

Judul Artikel: Analisis Performansi Metode Heuristik untuk Masalah Distribusi Rantai Pasokan Dua Tahap dengan Biaya Tetap

Jurnal: Performa: Media Ilmiah Teknik Industri

Penulis: Santoso, Rainisa Maini Heryanto

Volume 21 Nomor 2 Tahun 2022

1. Bukti tanggal submit artikel awal: 8 Januari 2022

The screenshot shows the journal's submission interface. At the top, there is a navigation bar with links for Home, About, Categories, Current, Archives, Announcements, Statistics, Author Guideline, and Publication Ethics. The main content area is titled "#58274 Summary" and includes a "Submission" section with the following details:

Authors	Santoso Santoso, Rainisa Maini Heryanto
Title	Analisis Performansi Metode Heuristik untuk Masalah Distribusi Rantai Pasokan Dua Tahap dengan Biaya Tetap
Original file	58274-157277-1-SM.pdf 2022-01-08
Supp. files	None
Submitter	Santoso Santoso
Date submitted	January 8, 2022 - 07:40 PM
Section	Articles
Editor	Dr. Ir. Wakhid Jauhari, ST, MT, IPM
Abstract Views	542

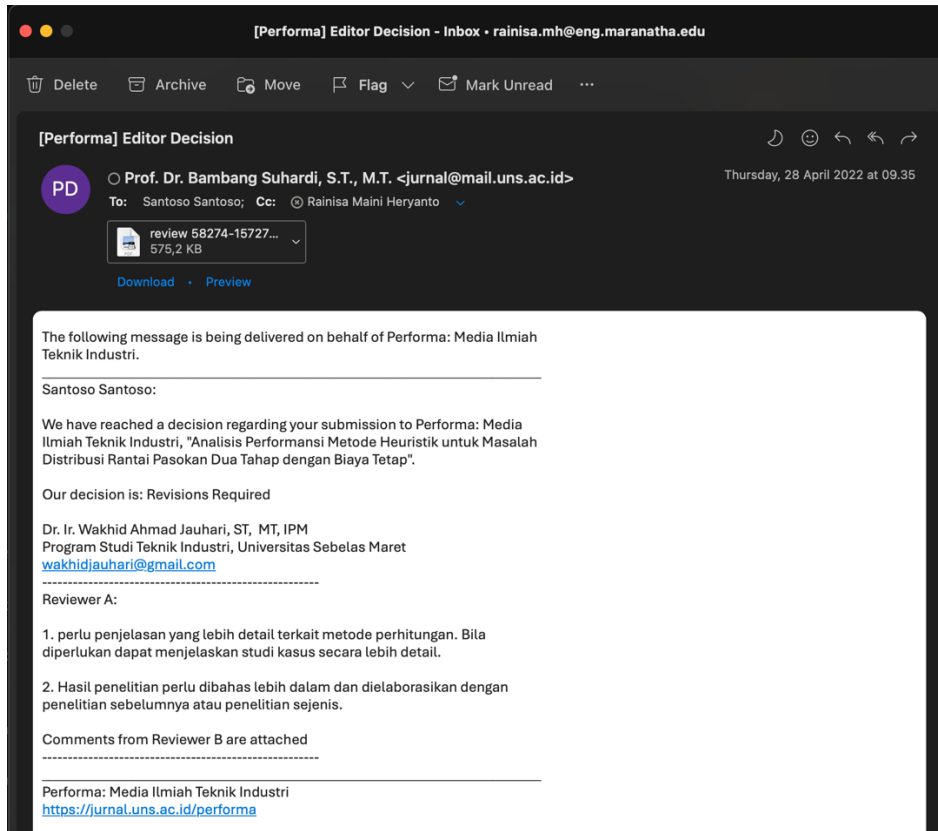
On the right side, there is a sidebar with a "User" section indicating the user is logged in as "santoso196" and links to "My Journals" and "My Profile".

2. Bukti review artikel: 28 April 2022

The screenshot shows the journal's review interface for article #58274. The main content area is titled "#58274 Review" and includes a "Peer Review" section with the following details:

Round 1	
Review Version	58274-157278-1-RV.pdf 2022-01-08
Initiated	2022-01-25
Last modified	2022-04-28
Uploaded file	Reviewer B 58274-167451-1-RV.pdf 2022-04-28

The sidebar on the right is identical to the submission page, showing the user is logged in as "santoso196" with links to "My Journals", "My Profile", and "Log Out".



3. Revisi masuk tanggal: 6 Mei 2022 dan keputusan penerimaan artikel: 12 Mei 2022

Home	About	Categories	Current	Archives	Announcements	Statistics	Author Guideline	Publication Ethics	User Home
------	-------	------------	---------	----------	---------------	------------	------------------	--------------------	-----------

## #58274 Review

[Summary](#) [Review](#) [Editing](#)

### Submission

**Authors** Santoso Santoso, Rainisa Maini Heryanto

**Title** Analisis Performansi Metode Heuristik untuk Masalah Distribusi Rantai Pasokan Dua Tahap dengan Biaya Tetap

**Section** Articles

**Editor** Dr. Ir. Wakhid Jauhari, ST, MT, IPM

### Peer Review

Round 1

**Review Version** [58274-157278-1-RV.pdf](#) 2022-01-08

**Initiated** 2022-01-25

**Last modified** 2022-04-28

**Uploaded file** Reviewer B [58274-167451-1-RV.pdf](#) 2022-04-28

### Editor Decision

**Decision** Accept Submission 2022-05-12

**Notify Editor** [Editor/Author Email Record](#) 2022-05-12

**Editor Version** [58274-168019-1-ED.docx](#) 2022-05-12

**Author Version** [58274-167786-1-ED.docx](#) 2022-05-06 [Delete](#)

**Upload Author Version**  no file selected

[template in English](#)

**Author Guidelines**

Focus and Scope

Publication Ethics

Peer Review Policy

Publisher

Editorial Team

Reviewers

Contact Us

**User**

You are logged in as... **santoso196**

[My Journals](#)

[My Profile](#)

[Log Out](#)

**Notifications**

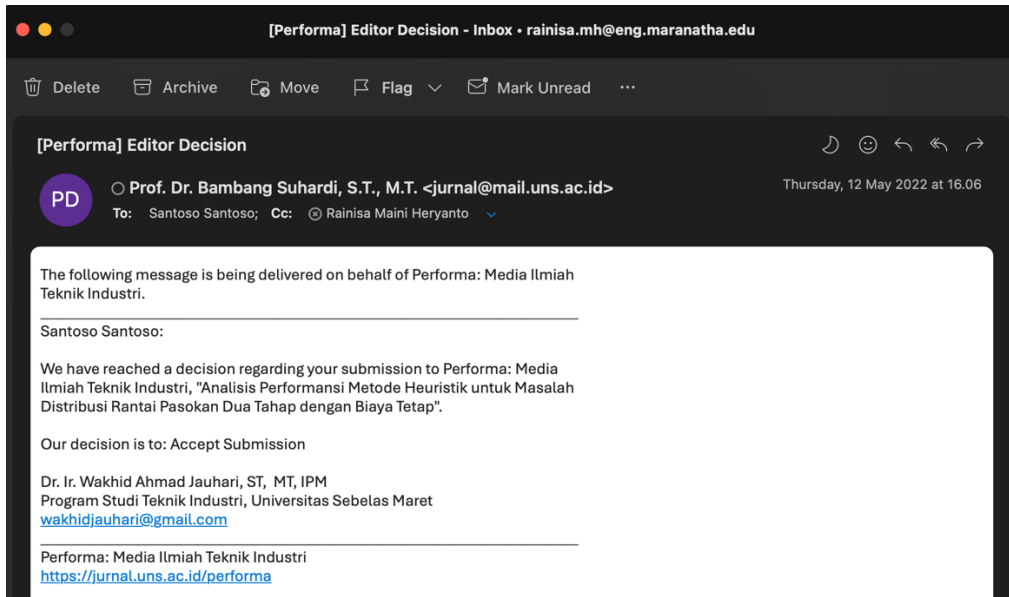
- [View \(18 new\)](#)
- [Manage](#)

**Indexing**

SINTA

Crossref

GARUDA



4. Tanggal terbit online: September 2022

# Analisis Performansi Metode Heuristik untuk Masalah Distribusi Rantai Pasokan Dua Tahap dengan Biaya Tetap

Santoso\*<sup>1</sup> dan Rainisa Maini Heryanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jl. Prof. drg. Surya Sumantri M.P.H. No. 65, Bandung, 40164, Indonesia

Email: santoso.ajiank@gmail.com<sup>1</sup>, rainisa.mh@eng.maranatha.edu<sup>2</sup>

## Abstrak

Distribusi produk di sepanjang rantai pasokan, yang secara langsung mempengaruhi biaya rantai pasokan adalah *key driver* dari profitabilitas perusahaan secara keseluruhan. Biaya distribusi bahkan menyumbang sekitar 30% dari biaya produk. Oleh karena itu, masalah distribusi merupakan pertimbangan penting untuk perusahaan industri yang memiliki jaringan rantai pasokan. Penelitian ini mempertimbangkan masalah distribusi dua tahap dari rantai pasokan yang dikaitkan dengan biaya tetap. Dua jenis biaya terlibat dalam masalah ini adalah biaya berkelanjutan yang meningkat secara linier sesuai dengan jumlah produk yang dikirim antara sumber dan tujuan serta biaya kedua adalah biaya tetap yang terjadi setiap kali jumlah yang tidak nol dikirimkan antara sumber dan tujuan. Tujuan yang ingin dicapai adalah meminimalisasi total biaya distribusi. Metode heuristik konstruktif sederhana yang didasari oleh metode aproksimasi Vogel akan dievaluasi untuk kualitas dari solusinya dengan membandingkannya dengan solusi yang dihasilkan dari metode genetika (GA) dan sebuah metode heuristik lain. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa metode heuristik tersebut memiliki solusi yang baik dan dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam praktik. Metode heuristik tersebut dapat diselesaikan dengan perhitungan yang cukup sederhana dan membutuhkan waktu yang cukup singkat.

**Kata kunci:** biaya tetap, dua tahap, masalah distribusi, metode heuristik, rantai pasokan

## Abstract

The distribution of products along the supply chain, which directly affects the cost of the supply chain, is the main driver of the overall company's profitability. Distribution costs account for about 30% of product costs. Therefore, distribution issues are an important consideration for industrial companies that have supply chain networks. This paper considers a two-stage distribution problem of supply chain associated with a fixed charge. Two kinds of cost are involved in this problem are a continuous cost that increase linearly according to the quantity of product shipped between source and destination, and second cost, fixed charge which is incurred whenever a nonzero quantity is shipped between a source and a destination. The objective to be achieved is to minimize the total distribution costs. A simple constructive heuristic method that influenced by Vogel approximation will be evaluated for a quality of the solution by comparing it with solutions generated from genetic methods (GA) and other heuristics. The comparison results show that the heuristic method has a good solution and can be considered for use in practice. That heuristic method can be solved with simple calculations and requires a short time.

**Keywords:** distribution problem, fixed charge, heuristic method, supply chain, two-stage.

## 1. Pendahuluan

Rantai pasokan adalah jaringan perusahaan yang memproduksi, menjual, dan mengirimkan produk atau layanan ke segmen pasar yang telah ditentukan. Hal ini tidak hanya mencakup produsen dan pemasok, tetapi juga *transporter*, gudang, pengecer, dan konsumen itu sendiri. Istilah rantai pasokan memunculkan gambaran produk atau *supply* yang bergerak dari pemasok ke produsen kemudian distributor ke pengecer dan kemudian konsumen di sepanjang rantai.

Distribusi produk di sepanjang rantai pasokan, yang secara langsung mempengaruhi biaya rantai pasokan, adalah *key driver* dari profitabilitas perusahaan secara keseluruhan. Biaya distribusi bahkan menyumbang

sekitar 30% dari biaya produk dan memainkan peran penting dalam penentuan harganya. Oleh karena itu, masalah distribusi merupakan pertimbangan penting untuk perusahaan industri yang memiliki jaringan rantai pasokan. Dalam masalah tersebut, salah satu keputusan strategis adalah alokasi kuantitas transaksi dari pusat produksi ke titik terminal dengan biaya yang efektif.

Seringkali, biaya transportasi per unit digunakan untuk mencari jadwal distribusi yang optimal. Asumsi dasar dalam setiap masalah transportasi adalah bahwa biaya transportasi berbanding lurus dengan kuantitas yang dikirimkan (Diaby, 1991). Pendekatan itu murni mempertimbangkan biaya total distribusi sebagai kuantitas yang tergantung dan sebanding dengan jumlah

\* Penulis korespondensi

yang diangkut antara sumber dan tujuan. Namun, asumsi ini tidak dapat dibenarkan dalam situasi dunia nyata. Banyak masalah transportasi dan distribusi praktis dapat dimodelkan sebagai masalah transportasi biaya tetap (Sun et al., 1998). Biaya tetap dapat mewakili biaya sewa kendaraan, biaya tol di jalan raya, biaya pendaratan di bandara, biaya *setup* untuk mesin di lingkungan manufaktur, waktu untuk menemukan *file* dalam sistem basis data terdistribusi, dll. Dengan adanya biaya satu kali seperti itu, masalah transportasi disebut masalah biaya tetap.

Masalah transportasi biaya tetap adalah pengembangan dari masalah transportasi klasik di mana biaya tetap dikeluarkan untuk setiap titik *supply* yang digunakan dalam solusi (Schaffer & O’Leary, 1989). Dua jenis biaya yang dipertimbangkan dalam masalah transportasi biaya tetap adalah (i) biaya yang terus meningkat secara linier dengan kuantitas produk yang dikirim antara sumber dan tujuan, dan (ii) biaya tetap, yang dikeluarkan setiap kali kuantitas produk yang tidak nol dikirimkan antara sumber dan tujuan.

Walaupun masalah biaya tetap dipertimbangkan secara luas namun kebanyakan adalah masalah satu tahap (Ekşioğlu & Jin, 2006; Yang & Liu, 2007; Adlakha et al., 2007). Masalah distribusi multi-tahap adalah masalah standar bagi perusahaan industri dengan jaringan rantai pasokan. Mengingat pertimbangan di atas, penelitian ini berkonsentrasi pada masalah distribusi rantai pasokan tiga eselon yang melibatkan dua tahap distribusi dan biaya tetap. Masalah ini disebut juga *2-stage fixed charge transportation problem* (2FCTP).

Balaji & Jawahar (2010) mengembangkan algoritma berbasis *simulated annealing* (SA) untuk 2FCTP. Antony Arokia Durai Raj & Rajendran (2012) mengusulkan algoritma genetika (GA) untuk menyelesaikan 2FCTP dalam dua skenario. Skenario pertama adalah biaya tetap yang terkait dengan rute dan kapasitas distributor tidak terbatas dan skenario kedua adalah biaya tetap yang terkait dengan pembukaan *distribution center* (DC) dengan kapasitas terbatas. Panicker et al. (2013) mengembangkan heuristik berbasis *ant colony optimization* (ACO) untuk memecahkan 2FCTP.

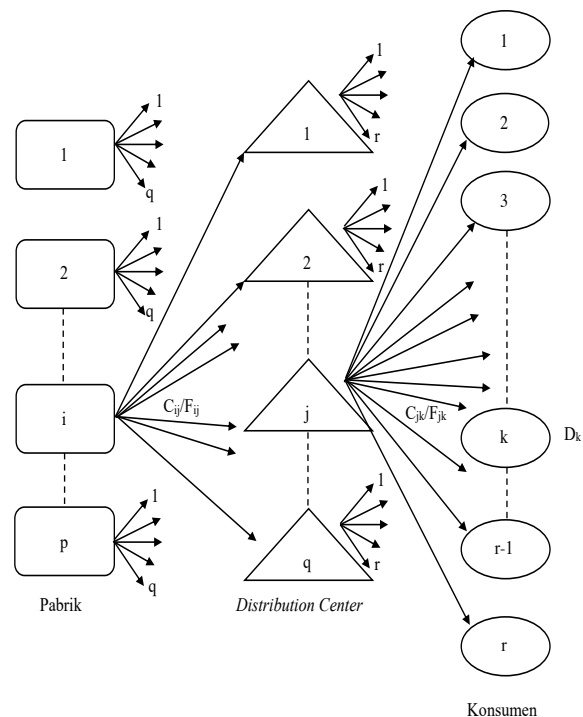
Sebuah model *integer programming* dengan pendekatan ACO dengan *solver* LINGO dikembangkan untuk memecahkan masalah 2FCTP (Hong et al., 2018). Permasalahan 2FCTP yang diselesaikan dengan sebuah *matheuristic* yang menggunakan algoritma *evolutionary* dan mengeksplorasi properti untuk memandu algoritma menuju solusi yang lebih baik (Calvete et al., 2018).

Permasalahan transportasi dua tahap dengan biaya tetap untuk membuka pusat distribusi, yang merupakan pengembangan dari masalah transportasi klasik. Sebuah metode heuristik konstruktif yang efisien diusulkan pada penelitian ini (Cosma et al., 2019). Masalah 2FCTP

didekati dengan metode heuristik yang disebut algoritma paralel dan mencoba menyelesaikan permasalahan pada *real-world* dengan efisien (Cosma, Pop, & Danciulescu, 2020).

Pendekatan genetika hibrida yang efisien digunakan untuk memecahkan masalah desain jaringan rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap. Rantai pasokan dua tahap yang dipertimbangkan meliputi produsen, *distribution center*, dan konsumen, dengan biaya utamanya adalah selain biaya transportasi variabel, juga menggunakan biaya tetap untuk pembukaan *distribution center* (Cosma, Pop, & Sabo, 2020).

Model matematika 2FCTP yang dikembangkan oleh Jawahar & Balaji (2009) adalah masalah distribusi rantai pasokan dimana terdapat sejumlah  $p$  pabrik,  $q$  *distribution center*, dan  $r$  konsumen. Setiap pabrik  $i$  dapat mengirimkan produk ke salah satu dari *distribution center*  $j$  dengan biaya transportasi  $C_{ij}$  (biaya pengiriman per unit dari pabrik  $i$  ke *distribution center*  $j$ ) ditambah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{ij}$ , diasumsikan untuk mengoperasikan rute tersebut. Setiap *distribution center*  $j$  dapat mengirimkan produk ke salah satu dari konsumen  $k$  dengan biaya transportasi  $C_{jk}$  (biaya pengiriman per unit dari *distribution center*  $j$  ke konsumen  $k$ ) ditambah biaya tetap  $F_{jk}$ , diasumsikan untuk mengoperasikan rute. Setiap pabrik  $i = 1, 2, \dots, p$  memiliki *supply* atau kapasitas  $S_i$  unit dan setiap konsumen  $k = 1, 2, \dots, r$  memiliki permintaan  $D_k$  unit. Setiap *distribution center*  $j = 1, \dots, q$  memiliki kapasitas penyimpanan  $SC_j$  unit. Gambar 1 menunjukkan representasi dari masalah distribusi rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap.



Sumber: Jawahar & Balaji (2009)

Gambar 1. Distribusi Rantai Pasok Dua Tahap

Fungsi tujuan (1) adalah untuk menentukan rute-rute yang akan dibuka dan besarnya pengiriman pada rute-rute tersebut, sehingga total biaya distribusi dapat diminimalkan.

Variabel keputusan:

- $X_{ij}$  = unit yang dikirimkan dari pabrik  $i$  ke *distribution center*  $j$
- $X_{jk}$  = unit yang dikirimkan dari *distribution center*  $j$  ke konsumen  $k$ ,  $Y_{ij}$ , dan  $Y_{jk}$ .
- $Y_{ij}$  = 0 jika  $X_{ij} = 0$   
= 1 jika  $X_{ij} > 0$
- $Y_{jk}$  = 0 jika  $X_{jk} = 0$   
= 1 jika  $X_{jk} > 0$

Model matematika dari masalah distribusi dua tahap dari rantai pasokan yang dikaitkan dengan biaya tetap adalah sebagai berikut:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \{C_{ij}X_{ij} + F_{ij}Y_{ij}\} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r \{C_{jk}X_{jk} + F_{jk}Y_{jk}\} \quad (1)$$

Kendala:

$$\sum_{j=1}^q X_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^q X_{jk} = D_k \quad \forall k = 1, \dots, r \quad (3)$$

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

$$X_{jk} \geq 0 \text{ dan integer} \quad (5)$$

Kendala (2) menjamin bahwa unit yang dikirim dari pabrik  $i$  ke semua *distribution center*  $j$  tidak melebihi *supply* atau kapasitas pabrik  $i$ . Kendala (3) menjamin bahwa unit yang dikirimkan ke konsumen  $k$  dari semua *distribution center*  $j$  adalah sama dengan permintaan konsumen  $k$ . Kendala (4) dan (5) adalah kendala non negatif.

**2. Metode Penelitian**

Penelitian ini berfokus pada metode heuristik konstruktif sederhana yang dikembangkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) untuk menyelesaikan masalah distribusi rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap untuk rute transportasi. Penelitian ini mencoba menggunakan metode heuristik yang didasari oleh metode aproksimasi Vogel untuk menyelesaikan beberapa kasus numerik pada Jawahar & Balaji (2009) dan ingin menguji performansinya terhadap metode GA dan metode heuristik lainnya.

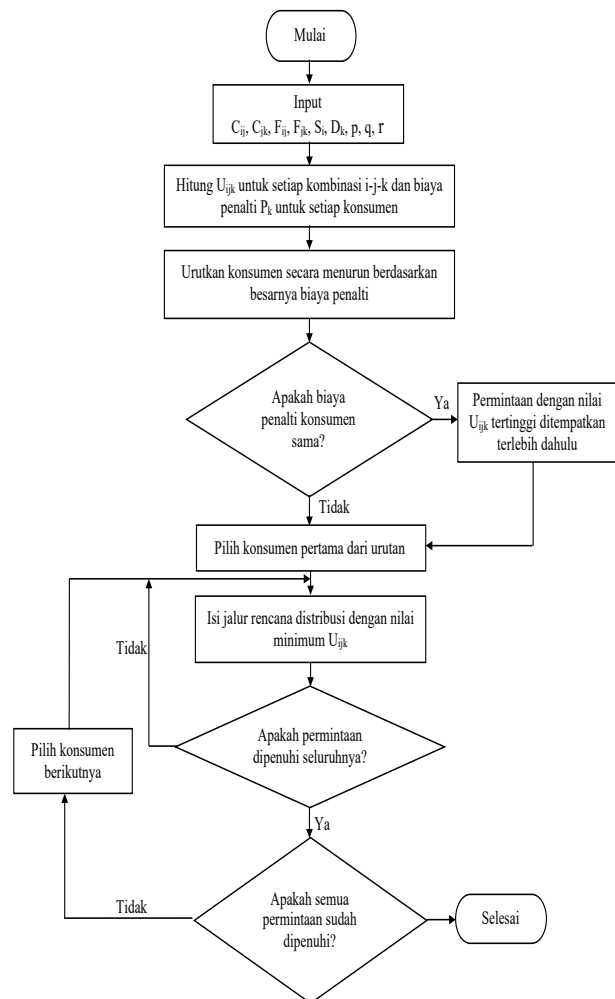
Prosedur metode heuristik adalah:

- 1) Buatlah matriks dari *approximated unit cost*  $U_{ijk}$  dengan menggunakan persamaan (6). Ini merupakan semua jalur yang memungkinkan untuk transportasi produk.
 
$$U_{ijk} = C_{ij} + C_{jk} + \frac{F_{ij}}{S_i} + \frac{F_{jk}}{D_k} \quad (6)$$
- 2) Dari matriks  $U_{ijk}$ , hitunglah biaya penalti  $P_k$  untuk setiap konsumen yang dihitung sebagai selisih dari nilai minimum dari  $U_{ijk}$  dengan nilai minimum kedua dari  $U_{ijk}$  untuk setiap konsumen  $k$ .
- 3) Buatlah urutan konsumen ( $L$ ) secara menurun dari besarnya biaya penalti. Ini mewakili urutan di mana

permintaan konsumen akan dipenuhi. Jika biaya penalti konsumen sama, maka konsumen dengan nilai  $U_{ijk}$  yang lebih tinggi akan ditempatkan lebih awal dalam urutan.

- 4) Pilih konsumen pertama dalam urutan, dan alokasikan jumlah maksimum yang mungkin. Alokasi maksimum adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik  $i$  dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen  $k$ .
- 5) Perbarui nilai dari pasokan dan permintaan. Jika permintaan di konsumen  $k$  tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih dan permintaan konsumen dipenuhi. Proses ini diulangi sampai permintaan konsumen habis terpenuhi.
- 6) Selanjutnya adalah konsumen kedua dalam urutan  $L$  dipilih dan prosedur yang sama dilakukan. Proses tersebut diulang sampai semua permintaan konsumen terpenuhi.
- 7) Distribusi yang diperoleh adalah solusinya.

Prosedur heuristik ditampilkan sebagai diagram alir di Gambar 2.



Sumber: Srirangacharyulu & Srinivas (2017)  
**Gambar 2.** Diagram Alir Prosedur Heuristik

### 3. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini akan disajikan ilustrasi penyelesaian permasalahan 2FCTP dengan metode heuristik tersebut untuk sebuah data contoh numerik. Contoh numerik yang akan dibahas adalah memiliki 3 pabrik, 3 *distribution center*, dan 7 konsumen dan contoh tersebut diambil dari Jawahar & Balaji (2009). Tabel 1 adalah biaya transportasi  $C_{ij}$  (biaya pengiriman per unit dari pabrik  $i$  ke *distribution center*  $j$ ), dan Tabel 2 adalah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{ij}$  dan kapasitas tiap pabrik  $i$ .

**Tabel 1.** Biaya Transportasi  $C_{ij}$

i	j		
	1	2	3
1	75	65	20
2	40	6	35
3	6	35	30



**Tabel 2.** Biaya Tetap  $F_{ij}$  dan  $S_i$

i	j			$S_i$
	1	2	3	
1	5000	1500	1600	375
2	6000	550	3400	1300
3	5500	2000	4000	700

Tabel 3 adalah biaya transportasi  $C_{jk}$  (biaya pengiriman per unit dari *distribution center*  $j$  ke konsumen  $k$ ), dan Tabel 4 adalah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{jk}$  dan permintaan tiap konsumen  $k$ .

**Tabel 3.** Biaya Transportasi  $C_{jk}$

k	j		
	1	2	3
1	9	25	40
2	20	35	10
3	5	16	26
4	70	25	8
5	4	2	10
6	40	35	60
7	22	14	6

**Tabel 4.** Biaya Tetap  $F_{jk}$  dan  $D_k$

k	j			$D_k$
	1	2	3	
1	2300	3000	4500	200
2	3500	2700	4200	245
3	4000	500	2200	150
4	0	1600	7000	475
5	8000	10000	6000	555
6	8000	6000	7500	560
7	1500	1000	2500	190

**Tabel 5** Nilai *Approximated Unit Cost*  $U_{ijk}$

Konsumen	Pabrik $i = 1$			Pabrik $i = 2$			Pabrik $i = 3$		
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
1	108.83	109.00	86.77	65.12	46.42	100.12	34.36	77.86	98.21
2	122.62	115.02	51.41	78.90	52.44	64.76	48.14	83.88	62.86
3	120.00	88.33	64.93	76.28	25.76	78.28	45.52	57.19	76.38
4	158.33	97.37	47.00	114.62	34.79	60.35	83.86	66.23	58.45
5	106.75	89.02	45.08	63.03	26.44	58.43	32.27	57.88	56.53
6	142.62	114.71	97.66	98.90	52.14	111.01	68.14	83.57	109.11
7	118.23	88.26	43.42	74.51	25.69	56.77	43.75	57.12	54.87

Pada langkah 2 adalah menentukan nilai penalti  $P_k$  untuk setiap konsumen dan perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Nilai Penalti  $P_k$  Setiap Konsumen

k	Min 1	Min 2	$P_k$
1	34.36	46.42	12.07
2	48.14	51.41	3.27
3	25.76	45.52	19.77
4	34.79	47.00	12.21
5	26.44	32.27	5.83
6	52.14	68.14	16.01
7	25.69	43.42	17.74

Pada Langkah 3 akan dibuat daftar konsumen (L) dalam urutan menurun dari besarnya biaya penalti. Ini

Pengolahan data dimulai dengan langkah 1 dengan membuat matriks dari *approximated unit cost*  $U_{ijk}$ . Penentuan nilai  $U_{ijk}$  dihitung dengan menggunakan persamaan (6), dan matriks tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

mewakili urutan di mana permintaan konsumen akan dipenuhi. Daftar konsumen tersebut dapat dilihat pada Tabel 7. Pada Langkah 4, akan melakukan alokasi pemenuhan permintaan dari konsumen yang berada pada urutan pertama dari daftar konsumen yang ada di Tabel 7, yaitu adalah konsumen 3. Alokasi pemenuhan akan dimulai dari nilai minimum  $U_{ijk}$ . Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 3 adalah 25.76 dan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Alokasi pemenuhan permintaan konsumen 3 dapat dilihat pada Tabel 8.

Langkah 5 tidak dilakukan, karena permintaan konsumen 3 sudah terpenuhi sepenuhnya. Jika permintaan di konsumen 3 tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih dan

seterusnya sampai permintaan konsumen 3 dapat dipenuhi.

Pada langkah 6, akan dipilih konsumen yang berada di urutan kedua dari daftar konsumen di Tabel 7, yaitu konsumen 7. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 7 adalah 25.69 dan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Untuk alokasi pemenuhan permintaan konsumen 7 dapat dilihat pada Tabel 9. Proses ini akan dilakukan sampai permintaan semua konsumen sudah dipenuhi.

Pada Tabel 7, konsumen berikutnya setelah konsumen 3 dan konsumen 7 adalah konsumen 6. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 6 adalah 52.14 dan jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Gambaran alokasi pemenuhan permintaan konsumen 6 dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 7.** Urutan Daftar Konsumen

k	$P_k$
3	19.77
7	17.74
6	16.01
4	12.21
1	12.07
5	5.83
2	3.27

**Tabel 8.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 3

Pabrik i	<i>Distribution center j</i>			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		150		1300
3				700

Konsumen k	<i>Distribution center j</i>			$D_k$
	1	2	3	
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6				560
7				190

**Tabel 9.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 7

Pabrik i	<i>Distribution center j</i>			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		340		1300
3				700

Konsumen k	<i>Distribution center j</i>			$D_k$
	1	2	3	
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6				560
7		190		190

**Tabel 10.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 6

Pabrik i	<i>Distribution center j</i>			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		900		1300
3				700

Konsumen k	<i>Distribution center j</i>			$D_k$
	1	2	3	
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6		560		560
7		190		190

Untuk selanjutnya, dari daftar urutan konsumen di Tabel 7, maka konsumen berikutnya atau setelah konsumen 3, 7, dan 6 adalah konsumen 4. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 4 adalah 34.79 dan jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Alokasi dari *distribution center* 2 ke konsumen 4 adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik 2 dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen 4, yaitu adalah minimum dari  $(400, 475) = 400$ . Dengan alokasi tersebut, maka permintaan di konsumen 4 belum terpenuhi seluruhnya, dan masih ada sisa permintaan sebesar  $475 - 400 = 75$  unit.

Berdasarkan metode heuristik di Langkah 5, jika permintaan di konsumen 4 tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih, dan nilai tersebut adalah 47.00. Jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 1 dan *distribution center* 3. Alokasi dari *distribution center* 3 ke konsumen 4 adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik 1 dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen 4, yaitu adalah minimum dari  $(375, 75) = 75$ . Gambaran alokasi pemenuhan permintaan konsumen 4 dapat dilihat pada Tabel 11.

Proses ini akan dilanjutkan ke konsumen berikutnya yang ada di daftar Tabel 7, yaitu konsumen 1, 5, dan 2. Hasil akhir alokasi dapat dilihat pada Tabel 12.

**Tabel 11.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 4

Pabrik i	<i>Distribution center j</i>			$S_i$
	1	2	3	
1			75	375
2		1300		1300
3				700

Konsumen k	<i>Distribution center j</i>			$D_k$
	1	2	3	
1				200
2				245
3		150		150
4		400	75	475
5				555
6		560		560
7		190		190



**Tabel 12.** Hasil Alokasi Akhir

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1300
3	700			700

---

Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2			245	245
3		150		150
4		400	75	475
5	500		55	555
6		560		560
7		190		190

Total biaya distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1), yaitu  $Z = 105.810$ . Untuk contoh numerik yang sama diperoleh total biaya distribusi sebesar  $Z = 106.615$  dengan metode genetika (GA) dan menghasilkan  $Z = 108.435$  menggunakan sebuah metode heuristik lain (Jawahar & Balaji, 2009). Solusi yang dihasilkan oleh metode GA dan metode heuristik lain tersebut dapat dilihat pada Tabel 13 dan Tabel 14.

**Tabel 13.** Alokasi GA

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1300
3	445	155	100	700

---

Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2			245	245
3		150		150
4			475	475
5		555		555
6		560		560
7		190		190

**Tabel 14.** Alokasi Metode Heuristik Lain

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1300
3	700			700

---

Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2			245	245
3		150		150
4		345	130	475
5	500	55		555
6		560		560
7		190		190

**4. Kesimpulan**

Dari hasil perbandingan dengan sebuah contoh numerik di atas memperlihatkan bahwa metode heuristik yang diusulkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) dapat dipertimbangkan sebagai metode yang sederhana

dan membutuhkan waktu perhitungan yang cukup singkat dan memberi solusi yang baik untuk menyelesaikan permasalahan 2FCTP.

Perbandingan lebih lanjut akan dilakukan antara metode heuristik yang diusulkan Srirangacharyulu & Srinivas (2017) dengan metode genetika (GA) dan metode heuristik lain dari penelitian Jawahar & Balaji (2009). Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 15 dan Tabel 16. Contoh numerik yang dijabarkan di atas adalah contoh numerik untuk masalah berukuran 3 pabrik (i), 3 *distribution center* (j), dan 7 konsumen (k) atau 3 x 3 x 7.

**Tabel 15.** Perbandingan Performansi

No	Ukuran masalah i x j x k	Total biaya distribusi		
		Heuristik	GA	Heuristik lain
1	2 x 2 x 6	165650	165650	165650
2	2 x 2 x 7	162850	162490	169890
3	2 x 3 x 4	34130	32150	34130
4	2 x 3 x 6	71295	69970	71295
5	2 x 3 x 8	203330	201680	202330
6	3 x 3 x 6	132820	132890	132890
7	3 x 3 x 7	105810	106615	108435

**Tabel 16.** Nilai Deviasi Metode Heuristik Terhadap GA dan Metode Heuristik Lain

No	Ukuran masalah i x j x k	Deviasi heuristik terhadap (%)	
		GA	Heuristik lain
1	2 x 2 x 6	0.00%	0.00%
2	2 x 2 x 7	0.22%	-4.32%
3	2 x 3 x 4	5.80%	0.00%
4	2 x 3 x 6	1.86%	0.00%
5	2 x 3 x 8	0.81%	0.49%
6	3 x 3 x 6	-0.05%	-0.05%
7	3 x 3 x 7	-0.76%	-2.48%

Pada Tabel 16 dapat dilihat jika tanda adalah negatif, maka metode heuristik akan menghasilkan biaya total distribusi yang lebih kecil atau lebih baik. Sebaliknya, jika tanda adalah positif, maka metode heuristik akan menghasilkan biaya total distribusi yang lebih besar atau lebih buruk. Pada perbandingan metode heuristik usulan dibandingkan GA maka menghasilkan 2 contoh numerik yang lebih baik, 1 contoh numerik yang sama, dan 4 contoh numerik yang lebih buruk dengan rata-rata memiliki biaya distribusi lebih besar sebesar  $(0.22 + 5.80 + 1.86 + 0.81)/4 = 2,17\%$ .

Pada perbandingan metode heuristik usulan dibandingkan dengan metode heuristik lain, maka menghasilkan 3 contoh numerik yang lebih baik, 3 contoh numerik yang sama, dan hanya 1 contoh numerik yang lebih buruk. Berdasarkan perbandingan tersebut, maka metode heuristik usulan dari Srirangacharyulu & Srinivas (2017) adalah metode yang dapat dipertimbangkan dalam menyelesaikan permasalahan 2FCTP karena perhitungannya yang cukup sederhana

dan membutuhkan waktu perhitungan yang cukup singkat, serta menghasilkan solusi yang baik.

#### Daftar Pustaka

- Adlakha, V., Kowalski, K., Vemuganti, R. R., & Lev, B. (2007). More-for-less algorithm for fixed-charge transportation problems. *Omega*, 35(1), 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.03.001>
- Antony Arokia Durai Raj, K., & Rajendran, C. (2012). A genetic algorithm for solving the fixed-charge transportation model: Two-stage problem. *Computers and Operations Research*, 39(9), 2016–2032. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.020>
- Balaji, A. N., & Jawahar, N. (2010). A Simulated Annealing Algorithm for a two-stage fixed charge distribution problem of a Supply Chain. *International Journal of Operational Research*, 7(2), 192–215. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2010.030803>
- Calvete, H. I., Galé, C., Iranzo, J. A., & Toth, P. (2018). A matheuristic for the two-stage fixed-charge transportation problem. *Computers and Operations Research*, 95, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.007>
- Cosma, O., Danciulescu, D., & Pop, P. C. (2019). On the Two-Stage Transportation Problem with Fixed Charge for Opening the Distribution Centers. *IEEE Access*, 7, 113684–113698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936095>
- Cosma, O., Pop, P. C., & Danciulescu, D. (2020). A Parallel Algorithm for Solving a Two-Stage Fixed-Charge Transportation Problem. *Informatica (Netherlands)*, 31(4), 681–706. <https://doi.org/10.15388/20-INFOR432>
- Cosma, O., Pop, P. C., & Sabo, C. (2020). An efficient hybrid genetic approach for solving the two-stage supply chain network design problem with fixed costs. *Mathematics*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/MATH8050712>
- Diaby, M. (1991). Successive linear approximation procedure for generalized fixed-charge transportation problems. *Journal of the Operational Research Society*, 42(11), 991–1001. <https://doi.org/10.1057/jors.1991.189>
- Ekşioğlu, S. D., & Jin, M. (2006). Cross-facility production and transportation planning problem with perishable inventory. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3982 LNCS(May 2006), 708–717. [https://doi.org/10.1007/11751595\\_75](https://doi.org/10.1007/11751595_75)
- Hong, J., Diabat, A., Panicker, V. V., & Rajagopalan, S. (2018). A two-stage supply chain problem with fixed costs: An ant colony optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 204, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.019>
- Jawahar, N., & Balaji, A. N. (2009). A genetic algorithm for the two-stage supply chain distribution problem associated with a fixed charge. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 194, Issue 2). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.005>
- Panicker, V. V., Vanga, R., & Sridharan, R. (2013). Ant colony optimisation algorithm for distribution-allocation problem in a two-stage supply chain with a fixed transportation charge. *International Journal of Production Research*, 51(3), 698–717. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.658118>
- Schaffer, J. R., & O’Leary, D. E. (1989). Use of penalties in a branch and bound procedure for the fixed charge transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 43(3), 305–312. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90229-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90229-4)
- Srirangacharyulu, B., & Srinivas, K. (2017). A Heuristic Method for the two-stage Supply Chain Distribution Problem with Fixed Charge. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 5(5), 100–104. <http://iraj.in>
- Sun, M., Aronson, J. E., McKeown, P. G., & Drinka, D. (1998). A tabu search heuristic procedure for the fixed charge transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2–3), 441–456. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00284-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00284-1)
- Yang, L., & Liu, L. (2007). Fuzzy fixed charge solid transportation problem and algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 7(3), 879–889. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2005.11.011>

## Analisis Performansi Metode Heuristik untuk Masalah Distribusi Rantai Pasokan Dua Tahap dengan Biaya Tetap

Santoso<sup>\*1</sup> dan Rainisa Maini Heryanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha  
Jl. Prof. drg. Surya Sumantri M.P.H. No. 65, Bandung, 40164, Indonesia  
Email: santoso@eng.maranatha.edu<sup>1</sup>, rainisa.mh@eng.maranatha.edu<sup>2</sup>

### Abstrak

Distribusi produk di sepanjang rantai pasokan, yang secara langsung mempengaruhi biaya rantai pasokan adalah *key driver* dari profitabilitas perusahaan secara keseluruhan. Biaya distribusi bahkan menyumbang sekitar 30% dari biaya produk. Oleh karena itu, masalah distribusi merupakan pertimbangan penting untuk perusahaan industri yang memiliki jaringan rantai pasokan. Penelitian ini mempertimbangkan masalah distribusi dua tahap dari rantai pasokan yang dikaitkan dengan biaya tetap. Dua jenis biaya terlibat dalam masalah ini adalah biaya berkelanjutan yang meningkat secara linier sesuai dengan jumlah produk yang dikirim antara sumber dan tujuan serta biaya kedua adalah biaya tetap yang terjadi setiap kali jumlah yang tidak nol dikirimkan antara sumber dan tujuan. Tujuan yang ingin dicapai adalah meminimalisasi total biaya distribusi. Metode heuristik konstruktif sederhana yang didasari oleh metode aproksimasi Vogel akan dievaluasi untuk kualitas dari solusinya dengan membandingkannya dengan solusi yang dihasilkan dari metode genetika (GA) dan sebuah metode heuristik lain. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa metode heuristik tersebut memiliki solusi yang baik dan dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam praktik. Metode heuristik dapat digunakan karena perhitungan yang cukup sederhana dan membutuhkan waktu yang cukup singkat.

**Kata kunci:** biaya tetap, dua tahap, masalah distribusi, metode heuristik, rantai pasokan

### Abstract

The distribution of products along the supply chain, which directly affects the cost of the supply chain, is the main driver of the overall company's profitability. Distribution costs account for about 30% of product costs. Therefore, distribution issues are an important consideration for industrial companies that have supply chain networks. This paper considers a two-stage distribution problem of supply chain associated with a fixed charge. Two kinds of cost are involved in this problem are a continues cost that increase linearly according to the quantity of product shipped between source and destination, and second cost, fixed charge which is incurred whenever a nonzero quantity is shipped between a source and a destination. The objective to be achieved is to minimize the total distribution costs. A simple constructive heuristic method that influenced by Vogel approximation will be evaluated for a quality of the solution by comparing it with solutions generated from genetic methods (GA) and other heuristics. The comparison results show that the heuristic method has a good solution and can be considered for use in practice. That heuristic method could be used because of simple calculations and requires a short time.

**Keywords:** distribution problem, fixed charge, heuristic method, supply chain, two-stage.

### 1. Pendahuluan

Rantai pasokan adalah jaringan perusahaan yang memproduksi, menjual, dan mengirimkan produk atau layanan ke segmen pasar yang telah ditentukan. Hal ini tidak hanya mencakup produsen dan pemasok, tetapi juga *transporter*, gudang, pengecer, dan konsumen itu sendiri. Istilah rantai pasokan memunculkan gambaran produk atau *supply* yang bergerak dari pemasok ke produsen kemudian distributor ke pengecer dan kemudian konsumen di sepanjang rantai.

Distribusi produk di sepanjang rantai pasokan, yang secara langsung mempengaruhi biaya rantai pasokan, adalah *key driver* dari profitabilitas perusahaan secara keseluruhan. Biaya distribusi bahkan menyumbang

sekitar 30% dari biaya produk dan memainkan peran penting dalam penentuan harganya. Oleh karena itu, masalah distribusi merupakan pertimbangan penting untuk perusahaan industri yang memiliki jaringan rantai pasokan. Dalam masalah tersebut, salah satu keputusan strategis adalah alokasi kuantitas transaksi dari pusat produksi ke titik terminal dengan biaya yang efektif.

Seringkali, biaya transportasi per unit digunakan untuk mencari jadwal distribusi yang optimal. Asumsi dasar dalam setiap masalah transportasi adalah bahwa biaya transportasi berbanding lurus dengan kuantitas yang dikirimkan (Diaby, 1991). Pendekatan itu murni mempertimbangkan biaya total distribusi sebagai kuantitas yang tergantung dan sebanding dengan jumlah

\* Penulis korespondensi

Commented [RMH1]: Reviewer B: Cek kalimat ini!

Commented [RMH2R1]: Tanggapan: kalimat ini sudah direvisi sehingga lebih mudah dipahami.

yang diangkat antara sumber dan tujuan. Namun, asumsi ini tidak dapat dibenarkan dalam situasi dunia nyata. Banyak masalah transportasi dan distribusi praktis dapat dimodelkan sebagai masalah transportasi biaya tetap (Sun et al., 1998). Biaya tetap dapat mewakili biaya sewa kendaraan, biaya tol di jalan raya, biaya pendaratan di bandara, biaya *setup* untuk mesin di lingkungan manufaktur, waktu untuk menemukan *file* dalam sistem basis data terdistribusi, dll. Dengan adanya biaya satu kali seperti itu, masalah transportasi disebut masalah biaya tetap.

Masalah transportasi biaya tetap adalah pengembangan dari masalah transportasi klasik di mana biaya tetap dikeluarkan untuk setiap titik *supply* yang digunakan dalam solusi (Schaffer & O'Leary, 1989). Dua jenis biaya yang dipertimbangkan dalam masalah transportasi biaya tetap adalah (i) biaya yang terus meningkat secara linier dengan kuantitas produk yang dikirim antara sumber dan tujuan, dan (ii) biaya tetap, yang dikeluarkan setiap kali kuantitas produk yang tidak nol dikirimkan antara sumber dan tujuan.

Walaupun masalah biaya tetap dipertimbangkan secara luas namun kebanyakan adalah masalah satu tahap (Eksioglu & Jin, 2006; Yang & Liu, 2007; Adlakha et al., 2007). Masalah distribusi multi-tahap adalah masalah standar bagi perusahaan industri dengan jaringan rantai pasokan. Mengingat pertimbangan di atas, penelitian ini berkonsentrasi pada masalah distribusi rantai pasokan tiga eselon yang melibatkan dua tahap distribusi dan biaya tetap. Masalah ini disebut juga *2-stage fixed charge transportation problem* (2FCTP).

Balaji & Jawahar (2010) mengembangkan algoritma berbasis *simulated annealing* (SA) untuk 2FCTP. Antony Arokia Durai Raj & Rajendran (2012) mengusulkan algoritma genetika (GA) untuk menyelesaikan 2FCTP dalam dua skenario. Skenario pertama adalah biaya tetap yang terkait dengan rute dan kapasitas distributor tidak terbatas dan skenario kedua adalah biaya tetap yang terkait dengan pembukaan *distribution center* (DC) dengan kapasitas terbatas. Panicker et al. (2013) mengembangkan heuristik berbasis *ant colony optimization* (ACO) untuk memecahkan 2FCTP.

Sebuah model *integer programming* dengan pendekatan ACO dengan *solver* LINGO dikembangkan untuk memecahkan masalah 2FCTP (Hong et al., 2018). Permasalahan 2FCTP yang diselesaikan dengan sebuah *matheuristic* yang menggunakan algoritma *evolutionary* dan mengeksplorasi properti untuk memandu algoritma menuju solusi yang lebih baik (Calvete et al., 2018).

Permasalahan transportasi dua tahap dengan biaya tetap untuk membuka pusat distribusi, yang merupakan pengembangan dari masalah transportasi klasik. Sebuah metode heuristik konstruktif yang efisien diusulkan pada penelitian ini (Cosma et al., 2019). Masalah 2FCTP didekati dengan metode heuristik yang disebut algoritma

paralel dan mencoba menyelesaikan permasalahan pada *real-world* dengan efisien (Cosma, Pop, & Danculescu, 2020).

Pendekatan genetika hibrida yang efisien digunakan untuk memecahkan masalah desain jaringan rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap. Rantai pasokan dua tahap yang dipertimbangkan meliputi produsen, *distribution center*, dan konsumen, dengan biaya utamanya adalah selain biaya transportasi variabel, juga menggunakan biaya tetap untuk pembukaan *distribution center* (Cosma, Pop, & Sabo, 2020).

Penelitian ini berfokus pada metode heuristik konstruktif sederhana yang dikembangkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) untuk menyelesaikan masalah distribusi rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap untuk rute transportasi. Metode heuristik tersebut adalah metode yang didasari oleh metode aproksimasi Vogel. Penelitian ini mencoba untuk menggunakan metode heuristik tersebut untuk menyelesaikan beberapa kasus numerik yang terdapat pada Jawahar & Balaji (2009). Penelitian ini juga ingin menguji performansi metode heuristik tersebut terhadap hasil komputasi dengan metode GA dan metode heuristik lainnya yang telah dilakukan oleh Jawahar & Balaji (2009) untuk kasus-kasus numerik yang sama.

Adapun pengujian performansi metode heuristik konstruktif sederhana yang dikembangkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) untuk permasalahan 2FCTP tersebut belum pernah dilakukan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Tujuan penelitian ini adalah ingin mengetahui bagaimana performansi metode heuristik yang dikembangkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) tersebut dan apakah metode heuristik tersebut dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam penyelesaian permasalahan 2FCTP.

## 2. Deskripsi Sistem

Model matematika 2FCTP yang dikembangkan oleh Jawahar & Balaji (2009) adalah masalah distribusi rantai pasokan dimana terdapat sejumlah  $p$  pabrik,  $q$  *distribution center*, dan  $r$  konsumen. Setiap pabrik  $i$  dapat mengirimkan produk ke salah satu dari *distribution center*  $j$  dengan biaya transportasi  $C_{ij}$  (biaya pengiriman per unit dari pabrik  $i$  ke *distribution center*  $j$ ) ditambah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{ij}$ , diasumsikan untuk mengoperasikan rute tersebut. Setiap *distribution center*  $j$  dapat mengirimkan produk ke salah satu dari konsumen  $k$  dengan biaya transportasi  $C_{jk}$  (biaya pengiriman per unit dari *distribution center*  $j$  ke konsumen  $k$ ) ditambah biaya tetap  $F_{jk}$ , diasumsikan untuk mengoperasikan rute. Setiap pabrik  $i = 1, 2, \dots, p$  memiliki *supply* atau kapasitas  $S_i$  unit dan setiap konsumen  $k = 1, 2, \dots, r$  memiliki permintaan  $D_k$  unit. Setiap *distribution center*  $j = 1, \dots, q$  memiliki kapasitas penyimpanan  $SC_j$  unit. Gambar 1 menunjukkan

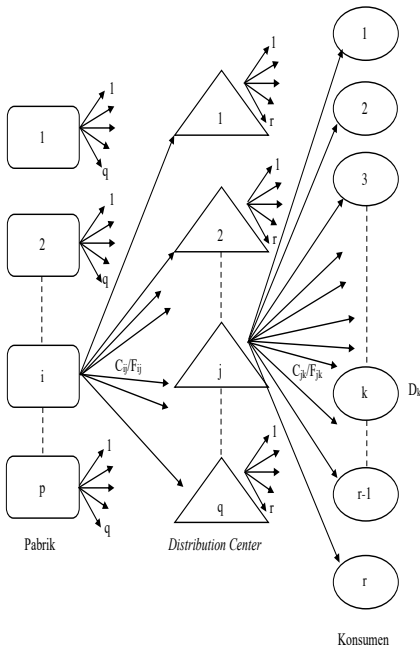
**Commented [RMH3]:** Reviewer B: Bagian pendahuluan perlu menjelaskan 1. tujuan penelitian, 2 pertanyaan penelitian dan kebaruan penelitian

**Commented [RMH4R3]:** Tanggapan: sudah ditambahkan pada 2 paragraf ini.

**Commented [RMH5]:** Reviewer B: Mulai dari paragraf ini seterusnya, pindahkan ke bab sendiri dg judul deskripsi sistem

**Commented [RMH6R5]:** Tanggapan: sudah ditambahkan bagian deskripsi sistem.

representasi dari masalah distribusi rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap.



Sumber: Jawahar & Balaji (2009)  
**Gambar 1.** Distribusi Rantai Pasok Dua Tahap

Fungsi tujuan (1) adalah untuk menentukan rute-rute yang akan dibuka dan besarnya pengiriman pada rute-rute tersebut, sehingga total biaya distribusi dapat diminimalkan.

Variabel keputusan:

- $X_{ij}$  = unit yang dikirimkan dari pabrik  $i$  ke  $distribution\ center\ j$
- $X_{jk}$  = unit yang dikirimkan dari  $distribution\ center\ j$  ke konsumen  $k$ ,  $Y_{ij}$ , dan  $Y_{jk}$ .
- $Y_{ij}$  = 0 jika  $X_{ij} = 0$   
 = 1 jika  $X_{ij} > 0$
- $Y_{jk}$  = 0 jika  $X_{jk} = 0$   
 = 1 jika  $X_{jk} > 0$

Model matematika dari masalah distribusi dua tahap dari rantai pasokan yang dikaitkan dengan biaya tetap adalah sebagai berikut:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \{C_{ij}X_{ij} + F_{ij}Y_{ij}\} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r \{C_{jk}X_{jk} + F_{jk}Y_{jk}\} \quad (1)$$

Kendala:

$$\sum_{j=1}^q X_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^q X_{jk} = D_k \quad \forall k = 1, \dots, r \quad (3)$$

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

$$X_{jk} \geq 0 \text{ dan integer} \quad (5)$$

Kendala (2) menjamin bahwa unit yang dikirim dari pabrik  $i$  ke semua  $distribution\ center\ j$  tidak melebihi  $supply$  atau kapasitas pabrik  $i$ . Kendala (3) menjamin bahwa unit yang dikirimkan ke konsumen  $k$  dari semua  $distribution\ center\ j$  adalah sama dengan permintaan konsumen  $k$ . Kendala (4) dan (5) adalah kendala non negatif.

### 3. Metode Penelitian

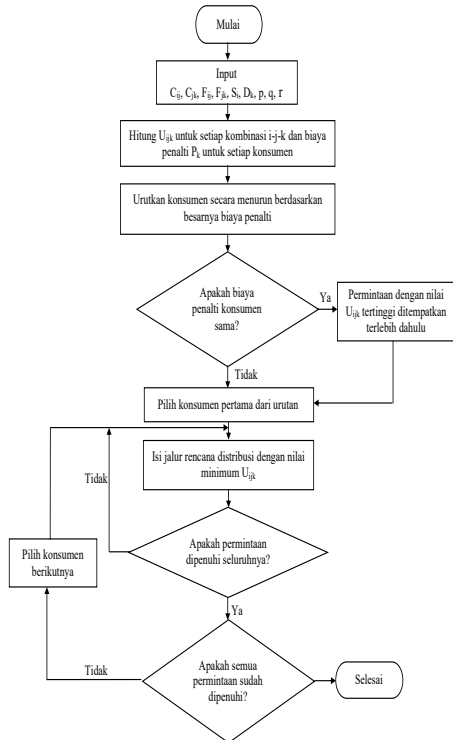
Prosedur metode heuristik konstruktif sederhana yang dikembangkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) untuk menyelesaikan masalah distribusi rantai pasokan dua tahap dengan biaya tetap untuk rute transportasi adalah:

- 1) Buatlah matriks dari  $approximated\ unit\ cost\ U_{ijk}$  dengan menggunakan persamaan (6). Ini merupakan semua jalur yang memungkinkan untuk transportasi produk.
 
$$U_{ijk} = C_{ij} + C_{jk} + \frac{F_{ij}}{S_i} + \frac{F_{jk}}{D_k} \quad (6)$$
- 2) Dari matriks  $U_{ijk}$ , hitunglah biaya penalti  $P_k$  untuk setiap konsumen yang dihitung sebagai selisih dari nilai minimum dari  $U_{ijk}$  dengan nilai minimum kedua dari  $U_{ijk}$  untuk setiap konsumen  $k$ .
- 3) Buatlah urutan konsumen ( $L$ ) secara menurun dari besarnya biaya penalti. Ini mewakili urutan di mana permintaan konsumen akan dipenuhi. Jika biaya penalti konsumen sama, maka konsumen dengan nilai  $U_{ijk}$  yang lebih tinggi akan ditempatkan lebih awal dalam urutan.
- 4) Pilih konsumen pertama dalam urutan, dan alokasikan jumlah maksimum yang mungkin. Alokasi maksimum adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik  $i$  dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen  $k$ .
- 5) Perbarui nilai dari pasokan dan permintaan. Jika permintaan di konsumen  $k$  tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih dan permintaan konsumen dipenuhi. Proses ini diulangi sampai permintaan konsumen habis terpenuhi.
- 6) Selanjutnya adalah konsumen kedua dalam urutan  $L$  dipilih dan prosedur yang sama dilakukan. Proses tersebut diulang sampai semua permintaan konsumen terpenuhi.
- 7) Distribusi yang diperoleh adalah solusinya.

Prosedur heuristik ditampilkan sebagai diagram alir di Gambar 2.

**Commented [RMH7]:** Reviewer A: perlu penjelasan yang lebih detail terkait metode perhitungan. Bila diperlukan dapat menjelaskan studi kasus secara lebih detail.

**Commented [RMH8R7]:** Tanggapan: sudah dijelaskan dalam bentuk penjelasan dan flow chart



Sumber: Srirangacharyulu & Srinivas (2017)  
Gambar 2. Diagram Alir Prosedur Heuristik

4. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini akan disajikan ilustrasi penyelesaian permasalahan 2FCTP dengan metode heuristik tersebut untuk sebuah data contoh numerik. Contoh numerik yang akan dibahas adalah memiliki 3 pabrik, 3 *distribution center*, dan 7 konsumen dan contoh tersebut diambil dari Jawahar & Balaji (2009). Tabel 1 adalah biaya transportasi  $C_{ij}$  (biaya pengiriman per unit dari pabrik  $i$  ke *distribution center*  $j$ ), dan Tabel 2 adalah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{ij}$  dan kapasitas tiap pabrik  $i$ .

Tabel 1. Biaya Transportasi ( $C_{ij}$ )

i	j		
	1	2	3
1	75	65	20
2	40	6	35
3	6	35	30

(satuan:  $C_{ij}$  dalam Rupiah/unit)

Commented [RMH11]: Reviewer B: Tambahkan satuan di setiap notasi yg ditampilkan ditabel

Commented [RMH12R11]: Tanggapan: sudah ditambahkan pada keterangan di bagian bawah tabel.

Tabel 2. Biaya Tetap ( $F_{ij}$ ) dan Kapasitas Pabrik ( $S_i$ )

i	j			$S_i$
	1	2	3	
1	5,000	1,500	1,600	375
2	6,000	550	3,400	1,300
3	5,500	2,000	4,000	700

(satuan:  $F_{ij}$  dalam Rupiah/pengiriman dan  $S_i$  dalam unit)

Tabel 3 adalah biaya transportasi  $C_{jk}$  (biaya pengiriman per unit dari *distribution center*  $j$  ke konsumen  $k$ ), dan Tabel 4 adalah biaya tetap untuk pengiriman produk dengan kuantitas tidak nol  $F_{jk}$  dan permintaan tiap konsumen  $k$ .

Pengolahan data dimulai dengan langkah 1 dengan membuat matriks dari *approximated unit cost*  $U_{ijk}$ . Penentuan nilai  $U_{ijk}$  dihitung dengan menggunakan persamaan (6), dan matriks tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 3. Biaya Transportasi ( $C_{jk}$ )

k	j		
	1	2	3
1	9	25	40
2	20	35	10
3	5	16	26
4	70	25	8
5	4	2	10
6	40	35	60
7	22	14	6

(satuan:  $C_{jk}$  dalam Rupiah/unit)

Commented [RMH9]: Reviewer A: Hasil penelitian perlu dibahas lebih dalam dan dielaborasi dengan penelitian sebelumnya atau penelitian sejenis.

Commented [RMH10R9]: Tanggapan: sudah ditambahkan pada bagian terakhir. Penelitian sebelumnya belum ada yang membahas permasalahan ini dan penjelasan ini sudah disampaikan pada paragraf akhir bagian 1.

Tabel 4. Biaya Tetap ( $F_{jk}$ ) dan Demand Konsumen ( $D_k$ )

k	j			$D_k$
	1	2	3	
1	2,300	3,000	4,500	200
2	3,500	2,700	4,200	245
3	4,000	500	2,200	150
4	0	1,600	7,000	475
5	8,000	10,000	6,000	555
6	8,000	6,000	7,500	560
7	1,500	1,000	2,500	190

(satuan:  $F_{jk}$  dalam Rupiah/pengiriman dan  $D_k$  dalam unit)

Tabel 5. Nilai *Approximated Unit Cost* ( $U_{ijk}$ )

Konsumen	Pabrik i = 1			Pabrik i = 2			Pabrik i = 3		
	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3
1	108.83	109.00	86.77	65.12	46.42	100.12	34.36	77.86	98.21
2	122.62	115.02	51.41	78.90	52.44	64.76	48.14	83.88	62.86
3	120.00	88.33	64.93	76.28	25.76	78.28	45.52	57.19	76.38
4	158.33	97.37	47.00	114.62	34.79	60.35	83.86	66.23	58.45
5	106.75	89.02	45.08	63.03	26.44	58.43	32.27	57.88	56.53
6	142.62	114.71	97.66	98.90	52.14	111.01	68.14	83.57	109.11
7	118.23	88.26	43.42	74.51	25.69	56.77	43.75	57.12	54.87

(satuan:  $U_{ijk}$  dalam Rupiah/unit)

Pada langkah 2 adalah menentukan nilai penalti  $P_k$  untuk setiap konsumen dan perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Nilai Penalti ( $P_k$ ) Setiap Konsumen

k	Min 1	Min 2	$P_k$
1	34.36	46.42	12.07
2	48.14	51.41	3.27
3	25.76	45.52	19.77
4	34.79	47.00	12.21
5	26.44	32.27	5.83
6	52.14	68.14	16.01
7	25.69	43.42	17.74

(satuan:  $P_k$  dalam Rupiah/unit)

Pada Langkah 3 akan dibuat daftar konsumen (L) dalam urutan menurun dari besarnya biaya penalti. Ini mewakili urutan di mana permintaan konsumen akan dipenuhi. Daftar konsumen tersebut dapat dilihat pada Tabel 7. Pada Langkah 4, akan melakukan alokasi pemenuhan permintaan dari konsumen yang berada pada urutan pertama dari daftar konsumen yang ada di Tabel 7, yaitu adalah konsumen 3. Alokasi pemenuhan akan dimulai dari nilai minimum  $U_{ijk}$ . Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 3 adalah 25.76 dan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Alokasi pemenuhan permintaan konsumen 3 dapat dilihat pada Tabel 8.

Langkah 5 tidak dilakukan, karena permintaan konsumen 3 sudah terpenuhi sepenuhnya. Jika permintaan di konsumen 3 tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih dan seterusnya sampai permintaan konsumen 3 dapat dipenuhi.

Pada langkah 6, akan dipilih konsumen yang berada di urutan kedua dari daftar konsumen di Tabel 7, yaitu konsumen 7. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 7 adalah 25.69 dan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Untuk alokasi pemenuhan permintaan konsumen 7 dapat dilihat pada Tabel 9. Proses ini akan dilakukan sampai permintaan semua konsumen sudah dipenuhi.

Pada Tabel 7, konsumen berikutnya setelah konsumen 3 dan konsumen 7 adalah konsumen 6. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 6 adalah 52.14 dan jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Gambaran alokasi pemenuhan permintaan konsumen 6 dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 7.** Urutan Daftar Konsumen

k	$P_k$
3	19.77
7	17.74
6	16.01
4	12.21
1	12.07
5	5.83
2	3.27

(satuan:  $P_k$  dalam Rupiah/unit)

**Tabel 8.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 3

Pabrik i	Distribution center j			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		150		1300
3				700
Konsumen k	Distribution center j			$D_k$
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6				560
7				190

(satuan: alokasi dalam unit)

**Tabel 9.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 7

Pabrik i	Distribution center j			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		340		1,300
3				700
Konsumen k	Distribution center j			$D_k$
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6				560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

**Tabel 10.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 6

Pabrik i	Distribution center j			$S_i$
	1	2	3	
1				375
2		900		1,300
3				700
Konsumen k	Distribution center j			$D_k$
1				200
2				245
3		150		150
4				475
5				555
6		560		560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

Untuk selanjutnya, dari daftar urutan konsumen di Tabel 7, maka konsumen berikutnya atau setelah konsumen 3, 7, dan 6 adalah konsumen 4. Nilai  $U_{ijk}$  minimum pada konsumen 4 adalah 34.79 dan jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 2 dan *distribution center* 2. Alokasi dari *distribution center* 2 ke konsumen 4 adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik 2 dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen 4, yaitu adalah minimum dari  $(400, 475) = 400$ . Dengan alokasi tersebut, maka permintaan di konsumen 4 belum

terpenuhi seluruhnya, dan masih ada sisa permintaan sebesar  $475 - 400 = 75$  unit.

Berdasarkan metode heuristik di Langkah 5, jika permintaan di konsumen 4 tidak sepenuhnya dipenuhi, maka jalur dengan nilai  $U_{ijk}$  terkecil kedua dipilih, dan nilai tersebut adalah 47.00. Jika dilihat pada Tabel 5, maka nilai ini akan berasosiasi dengan pabrik 1 dan *distribution center* 3. Alokasi dari *distribution center* 3 ke konsumen 4 adalah nilai minimum dari sisa pasokan di pabrik 1 dan sisa permintaan yang belum dipenuhi pada konsumen 4, yaitu adalah minimum dari  $(375, 75) = 75$ . Gambaran alokasi pemenuhan permintaan konsumen 4 dapat dilihat pada Tabel 11.

Proses ini akan dilanjutkan ke konsumen berikutnya yang ada di daftar Tabel 7, yaitu konsumen 1, 5, dan 2. Hasil akhir alokasi dapat dilihat pada Tabel 12.

**Tabel 11.** Alokasi Pemenuhan Permintaan Konsumen 4

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			75	375
2		1300		1,300
3				700
Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2		245		245
3			150	150
4		400	75	475
5				555
6		560		560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

**Tabel 12.** Hasil Alokasi Akhir

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1,300
3	700			700
Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2		245		245
3			150	150
4		400	75	475
5	500		55	555
6		560		560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

Total biaya distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1), yaitu  $Z = 105.810$ . Untuk contoh numerik yang sama diperoleh total biaya distribusi sebesar  $Z = 106.615$  dengan metode genetika (GA) dan menghasilkan  $Z = 108.435$  menggunakan sebuah metode heuristik lain (Jawahar & Balaji, 2009). Solusi yang dihasilkan oleh metode GA dan metode heuristik lain tersebut dapat dilihat pada Tabel 13 dan Tabel 14.

**Tabel 13.** Alokasi GA

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1,300
3	445	155	100	700
Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2		245		245
3			150	150
4			475	475
5		555		555
6		560		560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

**Tabel 14.** Alokasi Metode Heuristik Lain

Pabrik i	Distribution center j			S <sub>i</sub>
	1	2	3	
1			375	375
2		1300		1300
3	700			700
Konsumen k	Distribution center j			D <sub>k</sub>
	1	2	3	
1	200			200
2		245		245
3			150	150
4		345	130	475
5	500	55		555
6		560		560
7		190		190

(satuan: alokasi dalam unit)

Dari hasil perhitungan dengan sebuah contoh numerik di atas memperlihatkan bahwa metode heuristik yang diusulkan oleh Srirangacharyulu & Srinivas (2017) dapat dipertimbangkan sebagai metode yang sederhana dan membutuhkan waktu perhitungan yang cukup singkat dan memberi solusi yang baik untuk menyelesaikan permasalahan 2FCTP.

Perbandingan lebih lanjut akan dilakukan antara metode heuristik yang diusulkan Srirangacharyulu & Srinivas (2017) dengan metode GA dan metode heuristik lain dari penelitian Jawahar & Balaji (2009). Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 15 dan Tabel 16. Contoh numerik yang dijabarkan di atas adalah contoh numerik untuk masalah berukuran 3 pabrik (i), 3 *distribution center* (j), dan 7 konsumen (k) atau  $3 \times 3 \times 7$ .

**Tabel 15.** Perbandingan Performansi

No	Ukuran masalah i x j x k	Total biaya distribusi		
		Heuristik	GA	Heuristik lain
1	2 x 2 x 6	165,650	165,650	165,650
2	2 x 2 x 7	162,850	162,490	169,890
3	2 x 3 x 4	34,130	32,150	34,130
4	2 x 3 x 6	71,295	69,970	71,295
5	2 x 3 x 8	203,330	201,680	202,330
6	3 x 3 x 6	132,820	132,890	132,890
7	3 x 3 x 7	105,810	106,615	108,435

(satuan: total biaya distribusi dalam Rupiah)



**Tabel 16.** Nilai Deviasi Metode Heuristik Terhadap GA dan Metode Heuristik Lain

No	Ukuran masalah $i \times j \times k$	Deviasi heuristik terhadap	
		GA	Heuristik lain
1	2 x 2 x 6	0.00	0.00
2	2 x 2 x 7	0.22	-4.32
3	2 x 3 x 4	5.80	0.00
4	2 x 3 x 6	1.86	0.00
5	2 x 3 x 8	0.81	0.49
6	3 x 3 x 6	-0.05	-0.05
7	3 x 3 x 7	-0.76	-2.48

(satu: deviasi dalam %)

Pada Tabel 16 dapat dilihat jika tanda adalah negatif, maka metode heuristik akan menghasilkan biaya total distribusi yang lebih kecil atau lebih baik. Sebaliknya, jika tanda adalah positif, maka metode heuristik akan menghasilkan biaya total distribusi yang lebih besar atau lebih buruk. Pada perbandingan metode heuristik usulan dibandingkan GA maka metode heuristik usulan menghasilkan solusi yang lebih baik untuk 2 contoh numerik, menghasilkan solusi yang sama untuk 1 contoh numerik, dan menghasilkan solusi yang lebih buruk untuk 4 contoh numerik. Pada 4 contoh numerik tersebut, metode heuristik usulan memiliki biaya distribusi lebih besar dengan nilai rata-rata sebesar  $(0.22 + 5.80 + 1.86 + 0.81)/4 = 2,17\%$ .

Pada perbandingan metode heuristik usulan dibandingkan dengan metode heuristik lain yang digunakan oleh Jawahar & Balaji (2009), maka metode heuristik usulan menghasilkan solusi yang lebih baik pada 3 contoh numerik, menghasilkan solusi yang sama untuk 3 contoh numerik, dan menghasilkan solusi yang lebih buruk hanya pada 1 contoh numerik saja. Pada 3 contoh numerik dimana metode heuristik usulan menghasilkan solusi yang lebih baik, metode heuristik usulan memiliki biaya distribusi lebih kecil dengan nilai rata-rata sebesar  $(4,32+0,05+2,48)/3 = 2,28\%$ . Jika dibandingkan untuk semua kasus, maka metode heuristik usulan memiliki biaya distribusi lebih kecil dengan nilai rata-rata sebesar  $(4,32-0,49+0,05+2,48)/4 = 1,59\%$ .

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan perbandingan yang telah dilakukan, maka metode heuristik usulan dari Srirangacharyulu & Srinivas (2017) memiliki performansi lebih baik dibandingkan metode heuristik lain yang digunakan oleh Jawahar & Balaji (2009). Metode heuristik usulan memiliki biaya distribusi lebih kecil dengan nilai rata-rata sebesar 1,59%.

Metode heuristik usulan adalah metode yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam menyelesaikan permasalahan 2FCTP karena perhitungannya yang cukup sederhana dan membutuhkan waktu perhitungan yang cukup singkat, serta menghasilkan solusi yang baik. Pada penelitian lanjutan, dapat dilakukan dengan pengujian performansi metode heuristik usulan tersebut pada

tahapan lebih lanjut, artinya melakukan pengujian metode heuristik usulan pada contoh-contoh numerik yang lebih beragam dan jumlah contoh numerik yang jauh lebih banyak.

## Daftar Pustaka

- Adlakha, V., Kowalski, K., Vemuganti, R. R., & Lev, B. (2007). More-for-less algorithm for fixed-charge transportation problems. *Omega*, 35(1), 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.03.001>
- Antony Arokia Durai Raj, K., & Rajendran, C. (2012). A genetic algorithm for solving the fixed-charge transportation model: Two-stage problem. *Computers and Operations Research*, 39(9), 2016–2032. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.020>
- Balaji, A. N., & Jawahar, N. (2010). A Simulated Annealing Algorithm for a two-stage fixed charge distribution problem of a Supply Chain. *International Journal of Operational Research*, 7(2), 192–215. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2010.030803>
- Calvete, H. I., Galé, C., Iranzo, J. A., & Toth, P. (2018). A matheuristic for the two-stage fixed-charge transportation problem. *Computers and Operations Research*, 95, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.007>
- Cosma, O., Danciulescu, D., & Pop, P. C. (2019). On the Two-Stage Transportation Problem with Fixed Charge for Opening the Distribution Centers. *IEEE Access*, 7, 113684–113698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936095>
- Cosma, O., Pop, P. C., & Danciulescu, D. (2020). A Parallel Algorithm for Solving a Two-Stage Fixed-Charge Transportation Problem. *Informatica (Netherlands)*, 31(4), 681–706. <https://doi.org/10.15388/20-INFOR432>
- Cosma, O., Pop, P. C., & Sabo, C. (2020). An efficient hybrid genetic approach for solving the two-stage supply chain network design problem with fixed costs. *Mathematics*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/MATH8050712>
- Diaby, M. (1991). Successive linear approximation procedure for generalized fixed-charge transportation problems. *Journal of the Operational Research Society*, 42(11), 991–1001. <https://doi.org/10.1057/jors.1991.189>
- Ekşioğlu, S. D., & Jin, M. (2006). Cross-facility production and transportation planning problem with perishable inventory. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3982 LNCS(May 2006), 708–717. [https://doi.org/10.1007/11751595\\_75](https://doi.org/10.1007/11751595_75)
- Hong, J., Diabat, A., Panicker, V. V., & Rajagopalan, S. (2018). A two-stage supply chain problem with fixed costs: An ant colony optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 204, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.019>
- Jawahar, N., & Balaji, A. N. (2009). A genetic algorithm for the two-stage supply chain distribution problem associated with a fixed charge. In *European*

**Commented [RMH13]:** Reviewer B: Dibagian kesimpulan tidak boleh menyebut Tabel dan menampilkan Tabel. bagian ini mestinya berisi specific findings yg didapatkan dari penelitian dan penjelasan ttg arah penelitian lanjutan

**Commented [RMH14R13]:** Tanggapan: sudah diperbaiki dan diperjelas, tabel sudah dipindahkan ke bagian sebelumnya.

- Journal of Operational Research* (Vol. 194, Issue 2). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.005>
- Panicker, V. V., Vanga, R., & Sridharan, R. (2013). Ant colony optimisation algorithm for distribution-allocation problem in a two-stage supply chain with a fixed transportation charge. *International Journal of Production Research*, 51(3), 698–717.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2012.658118>
- Schaffer, J. R., & O'Leary, D. E. (1989). Use of penalties in a branch and bound procedure for the fixed charge transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 43(3), 305–312.  
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90229-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90229-4)
- Srirangacharyulu, B., & Srinivas, K. (2017). A Heuristic Method for the two-stage Supply Chain Distribution Problem with Fixed Charge. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 5(5), 100–104.  
<http://iraj.in>
- Sun, M., Aronson, J. E., McKeown, P. G., & Drinka, D. (1998). A tabu search heuristic procedure for the fixed charge transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2–3), 441–456.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00284-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00284-1)
- Yang, L., & Liu, L. (2007). Fuzzy fixed charge solid transportation problem and algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 7(3), 879–889.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2005.11.011>