et al., 2001) sebagai: “*The process for totally optimizing the logistics and transport activities by private company in urban areas considering the traffic environment, the traffic congestion and energy consumption within framework of a market economy.*”

Menurut Lagorio et al. (2016), terdapat tiga isu utama dalam penelitian logistik perkotaan, yaitu: *Vehicle Routing Problem* (VRP), keterlibatan pemangku kepentingan, dan evaluasi performa solusi. Penelitian dalam bidang logistik perkotaan terus berkembang dengan munculnya konsep-konsep baru untuk mengatasi tantangan logistik perkotaan yang semakin kompleks. Salah satu solusi yang banyak dibahas adalah *Urban Consolidation Center* (UCC), yaitu pusat konsolidasi yang berfungsi untuk meningkatkan utilisasi aset logistik, mengurangi kemacetan lalu lintas, serta memungkinkan penggunaan kendaraan ramah lingkungan dalam tahap akhir distribusi (Faure et al., 2016; Gonzalez-Feliu, 2011; Janjevic & Ndiaye, 2017; van Duin et al., 2010). Selain itu, berbagai inovasi dalam logistik perkotaan telah dikembangkan, mulai dari jaringan multi eselon (Cuda et al., 2015; Hemmelmayr et al., 2012), kendaraan ramah lingkungan (Anderluh et al., 2017), hingga konsep futuristik seperti *Physical Internet* (Crainic et al., 2020; Mohamed et al., 2017) dan *crowd logistics* (Kunze, 2016). Selain itu, solusi berbasis teknologi seperti *parcel lockers* (Iwan et al., 2016; Lachapelle et al., 2018; Schwerdfeger & Boysen, 2020; Vakulenko et al., 2018; Yuen et al., 2018) dan strategi kolaboratif berbasis *resource sharing* (Neghabadi et al., 2019) juga ditawarkan untuk meningkatkan efisiensi distribusi dan mengurangi dampak lingkungan.

Sinkronisasi antara kendaraan tingkat pertama dan tingkat kedua merupakan aspek penting dalam sistem distribusi dua eselon, namun hanya sedikit peneliti yang memperhatikan aspek ini. Aspek sinkronisasi dalam 2E-VRP diperkenalkan oleh (Crainic et al., 2009), yang mencakup waktu perjalanan yang bergantung pada waktu, *multi depot*, *multi-trip*, armada heterogen, dan jendela waktu.

Pada dasarnya, terdapat dua jenis batasan sinkronisasi dalam jaringan dua eselon, yaitu sinkronisasi berbasis waktu dan sinkronisasi berbasis kapasitas. Sinkronisasi berbasis waktu berarti bahwa kendaraan harus tiba pada waktu yang hampir bersamaan di hub atau satelit (sinkron dari segi waktu). Jika salah satu kendaraan tiba lebih awal atau lebih lambat dari kendaraan lain, akan terjadi waktu tunggu di satelit. Mekanisme sinkronisasi 2E-VRP berdasarkan batasan waktu dipelajari oleh (Anderluh et al., 2017; Grangier et al., 2016; Li et al., 2016). Sementara itu, Li et al. (2018, 2020), menggunakan pendekatan berbasis kapasitas untuk memodelkan proses sinkronisasi di satelit dengan mengadopsi batasan *Real-time Transshipment Capacity* (RTC) untuk membuat rute dua eselon saling berinteraksi.

Penelitian ini akan berfokus pada optimasi dan sinkronisasi distribusi di tingkat eselon pertama dan kedua. Pendekatan simultan ini mempertimbangkan sinkronisasi antara pemasok dan pusat distribusi kota, dengan mempertimbangkan aspek inventori dan penentuan rute optimal. Untuk aspek sinkronisasi, penelitian ini akan mengadopsi mekanisme sinkronisasi di *hub* atau satelit berupa sinkronisasi dari segi waktu atau kapasitas *hub*.

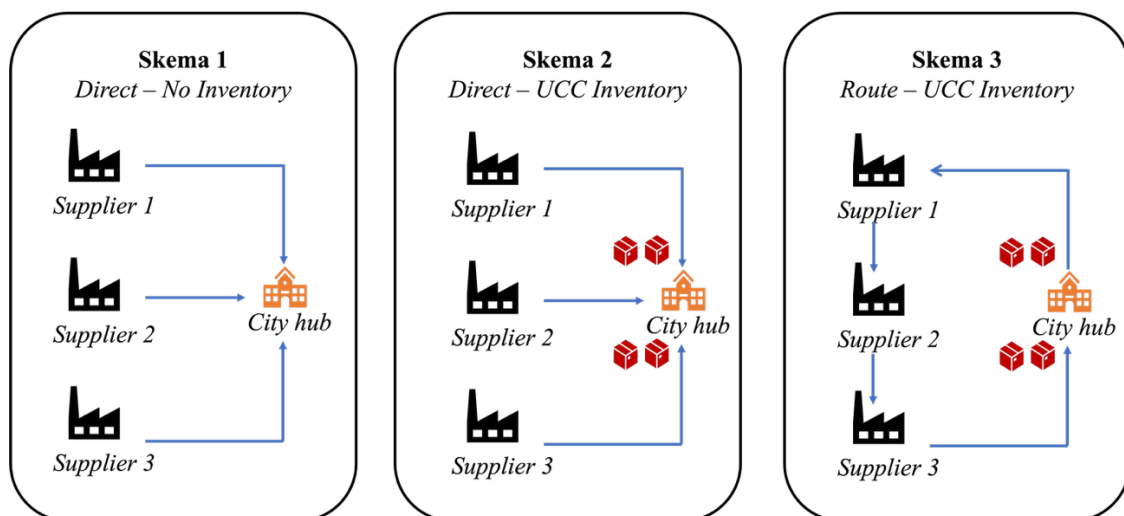
METODE PENELITIAN

Deskripsi Permasalahan

Studi ini mempertimbangkan sistem distribusi dua tingkat dalam konteks perkotaan, di mana jaringan distribusi terdiri atas sejumlah pemasok S yang berlokasi di luar area perkotaan, satu *Urban Consolidation Center* (UCC), dan beberapa *retailer* perkotaan R . Para *retailer* mempunyai permintaan harian dari pelanggan mereka untuk berbagai jenis produk dalam periode perencanaan multi-periode T yang telah ditentukan (di mana setiap periode t dalam T merepresentasikan satu hari). Setiap *retailer* melakukan pemesanan produk yang diperlukan dari pemasok yang berbeda (satu pemasok untuk setiap jenis produk) dan dikenakan biaya pemesanan untuk setiap transaksi pemesanan. Pemasok dapat mengirimkan produk mereka ke UCC sebelum didistribusikan ke *retailer* menggunakan mode kendaraan heterogen (misalnya, sepeda kargo dan van). Sepeda diizinkan untuk melakukan beberapa perjalanan dalam satu periode (*multi-trip*). Setiap *retailer* memiliki kapasitas penyimpanan yang terbatas, menanggung biaya penyimpanan apabila produk disimpan selama beberapa periode, serta menerapkan batasan waktu terhadap pengiriman.

Pemodelan permasalahan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua model, yaitu untuk permasalahan eselon pertama dan eselon kedua. Dalam hal ini, eselon kedua diselesaikan terlebih dahulu untuk menentukan jadwal, rute, serta kuantitas produk yang harus dikirimkan dari UCC ke *retailer* setiap harinya. Model untuk eselon kedua diadaptasi dari penelitian sebelumnya (Iswari et al., 2023). Setelah mendapatkan solusi optimal dari eselon kedua, maka akan dicari solusi untuk eselon pertama dengan mempertimbangkan sinkronisasi waktu dan kapasitas pada UCC.

Pada tingkat distribusi/eselon pertama, terdapat 3 jenis skema yang akan dianalisis dalam penelitian ini, yaitu skema *direct - no inventory*, *direct - inventory*, dan *route - inventory*. Tiga skema ini akan mempengaruhi proses sinkronisasi antara eselon pertama dan eselon kedua. Dalam proses sinkronisasi ini terdapat 2 jenis sinkronisasi, yaitu sinkronisasi waktu dan kapasitas. Sinkronisasi dalam hal waktu berarti barang dari *supplier* harus berada di UCC sebelum barang tersebut dibutuhkan untuk dikirim ke *retailer*. Untuk sinkronisasi dalam hal kapasitas, artinya dalam setiap periode, jumlah barang yang tersimpan dalam UCC harus kurang dari kapasitas maksimum UCC, tetapi masih dapat memenuhi kebutuhan pengiriman UCC ke *retailer*. Gambar 2. merupakan ilustrasi dari 3 skema yang dipakai untuk sinkronisasi pada penelitian ini.



Gambar 2. Skema Sinkronisasi

1. Skema 1: *Direct & No Inventory*

Pada skema ini, diasumsikan bahwa pemasok mengirimkan semua produk yang dibutuhkan ke UCC pada setiap periode menggunakan truk melalui perjalanan langsung. Untuk menghitung biaya transportasi pada tingkat pertama, jumlah perjalanan yang dibutuhkan dari setiap pemasok $s \in S$ pada setiap periode $t \in T$ ditentukan dengan membagi jumlah produk yang dikirim dengan kapasitas kendaraan, setelah itu dihitung biaya untuk eselon pertama, w_{st} dengan cara mengkalikan biaya per trip (B_s) untuk pemasok $s \in S$, yaitu B_s , dengan total trip yang dibutuhkan seperti yang terdapat pada Persamaan (1). Skema 1 ini merupakan skema yang tidak melibatkan proses optimasi pada eselon pertama. Persamaan (2) merupakan formula untuk menghitung total biaya eselon pertama dengan skema 1.

$$w_{st} = \frac{D_{st}}{C} * B_s \quad (1)$$

$$z_1^* = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} w_{st} \quad (2)$$

2. Skema 2: *Direct – Inventory*

Model untuk skema kedua ini bertujuan untuk mengoptimalkan pengiriman setiap produk $p \in P$ ke pusat konsolidasi perkotaan (UCC) selama semua periode $t \in T$ dengan memanfaatkan fasilitas *storage*/penyimpanan di UCC. Secara khusus, berdasarkan jumlah pengiriman dari UCC ke setiap *retailer* per periode, model ini menentukan berapa banyak produk yang harus dikirim ke UCC di setiap periode untuk meminimalkan biaya. Biaya ini terdiri dari biaya pengiriman dari pemasok per pengiriman per periode dan biaya penyimpanan di UCC per unit per periode. Dalam model ini, jumlah pengiriman dari UCC ke setiap *retailer* per periode dianggap sebagai permintaan untuk produk p dari setiap *retailer* per periode. Pengiriman dari pemasok ke UCC dibatasi oleh kapasitas kendaraan dan kapasitas penyimpanan di UCC. Model matematika ini terdiri dari beberapa variabel, parameter, dan kapasitas, yang disusun sebagai berikut.

Sets:

S : Kumpulan pemasok.

T : Kumpulan periode waktu yang terurut.

Parameters:

$d_{s,t}$: Permintaan produk dari pemasok s pada periode t .

C_s : Biaya pengiriman per trip dari pemasok s .

H_s : Biaya penyimpanan per unit produk dari pemasok s .

Q : Kapasitas kendaraan (maksimum jumlah produk yang dapat diangkut dalam satu trip).

G : Kapasitas maksimum penyimpanan di hub/satelit.

Decision Variables:

$F_{s,t}$: Jumlah produk yang dikirim dari pemasok s pada periode t .

$I_{s,t}$: Inventori produk dari pemasok s pada periode t .

$R_{s,t}$: Variabel biner yang bernilai 1 jika ada perjalanan dari pemasok s pada periode t , dan 0 jika tidak.

Fungsi Objektif:

$$\text{Min } z_1^* = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} C_s R_{s,t} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} H_s I_{s,t} \quad (3)$$

Batasan:

$$F_{s,1} - I_{s,1} = d_{s,1} \quad \forall s \in S \quad (4)$$

$$I_{s,t-1} + F_{s,t} - I_{s,t} = d_{s,t} \quad \forall s \in S, \forall t \geq 2 \quad (5)$$

$$\frac{F_{s,t}}{Q} \leq R_{s,t} \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} I_{s,t} \leq G \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$I_{s,t}, F_{s,t} \geq 0, R_{s,t} \in \{0,1\} \quad (8)$$

Fungsi objektif (3) bertujuan untuk meminimalkan total biaya pengiriman pemasok per perjalanan per periode dan biaya penyimpanan di UCC per unit per periode. Persamaan (4) dan (5) merupakan batasan yang menjelaskan hubungan pergerakan inventori antar tiap periodenya dan memastikan *demand* harus terpenuhi. Persamaan (6) berkaitan dengan kapasitas kendaraan dan jumlah perjalanan. Persamaan (7) menjamin bahwa total inventori semua produk tidak boleh melebihi kapasitas penyimpanan UCC di setiap periode t . Terakhir, Persamaan (8) merupakan *sign restrictions*.

3. Skema 3: Route & Inventory

Skema 3 memungkinkan UCC untuk mengambil produk dari *supplier* dengan menentukan rute optimal dan jumlah produk yang dikirimkan oleh *supplier* pada tiap periodenya. Dalam skema ini, diasumsikan terdapat kendaraan yang berangkat dari *hub* atau satelit kemudian mengambil barang dari sejumlah pemasok S . Setiap periode T menggambarkan waktu tertentu di mana kegiatan pengiriman dan inventori berlangsung.

Setiap pemasok $s \in S$ memiliki permintaan produk dalam setiap periode $t \in T$, yang perlu dipenuhi. Biaya transportasi dikenakan untuk setiap pengiriman antara *node* i dan j dalam jaringan, serta biaya penyimpanan yang diterapkan pada setiap pemasok. Selain itu, terdapat kapasitas maksimum kendaraan Q yang membatasi jumlah produk yang dapat diangkut pada setiap perjalanan, dan kapasitas maksimum hub G , yang membatasi total produk yang dapat disimpan di hub.

Model ini bertujuan untuk meminimalkan total biaya yang meliputi biaya transportasi dan biaya penyimpanan inventori di UCC. Berikut ini adalah variabel, parameter, dan model matematis untuk meminimalkan total biaya distribusi dan biaya inventori untuk skema 3.

Sets:

S : Kumpulan pemasok

N : Kumpulan *node*, yang mencakup pemasok S dan hub $\{0\}$

T : Periode waktu, di mana setiap periode memiliki operasi distribusi

P : Pasangan *node* dalam jaringan dengan aturan $j > i$

Parameters:

$d_{s,t}$: Permintaan produk dari pemasok s pada periode t .

$C_{i,j}$: Biaya pengiriman per trip dari pemasok s .

H_s : Biaya penyimpanan per unit produk dari pemasok s .

Q : Kapasitas kendaraan (maksimum jumlah produk yang dapat diangkut dalam satu trip).

G : Kapasitas maksimum penyimpanan di hub.

M : Konstanta besar (digunakan untuk batasan)

Decision Variables:

$F_{s,t}$: Jumlah produk yang dikirim dari pemasok s pada periode t .

$I_{s,t}$: Inventori produk dari pemasok s pada periode t .

$X_{i,j,t}$: Variabel biner (1 jika terdapat pengiriman dari *node* i ke *node* j pada periode t)

$L_{i,t}$: Beban kendaraan setelah mengunjungi *node* i

Fungsi Tujuan:

$$\text{Min } z_1^* = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{i,j} X_{i,j,t} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} H_s I_{s,t} \quad (9)$$

Batasan:

$$F_{s,1} - I_{s,1} = d_{s,1} \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$I_{s,t-1} + F_{s,t} - I_{s,t} = d_{s,t} \quad \forall s \in S, \forall t \geq 2 \quad (11)$$

$$F_{s,t} \leq \sum_{j \in N} M X_{s,j,t} \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (12)$$

$$X_{i,j,t} + X_{j,i,t} \leq 1 \quad \forall i, j \in S, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{i \in N} X_{i,l,t} = \sum_{i \in N} X_{l,i,t} \quad \forall l \in S, \forall t \in T \quad (14)$$

$$X_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i \in N, \forall j \in S, \forall t \in T \quad (15)$$

$$F_{s,t} \leq \sum_{j \in N} M X_{0,j,t} \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (16)$$

$$F_{s,t} \leq \sum_{i \in N} M X_{i,0,t} \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (17)$$

$$L_{i,t} + F_{j,t} - M(1 - X_{i,j,t}) \leq L_{j,t} \quad \forall i \in N, \forall j \in S, \forall t \in T \quad (18)$$

$$L_{j,t} \leq Q \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} I_{s,t} \leq G \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$I_{s,t}, L_{i,t}, F_{s,t} \geq 0, X_{i,j,t} \in \{0,1\} \quad (21)$$

Fungsi objektif pada Persamaan (9) adalah untuk meminimalkan biaya transportasi dan biaya penyimpanan di setiap pemasok. Persamaan (10) dan (12) mengatur keseimbangan inventori pada setiap periode untuk memastikan bahwa permintaan terpenuhi di seluruh pemasok. Selanjutnya, Persamaan (13) merupakan batasan aliran produk mengharuskan pemasok yang mengirimkan produk untuk dikunjungi, dengan larangan perjalanan bolak-balik untuk efisiensi. Persamaan (14) merupakan batasan keseimbangan aliran dan Persamaan (15) merupakan batasan untuk memastikan kunjungan sekali per *node* per periode. Persamaan (16) dan (17) merupakan batasan untuk memastikan pengiriman dimulai dan berakhir di UCC. Persamaan (18) dan (19) merupakan batasan yang mendefinisikan aliran kapasitas kendaraan dan memastikan agar jumlah produk yang diangkut dibatasi oleh kapasitas kendaraan. Persamaan (20) merupakan batasan kapasitas penyimpanan UCC. Terakhir, Persamaan (21) merupakan *sign restrictions*.

Solusi Penyelesaian

Untuk memecahkan masalah *Inventory Routing Problem* pada sistem eselon kedua, kami mengadaptasi metode penyelesaian dari Iswari et al. (2023). Proses optimasi sistem eselon kedua terdiri dari dua fase utama, yaitu fase penentuan inventori dan fase penentuan rute.

1. Fase Penentuan Inventori

Pada fase penentuan inventori, langkah pertama adalah menjalankan *replenishment algorithm* untuk menentukan jumlah pemesanan yang optimal dari setiap produk guna meminimalkan total biaya persediaan. Dalam penelitian ini, kami menggunakan pendekatan *Economic Order Quantity (EOQ)*. *EOQ* adalah metode klasik dalam manajemen persediaan

yang digunakan untuk menentukan jumlah pemesanan optimal yang meminimalkan total biaya persediaan, yang mencakup biaya pemesanan dan biaya penyimpanan. EOQ membantu perusahaan dalam mengatur kapan dan berapa banyak barang yang harus dipesan untuk meminimasi biaya persediaan. Setelah itu, dihitung biaya inventori, yang mencakup biaya penyimpanan di *urban consolidation center* (UCC) dan biaya pemesanan dari pemasok. Selanjutnya, untuk setiap periode dan setiap pemasok, dibuat daftar *retailer* yang harus dipenuhi permintaannya pada periode tersebut oleh UCC.

2. Fase Penentuan Rute

Terkait dengan metode penyelesaian untuk proses optimasi rute, penelitian ini menggunakan pendekatan metaheuristik. Pendekatan metaheuristik banyak digunakan oleh para peneliti untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi, seperti perutean, penjadwalan, penempatan fasilitas, dan optimasi jaringan. Dalam penelitian ini, algoritma metaheuristik *Large Neighborhood Search* (LNS) yang diadaptasi dari Iswari et al. (2023) digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penentuan rute. LNS merupakan salah satu metode heuristik yang termasuk dalam kelompok algoritma pencarian ruang solusi berskala besar (*Very Large Scale Neighborhood*, VLSN) (Pisinger & Ropke, 2010). Metode LNS pertama kali diperkenalkan oleh Shaw (1998) untuk menyelesaikan permasalahan perutean kendaraan, dan telah terbukti sangat efektif. Prinsip kerja algoritma LNS adalah dengan menggunakan mekanisme *destroy and repair* untuk menjelajahi lingkungan solusi.

Algoritma *Large Neighborhood Search* (LNS) merupakan metode metaheuristik yang bekerja secara iteratif untuk mencari solusi terbaik melalui proses perusakan dan perbaikan solusi. Proses dimulai dengan menentukan parameter awal, seperti jumlah iterasi, jumlah maksimum rute dan jumlah *node* yang dapat dihapus, serta tingkat toleransi terhadap penurunan kualitas solusi. Selanjutnya, algoritma membentuk solusi awal yang layak menggunakan *insertion heuristic*. Solusi ini kemudian dijadikan sebagai solusi awal dan solusi terbaik sementara. Pada setiap iterasi, algoritma secara acak memilih metode *destroy* untuk menghapus sebagian elemen dari solusi saat ini, lalu menggunakan metode *repair* untuk membangunnya kembali dengan pendekatan penyisipan yang efisien. Setelah solusi diperbaiki, algoritma mengevaluasi apakah solusi tersebut lebih baik dari solusi terbaik yang ada. Jika ya, maka solusi terbaik diperbarui; jika tidak, solusi baru tetap dapat diterima selama penurunannya tidak melampaui ambang batas yang telah ditentukan.

Untuk mengoptimalkan proses pada eselon pertama ini, penelitian ini menggunakan perangkat lunak pemrograman, yaitu AMPL dengan *solver* CPLEX. AMPL, atau *A Mathematical Programming Language*, adalah bahasa pemodelan yang digunakan untuk mendefinisikan masalah optimasi seperti pemrograman linier dan integer, dengan memberikan kemudahan dalam mendefinisikan variabel, kendala, dan fungsi tujuan. CPLEX adalah perangkat lunak *solver* yang khusus dirancang untuk menyelesaikan model optimasi linier serta integer. Ketiga skema distribusi (Skema 1–3) dimodelkan dalam AMPL dan diselesaikan menggunakan CPLEX.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dalam penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai skenario berdasarkan karakteristik permasalahan (jumlah *retailers*, jumlah *suppliers* dan biaya simpan). Jumlah *retailer* divariasikan antara 10 dan 30, sedangkan jumlah pemasok (*supplier*) bervariasi antara 2 dan 6. Selain itu, biaya penyimpanan di *Urban Consolidation Center* (UCC) diuji dalam dua skenario, yaitu €0,1 dan €0,5 per unit per periode. Selain itu, terdapat data parameter umum yang digunakan, seperti jumlah periode, waktu pelayanan, dan kapasitas penyimpanan, serta nilai parameter kendaraan (*van* dan sepeda kargo). Data-

data ini ditentukan berdasarkan data observasi dan data dari literatur (Archetti et al., 2007; Arnold et al., 2018; Janjevic & Ndiaye, 2017).

Perencanaan dilakukan untuk periode sepanjang 14 hari. Jendela waktu operasi untuk pemasok dan pusat kota ditetapkan selama 480 menit per hari, sedangkan jendela waktu pelayanan untuk setiap *retailer* dibatasi hanya 60 menit. Setiap aktivitas layanan di lokasi pelanggan diasumsikan memakan waktu 10 menit. Kapasitas maksimum penyimpanan di masing-masing *retailer* adalah 150 unit, sedangkan UCC mampu menampung hingga 5000 unit produk. Terdapat dua jenis kendaraan yang digunakan, yaitu *van* dan sepeda kargo. Van memiliki kapasitas angkut sebesar 2000 unit, kecepatan 17 km/jam, dan dikenakan biaya operasional €0,18 per kilometer. Selain itu, *van* menghasilkan biaya eksternal tambahan berupa emisi (€0,11/km), kebisingan (€0,05/km), dan kemacetan (€0,49/km). Sementara itu, sepeda kargo memiliki kapasitas lebih kecil sebesar 600 unit, kecepatan 12 km/jam, dan biaya operasional lebih rendah sebesar €0,10/km, tanpa menimbulkan biaya eksternal lainnya. Kedua jenis kendaraan memiliki biaya pengemudi yang sama, yaitu €0,30 per menit.

Seperti penjelasan pada subbab sebelumnya, pertama akan diselesaikan terlebih dahulu permasalahan eselon kedua. Dengan menggunakan metode *replenishment* EOQ dan penentuan rute *Large Neighborhood Search*, didapatkan hasil rute optimal beserta jadwal dan jumlah pengantaran. Hasil rekap total biaya untuk eselon kedua terdapat di Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Rekapitulasi Biaya Eselon ke-2 (€)

<i>Data Instances</i>	<i>Routing cost</i>	<i>Holding cost</i>	<i>Ordering Cost</i>	<i>Total cost</i>
10 2	1567,18	2126,60	1350	5043,78
10 2	1989,26	6038,90	3950	11978,16
30 2	3545,42	6440,10	4150	14135,52
30 6	4529,63	18579,20	12090	35198,83

Data jumlah unit tiap jenis produk yang harus ada di UCC setiap periode merupakan data *input* untuk menentukan solusi di sistem eselon pertama. Fokus dari penelitian ini adalah menyinkronisasikan pengiriman antara eselon pertama dengan eselon kedua. Dalam hal ini, penelitian ini bertujuan untuk melakukan sinkronisasi dalam hal waktu dan kapasitas. Sinkronisasi dalam hal waktu berarti barang dari *supplier* harus berada di UCC sebelum barang tersebut dibutuhkan untuk dikirim ke *retailer* di dalam perkotaan. Untuk sinkronisasi dalam hal kapasitas, artinya dalam setiap periode, jumlah barang yang tersimpan dalam UCC harus kurang dari kapasitas maksimum UCC. Untuk melakukan sinkronisasi dari eselon pertama dan eselon kedua, terdapat 3 skema seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya. Tabel 2 - 4 adalah hasil dari skema 1, skema 2, dan skema 3.

Tabel 2. Hasil Skema 1

Jumlah <i>retailer</i>	Jumlah <i>supplier</i>	Biaya Simpan (<i>h</i>)	Biaya Transportasi	Biaya Inventori	Total Biaya (€)
10	2	<i>direct</i>	2206,95	0,00	2206,95
10	6	<i>direct</i>	5717,68	0,00	5717,68
30	2	<i>direct</i>	1950,78	0,00	1950,78
30	6	<i>direct</i>	5156,34	0,00	5156,34

Pada skema 1, produk dikirim langsung dari pemasok ke UCC tanpa penyimpanan di UCC. Hasil ini menunjukkan bahwa biaya transportasi meningkat pada jumlah pemasok yang lebih besar, sedangkan jumlah *retailer* memiliki pengaruh yang lebih kecil terhadap biaya. Tidak adanya biaya penyimpanan menyebabkan biaya inventori menjadi nol, sehingga total biaya sepenuhnya tergantung pada biaya transportasi. Skema ini cocok untuk situasi di mana kebutuhan inventori minimal dan permintaan bisa langsung dipenuhi tanpa

harus menimbun produk di UCC. Skema ini adalah skema paling sederhana karena tidak memerlukan formulasi optimasi kompleks, tetapi mempunyai fleksibilitas yang rendah.

Tabel 3. Hasil Skema 2

Jumlah <i>retailer</i>	Jumlah <i>supplier</i>	Biaya Simpan (<i>h</i>)	Biaya Transportasi	Biaya Inventori	Total Biaya (€)
10	2	0,1	899,40	425,60	1325,00
10	6	0,1	2687,18	1174,30	3861,48
30	2	0,1	1450,71	149,40	1600,11
30	6	0,1	3740,36	1119,40	4859,76
10	2	0,5	1641,16	413,00	2054,16
10	6	0,5	5161,34	736,50	5897,84
30	2	0,5	1622,18	0,00	1622,18
30	6	0,5	5157,60	0,00	5157,60

Skema 2 menambahkan elemen penyimpanan di UCC dengan mempertimbangkan dua level biaya simpan (*h*): €0,1 dan €0,5. Secara umum, biaya inventori meningkat dengan bertambahnya biaya simpan dan jumlah pemasok. Pada biaya simpan €0,5, biaya penyimpanan secara signifikan lebih tinggi, terutama pada kasus dengan banyak pemasok (misalnya, 10 *retailer* dan 6 pemasok menghasilkan total biaya €5041,86). Skema ini memberikan fleksibilitas lebih dalam memenuhi permintaan karena adanya penyimpanan di UCC, yang dapat mengurangi frekuensi pengiriman dan meningkatkan efisiensi total. Skema ini optimal jika ada kebutuhan untuk menyimpan produk agar dapat merespons fluktuasi permintaan dengan lebih baik.

Tabel 4. Hasil Skema 3

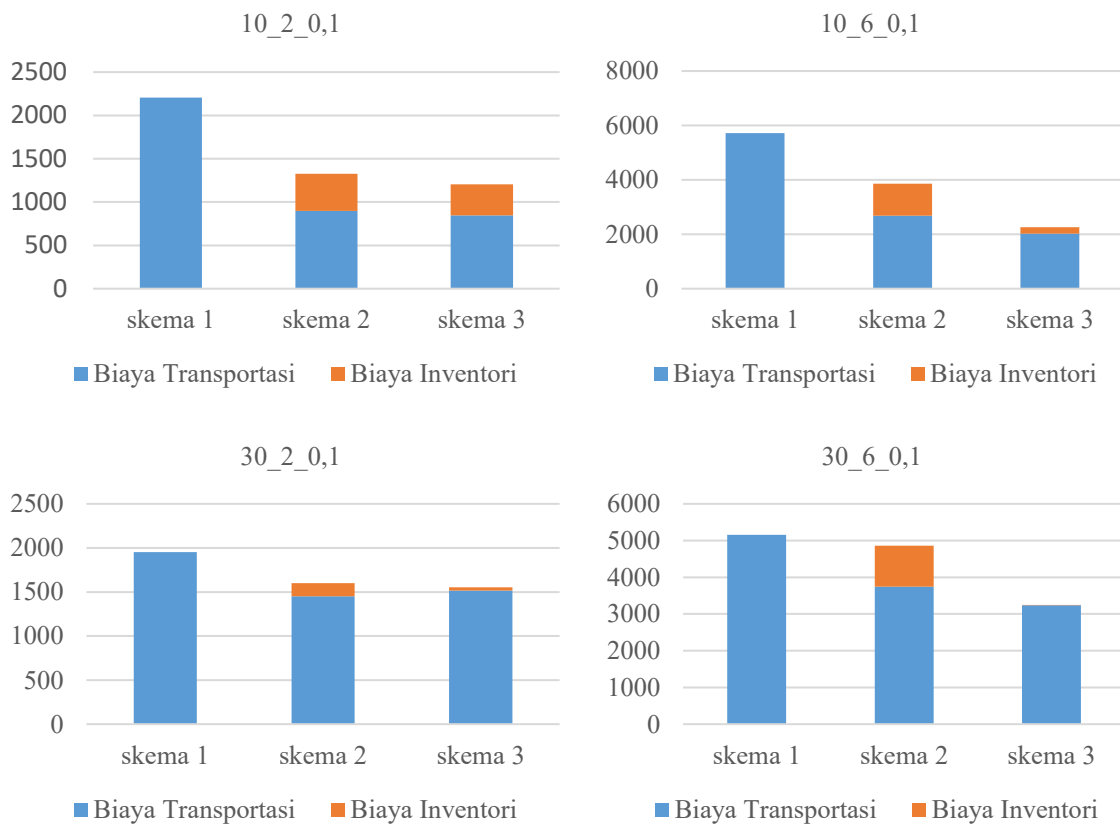
Jumlah <i>retailer</i>	Jumlah <i>supplier</i>	Biaya Simpan (<i>h</i>)	Biaya Transportasi	Biaya Inventori	Total Biaya (€)
10	2	0,1	845,62	360,30	1205,92
10	6	0,1	2025,30	238,20	2263,50
30	2	0,1	1515,04	36,40	1551,44
30	6	0,1	3237,77	12,70	3250,47
10	2	0,5	1559,57	220,00	1779,57
10	6	0,5	2325,69	0,00	2325,69
30	2	0,5	1561,08	0,00	1561,08
30	6	0,5	3289,46	7,50	3296,96

Skema 3 menggabungkan optimasi rute dan penyimpanan pada eselon pertama, yang mencakup biaya transportasi, inventori, dan pemanfaatan kapasitas kendaraan dan *hub* secara efisien. Biaya penyimpanan dan transportasi bervariasi tergantung pada jumlah pemasok dan *retailer*, namun secara keseluruhan skema ini menunjukkan efisiensi biaya yang lebih tinggi dibandingkan skema 1 dan 2. Sebagai contoh, pada 10 *retailer* dan 6 pemasok dengan biaya simpan (*h*) €0,1; total biaya yang didapatkan adalah €1878,25, dimana biaya ini lebih rendah dibandingkan skema 2 untuk situasi yang sama. Selain itu, penelitian ini juga mencoba melakukan perhitungan apabila pada skema 3 dilakukan optimasi rute, tetapi dengan kondisi UCC tidak dapat menyimpan barang (Tabel 5). Dalam kondisi tanpa penyimpanan (*No_inv*), skema 3 tetap menunjukkan total biaya yang lebih rendah dibandingkan skema 1 dan 2 untuk konfigurasi yang sama.

Tabel 5. Hasil Skema 3 – *No Inventory at the UCC*

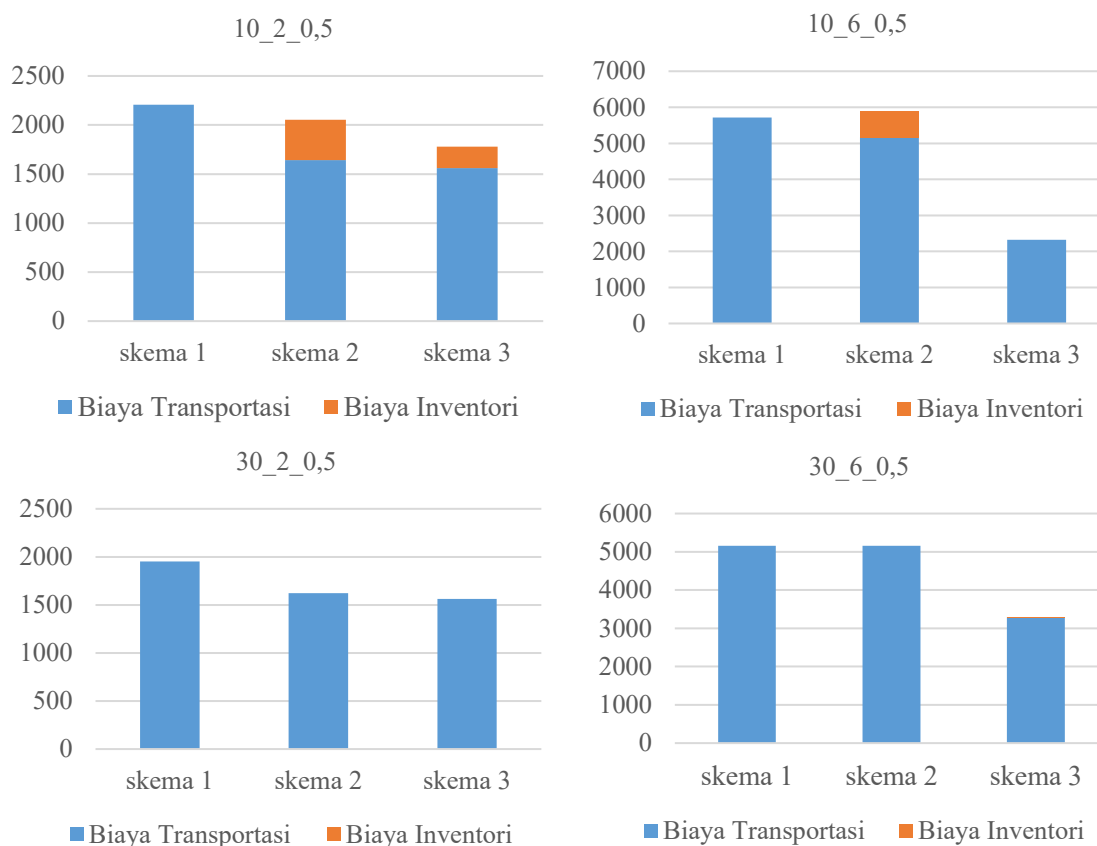
Jumlah <i>retailer</i>	Jumlah <i>supplier</i>	Biaya Simpan (<i>h</i>)	Biaya Transportasi	Biaya Inventori	Total Biaya (€)
10	2	<i>No inv</i>	1843,38	0,00	1843,38
10	6	<i>No inv</i>	2325,69	0,00	2325,69
30	2	<i>No inv</i>	1561,08	0,00	1561,08
30	6	<i>No inv</i>	3361,39	0,00	3361,39

Setelah melakukan analisis terhadap hasil dari masing-masing skema, akan dilakukan perbandingan performansi dari ketiga skema yang ada untuk masing-masing konfigurasi. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan antar skema untuk biaya simpan €0,1 dan €0,5.

**Gambar 3.** Perbandingan Skema 1 – 3 dengan biaya simpan (*h*) €0,1

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 dan Gambar 4, analisis dilakukan untuk tiga skema distribusi (*Direct & No Inventory*, *Direct – Inventory*, dan *Route & Inventory*) pada berbagai konfigurasi jumlah *retailer* dan *supplier*. Secara keseluruhan, Skema 1 (*Direct & No Inventory*) cenderung memiliki biaya tertinggi di semua konfigurasi, yang didominasi oleh biaya transportasi tanpa ada biaya inventori. Pada skema ini biaya transportasi meningkat drastis karena setiap pengiriman dilakukan langsung tanpa menyimpan produk di UCC. Skema 2 (*Direct – Inventory*) menunjukkan penghematan pada biaya transportasi dibandingkan Skema 1 karena menggunakan fasilitas inventori di UCC. Dengan menambahkan biaya inventori, skema ini mampu mengurangi total biaya transportasi. Namun, biaya inventori ini menjadi signifikan ketika jumlah *retailer* atau *supplier* bertambah, seperti terlihat pada konfigurasi 10_6_0,1 dan 30_6_0,1, di mana total biaya inventori cukup besar untuk menutupi penghematan dari biaya transportasi. Skema 3 (*Route*

& Inventory) secara konsisten menunjukkan efisiensi tertinggi di seluruh konfigurasi, baik untuk jumlah *retailer* maupun *supplier* yang berbeda. Pada skema ini, optimasi rute yang dipadukan dengan inventori memungkinkan pengurangan biaya transportasi dan inventori secara signifikan.



Gambar 4. Perbandingan Skema 1 – 3 dengan biaya simpan (h) €0,5

Secara keseluruhan, ketiga skema distribusi merepresentasikan pendekatan bertingkat dalam perancangan sistem logistik perkotaan: mulai dari pendekatan pengiriman langsung tanpa penyimpanan (Skema 1), pendekatan berbasis penyimpanan yang lebih fleksibel (Skema 2), hingga pendekatan terpadu yang menggabungkan perencanaan rute dan inventori secara simultan (Skema 3). Analisis terhadap ketiga skema ini memungkinkan evaluasi *trade-off* antara kompleksitas perencanaan dan efisiensi biaya. Hasil menunjukkan bahwa Skema 3 merupakan pilihan paling efisien dan fleksibel di berbagai konfigurasi, dengan kombinasi biaya transportasi dan inventori yang lebih rendah. Sebaliknya, Skema 1 merupakan skema paling sederhana, tetapi cenderung menghasilkan biaya tertinggi karena tidak melibatkan optimasi rute maupun penyimpanan, terutama saat jumlah *supplier* meningkat. Skema 2 memberikan penghematan dibandingkan Skema 1, namun tetap kurang optimal dibandingkan Skema 3. Temuan ini memberikan dasar untuk merancang sistem distribusi dua eselon yang lebih adaptif, terutama dalam konteks distribusi multi-periode yang memerlukan pengaturan inventori dan rute yang optimal.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan skema distribusi yang mempertimbangkan aspek inventori dan perutean secara terintegrasi dapat memberikan efisiensi biaya yang signifikan dibandingkan pendekatan pengiriman langsung tanpa penyimpanan (Skema 1). Detail peningkatan performansi dalam hal efisiensi biaya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil efisiensi biaya (%) Skema 1 - 3

No	Jumlah <i>retailer</i>	Jumlah <i>supplier</i>	Biaya (€)			Efisiensi biaya (%)	
			Skema 1	Skema 2; h = 0,1	Skema 3; h = 0,1	Skema 1 ke Skema 2	Skema 1 ke Skema 3
1	10	2	2206,95	1325,00	1205,92	39,96%	45,36%
2	10	6	5717,68	3861,48	2263,50	32,46%	60,41%
3	30	2	1950,78	1600,11	1551,44	17,98%	20,47%
4	30	6	5156,34	4859,76	3250,47	5,75%	36,96%

Hasil pada Tabel 6 memperlihatkan bahwa penerapan Skema 2 (*Direct & Inventory*) menghasilkan efisiensi biaya antara 5% hingga 39% dibandingkan Skema 1, tergantung pada jumlah *retailer* dan *supplier* dalam sistem. Sementara itu, Skema 3 (*Route & Inventory*), yang mengombinasikan strategi perencanaan rute dan manajemen inventori, menunjukkan kinerja biaya yang paling efisien dengan penghematan antara 20% hingga 60% dibandingkan Skema 1. Dengan demikian, integrasi inventori dan perutean dalam skema distribusi dua eselon terbukti efektif dalam menekan total biaya logistik di berbagai skenario urban.

PENUTUP

Penelitian ini menunjukkan bahwa model matematis telah berhasil dikembangkan untuk mengoptimalkan dan menyinkronkan sistem logistik perkotaan dengan pendekatan multi-eselon, khususnya pada dua tingkatan distribusi (dua-eselon). Permasalahan optimasi dan sinkronisasi antar eselon diselesaikan melalui tiga skema distribusi, yaitu (i) *Direct & No Inventory*, (ii) *Direct–Inventory*, dan (iii) *Route–Inventory*. Model dirancang dengan mempertimbangkan biaya transportasi, penyimpanan, serta kapasitas kendaraan dan kapasitas hub. Optimasi dilakukan menggunakan EOQ dan LNS untuk eselon kedua, serta AMPL - CPLEX untuk eselon pertama. Hasil analisis menunjukkan bahwa skema ketiga, yaitu *Route & Inventory*, memberikan hasil paling efisien dengan biaya terendah dalam konteks sistem logistik perkotaan. Integrasi inventori dan perutean dalam skema distribusi dua eselon terbukti mampu menekan total biaya logistik sebesar 5–39% pada Skema 2 dan 20–60% pada Skema 3 dibandingkan pendekatan pengiriman langsung tanpa penyimpanan (Skema 1). Penelitian selanjutnya disarankan menguji model pada kasus nyata dengan mempertimbangkan dinamika permintaan yang fluktuatif serta mengintegrasikan analisis dampak lingkungan untuk menciptakan sistem logistik yang efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aastrup, J., Gammelgaard, B., & Prockl, G. (2012, June 7). 3PL Services in City Logistics—A Users Perspective. *24th Annual Nordic Logistics Research Network Conference, Naantali*.
- Anderluh, A., Hemmelmayr, V. C., & Nolz, P. C. (2017). Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Central European Journal of Operations Research*, 25(2), 345–376. <https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z>
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 41(3), 382–391. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0188>
- Arnold, F., Cardenas, I., Sörensen, K., & Dewulf, W. (2018). Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0272-6>

- Browne, M., Sweet, M., Woodburn, D. A., & Allen, J. (2005). *Urban Freight Consolidation Centres Final Report*. Transport Studies Group, University of Westminster.
- Crainic, T. G., Gendreau, M., & Jemai, L. (2020). Planning hyperconnected, urban logistics systems. *Transportation Research Procedia*, 47, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.070>
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, 43(4), 432–454. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Cuda, R., Guastaroba, G., & Speranza, M. G. (2015). A survey on two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 55, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>
- Farias, K., Hadj-Hamou, K., & Yugma, C. (2021). Model and exact solution for a two-echelon inventory routing problem. *International Journal of Production Research*, 59(10), 3109–3132. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746428>
- Faure, L., Burlat, P., & Marquès, G. (2016). Evaluate the Viability of Urban Consolidation Centre with Regards to Urban Morphology. *Transportation Research Procedia*, 12, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.071>
- Gonzalez-Feliu, J. (2011). Costs and benefits of logistics pooling for urban freight distribution: Scenario simulation and assessment for strategic decision support. *Seminario CREI, Nov 2011, Rome, Italy*.
- Grangier, P., Gendreau, M., Lehuédé, F., & Rousseau, L.-M. (2016). An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.040>
- Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J.-F., & Crainic, T. G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems arising in city logistics. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3215–3228. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.007>
- Iswari, T., Caris, A., & Braekers, K. (2023). Analyzing the benefits of a city hub: An inventory and routing perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109629. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109629>
- Iwan, S., Kijewska, K., & Lemke, J. (2016). Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland. *Transportation Research Procedia*, 12, 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018>
- Janjevic, M., & Ndiaye, A. (2017). Investigating the financial viability of urban consolidation centre projects. *Research in Transportation Business & Management*, 24, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.05.001>
- Johansson, H., & Björklund, M. (2017). Urban consolidation centres: Retail stores' demands for UCC services. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(7), 646–662. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2017-0114>
- Kunze, O. (2016). Replicators, Ground Drones and Crowd Logistics A Vision of Urban Logistics in the Year 2030. *Transportation Research Procedia*, 19, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.088>
- Lachapelle, U., Burke, M., Brotherton, A., & Leung, A. (2018). Parcel locker systems in a car dominant city: Location, characterisation and potential impacts on city planning and consumer travel access. *Journal of Transport Geography*, 71, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.06.022>

- Lagorio, A., Pinto, R., & Golini, R. (2016). Research in urban logistics: A systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 46(10), 908–931. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2016-0008>
- Li, H., Liu, Y., Chen, K., & Lin, Q. (2020). The two-echelon city logistics system with on-street satellites. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.024>
- Li, H., Liu, Y., Jian, X., & Lu, Y. (2018). The two-echelon distribution system considering the real-time transshipment capacity varying. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.015>
- Li, H., Zhang, L., Lv, T., & Chang, X. (2016). The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 169–188. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.012>
- Mohamed, I. B., Klibi, W., Labarthe, O., Deschamps, J.-C., & Babai, M. Z. (2017). Modelling and solution approaches for the interconnected city logistics. *International Journal of Production Research*, 55(9), 2664–2684. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1267412>
- Neghabadi, P. D., Samuel, K. E., & Espinouse, M.-L. (2019). Systematic literature review on city logistics: Overview, classification and analysis. *International Journal of Production Research*, 57(3), 865–887. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1489153>
- Pisinger, D., & Ropke, S. (2010). Large neighborhood search. *Handbook of Metaheuristics*, 399–420.
- Schwerdfeger, S., & Boysen, N. (2020). Optimizing the changing locations of mobile parcel lockers in last-mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 285(3), 1077–1094. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.033>
- Shaw, P. (1998). Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. In M. Maher & J.-F. Puget (Eds.), *Principles and Practice of Constraint Programming—CP98* (pp. 417–431). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-49481-2_30
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., & van Duin, R. (2001). *CITY LOGISTICS. NETWORK MODELLING AND INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS*. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=673352>
- The World Bank. (2023). *The Logistics Performance Index and Its Indicators*. https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report_with_layout.pdf
- Vakulenko, Y., Hellström, D., & Hjort, K. (2018). What's in the parcel locker? Exploring customer value in e-commerce last mile delivery. *Journal of Business Research*, 88, 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.11.033>
- van Duin, J. H. R., Quak, H., & Muñozuri, J. (2010). New challenges for urban consolidation centres: A case study in The Hague. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6177–6188. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.029>
- Yuen, K. F., Wang, X., Ng, L. T. W., & Wong, Y. D. (2018). An investigation of customers' intention to use self-collection services for last-mile delivery. *Transport Policy*, 66, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.03.001>