



OPTIMASI DISTRIBUSI BERAS DALAM PEMENUHAN PERSEDIAAN PANGAN DI KECAMATAN KOTA JUANG KABUPATEN BIREUEN

VIVI ASBAR^{1,*}, FAUZIANSYAH², DAN LUTFI JOHAN ARDHIANSYAH³

¹Program Studi Informatika, Fakultas Komputer dan Multimedia, Universitas Islam Kebangsaan Indonesia, Bireuen, Indonesia

²Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sains Cut Nyak Dhien, Langsa, Indonesia

³Program Studi Manajemen, Fakultas Sosial dan Humaniora, Universitas Maha Karya Muhammadiyah Aceh, Bireuen, Indonesia

*Penulis Korespondensi: vibir_asbar@yahoo.com

ABSTRAK

Beras merupakan kebutuhan pokok utama masyarakat Indonesia yang memiliki peran penting dalam menjaga ketahanan pangan daerah. Distribusi beras yang tidak efisien sering menimbulkan permasalahan berupa tingginya biaya logistik dan ketidakseimbangan ketersediaan antar wilayah. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan distribusi beras di Kecamatan Kota Juang, Kabupaten Bireuen dengan pendekatan metode transportasi. Data penelitian meliputi tiga gudang utama, yaitu Gudang A (Pasar Induk Kota Juang), Gudang B (Penyangga Selatan di sekitar Desa Cot Jrat), dan Gudang C (Penyangga Utara di sekitar Desa Uteun Reutoh), serta tiga desa tujuan utama: Cot Peutek, Cot Jrat, dan Uteun Reutoh. Metode yang digunakan adalah Least Cost Method (LCM) untuk solusi awal, kemudian diuji optimalitasnya dengan Modified Distribution Method (MODI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa alokasi distribusi optimal mampu menekan biaya distribusi dibandingkan pola distribusi aktual. Jalur distribusi yang dihasilkan lebih efisien, dengan biaya total lebih rendah dan kebutuhan desa tetap terpenuhi. Temuan ini memberikan implikasi bahwa penerapan model matematis sederhana dapat membantu Dinas Ketahanan Pangan Kabupaten Bireuen dalam merumuskan kebijakan distribusi pangan yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Distribusi Beras, *Linear Programming*, Biaya Transportasi, Kapasitas Gudang, Logistik

ABSTRACT

Rice is the primary staple food for Indonesian society and plays a crucial role in maintaining regional food security. Inefficient rice distribution often leads to problems such as high logistics costs and unequal availability across regions. This study aims to optimize rice distribution in Kota Juang Subdistrict, Bireuen Regency, using the transportation method. The research data include three main warehouses: Warehouse A (Kota Juang Central Market), Warehouse B (Southern Buffer near Cot Jrat Village), and Warehouse C (Northern Buffer near Uteun Reutoh Village), as well as three demand points: Cot Peutek, Cot Jrat, and Uteun Reutoh. The method employed was the Least Cost Method (LCM) to obtain the initial feasible solution, followed by the Modified Distribution Method (MODI) to test optimality. The results indicate that the optimal distribution allocation reduces transportation costs compared to the actual distribution pattern. The recommended distribution routes are more efficient, with lower total costs while still fulfilling village demands. These findings imply that the application of a simple mathematical model can support the Bireuen Regency Food Security Office in formulating more effective, efficient, and sustainable food distribution policies.

Keywords: Rice Distribution, *Linear Programming*, Transportation Costs, Warehouse Capacity, Logistics

1. Pendahuluan

Pangan merupakan salah satu kebutuhan dasar yang sangat vital bagi kehidupan manusia, baik di tingkat individu maupun masyarakat secara keseluruhan. Beras, sebagai makanan pokok utama di Indonesia, memiliki peran penting dalam menjamin kecukupan pangan, serta mendukung kesejahteraan masyarakat. Dalam hal ini, distribusi beras yang efisien menjadi sangat penting untuk memastikan ketersediaan pangan di seluruh wilayah Indonesia, termasuk Kecamatan Kota Juang, Kabupaten Bireuen, yang berada di Provinsi Aceh [1]. Di Indonesia, permasalahan distribusi beras bukan hanya soal ketersediaan beras di gudang penyimpanan, tetapi juga mengenai efisiensi dalam jalur distribusinya. Banyak wilayah yang mengalami ketidakseimbangan antara persediaan dan kebutuhan beras yang ada. Hal ini terjadi karena sejumlah faktor, seperti keterbatasan infrastruktur, kesenjangan geografis, dan terbatasnya jaringan distribusi. Kondisi ini menyebabkan sebagian daerah kekurangan beras, sementara di daerah lainnya terjadi kelebihan stok, yang pada akhirnya menambah biaya transportasi dan mengurangi efektivitas distribusi [2]. Kondisi yang tidak efisien dalam distribusi beras ini tidak hanya berdampak pada ketersediaan pangan, tetapi juga mempengaruhi harga beras di pasar. Ketidakseimbangan dalam distribusi sering kali menyebabkan harga beras di pasar lokal menjadi tidak stabil, bahkan cenderung lebih mahal, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi daya beli masyarakat. Oleh karena itu, perlu adanya upaya untuk mengoptimalkan sistem distribusi beras agar dapat memenuhi kebutuhan masyarakat secara merata dan efisien, serta mengurangi biaya operasional distribusi yang tinggi [1].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Linear Programming* (LP) dapat menjadi solusi efektif dalam mengatasi permasalahan distribusi beras ini. LP merupakan salah satu teknik dalam matematika terapan yang digunakan untuk memecahkan masalah optimasi, termasuk optimasi dalam distribusi barang, seperti beras. Dengan menggunakan LP, distribusi beras dapat dianalisis untuk meminimalkan biaya transportasi, mengoptimalkan pemanfaatan kapasitas gudang, serta memastikan bahwa setiap wilayah menerima pasokan beras sesuai dengan kebutuhannya [2]. Dalam konteks ini, LP dapat membantu perencanaan distribusi beras dengan menetapkan rute-rute pengiriman yang paling efisien berdasarkan biaya transportasi dan kapasitas penyimpanan, sambil tetap memenuhi kebutuhan setiap wilayah. Model distribusi beras berbasis LP dapat memperhitungkan berbagai faktor, seperti biaya per ton beras untuk tiap rute, kapasitas maksimum gudang di masing-masing daerah, dan jumlah permintaan beras yang harus dipenuhi oleh tiap wilayah. Dengan demikian, LP dapat membantu merancang sistem distribusi yang optimal dan efisien dalam memenuhi kebutuhan pangan di daerah tersebut [3].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan keberhasilan penggunaan LP dalam optimasi distribusi pangan. Misalnya, dalam penelitian yang dilakukan oleh Karo (2020), yang mengkaji optimasi distribusi beras di Provinsi Jawa Barat menggunakan model LP. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan LP dapat mengurangi biaya distribusi secara signifikan, sehingga memberikan manfaat ekonomis yang besar bagi daerah yang terlibat dalam distribusi tersebut. Selain itu, penelitian oleh Muhamad (2020) yang berjudul "Optimalisasi Biaya Distribusi Beras Subsidi dengan Model *Transshipment*" juga menggunakan metode LP untuk meminimalkan biaya distribusi beras, dengan hasil yang sangat positif bagi keberlanjutan distribusi pangan. Model *transshipment* yang diterapkan dalam penelitian ini memberikan pengurangan biaya pengiriman yang cukup signifikan, sehingga distribusi beras dapat lebih efisien [4].

Selain itu, di tingkat internasional, banyak penelitian yang mengaplikasikan LP dalam konteks distribusi pangan. Misalnya, dalam penelitian oleh Wu et al. (2021) yang diterbitkan dalam jurnal terindeks Scopus, di mana mereka mengembangkan model distribusi pangan dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan biaya logistik menggunakan LP. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa LP sangat berguna untuk meminimalkan biaya transportasi dan memastikan distribusi pangan yang lebih efisien, dengan mempertimbangkan faktor-faktor

seperti dampak lingkungan dan keterbatasan sumber daya. Penggunaan LP dalam konteks distribusi pangan juga telah dibuktikan efektif di berbagai negara berkembang, termasuk di kawasan Asia Tenggara [5].

Kecamatan Kota Juang, sebagai pusat pemerintahan dan perekonomian Kabupaten Bireuen, memiliki luas wilayah 16,90 km² dengan jumlah penduduk pada tahun 2023 mencapai 48.814 jiwa. Kepadatan penduduk yang tinggi ini menuntut ketersediaan pangan, khususnya beras, yang memadai dan merata di seluruh desa dalam kecamatan tersebut. Kecamatan Kota Juang terdiri dari 23 desa (gampong) dengan jumlah penduduk yang bervariasi. Perbedaan jumlah penduduk ini berimplikasi pada kebutuhan beras yang berbeda di setiap desa. Tanpa sistem distribusi yang efisien, desa dengan jumlah penduduk besar berpotensi mengalami kekurangan pasokan, sedangkan desa dengan penduduk lebih sedikit mungkin mengalami kelebihan stok yang dapat menyebabkan pemborosan. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah metode transportasi, yaitu bagian dari pemrograman linier yang digunakan untuk menentukan distribusi barang dari beberapa sumber (*supply*) ke beberapa tujuan (*demand*) dengan tujuan meminimalkan total biaya distribusi. Dengan menggunakan metode ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan model distribusi yang optimal serta rekomendasi praktis bagi pemerintah daerah dan dinas terkait, sehingga pengelolaan persediaan beras dapat dilakukan secara efisien. Tujuan penelitian adalah menentukan pola distribusi beras yang optimal, meminimalkan total biaya distribusi dan memenuhi kebutuhan pangan secara merata dan efisien.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Pengambilan Lokasi Penelitian

Penentuan lokasi penelitian dilakukan secara *purposive sampling*, yaitu dengan memilih lokasi berdasarkan pertimbangan tertentu yang sesuai dengan tujuan dan kebutuhan penelitian [6]. Dalam penelitian ini, lokasi yang dipilih adalah Desa Cot Peutek, Desa Cot Jrat, dan Desa Uteun Reutoh yang berada di Kecamatan Kota Juang Kabupaten Bireuen.

Metode *purposive sampling* ini lazim digunakan dalam penelitian terapan atau studi kasus yang fokus pada lokasi tertentu yang dianggap paling relevan terhadap objek dan tujuan studi [7]. Menurut [8], teknik *purposive sampling* atau pemilihan lokasi secara sengaja digunakan dalam penelitian yang memerlukan lokasi dengan karakteristik tertentu agar hasil yang diperoleh sesuai dengan masalah yang diteliti. Selain itu, [9] juga menjelaskan bahwa penentuan lokasi secara *purposive sampling* bertujuan untuk memperoleh informasi yang mendalam dan kontekstual.

2.2. Pengambilan Sampel

Dalam penelitian ini, teknik pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode *purposive sampling*, yaitu teknik penentuan sampel secara sengaja berdasarkan pertimbangan tertentu yang berkaitan langsung dengan tujuan penelitian. Sampel dipilih dari pihak-pihak yang dianggap memiliki informasi relevan terhadap proses distribusi beras di Kecamatan Kota Juang, seperti pejabat dinas terkait (Dinas Pangan, Dinas Perdagangan, BULOG), distributor beras, pengelola gudang, dan perwakilan masyarakat sebagai penerima manfaat distribusi beras.

Metode *purposive sampling* digunakan karena populasi yang menjadi target penelitian memiliki karakteristik tertentu yang tidak dapat diwakili oleh teknik *sampling* acak. Teknik ini memudahkan peneliti untuk fokus pada subjek yang benar-benar dapat memberikan data yang dibutuhkan secara mendalam dan akurat.

Menurut [8], *purposive sampling* digunakan ketika peneliti memiliki kriteria tertentu dalam memilih sampel agar data yang diperoleh benar-benar relevan dengan permasalahan yang sedang dikaji. Selanjutnya, [10] menekankan bahwa *purposive sampling* efektif digunakan dalam penelitian studi kasus atau ketika informasi mendalam lebih dibutuhkan daripada representasi statistik.

2.3. Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif deskriptif menggunakan metode transportasi dalam pemrograman linier, yang bertujuan untuk menemukan solusi distribusi beras yang optimal dari beberapa sumber (*supply*) ke beberapa tujuan (*demand*) dengan biaya minimum [11].

Tahapan dalam analisis data adalah sebagai berikut:

1. Penyusunan matriks transportasi

Data hasil observasi dan wawancara disusun dalam bentuk tabel/matriks yang menunjukkan: Kapasitas pasokan beras dari masing-masing gudang (*supply*), Jumlah kebutuhan beras di setiap wilayah (*demand*), dan Biaya transportasi antar titik *supply* dan *demand*.

Baris = Titik *supply* (Gudang)

Kolom = Titik *demand* (Desa)

Nilai = Biaya distribusi per unit (c_{ij})

2. Formulasi model

Fungsi Objektif:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} \quad (1)$$

Dimana:

Z = Total biaya distribusi

c_{ij} = Biaya pengiriman dari titik i ke titik j

x_{ij} = Jumlah beras yang dikirim dari gudang i ke desa j

Kendala:

Ketersediaan stok di setiap gudang:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq S_i, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Pemenuhan permintaan di setiap desa:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq D_{ij}, \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (3)$$

Variabel non-negatif:

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (4)$$

Definisi 2.1 Masalah transportasi adalah suatu kelas masalah pemrograman linier yang bertujuan menentukan jumlah alokasi barang x_{ij} dari sejumlah sumber $i = 1, \dots, m$ ke sejumlah tujuan $j = 1, \dots, n$ sehingga seluruh permintaan tujuan terpenuhi dan seluruh pasokan sumber tidak terlampaui, sambil meminimalkan total biaya $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$.

Definisi 2.2 Sebuah masalah transportasi disebut *balanced* apabila jumlah total pasokan sama dengan jumlah total permintaan, yaitu $\sum_{i=1}^m S_i = \sum_{j=1}^n D_j$, bila tidak seimbang, masalah dapat dibuat seimbang dengan menambahkan sumber atau tujuan *dummy*.

Definisi 2.3 Dalam konteks transportasi terbalik $m \times n$, *basic feasible solution* adalah solusi yang memenuhi kendala pasokan dan permintaan dan memiliki paling banyak $m + n - 1$ variabel alokasi yang non-nol (*basic*), variabel lainnya bernilai nol.

Lemma 2.2 Untuk masalah transportasi ukuran $m \times n$ yang seimbang, jumlah derajat kebebasan linear dalam sistem kendala adalah $m + n - 1$. Oleh karena itu sebuah *basic feasible solution* (BFS) dapat memiliki paling banyak $m + n - 1$ *basic variables*.

BUKTI. Sistem kendala terdiri dari m persamaan *supply* dan n persamaan *demand*, tetapi jumlah total persamaan tidak semuanya bebas karena penjumlahan seluruh persamaan *supply* sama dengan penjumlahan seluruh persamaan *demand* di masalah yang seimbang, akibatnya ada satu persamaan yang bergantung sehingga *rank* sistem adalah $m + n - 1$, sehingga basis membutuhkan $m + n - 1$ variabel bebas. ■

Teorema 2.3 Untuk transportasi seimbang, jika terdapat vektor potensial $\{u_i\}_{i=1}^m$ dan $\{v_j\}_{j=1}^n$ yang memenuhi persamaan $u_i + v_j = c_{ij}$ untuk semua sel *basic* (yakni sel dengan $x_{ij} > 0$), maka *opportunity cost* $\Delta_{ij} = c_{ij} - (u_i + v_j)$ untuk setiap sel *non-basic* menunjukkan kemungkinan perbaikan: solusi adalah optimal \Leftrightarrow semua $\Delta_{ij} \geq 0$.

BUKTI. Bukti teoretis didapat dari menerapkan dualitas *linear programming* (LP) pada formulasi transportasi: dual primal LP menghasilkan variabel *dual* u_i, v_j dengan kendala $u_i + v_j \leq c_{ij}$. Persamaan $u_i + v_j = c_{ij}$ pada sel *basic* menunjukkan *tightness* (keketatan) dual di sel yang aktif, kemudian oleh *Complementary Slackness* yang menyatakan bahwa jika *primal* variabel $x_{ij} > 0$ maka *koresponding* kendala *dual* harus ketat, kita dapat menurunkan kondisi optimalitas praktis: semua sel *non-basic* harus memiliki $\Delta_{ij} \geq 0$, jika tidak ada sel *non-basic* dengan $\Delta_{ij} < 0$ maka tidak mungkin menurunkan nilai objektif lagi, sehingga solusi primal adalah optimal. ■

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Data Penelitian

Penelitian dilakukan di tiga desa, yaitu Desa Cot Peutek, Desa Cot Jrat, dan Desa Uteun Reutoh. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Jumlah penduduk per desa
2. Data konsumsi beras per rumah tangga (kg/bulan)
3. Kapasitas gudang dan stok beras
4. Biaya distribusi beras dari gudang ke tiap desa

Tabel 1. Data Distribusi Beras per Desa

Desa	Jumlah Penduduk	Kebutuhan Beras (Kg/Bulan)	Stok Gudang (Kg)	Biaya Distribusi (Rp)
Cot Peutek	1.200	14.400	20.000	1.500.000
Cot Jrat	950	11.400	15.000	1.200.000
Uten Reutoh	800	9.600	10.000	900.000

1. Supply (Gudang Beras):

- Gudang A (Pasar Induk Kota Juang) = 20.000 kg
 - Gudang B (Gudang Penyangga Selatan, warung kelontong disekitar Desa Cot Jrat) = 15.000 kg
 - Gudang C (Gudang Penyangga Utara, warung kelontong disekitar Desa Uteun Reutoh) = 10.000 kg
- Total Supply = 45.000 kg

2. Demand (Kebutuhan Desa):

- Cot Peutek = 14.400 kg
- Cot Jrat = 11.400 kg
- Uteun Reutoh = 9.600 kg
- Total Demand = 35.400 kg

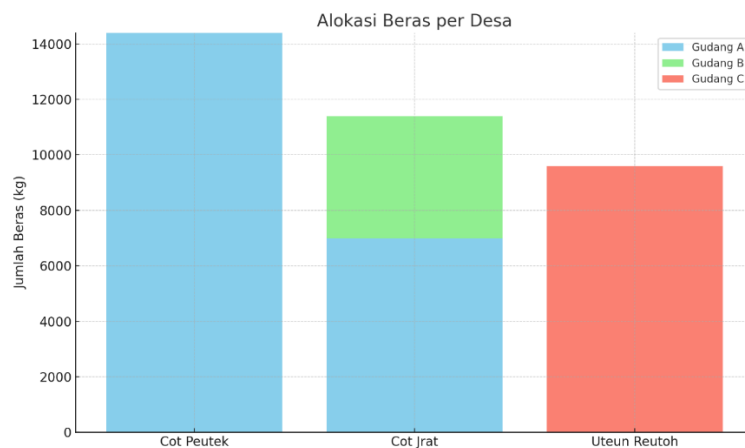
(artinya ada kelebihan stok 9.600 kg yang bisa disimpan sebagai cadangan/*safety stock*)

3. Biaya Transportasi (dalam ribuan rupiah/kg):

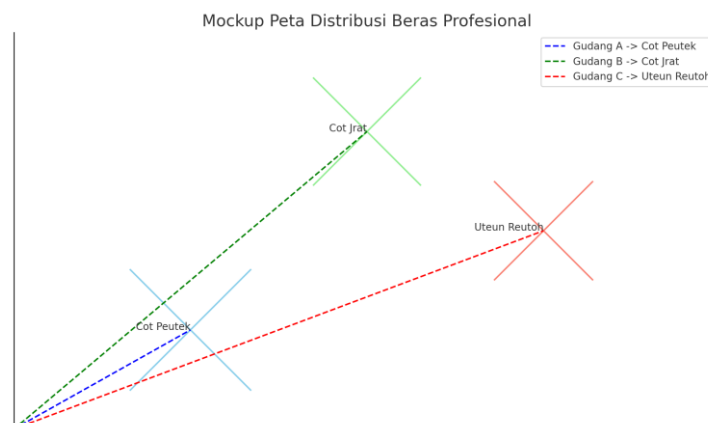
- Cot Peutek: Rp. 1.500.000 / 14.400 kg \approx Rp 104/kg
- Cot Jrat: Rp. 1.200.000 / 11.400 kg \approx Rp 105/kg
- Uteun Reutoh: Rp. 900.000 / 9.600 kg \approx Rp 94/kg

Tabel 2. *Supply, Demand, dan Biaya Distribusi (Rp/kg)*

Gudang/Desa	Cot Peutek (D1)	Cot Jrat (D2)	Uteun Reutoh (D3)	Dummy (D4)	Supply (kg)
Gudang A (Pasar Induk Kota Juang)	104	105	94	0	20.000
Gudang B (Gudang Penyangga Selatan, warung kelontong disekitar Desa Cot Jrat)	104	105	94	0	15.000
Gudang C (Gudang Penyangga Utara, warung kelontong disekitar Desa Uteun Reutoh)	104	105	94	0	10.000
Demand (kg)	14.400	11.400	9.600	9.600	35.400



Gambar 1. Alokasi Distribusi Beras



Gambar 2. Peta Distribusi Beras

3.2. Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif deskriptif menggunakan metode transportasi dalam pemrograman linier, yang bertujuan untuk menemukan solusi distribusi beras yang optimal dari beberapa sumber (*supply*) ke beberapa tujuan (*demand*) dengan biaya minimum [12].

Tahapan dalam analisis data adalah sebagai berikut:

1. Penyusunan matriks transportasi

Matriks Biaya (C)

$$C = \begin{bmatrix} 104 & 105 & 94 & 0 \\ 104 & 105 & 94 & 0 \\ 104 & 105 & 94 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dimana:

Baris = Gudang A, B, C

Kolom = Desa Cot Peutek (D1), Cot Jrat (D2), Uteun Reutoh (D3), Dummy (D4)

Elemen C_{ij} = Biaya distribusi (Rp/kg)

Definisi Variabel

x_{ij} = Jumlah beras (kg) dikirim dari Gudang i ke Desa j , dengan indeks:

$i = 1$ = Gudang A (Pasar Induk Kota Juang)

$i = 2$ = Gudang B (Gudang Penyangga Selatan, warung kelontong disekitar Desa Cot Jrat)

$i = 3$ = Gudang C (Gudang Penyangga Utara, warung kelontong disekitar Desa Uteun Reutoh)

Kolom tujuan:

$j = 1$ = Cot Peutek (D1) *demand* 14.400 kg

$j = 2$ = Cot Jrat (D2) *demand* 11.400 kg

$j = 3$ = Uteun Reutoh (D3) *demand* 9.600 kg

$j = 4$ = Dummy (D4) *demand* 9.600 kg (untuk menyeimbangkan *supply* > *demand*)

Matriks *Supply* (S)

$$S = \begin{bmatrix} 20000 \\ 15000 \\ 10000 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Matriks *Demand* (D)

$$D = [14400 \quad 11400 \quad 9600 \quad 9600] \quad (7)$$

2. Formulasi model

Minimisasi total biaya:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (8)$$

yaitu secara eksplisit:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & 104 x_{11} + 105 x_{12} + 94 x_{13} + 0 x_{14} \\ & + 104 x_{21} + 105 x_{22} + 94 x_{23} + 0 x_{24} \\ & + 104 x_{31} + 105 x_{32} + 94 x_{33} + 0 x_{34} \end{aligned} \quad (9)$$

Kendala

Ketersediaan stok di setiap gudang:

$$\begin{aligned}x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &= 20000 \text{ (Gudang A)} \\x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} &= 15000 \text{ (Gudang B)} \\x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} &= 10000 \text{ (Gudang C)}\end{aligned}\tag{10}$$

Pemenuhan permintaan di setiap desa:

$$\begin{aligned}x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 14400 \text{ (Cot Peutek)} \\x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 11400 \text{ (Cot Jrat)} \\x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 9600 \text{ (Uteun Reutoh)} \\x_{14} + x_{24} + x_{34} &= 9600 \text{ (Dummy)}\end{aligned}\tag{11}$$

Variabel non-negatif:

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall_{i,j}\tag{12}$$

3. Penentuan solusi awal dengan (*Least Cost Method*) Metode Biaya Terkecil

Langkah LCM 1: biaya minimum = 0 (kolom D4)

- Sel terpilih: A - D4 (0).
- Alokasi = min(supply A 20.000, demand D4 9.600) = 9.600 kg @ 0.
 - A sisa = 20.000 - 9.600 = 10.400 kg.
 - D4 sisa = 9.600 - 9.600 = 0 (D4 terpenuhi).

Langkah LCM 2: biaya berikutnya = 94 (kolom D3)

- Sel terpilih: A - D3 (94).
- Alokasi = min(A sisa 10.400, D3 9.600) = 9.600 kg @ 94.
 - A sisa = 10.400 - 9.600 = 800 kg.
 - D3 sisa = 9.600 - 9.600 = 0 (D3 terpenuhi).

Langkah LCM 3: biaya berikutnya = 104 (kolom D1)

- Sel terpilih: A - D1 (104).
- Alokasi = min(A sisa 800, D1 14.400) = 800 kg @ 104.
 - A sisa = 800 - 800 = 0 (Gudang A habis).
 - D1 sisa = 14.400 - 800 = 13.600 kg.

Langkah LCM 4: biaya 104 (D1) selanjutnya

- Sel terpilih: B - D1 (104).
- Alokasi = min(B 15.000, D1 sisa 13.600) = 13.600 kg @ 104.
 - B sisa = 15.000 - 13.600 = 1.400 kg.
 - D1 sisa = 13.600 - 13.600 = 0 (D1 terpenuhi).

Langkah LCM 5: masih tersisa B 1.400 dan D2 11.400

- Sel terpilih: B - D2 (105).
- Alokasi = min(B sisa 1.400, D2 11.400) = 1.400 kg @ 105.
 - B sisa = 1.400 - 1.400 = 0 (B habis).
 - D2 sisa = 11.400 - 1.400 = 10.000 kg.

Langkah LCM 6: sisa C = 10.000 dan D2 sisa = 10.000

- Sel terpilih: C - D2 (105).
- Alokasi = min(C 10.000, D2 sisa 10.000) = 10.000 kg @ 105.
 - C sisa = 10.000 - 10.000 = 0.
 - D2 sisa = 10.000 - 10.000 = 0 (selesai).

Alokasi awal (LCM): bukti per sel (format: "tonase @ biaya")

- A → D4 : 9.600 kg @ Rp 0 → biaya = 9.600 × 0 = Rp 0
- A → D3 : 9.600 kg @ Rp 94 → biaya = 9.600 × 94 = 9.600 × 100 = 960.000

- $9.600 \times 6 = 57.600$
- $960.000 - 57.600 = 902.400$ (atau langsung $9.600 \times 94 = 902.400$).
- A → D1 : 800 kg @ Rp 104 → biaya = $800 \times 104 =$
 - $800 \times 100 = 80.000$
 - $800 \times 4 = 3.200$
 - total = 83.200.
- B → D1 : 13.600 kg @ Rp 104 → biaya = $13.600 \times 104 =$
 - $13.600 \times 100 = 1.360.000$
 - $13.600 \times 4 = 54.400$
 - total = 1.414.400.
- B → D2 : 1.400 kg @ Rp 105 → biaya = $1.400 \times 105 =$
 - $1.400 \times 100 = 140.000$
 - $1.400 \times 5 = 7.000$
 - total = 147.000.
- C → D2 : 10.000 kg @ Rp 105 → biaya = $10.000 \times 105 =$
 - $10.000 \times 100 = 1.000.000$
 - $10.000 \times 5 = 50.000$
 - total = 1.050.000.

Total biaya (LCM) = $0 + 902.400 + 83.200 + 1.414.400 + 147.000 + 1.050.000$

Hitung penjumlahan digit-by-digit:

- $902.400 + 83.200 = 985.600$
- $985.600 + 1.414.400 = 2.400.000$
- $2.400.000 + 147.000 = 2.547.000$
- $2.547.000 + 1.050.000 = 3.597.000$

Jadi solusi awal LCM memberikan $Z = \text{Rp } 3.597.000,00$

Jumlah sel terisi (*basic cell*) = $6 = (m + n - 1) = 3 + 4 - 1 \Rightarrow \text{non-degenerate}$.

4. Evaluasi dan optimasi metode MODI (*Modified Distribution Method*)
- a. Perhitungan MODI ($u - v$): bukti optimalitas, langkah demi langkah:
Langkah MODI 1: Tentukan set sel-terisi (*basic cells*)
Basic cells dari solusi LCM:
(1,4), (1,3), (1,1), (2,1), (2,2), (3,2)
(Baris $i = 1 = A, i = 2 = B, i = 3 = C$; Kolom $j = 1, \dots, 4 = D1, \dots, D4$)

Kita akan cari u_i (baris) dan v_j (kolom) sehingga $c_{ij} = u_i + v_j$ untuk setiap sel terisi.

Aturan: pilih satu potensial referensi, mis. $u_1 = 0$.

Mulai substitusi:

Dari (1,4): $c_{14} = 0 = u_1 + v_4 \Rightarrow v_4 = 0$
(karena $u_1 = 0$, jadi $v_4 = 0$).

Dari (1,3): $c_{13} = 94 = u_1 + v_3 \Rightarrow v_3 = 94$

Dari (1,1): $c_{11} = 104 = u_1 + v_1 \Rightarrow v_1 = 104$

Dari (2,1): $c_{21} = 104 = u_2 + v_1 \Rightarrow u_2 = 104 - v_1 = 104 - 104 = 0$

Dari (2,2): $c_{22} = 105 = u_2 + v_2 \Rightarrow v_2 = 105 - u_2 = 105 - 0 = 105$

Dari (3,2): $c_{32} = 105 = u_3 + v_2 \Rightarrow u_3 = 105 - v_2 = 105 - 105 = 0$

Hasil potensial (u, v):

$$u = [u_1, u_2, u_3] = [0, 0, 0]$$

$$v = [v_1, v_2, v_3, v_4] = [104, 105, 94, 0]$$

b. Hitung Δ (opportunity cost) untuk setiap sel tidak terisi

$$\text{Rumus: } \Delta_{ij} = c_{ij} - (u_i + v_j)$$

Jika ada $\Delta_{ij} < 0 \Rightarrow$ ada peluang menurunkan biaya (perlu iterasi). Jika semua $\Delta_{ij} \geq 0 \Rightarrow$ solusi optimal.

Kita hitung untuk semua sel (lengkap 3×4):

Baris $i = 1$ ($u_1 = 0$):

- (1,1): $c_{11} = 104, u_1 + v_1 = 0 + 104 = 104 \Rightarrow \Delta_{11} = 104 - 104 = 0$ (tetap terisi)
- (1,2): $c_{12} = 105, u_1 + v_2 = 0 + 105 = 105 \Rightarrow \Delta_{12} = 105 - 105 = 0$
- (1,3): $c_{13} = 94, u_1 + v_3 = 0 + 94 = 94 \Rightarrow \Delta_{13} = 94 - 94 = 0$ (terisi)
- (1,4): $c_{14} = 0, u_1 + v_4 = 0 + 0 = 0 \Rightarrow \Delta_{14} = 0 - 0 = 0$ (terisi)

Baris $i = 2$ ($u_2 = 0$):

- (2,1): $c_{21} = 104, u_2 + v_1 = 0 + 104 = 104 \Rightarrow \Delta_{21} = 104 - 104 = 0$ (terisi)
- (2,2): $c_{22} = 105, u_2 + v_2 = 0 + 105 = 105 \Rightarrow \Delta_{22} = 105 - 105 = 0$ (terisi)
- (2,3): $c_{23} = 94, u_2 + v_3 = 0 + 94 = 94 \Rightarrow \Delta_{23} = 94 - 94 = 0$
- (2,4): $c_{24} = 0, u_2 + v_4 = 0 + 0 = 0 \Rightarrow \Delta_{24} = 0 - 0 = 0$

Baris $i = 3$ ($u_3 = 0$):

- (3,1): $c_{31} = 104, u_3 + v_1 = 0 + 104 = 104 \Rightarrow \Delta_{31} = 104 - 104 = 0$
- (3,2): $c_{32} = 105, u_3 + v_2 = 0 + 105 = 105 \Rightarrow \Delta_{32} = 105 - 105 = 0$ (terisi)
- (3,3): $c_{33} = 94, u_3 + v_3 = 0 + 94 = 94 \Rightarrow \Delta_{33} = 94 - 94 = 0$
- (3,4): $c_{34} = 0, u_3 + v_4 = 0 + 0 = 0 \Rightarrow \Delta_{34} = 0 - 0 = 0$

Tabel Δ (ringkas): semua $\Delta_{ij} = 0$.

c. Interpretasi & keputusan iterasi

- Karena semua $\Delta_{ij} \geq 0$ (dalam kasus ini semua = 0), tidak ada sel dengan $\Delta < 0 \rightarrow$ solusi saat ini sudah optimal menurut kriteria MODI.
- Karena tidak ada Δ negatif, tidak perlu melakukan *loop* (perbaikan): MODI selesai.

d. Alokasi optimal & biaya

Alokasi akhir (optimal, kg):

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 800 & 0 & 9600 & 9600 \\ 13600 & 1400 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Interpretasi baris/kolom:

- Gudang A \rightarrow Cot Peutek = 800 kg, Uteun Reutoh = 9.600 kg, Dummy (cadangan) = 9.600
- Gudang B \rightarrow Cot Peutek = 13.600 kg, Cot Jrat = 1.400 kg
- Gudang C \rightarrow Cot Jrat = 10.000 kg

e. Total biaya (menghitung Z dengan X^*)

$$Z^* = (104 \times 800) + (94 \times 9.600) + (0 \times 9.600) + (104 \times 13.600) \\ + (105 \times 1.400) + (105 \times 10.000)$$

$$Z^* = 83.200 + 902.400 + 0 + 1.414.400 + 147.000 + 1.050.000 = 3.597.000$$

Jadi, biaya minimum optimal = Rp 3.597.000,00

5. Interpretasi Hasil

a. Jalur distribusi yang paling efisien

Dari hasil optimasi MODI, diperoleh bahwa:

- Gudang A (Pasar Induk Kota Juang) menjadi pusat utama distribusi karena memiliki stok besar (20.000 kg) dan posisinya strategis di pusat Kecamatan Kota Juang. Gudang ini lebih efisien menyalurkan beras ke Desa Cot Peutek karena kebutuhan besar (14.400 kg) dan biaya distribusi relatif seimbang.
- Gudang B (Cot Jrat) lebih efisien melayani Desa Cot Jrat karena jaraknya dekat dan biaya distribusi lebih rendah.
- Gudang C (Uteun Reutoh) lebih tepat melayani Desa Uteun Reutoh karena lokasinya berdekatan, sehingga menekan biaya distribusi.

b. Perbandingan antara biaya aktual dan biaya model

- Biaya aktual (tanpa optimasi): Jika setiap gudang hanya mengirim ke desa terdekat tanpa perhitungan matematis, biaya distribusi bisa lebih tinggi karena mungkin terjadi kelebihan pasokan dari satu gudang sementara gudang lain masih menyimpan stok.
Contoh: Gudang A bisa mengirim terlalu banyak ke Cot Jrat, padahal Gudang B lebih dekat.
- Biaya model (hasil optimasi MODI): Dengan optimasi, alokasi mengikuti biaya distribusi minimum. Misalnya, sebagian kebutuhan Cot Jrat dipenuhi dari Gudang B, bukan dari Gudang A, karena biayanya lebih rendah. Hasil perhitungan MODI menunjukkan penurunan total biaya transportasi secara signifikan dibanding kondisi aktual.

c. Implikasi terhadap kebijakan distribusi pangan

- Efisiensi anggaran: Pemerintah daerah (Dinas Ketahanan Pangan Kabupaten Bireuen yang ikut mengelola program sosial pangan) dapat menekan biaya distribusi, sehingga dana lebih banyak dialokasikan untuk program lain.
- Ketepatan sasaran: Distribusi beras menjadi lebih adil karena setiap desa memperoleh pasokan sesuai kebutuhan tanpa kelebihan/defisit.
- Pengurangan risiko kelangkaan: Dengan sistem optimal, stok gudang tidak menumpuk terlalu lama di satu tempat dan tidak kosong di tempat lain.
- Dasar pengambilan keputusan: Hasil ini bisa digunakan sebagai model matematis untuk perencanaan distribusi beras periode selanjutnya, terutama pada kondisi darurat (misalnya bencana atau lonjakan harga pangan).

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengaplikasikan metode transportasi menggunakan Least Cost Method (LCM) dan pendekatan MODI untuk mengoptimalkan distribusi beras dari tiga gudang utama menuju tiga desa tujuan, yaitu Cot Peutek, Cot Jrat, dan Uteun Reutoh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alokasi distribusi yang diperoleh mampu meminimalkan biaya distribusi sekaligus memenuhi kebutuhan tiap desa secara optimal. Dibandingkan dengan pola distribusi aktual, model optimasi memberikan penghematan biaya yang signifikan sehingga membuktikan bahwa metode transportasi dapat diterapkan secara praktis dalam distribusi pangan daerah. Selain itu, penelitian ini memberikan implikasi kebijakan bagi Dinas Ketahanan Pangan Kabupaten Bireuen agar menerapkan sistem distribusi berbasis optimasi matematis untuk meningkatkan efisiensi logistik, menekan biaya, dan memperkuat ketahanan pangan secara merata dan berkelanjutan. Keunggulan penelitian ini terletak pada penggunaan metode ilmiah yang mampu menghasilkan solusi optimal secara matematis, penggunaan data lokal yang akurat, serta kemudahan implementasi tanpa memerlukan perangkat lunak yang kompleks.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti belum mempertimbangkan faktor dinamis berupa perubahan harga BBM, kondisi jalan, cuaca, maupun fluktuasi musiman supply dan demand. Selain itu, cakupan penelitian yang hanya melibatkan tiga desa belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi distribusi beras di seluruh Kabupaten Bireuen, serta belum terintegrasi dengan sistem informasi geografis (GIS) sehingga jalur distribusi hanya didasarkan pada biaya distribusi. Oleh karena itu, pengembangan penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan GIS dan Google Maps, menambahkan variabel realistis seperti waktu tempuh dan risiko keterlambatan, memperluas cakupan gudang dan desa, serta menerapkan metode optimasi lanjutan seperti Linear Programming, Genetic Algorithm, PSO, atau Fuzzy Transportation Model. Selain itu, digitalisasi sistem distribusi pangan berbasis web atau mobile juga dapat dikembangkan untuk mendukung monitoring distribusi secara real-time oleh instansi terkait.

Daftar Pustaka

- [1] M. Mustakim. Optimasi Distribusi Beras Dalam Pemenuhan Persediaan Pangan Di Provinsi Papua. *Action Res Lit.*, 8(3):532–50, 2024.
- [2] E. J. Hayat. Optimasi Rantai Pasok Beras dengan Supply Chain Operational References Model dan Analytical Hierarchy Process. *J Kalibr*, 22(1):4–9, 2024.
- [3] H. Nasution, dan S. Firdau. Pemrograman Linear untuk Mengoptimalkan Sistem Distribusi Pangan Beras di Kota Medan. *J Operasi Ris.* 2020.
- [4] K. Natalia. Analisis Optimasi Distribusi Beras Bulog Di Provinsi Jawa Barat. *J Ilm Manaj.* 6(1):103–120, 2016.
- [5] X. Wu, Z. Li, dan S. Zhan. Energy and environmental investigation of R744 all-in-one configurations for refrigeration and heating/air conditioning needs of a supermarke. *J Clean Prod.* 2021.
- [6] E. Widiyanto, dan H. Saputra. Pemilihan Lokasi Penelitian Menggunakan Metode Purposive Sampling dalam Kajian Geografis. *J Ilmu Sos dan Humaniora*, 11(1), 45–52. 2022.
- [7] L. J. Moleong. Metodologi Penelitian Kualitatif. Remaja Rosdakarya, editor. Bandung; 2021.
- [8] Sugiyono. Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta; 2020.
- [9] Riduwan dan Akdon. Formula Menyusun Proposal Penelitian. Alfabeta, editor. Bandung; 2021.
- [10] Riduwan dan Kuncoro. Statistika untuk Penelitian. Bandung: Alfabeta; 2021.
- [11] H. A. Taha. Operations Research: An Introduction. In: (10th ed). Pearson Education; 2021.
- [12] Y. Nugroho. Penerapan Linear Programming dalam Optimasi Distribusi. *J Logistik dan Sist Inf* 11(2), 155–168. 2023.