

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Model Transportasi

Model transportasi telah berkembang sejak pertengahan abad ke-20 dan berakar pada penelitian awal oleh Hitchcock (1941) yang pertama kali merumuskan dasar matematis persoalan transportasi sebagai masalah minimisasi biaya distribusi, kemudian dikembangkan oleh Koopmans (1947) melalui konsep alokasi optimal sumber daya yang menjadi fondasi teori transportasi modern. Model transportasi menjadi penting karena proses penyelesaiannya lebih sederhana dan lebih cepat dibanding metode optimasi umum seperti Simpleks standar. Puncaknya terjadi pada tahun 1951, ketika Dantzig memperkenalkan metode Simpleks sebagai teknik sistematis untuk menyelesaikan optimasi linear, sehingga model transportasi menjadi salah satu aplikasi klasik dalam *Linear Programming (LP)* yang bertujuan menentukan distribusi barang paling efisien dari beberapa sumber (*supply*) menuju beberapa tujuan (*demand*) dengan biaya minimum. Dalam formulasi matematisnya, variabel keputusan  $X_{ij}$  menyatakan jumlah barang yang dikirim dari sumber  $i$  ke tujuan  $j$ , sedangkan  $C_{ij}$  menyatakan biaya pengiriman per unit barang dari sumber  $i$  ke tujuan  $j$ . Nilai  $a_i$  menunjukkan kapasitas atau jumlah maksimum barang yang tersedia pada sumber  $i$  (*supply*), sementara  $b_j$  menunjukkan jumlah kebutuhan barang pada tujuan  $j$  (*demand*). Tujuan model adalah meminimumkan total biaya distribusi yang dinotasikan dengan  $Z$ , yaitu jumlah dari seluruh hasil perkalian antara biaya pengiriman dan jumlah barang yang dikirim, sehingga fungsi objektifnya dinyatakan sebagai:

Minimalkan:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

dengan kendala:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = X_{i1} + X_{i2} + X_{i3} + \cdots + X_{in} = a_i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = X_{1j} + X_{2j} + X_{3j} + \dots + X_{mj} = b_j \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

Struktur matematis ini secara langsung menentukan apakah suatu masalah transportasi berada dalam kondisi *balanced* atau *unbalanced*, di mana model disebut *balanced* apabila  $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$ , sehingga tidak perlu penambahan baris atau kolom *dummy*. Sedangkan model dikatakan *unbalanced* apabila  $\sum_{i=1}^m a_i \neq \sum_{j=1}^n b_j$ , sehingga harus diseimbangkan dengan menambahkan *dummy supply* atau *dummy demand* yang umumnya diberi biaya 0 karena tidak mewakili rute nyata. Menurut Ekanayake dan Nilumida (2023), kondisi *unbalanced* sering muncul dalam distribusi nyata karena jumlah permintaan dan jumlah barang yang tersedia tidak selalu tetap. Kadang permintaan pelanggan tiba-tiba naik atau turun (fluktuasi permintaan), dan kadang jumlah barang yang diproduksi atau dikirim dari gudang juga berubah-ubah setiap periode. Karena itu, masalah distribusi di dunia nyata sering tidak seimbang, sehingga perlu penanganan khusus agar semua perhitungan tetap bisa dilakukan. Penelitian klasik oleh Mhlanga et al. (2014) dan Ekanayake dan Ekanayake (2022) menegaskan bahwa keseimbangan *supply-demand* diperlukan agar model dapat dioptimalkan dengan benar. Dalam konteks distribusi nyata, penelitian modern Ekanayake dan Nilumida (2023) menunjukkan bahwa kondisi *unbalanced* sering terjadi akibat fluktuasi permintaan, perubahan produksi, atau ketidakpastian pasokan, sehingga penyeimbangan model menjadi langkah penting. Berbagai penelitian lain, seperti Afiani et al. (2020), Ekanayake dan Ekanayake (2022), Ardini dan Lutfiyah (2018), dan Pratihari et al. (2021) menyoroti bahwa performa metode solusi awal dapat berbeda antara kasus *balanced* dan *unbalanced* karena perbedaan pola penalti dan variasi rute biaya. Seiring perkembangan teknik optimasi, metode solusi awal seperti *North West Corner (NWC)*, *Least Cost Method (LCM)*, dan *VAM* mulai digunakan sejak tahun 1970-an untuk menghasilkan alokasi awal yang lebih efisien sebelum diuji optimalitasnya menggunakan *Stepping Stone*. Pada perkembangan modern, penelitian bergerak ke arah metode yang lebih adaptif, termasuk *MVAM* hasil

modifikasi Soomro et al. (2015) serta Hussein dan Shiker (2020) yang memperbaiki mekanisme penalti dan stabilitas alokasi, khususnya pada kasus *unbalanced* atau tabel berukuran besar. Dengan demikian, model transportasi tidak hanya memberikan dasar matematis dalam menentukan distribusi optimal, tetapi juga menjadi landasan bagi berbagai metode solusi awal dan teknik evaluasi keoptimalan yang digunakan dalam analisis logistik dan riset operasional masa kini.

## **2.2 Metode Solusi Awal Model Transportasi**

Sebelum dilakukan uji optimalitas seperti *Stepping Stone*, model transportasi memerlukan solusi awal yang dapat digunakan sebagai dasar perhitungan. Beberapa metode klasik yang sering diterapkan untuk memperoleh solusi awal tersebut antara lain:

### **1.2.1 North West Corner Method (NWCN)**

*NWCN* merupakan metode untuk memperoleh solusi awal pada masalah transportasi dengan memulai alokasi dari sel yang berada di pojok kiri atas tabel transportasi. Pada setiap langkah, jumlah yang dialokasikan ditentukan berdasarkan nilai minimum antara *supply* yang tersedia dan *demand* yang belum terpenuhi. Selanjutnya, proses alokasi dilanjutkan ke sel berikutnya secara horizontal atau vertikal hingga seluruh *supply* dan *demand* terpenuhi (Ardini & Lutfiyannah, 2018; Reja et al., 2018). Metode ini banyak digunakan karena prosedurnya sederhana dan tidak memerlukan perhitungan penalti dalam proses penentuan alokasi. Namun, *NWCN* tidak mempertimbangkan biaya transportasi pada tahap pembentukan solusi awal sehingga solusi yang diperoleh belum tentu menghasilkan biaya minimum. Oleh karena itu, solusi awal yang dihasilkan umumnya masih memerlukan pengujian dan perbaikan menggunakan metode optimasi, seperti *Stepping Stone*, untuk memperoleh solusi optimal (Dwiyanti et al., 2024; Siahaan et al., 2025).

### **1.2.2 Least Cost Method (LCN)**

*LCN* merupakan metode untuk memperoleh solusi awal pada masalah transportasi dengan mengalokasikan terlebih dahulu pada sel yang memiliki biaya transportasi paling rendah. Pada setiap tahap, alokasi dilakukan sebesar mungkin berdasarkan nilai *minimum* antara *supply* yang tersedia dan *demand* yang belum

terpenuhi, kemudian proses dilanjutkan pada sel dengan biaya terendah berikutnya hingga seluruh kebutuhan terpenuhi (Mas'ula et al., 2025). Metode ini dianggap lebih efektif dibandingkan metode konvensional seperti *North West Corner Method* karena mempertimbangkan biaya transportasi dalam penentuan alokasi awal. Darmo et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan *LCM* mampu menghasilkan biaya distribusi yang lebih rendah serta pola alokasi yang lebih efisien. Meskipun demikian, solusi yang diperoleh melalui *LCM* belum tentu merupakan solusi optimal sehingga masih diperlukan pengujian optimalitas menggunakan metode lanjutan, seperti *Stepping Stone* atau *Modified Distribution Method (MODI)*.

### 1.2.3 Vogel's Approximation Method (VAM)

*Vogel's Approximation Method (VAM)* diperkenalkan oleh H.O. Vogel pada awal 1970 – an sebagai metode untuk memperoleh solusi awal yang efisien pada masalah transportasi. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan nilai penalti yang dihitung dari perbedaan antara biaya transportasi terendah dan biaya transportasi kedua terendah pada setiap baris dan kolom dalam tabel biaya. Nilai penalti ini digunakan untuk menentukan prioritas rute yang memberikan penghematan biaya terbesar, sehingga proses alokasi *supply - demand* dapat dilakukan secara lebih optimal dan efisien.

Tabel 2.1 Permasalahan transportasi

| Dari<br>Ke |          | Sumber               |          |                      | Demand                   |
|------------|----------|----------------------|----------|----------------------|--------------------------|
|            |          | 1                    | $\vdots$ | N                    |                          |
| Tujuan     | 1        | $C_{11}$<br>$X_{11}$ | $\vdots$ | $C_{1N}$<br>$X_{1N}$ | $a_1$                    |
|            | $\vdots$ | $\vdots$             | $\vdots$ | $\vdots$             | $\vdots$                 |
|            | M        | $C_{M1}$             | $\vdots$ | $C_{MN}$             | $a_M$                    |
|            | Supply   | $b_1$                | ...      | $b_N$                | $\Sigma a$<br>$\Sigma b$ |

Dalam permasalahan transportasi, tujuan utamanya adalah meminimalkan total biaya transportasi ( $Z$ ). Biaya per unit pengiriman dari sumber  $i$  ke tujuan  $j$  dilambangkan dengan  $C_{ij}$ , sedangkan jumlah unit yang dikirim dari sumber  $i$  ke tujuan  $j$  dilambangkan dengan  $X_{ij}$ , yang merupakan variabel yang ingin dicari. Jumlah pasokan di setiap sumber  $i$  disebut  $a_i$ , dan jumlah permintaan di setiap tujuan  $j$  disebut  $b_j$ . Model transportasi dikatakan seimbang jika total pasokan sama dengan total permintaan, yaitu  $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$ , sehingga seluruh kebutuhan dapat terpenuhi tanpa kelebihan atau kekurangan.

Untuk memperoleh solusi awal yang efisien, digunakan *VAM*. Langkah dasar *VAM* dimulai dengan menghitung penalti pada tiap baris dan kolom, yaitu selisih antara biaya terkecil kedua dan biaya terkecil pertama pada baris atau kolom tersebut. Selanjutnya, dipilih baris atau kolom dengan penalti terbesar, lalu dilakukan alokasi pada sel dengan biaya terkecil di baris atau kolom tersebut. Setelah alokasi dilakukan, nilai *supply* dan *demand* dikurangi sesuai kuantitas yang dialokasikan, dan baris atau kolom yang sudah terpenuhi dicoret dari tabel. Proses ini diulang hingga seluruh *supply* dan *demand* terpenuhi, sehingga diperoleh solusi awal yang mendekati biaya minimum secara efisien. Menurut Batuwael et al (2019), metode *VAM* bekerja dengan menghitung selisih (penalti) antara dua biaya terendah pada setiap baris dan kolom untuk menentukan alokasi yang paling efisien, sedangkan Afiani et al. (2020) menambahkan bahwa metode *VAM* sangat stabil tetapi terkadang kurang optimal pada struktur biaya ekstrem.

Dari semua metode tersebut, *VAM* menjadi yang paling banyak digunakan karena menghasilkan biaya awal paling efisien dibanding *NWCM* dan *LCM* Afiani et al. (2020). Sebagai gambaran umum, perbandingan dari berbagai metode tersebut dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Perbandingan *NWCM*, *LCM*, dan *VAM*

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>North West Corner Method (NWCM)</i>    | Karakteristik: Tidak memerlukan perhitungan penalty, cocok untuk pengenalan awal model transportasi, solusi awal sering tidak efisien. Perlu diuji ulang dengan metode optimalitas.                                                                                                                           |
|                                           | Kelebihan: Langkah sangat sederhana dan cepat dan tidak mempertimbangkan biaya.                                                                                                                                                                                                                               |
|                                           | Kekurangan: Terletak pada strategi alokasi yang tidak mempertimbangkan biaya. dan <i>NWCM</i> hanya memulai dari pojok kiri atas dan bergerak sesuai sisa <i>supply/demand</i> tanpa melihat matriks biaya. Karena itu, metode ini sering menghasilkan solusi awal yang jauh dari optimal.                    |
| <i>Least Cost Method (LCM)</i>            | Karakteristik: Hasil lebih efisien dibanding <i>NWCM</i> dan tidak selalu mendekati solusi optimal.                                                                                                                                                                                                           |
|                                           | Kelebihan: Menggunakan biaya terendah sebagai dasar alokasi dan hanya melihat biaya per sel tanpa mempertimbangkan pola keseluruhan.                                                                                                                                                                          |
|                                           | Kekurangan: Terletak pada <i>pendekatan lokal (local optimum)</i> yang hanya memilih biaya termurah per sel secara langsung dan <i>LCM</i> tidak memperhitungkan hubungan antarbaris atau antarkolom sehingga alokasi biaya rendah pada tahap awal bisa menyebabkan biaya lebih tinggi di langkah berikutnya. |
| <i>Vogel's Approximation Method (VAM)</i> | Karakteristik: Solusi awal paling efisien dibanding <i>NWCM</i> dan <i>LCM</i> , banyak digunakan karena akurasi tinggi (Afiani et al., 2020) dan masih merupakan solusi awal sehingga tetap perlu diuji optimalitas.                                                                                         |
|                                           | Kelebihan: Memperhitungkan selisih dua biaya terendah (Batuwael et al., 2019; Mas'ula et al., 2025) dan perhitungan lebih panjang dibanding <i>NWCM</i> dan <i>LCM</i> .                                                                                                                                      |
|                                           | Kekurangan: Terletak pada kompleksitas perhitungan penalti, yang lebih panjang dan memerlukan lebih banyak langkah dibanding <i>NWCM</i> dan <i>LCM</i> dan walaupun hasilnya lebih efisien, prosesnya lebih rumit sehingga memerlukan waktu dan ketelitian lebih besar.                                      |

### 2.3 Modified Vogel's Approximation Method (MVAM)

*Modified Vogel's Approximation Method (MVAM)* dikembangkan sebagai penyempurnaan dari metode *VAM* dengan tujuan meningkatkan keakuratan solusi awal dan memperbaiki kelemahan dalam penentuan penalti. *MVAM* mulai banyak dibahas dalam literatur sejak tahun 2020-an, di mana berbagai penelitian mencoba memodifikasi cara perhitungan penalti agar lebih dinamis dan sensitif terhadap pola biaya. Salah satu penelitian Pratihari et al. (2021) bahkan memperluas algoritma *MVAM* untuk kondisi *fuzzy* dan *type-2 fuzzy*, sehingga mampu menangani ketidakpastian permintaan dan biaya transportasi. Dalam penerapannya, *MVAM* menurut Soomro et al. (2015) dimulai dengan menghitung penalti dinamis untuk

setiap baris dan kolom, di mana penalti baris diperoleh dari selisih antara biaya terbesar pertama dan kedua, sedangkan penalti kolom dihitung dari selisih biaya terkecil kedua dan pertama. Pendekatan ini dirancang untuk menyoroti baris yang memiliki variasi biaya tinggi serta kolom yang cenderung sensitif terhadap perubahan biaya kecil, sehingga dapat meminimalkan risiko alokasi pada rute yang justru menyebabkan biaya besar pada tahap berikutnya. Jika terdapat penalti terbesar yang sama, proses *tie-break* dilakukan menggunakan pembobot tertentu, misalnya berdasarkan kapasitas *supply* atau *demand*. Setelah baris atau kolom prioritas dipilih, sel dengan biaya dominan dialokasikan terlebih dahulu, kemudian nilai *supply* dan *demand* diperbarui hingga baris atau kolom tersebut habis dan dicoret dari tabel.

Solusi awal yang diperoleh melalui langkah-langkah tersebut dapat dievaluasi kembali menggunakan metode optimasi seperti *Stepping Stone* untuk mengetahui apakah masih terdapat alokasi yang dapat memperbaiki total biaya. Modifikasi berbeda diperkenalkan oleh Hussein dan Shiker (2020), yang menggunakan pendekatan penalti yang berlawanan dari Soomro et al. (2015). Dalam versi ini, penalti baris diperoleh dari selisih biaya terkecil kedua dan pertama, sedangkan penalti kolom dihitung dari selisih biaya terbesar pertama dan kedua. Perubahan ini mengalihkan sensitivitas penalti dari baris ke kolom, sehingga lebih menekankan stabilitas alokasi pada kolom yang memiliki variasi biaya tinggi, dan pada saat yang sama mengejar peluang biaya rendah pada baris. Dengan demikian, perbedaan utama kedua modifikasi *MVAM* tersebut terletak pada arah fokus penalti yang digunakan: Soomro et al. (2015) menekankan pengendalian variasi biaya tertinggi pada baris, sedangkan Hussein dan Shiker (2020) menekankan pengendalian variasi biaya tertinggi pada kolom. Kedua pendekatan ini menghasilkan pola alokasi yang berbeda serta dapat menunjukkan stabilitas dan efektivitas yang bervariasi, terutama pada tabel besar atau kondisi *unbalanced* dalam permasalahan transportasi.

## 2.4 Uji Keoptimalan Solusi Transportasi

### 2.4.1 Metode *Stepping Stone*

Metode *Stepping Stone* (metode batu loncatan) merupakan salah satu metode untuk menguji dan memperoleh solusi optimal pada masalah transportasi. Metode ini bekerja dengan mengevaluasi setiap sel kosong dalam tabel transportasi melalui pembentukan jalur tertutup yang memungkinkan dilakukan perbaikan alokasi. Disebut metode batu loncatan karena proses evaluasinya dilakukan dengan berpindah secara sistematis antar sel dalam matriks transportasi melalui jalur horizontal dan vertikal. Prosedur penggunaan Metode *Stepping Stone* adalah sebagai berikut:

- a) Mengisi tabel transportasi awal dengan solusi dasar layak yang telah diperoleh dari metode awal (misalnya *VAM* atau metode lainnya).
- b) Memastikan bahwa jumlah sel yang terisi memenuhi syarat solusi dasar layak, yaitu sebanyak  $(m + n - 1)$ , dengan  $m$  menyatakan jumlah sumber dan  $n$  menyatakan jumlah tujuan. Jika jumlah sel terisi kurang dari  $(m + n - 1)$ , maka terjadi degenerasi; sedangkan jika melebihi, terjadi redundansi.
- c) Memilih salah satu sel kosong (tidak teralokasi) untuk dievaluasi.
- d) Membentuk jalur tertutup yang dimulai dari sel kosong tersebut dan kembali ke sel awal melalui sel-sel yang telah teralokasi. Jalur hanya boleh dibentuk melalui pergerakan horizontal dan vertikal.
- e) Memberikan tanda plus (+) pada sel kosong yang dievaluasi, kemudian secara bergantian memberikan tanda minus (−) dan plus (+) pada setiap sel sepanjang jalur tertutup tersebut.
- f) Menghitung indeks perbaikan (*improvement index*) dengan menjumlahkan biaya pada sel bertanda plus (+) dan mengurangi biaya pada sel bertanda minus (−).
- g) Mengulangi langkah (c) sampai (f) untuk seluruh sel kosong. Apabila seluruh indeks perbaikan bernilai lebih besar atau sama dengan nol (untuk kasus minimisasi), maka solusi telah optimal. Jika terdapat indeks bernilai negatif,

maka solusi masih dapat diperbaiki dengan melakukan penyesuaian alokasi pada jalur yang bersangkutan.

Dengan prosedur tersebut, Metode *Stepping Stone* memungkinkan evaluasi sistematis terhadap kemungkinan perbaikan solusi sehingga diperoleh alokasi distribusi yang optimal sesuai dengan fungsi objektif yang ditetapkan.

## **2.5 Google Colaboratory (Google Colab)**

*Google Colaboratory* (*Google Colab*) merupakan layanan berbasis *cloud* dari *Google* yang menyediakan lingkungan kerja seperti *Jupyter Notebook* untuk menjalankan program *Python* tanpa instalasi, dilengkapi dengan *library* siap pakai, dukungan *Graphics Processing Unit (GPU)*/ *Tensor Processing Unit (TPU)* gratis, penyimpanan terintegrasi dengan *Google Drive*, serta fitur kolaborasi yang mendukung kegiatan pembelajaran dan penelitian. Dimana *GPU* ialah unit pemroses grafis yang digunakan untuk mempercepat komputasi, terutama pada perhitungan paralel seperti *machine learning*, *deep learning*, dan komputasi numerik dan *TPU* ialah unit pemroses khusus yang dikembangkan oleh *Google* untuk mempercepat pemrosesan model kecerdasan buatan, khususnya berbasis *TensorFlow*. Keandalan *Google Collab* sebagai media komputasi telah banyak dibahas dalam jurnal ilmiah, di antaranya (Arifin, Azim, Hartati, Widyawati, & Arifin, 2025) yang menjelaskan konsep dan penggunaannya, (Carneiro, et al., 2018) yang menganalisis performanya untuk *deep learning* (Anjani, Vitriani, & Hastuti, 2024), serta (Carneiro, et al., 2018) yang menekankan manfaatnya dalam pembelajaran *Python*. Dalam penelitian ini, *Google Colab* digunakan sebagai media simulasi penerapan metode *VAM*, *MVAM*, dan *Stepping Stone*, di mana data biaya, *supply*, dan *demand* dimodelkan menggunakan *Python* untuk memperoleh solusi awal melalui *VAM* dan *MVAM*, kemudian diuji dan disempurnakan menggunakan metode *Stepping Stone* hingga diperoleh biaya distribusi yang optimal, sehingga memudahkan perhitungan, visualisasi alokasi, dan perbandingan kinerja metode secara sistematis dan efisien.

## **2.6 Penelitian Terdahulu**

Perkembangan penelitian mengenai model transportasi menunjukkan evolusi metodologis yang panjang dan sistematis. Pada periode 1950–1990, landasan

teoretis model transportasi diletakkan oleh Hitchcock (1941) dan Koopmans (1947) yang pertama kali merumuskan persoalan distribusi sebagai model matematis berbentuk linear. Selanjutnya, model tersebut berkembang melalui penerapan metode simpleks yang diperkenalkan oleh Dantzig (1951) melalui pengembangan metode *Simpleks*. Pada masa tersebut, fokus penelitian masih berkisar pada formulasi variabel keputusan  $x_{ij}$ , kendala *supply-demand*, serta pengembangan metode solusi awal seperti *NWCM* dan *LCM*, hingga akhirnya *VAM* diperkenalkan pada tahun 1970-an sebagai heuristik yang mampu menghasilkan solusi awal lebih baik dibanding metode sebelumnya. Temuan-temuan awal ini menjadi fondasi kuat bagi penelitian modern di bidang model transportasi.

Pada periode 2020-an, perkembangan penelitian semakin pesat dengan munculnya berbagai varian *MVAM*, baik dalam bentuk deterministik maupun *fuzzy*. Modifikasi ini umumnya berfokus pada tiga aspek utama, yaitu: (1) perubahan formula penalti yang dapat menggunakan selisih biaya terkecil, terbesar, ataupun kombinasi keduanya; (2) pengembangan aturan *tie-break* berbasis *supply-demand* atau bobot biaya; serta (3) penanganan masalah *unbalanced* melalui restrukturisasi tabel dan penggunaan *dummy* yang lebih adaptif. Salah satu perkembangan penting ditunjukkan oleh Pratihari et al. (2021) yang memperluas *MVAM* ke dalam *fuzzy type-2* untuk menangani ketidakpastian biaya, *supply-demand*. Selain itu, beberapa penelitian aplikatif seperti Afiani et al. (2020) dan penelitian lain menunjukkan bahwa *MVAM* mampu menurunkan biaya transportasi pada kasus *balanced - unbalanced*. Penelitian perbandingan skala besar pada periode 2020–2023 juga menunjukkan bahwa *MVAM* cenderung lebih unggul pada tabel berukuran besar karena penalti adaptif yang lebih stabil. Hal ini didukung pula oleh temuan Ekanayake dan Nilumida (2023) yang membandingkan langsung *VAM* dan *MVAM* pada berbagai kondisi dan menyimpulkan bahwa *MVAM* menghasilkan solusi awal yang relatif lebih efisien.

Secara keseluruhan, evolusi tersebut menunjukkan pergeseran yang jelas dari heuristik sederhana pada periode awal, menuju heuristik adaptif berbasis penalti, hingga pengembangan pendekatan *fuzzy* modern yang mampu menangani ketidakpastian industri. Meskipun demikian, penelitian terdahulu juga menegaskan

bahwa walaupun *MVAM* banyak menghasilkan solusi awal yang lebih baik, prosedur uji optimalitas seperti *Stepping Stone* tetap diperlukan untuk memastikan tercapainya solusi dengan biaya minimum. Oleh karena itu, perkembangan metodologis selama lebih dari tujuh dekade ini menjadi dasar yang kuat bagi penelitian ini, terutama dalam menganalisis performa *VAM* dan *MVAM* pada data distribusi beras Raskin Perum Bulog Sub Divre Makassar Tahun 2016 yang dikembangkan menjadi empat skenario penelitian dengan kondisi *balanced* dan *unbalanced* serta diuji optimalitasnya menggunakan Metode *Stepping Stone*.

