

Optimasi Persediaan Beras Menggunakan *Integer Linear Programming* untuk Mengatasi Ketidakpastian Pasokan Studi Kasus: Bulog Gorontalo

Sriwati M. Daud¹, Hasan S. Panigoro², Armayani Aرسال³, Djihad Wungguli⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Gorontalo
Jl. Jend. Sudirman No. 6, Dulalowo Tim., Kec. Kota Tengah, Kota Gorontalo, Gorontalo, 96128
Email: sriwatimdaud02@gmail.com¹, hspanigoro@ung.ac.id², armayaniarsal@ung.ac.id³,
djihad@ung.ac.id⁴

Korespondensi penulis : sriwatimdaud02@gmail.com

Submitted : 22 Maret 2025

Accepted : 18 Juli 2025

Published : 24 Juli 2025

Abstrak

Perum BULOG Gorontalo berperan dalam penyediaan beras untuk menjamin ketahanan pangan. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan biaya persediaan yang meliputi pemesanan dan penyimpanan beras guna menghindari *overstock* yang meningkatkan biaya, dengan mempertimbangkan ketidakpastian pasokan. Metode yang digunakan adalah *Integer Linear Programming* (ILP) untuk menentukan keputusan pemesanan dan penyimpanan yang optimal, serta analisis sensitivitas untuk mengevaluasi dampak perubahan parameter terhadap solusi optimal. Hasil optimasi menunjukkan bahwa pendekatan ILP berhasil menurunkan biaya persediaan sebesar 17,6% per tahun, dari Rp208.423.972,00 menjadi Rp171.813.600,00. Analisis sensitivitas mengungkap bahwa perubahan permintaan dan ketidakpastian pasokan sebesar 10% dapat menyebabkan solusi optimal menjadi tidak feasible, sementara perubahan kapasitas pasokan dan biaya pembelian memiliki dampak yang lebih fleksibel terhadap hasil optimasi.

Kata Kunci: Analisis sensitivitas, *Integer Linear Programming*, optimasi, persediaan.

Abstract

Perum BULOG Gorontalo plays a crucial role in rice supply to ensure food security. This study aims to optimize rice ordering and storage to prevent overstock, which increases costs, while considering supply uncertainty. The method used is Integer Linear Programming (ILP) to determine optimal ordering and storage decisions, along with sensitivity analysis to evaluate the impact of parameter changes on the optimal solution. The optimization results indicate that the ILP approach successfully reduces inventory costs by 17.6% per year, from Rp208,423,972 to Rp171,813,600. Sensitivity analysis reveals that a 10% change in demand and supply

uncertainty can render the optimal solution infeasible, whereas changes in supply capacity and purchasing costs have a more flexible impact on optimization results.

Keywords: Inventory, Integer Linear Programming, optimization, sensitivitas analysis.

1. Pendahuluan

Indonesia ialah salah satu negara agraris terbesar di dunia dalam hal memproduksi produk pertanian, salah satunya adalah padi. Petani memprioritaskan padi karena dapat menghasilkan beras dan merupakan tanaman pangan utama yang dikonsumsi oleh sebagian besar penduduk Indonesia [1]. Produksi padi di Gorontalo pada tahun 2023 mencapai sekitar 251,43 ribu ton, meningkat 4,70% dibandingkan tahun sebelumnya. Namun, sebaran produksi sepanjang tahun tampak tidak menentu, dengan produksi tertinggi terjadi di bulan Januari dan terendah di bulan Oktober. Ketidakmenentuan ini disebabkan oleh berbagai faktor seperti perbedaan waktu tanam antar wilayah, perubahan pola cuaca yang memengaruhi musim tanam dan panen, serta kendala teknis di lapangan seperti ketersediaan sarana produksi dan serangan hama. Faktor-faktor tersebut menyebabkan hasil panen tidak tersebar merata sepanjang tahun, sehingga berdampak langsung pada kestabilan pasokan beras di wilayah Gorontalo [2]. Fluktuasi ini mencerminkan adanya ketidakpastian yang dapat mempengaruhi ketersediaan stok beras bagi Bulog. Oleh karena itu, Perum BULOG memiliki tanggung jawab untuk memastikan ketersediaan beras dan stabilitas harga. Dalam konteks ini, optimasi persediaan beras menjadi sangat penting untuk mengantisipasi ketidakpastian pasokan yang disebabkan oleh faktor eksternal seperti cuaca dan kebijakan pemerintah [3].

Pertumbuhan penduduk yang terus meningkat menyebabkan peningkatan permintaan terhadap beras. Beras selalu menjadi topik yang menarik dan kontroversial karena berkaitan dengan kebutuhan masyarakat Indonesia dan pasar dunia. Oleh karena itu, pemerintah perlu cepat tanggap dalam merespon parameter pasokan dan permintaan beras. Dengan mengetahui jumlah permintaan serta jumlah produksi dan pasokan yang tersedia, pemerintah dapat memantau dan menjaga ketersediaan beras untuk menjamin keamanan dan stabilitas harga [4]. Perubahan harga beras dan gandum seringkali menimbulkan kontroversi masyarakat, terutama ketika harga beras yang terlalu tinggi dan harga gandum yang terlalu rendah. Masyarakat umumnya mengharapkan pasokan serta harga beras yang stabil, selalu ada dengan harga pasar yang cukup terjangkau [5].

Persediaan adalah proses menentukan jumlah stok yang paling tepat dengan biaya terendah. Kebutuhan akan persediaan muncul dari ketidakpastian permintaan, ketidakpastian pemasok dan waktu pengiriman. Sedangkan tujuannya adalah untuk meningkatkan layanan pelanggan dan menyederhanakan proses produksi serta perencanaan untuk mengantisipasi kekurangan stok dan fluktuasi harga [6]. Ketidakpastian pasokan mengacu pada variabilitas yang tidak terduga dalam jumlah dan waktu kedatangan barang yang dipesan. Ketidakpastian ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan variabel eksternal dan internal yang mempengaruhi aksesibilitas dan distribusi beras. Ketidakpastian dalam pasokan ini dapat menyebabkan penundaan, pemutusan, atau kehilangan pasokan yang dapat mempengaruhi efisiensi distribusi dan ketersediaan beras di pasar [7].

Riset operasi adalah pendekatan ilmiah, terutama metode kuantitatif untuk menganalisis dan memecahkan masalah kompleks dalam sistem operasi dengan tujuan mencapai solusi optimal atau mendekati optimal. Dalam memahami masalah optimasi tersebut, matematika menyediakan alat untuk memecahkan masalah dengan cara yang

lebih efektif [8]. *Integer Linear Programming* (ILP) adalah salah satu metode dalam riset operasi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi, di mana semua variabel keputusan dibatasi hanya dapat bernilai bilangan bulat (integer). ILP merupakan bentuk khusus dari *Linear Programming* (LP), yang berfungsi untuk mencari nilai optimal (maksimum atau minimum) dari suatu fungsi tujuan linear, dengan mempertimbangkan serangkaian kendala (constraints) yang juga berbentuk linear. Dalam konteks riset operasi, ILP digunakan ketika keputusan yang diambil tidak dapat dibagi (seperti jumlah unit, orang, atau barang), sehingga pendekatan berbasis bilangan bulat menjadi sangat relevan. ILP sangat berguna dalam bidang logistik, manajemen persediaan, dan perencanaan produksi - termasuk dalam penelitian ini, yaitu optimasi persediaan beras di BULOG Gorontalo. Tujuan dari penggunaan *Integer Linear Programming* adalah untuk mengoptimalkan suatu fungsi tujuan, baik meminimalkan biaya atau memaksimalkan keuntungan dengan mempertimbangkan berbagai kendala yang ada. Fleksibilitas model *Integer Linear Programming* tersebut memungkinkan dilakukan penyesuaian secara dinamis, seperti menambah atau menghapus kendala (misalnya: menambah batasan gudang baru, perubahan biaya, atau ketidakpastian pasokan). Hal ini membuat ILP menjadi salah satu pendekatan yang adaptif terhadap perubahan kondisi riil di lapangan [9].

Beberapa penelitian terkait dengan optimasi persediaan telah memberikan kontribusi signifikan dalam bidang ini. Seperti, penelitian [10] menggunakan Metode Silver Meal Heuristic digunakan untuk mengurangi biaya persediaan beras secara keseluruhan di Bulog Sub Divre Ciamis, dengan fokus pada pengurangan biaya dan pengelolaan stok berdasarkan fluktuasi permintaan. Penelitian [11] menggunakan metode *Economic Order Quantity* juga digunakan untuk menentukan alur pengadaan beras di Bulog Divre Sulawesi Utara pada tahun 2022 dan menghitung biaya stok beras.

Penelitian dengan menggunakan metode *Integer Linear Programming* juga pernah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya di antaranya [12] untuk optimasi persediaan darah jenis trombosit di Unit Tranfusi Darah PMI Banyumas dan penelitian [13] yang memfokuskan pada optimasi keuntungan maksimal dari produksi getuk goreng. Penelitian-penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa metode *Integer Linear Programming* memiliki kemampuan yang baik dalam menyelesaikan permasalahan optimasi, khususnya dalam pengelolaan persediaan dan peningkatan keuntungan dalam bidang ekonomi. Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menerapkan metode *Integer Linear Programming* dalam mengoptimalkan persediaan beras di Bulog Gorontalo, khususnya dalam menghadapi ketidakpastian pasokan yang sering terjadi. Metode ini dipilih karena mampu memformulasikan berbagai kendala yang kompleks secara matematis, seperti keterbatasan kapasitas gudang, fluktuasi pasokan, serta pemenuhan permintaan masyarakat. Dengan bantuan *Software Lingo*, proses pemodelan dan penyelesaian masalah dapat dilakukan secara lebih efisien dan akurat, sehingga diharapkan menghasilkan solusi optimal dalam pengelolaan persediaan beras yang lebih efektif dan responsif terhadap kondisi pasokan yang tidak pasti.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, penyusunan model optimasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Integer Linear Programming* (ILP). Model ILP yang telah dirumuskan selanjutnya diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak Lingo. Penggunaan *software* Lingo dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam menyelesaikan permasalahan optimasi linear dan integer secara efisien. Lingo juga mampu menangani model dengan banyak variabel dan kendala secara cepat serta menyediakan fitur analisis sensitivitas yang berguna dalam mengevaluasi dampak perubahan parameter terhadap solusi optimal. Dengan demikian, bantuan software ini mempermudah proses perhitungan, mempercepat penyelesaian model, serta meningkatkan akurasi hasil yang diperoleh.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah primer yang mencakup periode Januari hingga Desember 2023, yang diperoleh dari Bulog Gorontalo. Data yang diperlukan meliputi data pasokan, permintaan, penyimpanan, kapasitas gudang, ketidakpastian pasokan dan lain-lain. Adapun metode yang digunakan dalam pembahasan ini adalah metode *Integer Linear Programming* dan pengolahan data dengan menggunakan analisis statistika, safety stock dan pendekatan aturan empiris (68%-95%-99.7%) dalam menentukan ketidakpastian pasokan serta analisis sensitivitas yang digunakan untuk memahami dampak dari perubahan parameter dalam *Integer Linear Programming* (ILP) terhadap solusi optimal yang telah diperoleh.

2.1 Analisis Statistika

Definisi 2.1 [14] Misalkan x adalah variabel acak diskrit dengan distribusi probabilitas $p(x)$. Rata-rata atau nilai harapan dari x dinyatakan sebagai berikut :

$$\mu = E(x) = \sum xp(x) \quad (1)$$

dimana elemen-elemen dijumlahkan untuk semua nilai dari variabel acak x .

Definisi 2.2 [14] Misalkan x adalah variabel acak diskrit dengan distribusi probabilitas $p(x)$ dan rata-rata (μ). Varians dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2] = \sum (x - \mu)^2 p(x) \quad (2)$$

Dimana penjumlahan dilakukan untuk semua nilai dari variabel acak x . Standar deviasi (σ) adalah akar kuadrat dari varians yang menggambarkan sebaran data dalam distribusi pasokan.

Pendekatan aturan empiris (68%-95%-99,7%) yang dijelaskan dalam buku Mendenhall (2012) yang menyatakan bahwa dalam distribusi normal:

- 1) Sekitar 68% dari rata-rata ($\mu \pm \sigma$)
- 2) Sekitar 95% dari rata-rata ($\mu \pm 2\sigma$)
- 3) Sekitar 99,7% dari rata-rata ($\mu \pm 3\sigma$).

Aturan ini digunakan untuk memahami seberapa besar ketidakpastian dalam pasokan dan menentukan batas stok aman untuk mengantisipasi variansi yang mungkin terjadi dalam konteks manajemen persediaan [14].

2.2 Persediaan Pengaman (*safety stock*)

Safety stock yaitu persediaan yang dibutuhkan untuk mengatasi ketidakpastian permintaan, dan *safety stock* adalah jumlah minimum persediaan yang harus ada untuk mengantisipasi ketidakpastian dalam permintaan atau gangguan pasokan akibat situasi yang tidak terduga [15]. Rumus *safety stock* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$SS = Z \cdot \sigma \cdot \sqrt{LT} \quad (3)$$

Dimana :

SS : *Safety stock*

Z : Nilai z , yang berkaitan dengan tingkat layanan yang diinginkan (dapat diperoleh dari tabel distribusi normal)

σ : Simpangan baku (standar deviasi)

LT : Lead time atau waktu yang diperlukan untuk mendapatkan pesanan baru.

2.3 Metode *Integer Linear Programming*

Secara umum, model masalah *Integer Linear Programming* dengan fungsi tujuan untuk meminimumkan dapat dibentuk dalam persamaan berikut:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Dimana :

Min : Menunjukkan bahwa tujuan dari model adalah *minimisasi* (pengurangan seminimal mungkin terhadap nilai fungsi tujuan.

Z : Nilai total dari fungsi tujuan yang ingin diminimalkan

$\sum_{j=1}^n$: Simbol penjumlahan dari indeks $j = 1$ sampai n ; artinya seluruh variabel keputusan x_j dijumlahkan berdasarkan bobot/koefisiennya.

c_j : Koefisien dari variabel keputusan x_j dalam fungsi tujuan mewakili nilai seperti biaya per unit, keuntungan, atau nilai lainnya tergantung konteks masalah.

x_j : Variabel keputusan ke- j yang nilainya akan dicari untuk meminimalkan Z ; bisa berupa jumlah barang yang diproduksi, dibeli, atau disimpan.

Kendala (4)

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (\leq, =, \geq) b_i$$

$$x_j \geq 0$$

x_j integer untuk beberapa atau untuk semua j

Dimana:

$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n$: Menunjukkan bahwa kendala bisa melibatkan banyak baris (i) dan banyak variabel (j), tergantung dari jumlah kendala dan variabel yang dimiliki model.

a_{ij} : Koefisien dari variabel x_j pada kendala ke- i ; merepresentasikan kontribusi atau hubungan antara variabel dan kendala tertentu.

x_j : Sama seperti sebelumnya, variabel keputusan ke- j .

$(\leq, =, \geq)$: Operator relasi dalam kendala. Tergantung kasusnya, bisa:

- \leq : kendala maksimum (misalnya kapasitas maksimum),
- $=$: kendala eksak (misalnya harus terpenuhi tepat),
- \geq : kendala minimum (misalnya batas minimum yang harus dicapai).

b_i : Sisi kanan dari kendala ke- i , yang merupakan batas atau kapasitas yang ditetapkan

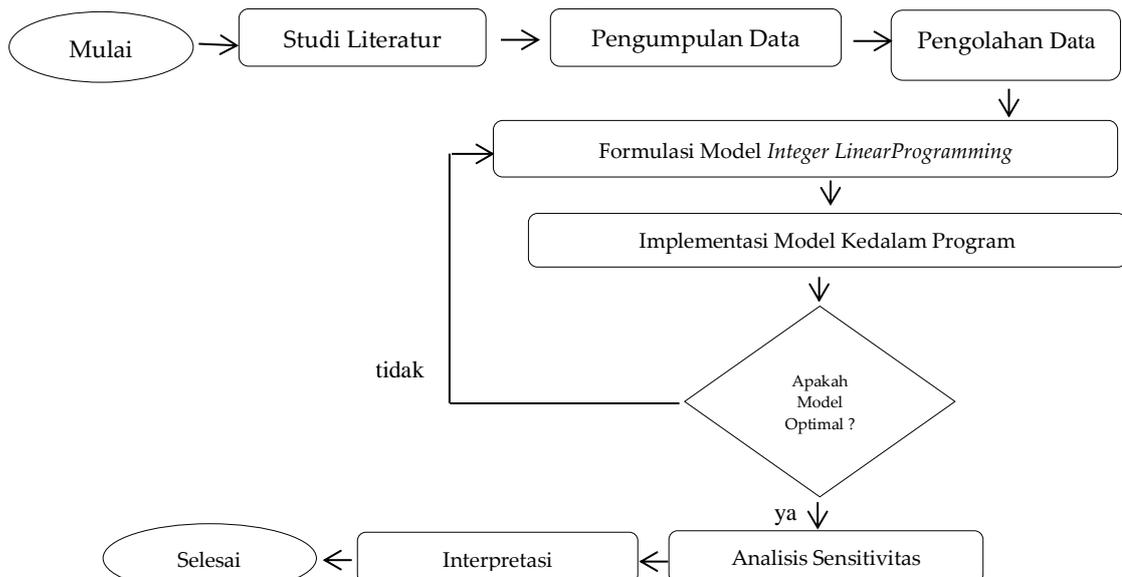
$x_j \geq 0$: Menyatakan bahwa semua variabel keputusan x_j harus bernilai nol atau lebih besar (tidak negatif), karena dalam banyak kasus seperti jumlah produk, barang, atau biaya tidak mungkin bernilai negatif.

2.4 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah proses evaluasi yang dilakukan setelah solusi optimal ditentukan (analisis pasca-optimal). Tujuannya adalah untuk memahami dampak dari perubahan parameter dalam integer Linear Programming (ILP) terhadap solusi optimal yang telah diperoleh [16]. Setelah permasalahan dalam Integer Linear Programming (ILP) terselesaikan dan menghasilkan solusi optimal, permasalahan tersebut secara umum dianggap selesai. Namun, dalam praktiknya kemungkinan muncul perubahan pada beberapa parameter dapat terjadi, seperti perubahan (penambahan atau pengurangan) batasan kapasitas, koefisien pada fungsi kendala, koefisien dalam fungsi tujuan, penambahan variabel baru, atau penambahan kendala baru. Perubahan-perubahan ini tentu akan memengaruhi solusi optimal yang telah diperoleh [17].

Apabila salah satu perubahan tersebut terjadi, metode optimasi seperti algoritma Simplex perlu diulang dari awal. Proses ini memakan waktu yang cukup lama karena perhitungan dilakukan kembali secara keseluruhan. Oleh karena itu, analisis sensitivitas sangat berguna untuk mengatasi masalah ini, karena memungkinkan evaluasi perubahan parameter tanpa harus memulai proses perhitungan dari awal, sebagaimana dijelaskan oleh [18].

Adapun tahapan analisis data dengan menggunakan metode *Integer Linear Programming* dapat digambarkan secara skematik pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Analisis

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Gambaran Data

Berdasarkan data yang diperoleh dari Bulog Gorontalo, diketahui bahwa pemerintah menetapkan harga beras perunit berdasarkan kondisi dan kualitas beras. Kenaikan permintaan dapat mendorong harga naik, sedangkan kelebihan pasokan dapat menurunkan harga.

Tabel 1. Biaya Pembelian Beras

| Bulan | Harga (Rp/Kg) |
|-----------|---------------|
| Januari | 10.600 |
| Februari | 10.800 |
| Maret | 11.800 |
| April | 12.300 |
| Mei | 12.300 |
| Juni | 12.300 |
| Juli | 13.520 |
| Agustus | 12.100 |
| September | 12.800 |
| Oktober | 11.600 |
| November | 13.100 |
| Desember | 13.200 |

(Sumber : Bulog Gorontalo)

Berikut adalah rincian biaya penyimpanan beras di masing-masing gudang yang tersedia di Bulog Gorontalo:

Tabel 2. Biaya Penyimpanan Beras

| Bulan | Gudang 1 (Rp/kg) | Gudang 2 (Rp/kg) | Gudang 3 (Rp/kg) |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Januari | 27.840 | 47.560 | 0 |
| Februari | 70.760 | 51.040 | 8.120 |
| Maret | 215.760 | 58.000 | 31.320 |
| April | 220.400 | 30.160 | 26.680 |
| Mei | 119.480 | 44.080 | 19.720 |
| Juni | 104.400 | 276.080 | 290.000 |
| Juli | 621.760 | 73.080 | 284.200 |
| Agustus | 3.248.000 | 533.600 | 490.800 |
| September | 2.436.000 | 580.000 | 344.520 |
| Oktober | 1.740.000 | 496.480 | 325.960 |
| November | 1.624.000 | 184.440 | 309.720 |
| Desember | 1.392.000 | 67.280 | 232.000 |

(Sumber : Bulog Gorontalo)

3.2 Pengolahan Data

1. Menentukan nilai *safety stock*

Penentuan *safety stock* (stok pengaman) dilakukan untuk mengantisipasi ketidakpastian pasokan yang dapat terjadi selama periode *lead time*. Dalam penelitian ini, digunakan nilai simpangan baku (σ) sebesar 150,99 kg yang diperoleh dari data historis fluktuasi pasokan, dan lead time (LT) selama 15 hari berdasarkan informasi operasional

Bulog. Tingkat layanan yang diinginkan adalah 95%, yang sesuai dengan nilai Z sebesar 1,65 berdasarkan tabel distribusi normal standar. Setelah semua data tersedia, perhitungan safety stock dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} SS &= Z \cdot \sigma \cdot \sqrt{LT} \\ SS &= 1.65 \cdot 150.99 \cdot \sqrt{15} \\ SS &= 249,1335 \cdot \sqrt{15} \\ SS &= 965 \text{ kg} \end{aligned} \quad (5)$$

Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak Bulog, diketahui bahwa waktu tunggu (*lead time*) pengadaan beras bervariasi antara 7 hari, 15 hari, hingga lebih dari satu bulan, tergantung pada kondisi logistik, cuaca, jarak pemasok, dan ketersediaan transportasi. Dalam penelitian ini, lead time 15 hari dipilih karena mewakili rata-rata waktu tunggu dalam kondisi normal, memberikan keseimbangan antara efisiensi dan mitigasi risiko. Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa safety stock yang dibutuhkan selama periode lead time adalah 965 kg, yang bertujuan untuk mengatasi ketidakpastian pasokan dan fluktuasi permintaan. Dengan adanya safety stock ini, Bulog dapat menjaga tingkat pelayanan 95% dan memastikan kelancaran distribusi beras ke wilayah yang membutuhkan.

2. Menentukan nilai ketidakpastian pasokan

a) Analisis scenario pasokan dari pemasok 1

Pada analisis skenario pasokan dari pemasok 1, dilakukan pendekatan statistik untuk memperkirakan ketidakpastian pasokan dengan menggunakan aturan *Empirical Rule* (aturan 68-95-99,7). Berdasarkan data historis pasokan bulanan dari pemasok 1, diperoleh nilai rata-rata (μ) sebesar 500 kg dan simpangan baku (σ) sebesar 24,49 kg. Dengan menggunakan aturan ini, diperoleh kisaran pasokan yang mungkin terjadi dalam tiga tingkat keyakinan.

1) Kondisi normal (68%)

$$\begin{aligned} 68\% &= (\mu \pm 1\sigma) \\ &= (500 - 1(24,49)) = 475,51 \text{ kg.} \\ &= (500 + 1(24,49)) = 524,49 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (6)$$

Berdasarkan aturan empiris pada 68% kemungkinan, pasokan beras yang tersedia akan berada dalam rentang 475, 51 kg hingga 524, 49 kg. Ini berarti bahwa, jika pasokan mengikuti distribusi normal.

2) Kondisi sedang (95%)

$$\begin{aligned} 95\% &= (\mu \pm 2\sigma) \\ &= (500 - 2(24,49)) = 451,02 \text{ kg} \\ &= (500 + 2(24,49)) = 548,98 \text{ kg} \end{aligned} \quad (7)$$

Berdasarkan aturan empiris pada 95% kemungkinan, pasokan beras yang tersedia akan berada dalam rentang 451, 02 kg hingga 548, 98 kg.

3) Kondisi ekstrim (99,7%)

$$\begin{aligned} 99,7\% &= (\mu \pm 3\sigma) \\ &= (500 - 3(24,49)) = 426,53 \text{ kg.} \\ &= (500 + 3(24,49)) = 573,47 \text{ kg} \end{aligned} \quad (8)$$

Berdasarkan aturan empiris 99,7% kemungkinan pasokan beras akan berada dalam rentang 426,53 kg hingga 573,47 kg.

b) Analisis scenario pasokan dari pemasok 2

Pada analisis skenario pasokan dari pemasok 2, dilakukan pendekatan statistik untuk memperkirakan ketidakpastian pasokan dengan menggunakan aturan *Empirical Rule* (aturan 68-95-99,7). Berdasarkan data historis pasokan bulanan dari pemasok 1, diperoleh nilai rata-rata (μ) sebesar 333,3 kg dan simpangan baku (σ) sebesar 31,78 kg. Dengan menggunakan aturan ini, diperoleh kisaran pasokan yang mungkin terjadi dalam tiga tingkat keyakinan.

1) Kondisi normal (68%)

$$\begin{aligned} 68\% &= (\mu \pm 1\sigma) & (9) \\ &= (333,3 - 1(31,78)) = 301,52 \text{ kg.} \\ &= (333,3 + 1(31,78)) = 365,08 \text{ kg} \end{aligned}$$

Dengan asumsi distribusi pasokan mengikuti distribusi normal, ada kemungkinan 68% bahwa pasokan beras yang diterima oleh Bulog Gorontalo akan berada dalam rentang 301,52 kg hingga 365,08 kg

2) Kondisi sedang (95%)

$$\begin{aligned} 95\% &= (\mu \pm 2\sigma) & (10) \\ &= (333,3 - 2(31,78)) = 269,74 \text{ kg.} \\ &= (333,3 + 2(31,78)) = 396,86 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Berdasarkan aturan empiris pada 95% kemungkinan, pasokan beras yang diterima oleh Bulog Gorontalo akan berada dalam rentang 269,74 kg hingga 396,86 kg.

3) Kondisi ekstrim (99,7%)

$$\begin{aligned} 99,7\% &= (\mu \pm 3\sigma) & (11) \\ &= (333,3 - 3(31,78)) = 237,96 \text{ kg.} \\ &= (333,3 + 3(31,78)) = 428,64 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Berdasarkan aturan empiris pada 99,7% kemungkinan, pasokan beras yang diterima oleh Bulog Gorontalo akan berada dalam rentang 237,96 kg hingga 428,64 kg.

Berdasarkan data Tabel 1 dan Tabel 2, maka dapat dibentuk model *Integer Linear Programming* berikut :

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= 10600x_{1,1} + 10800x_{1,2} + 11800x_{1,3} + 12300x_{1,4} + \\ &12300x_{1,5} + 12300x_{1,6} + 13520x_{1,7} + 12100x_{1,8} + 12800x_{1,9} + 11600x_{1,10} + \\ &13100x_{1,11} + 13200x_{1,12} + 10600x_{2,1} + 10800x_{2,2} + 11800x_{2,3} + 12300x_{2,4} + \\ &12300x_{2,6} + 12300x_{2,6} + 13520x_{2,7} + 12100x_{2,8} + 12800x_{2,9} + 11600x_{2,10} + \\ &13100x_{2,11} + 13200x_{2,12} + 27840y_{1,1} + 70760y_{1,2} + 215760y_{1,3} + 220400y_{1,4} + \\ &119480y_{1,5} + 104400y_{1,6} + 621760y_{1,7} + 3248000y_{1,8} + 2436000y_{1,9} + \\ &1740000y_{1,10} + 1624000y_{1,11} + 1392000y_{1,12} + 47560y_{2,1} + 51040y_{2,2} + \\ &58000y_{2,3} + 30160y_{2,4} + 44080y_{2,5} + 276080y_{2,6} + 73080y_{2,7} + 533600y_{2,8} + \\ &580000y_{2,9} + 496480y_{2,10} + 184440y_{2,11} + 67280y_{2,12} + 0y_{3,1} + 8120y_{3,2} + \\ &31320y_{3,3} + 26680y_{3,4} + 19720y_{3,5} + 290000y_{3,6} + 284200y_{3,7} + 490800y_{3,8} + \\ &344520y_{3,9} + 325960y_{3,10} + 309720y_{3,11} + 232000y_{3,12} \end{aligned} \quad (12)$$

Dimana :

Z : Total biaya yang ingin diminimalkan (biaya pembelian + biaya penyimpanan)
 $x_{i,t}$: Jumlah beras yang dibeli dari pemasok ke- i pada bulan ke- t .
 $y_{j,t}$: Jumlah beras yang disimpan di gudang ke- j pada bulan ke- t .

Kendala :

a) Permintaan beras

$$\begin{aligned} x_{1,1} + x_{2,1} &\geq 420; x_{1,2} + x_{2,2} \geq 259; x_{1,3} + x_{2,3} \geq 289; \\ x_{1,4} + x_{2,4} &\geq 9; x_{1,5} + x_{2,5} \geq 0; x_{1,6} + x_{2,6} \geq 20; \\ x_{1,7} + x_{1,7} &\geq 86; x_{1,7} + x_{2,8} \geq 307; x_{1,7} + x_{1,9} \geq 234; \\ x_{1,10} + x_{2,10} &\geq 264; x_{1,11} + x_{2,11} \geq 114; x_{1,12} + x_{2,12} \geq 461; \end{aligned} \quad (13)$$

b) Kapasitas gudang

$$\begin{aligned} y_{1,t} &\leq 8000 \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \\ y_{2,t} &\leq 1000 \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \\ y_{3,t} &\leq 1000 \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \end{aligned} \quad (14)$$

c) Kapasitas pasokan

- Pemasok 1

$$\begin{aligned} x_{1,1} &\leq 500; x_{1,2} \leq 480; x_{1,3} \leq 550; x_{1,4} \leq 450; x_{1,5} \leq 510; \\ x_{1,6} &\leq 500; x_{1,7} \leq 480; x_{1,8} \leq 510; x_{1,9} \leq 530; x_{1,10} \leq 490; \\ x_{1,11} &\leq 490; x_{1,12} \leq 510 \end{aligned} \quad (15)$$

- Pemasok 2

$$\begin{aligned} x_{2,1} &\leq 500; x_{2,2} \leq 480; x_{2,3} \leq 550; x_{2,4} \leq 450; x_{2,5} \leq 510; \\ x_{2,6} &\leq 500; x_{2,7} \leq 480; x_{2,8} \leq 510; x_{2,9} \leq 530; x_{2,10} \leq 490; \\ x_{2,11} &\leq 490; x_{2,12} \leq 510 \end{aligned} \quad (16)$$

d) Keseimbangan persediaan

$$\begin{aligned} y_{1,1} + y_{2,1} + y_{3,1} &= x_{1,1} + x_{2,1} - 420; \\ y_{1,2} + y_{2,2} + y_{3,2} &= x_{1,2} + x_{2,2} - 259; \\ y_{1,3} + y_{2,3} + y_{3,3} &= x_{1,3} + x_{2,3} - 289; \\ y_{1,4} + y_{2,4} + y_{3,4} &= x_{1,4} + x_{2,4} - 9; \\ y_{1,5} + y_{2,5} + y_{3,5} &= x_{1,5} + x_{2,5} - 0; \\ y_{1,6} + y_{2,6} + y_{3,6} &= x_{1,6} + x_{2,6} - 20; \\ y_{1,7} + y_{2,7} + y_{3,7} &= x_{1,7} + x_{2,7} - 86; \\ y_{1,8} + y_{2,8} + y_{3,8} &= x_{1,8} + x_{2,8} - 307; \\ y_{1,9} + y_{2,9} + y_{3,9} &= x_{1,9} + x_{2,9} - 234; \\ y_{1,10} + y_{2,10} + y_{3,10} &= x_{1,10} + x_{2,10} - 264; \\ y_{1,11} + y_{2,11} + y_{3,11} &= x_{1,11} + x_{2,11} - 114; \\ y_{1,12} + y_{2,12} + y_{3,12} &= x_{1,12} + x_{2,12} - 461 \end{aligned} \quad (17)$$

e) Persediaan Pengaman (*Safety stock*)

$$y_{j,t} \geq 965; \quad \forall j = \{1,2,3\}, \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \quad (18)$$

f) Ketidakpastian pasokan

1) Pemasok 1

• Kondisi normal 68%

$$\begin{aligned} x_{1,1} &\leq 500 \cdot 524.49; x_{1,2} \leq 480 \cdot 524.49; x_{1,3} \leq 550 \cdot 524.49; \\ x_{1,4} &\leq 450 \cdot 524.49; x_{1,5} \leq 510 \cdot 524.49; x_{1,6} \leq 500 \cdot 524.49; \\ x_{1,7} &\leq 480 \cdot 524.49; x_{1,8} \leq 510 \cdot 524.49; x_{1,9} \leq 530 \cdot 524.49; \end{aligned}$$

$$x_{1,10} \leq 490 \cdot 524.49; x_{1,11} \leq 490 \cdot 524.49; x_{1,12} \leq 510 \cdot 524.49 \quad (19)$$

- Kondisi sedang 95%

$$\begin{aligned} x_{1,1} &\leq 500 \cdot 548.98; x_{1,2} \leq 480 \cdot 548.98; x_{1,3} \leq 550 \cdot 548.98; \\ x_{1,4} &\leq 450 \cdot 548.98; x_{1,5} \leq 510 \cdot 548.98; x_{1,6} \leq 500 \cdot 548.98; \\ x_{1,7} &\leq 480 \cdot 548.98; x_{1,8} \leq 510 \cdot 548.98; x_{1,9} \leq 530 \cdot 548.98; \\ x_{1,10} &\leq 490 \cdot 548.98; x_{1,11} \leq 490 \cdot 548.98; x_{1,12} \leq 510 \cdot 548.98 \end{aligned} \quad (20)$$

- Kondisi ekstrim 99.7%

$$\begin{aligned} x_{1,1} &\leq 500 \cdot 573.447; x_{1,2} \leq 480 \cdot 573.447; x_{1,3} \leq 550 \cdot 573.447; \\ x_{1,4} &\leq 450 \cdot 573.447; x_{1,5} \leq 510 \cdot 573.447; x_{1,6} \leq 500 \cdot 573.447; \\ x_{1,7} &\leq 480 \cdot 573.447; x_{1,8} \leq 510 \cdot 573.447; x_{1,9} \leq 530 \cdot 573.447; \\ x_{1,10} &\leq 490 \cdot 573.447; x_{1,11} \leq 490 \cdot 573.447; x_{1,12} \leq 510 \cdot 573.447 \end{aligned} \quad (21)$$

2) Pemasok 2

- Kondisi normal 68%

$$\begin{aligned} x_{2,1} &\leq 312 \cdot 365.08; x_{2,2} \leq 335 \cdot 365.08; x_{2,3} \leq 330 \cdot 365.08; \\ x_{2,4} &\leq 300 \cdot 365.08; x_{2,5} \leq 340 \cdot 365.08; x_{2,6} \leq 320 \cdot 365.08; \\ x_{2,7} &\leq 325 \cdot 365.08; x_{2,8} \leq 400 \cdot 365.08; x_{2,9} \leq 308 \cdot 365.08; \\ x_{2,10} &\leq 400 \cdot 365.08; x_{2,11} \leq 320 \cdot 365.08; x_{2,12} \leq 310 \cdot 365.08; \end{aligned} \quad (22)$$

- Kondisi sedang 95%

$$\begin{aligned} x_{2,1} &\leq 312 \cdot 396.86; x_{2,2} \leq 335 \cdot 396.86; x_{2,3} \leq 330 \cdot 396.86; \\ x_{2,4} &\leq 300 \cdot 396.86; x_{2,5} \leq 340 \cdot 396.86; x_{2,6} \leq 320 \cdot 396.86; \\ x_{2,7} &\leq 325 \cdot 396.86; x_{2,8} \leq 400 \cdot 396.86; x_{2,9} \leq 308 \cdot 396.86; \\ x_{2,10} &\leq 400 \cdot 396.86; x_{2,11} \leq 320 \cdot 396.86; x_{2,12} \leq 310 \cdot 396.86; \end{aligned} \quad (23)$$

- Kondisi ekstrim 99.7%

$$\begin{aligned} x_{2,1} &\leq 312 \cdot 428.64; x_{2,2} \leq 335 \cdot 428.64; x_{2,3} \leq 330 \cdot 428.64; \\ x_{2,4} &\leq 300 \cdot 428.64; x_{2,5} \leq 340 \cdot 428.64; x_{2,6} \leq 320 \cdot 428.64; \\ x_{2,7} &\leq 325 \cdot 428.64; x_{2,8} \leq 400 \cdot 428.64; x_{2,9} \leq 308 \cdot 428.64; \\ x_{2,10} &\leq 400 \cdot 428.64; x_{2,11} \leq 320 \cdot 428.64; x_{2,12} \leq 310 \cdot 428.64; \end{aligned} \quad (24)$$

g) Non-negatif dan integer

$$x_{i,t} \geq 0 \in \mathbb{Z} \quad \forall i = \{1,2\}, \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \quad (25)$$

$$y_{j,t} \geq 0 \in \mathbb{Z} \quad \forall j = \{1,2,3\}, \quad \forall t = \{1,2, \dots, 12\} \quad (26)$$

Berdasarkan hasil optimasi yang dilakukan dengan metode *Integer Linear Programming* (ILP) menggunakan perangkat lunak LINGO, total biaya persediaan yang diperoleh untuk satu tahun di Bulog Gorontalo adalah sebesar Rp.171.813.600, yang mencakup biaya pembelian dan biaya penyimpanan. Sebelumnya, total biaya persediaan tercatat sebesar Rp208.423.972,00 [19], sehingga penerapan *Integer Linear Programming* (ILP) menghasilkan penghematan sebesar Rp. 36.610.372 atau sekitar 17.6%. Hasil ini menunjukkan bahwa model ILP mampu menciptakan efisiensi biaya yang signifikan dengan mengoptimalkan kombinasi pemesanan dan distribusi penyimpanan beras di setiap gudang. Informasi rinci terkait jumlah pemesanan beras dari masing-masing

pemasok dan jumlah penyimpanan di setiap gudang dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Banyaknya beras yang dipesan

| Variabel | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| Pemasok 1 | 510 | 480 | 448 | 450 | 510 | 37 | 86 | 207 | 234 | 264 | 114 | 510 |
| Pemasok 2 | 312 | 335 | 0 | 300 | 340 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 131 |

Tabel 4. Banyaknya beras yang disimpan

| Variabel | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| Gudang 1 | 392 | 556 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gudang 2 | 0 | 0 | 0 | 741 | 44 | 0 | 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 180 |
| Gudang 3 | 0 | 0 | 159 | 0 | 806 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.3 Analisis Sensitivitas

Dalam banyak praktik logistik, 10% dijadikan sebagai cadangan persediaan (*safety stock*) atau allowance untuk mengakomodasi potensi keterlambatan pengiriman, ketidaksesuaian jumlah pasokan, atau gangguan distribusi lainnya. Angka ini dipandang tidak terlalu kecil sehingga dapat mengurangi risiko kekurangan stok, namun juga tidak terlalu besar sehingga tetap menjaga efisiensi biaya dan kapasitas penyimpanan. Selain itu, dalam kondisi ketika data historis belum cukup tersedia, penggunaan 10% menjadi pendekatan heuristik yang diterima secara umum untuk menjaga keseimbangan antara efisiensi operasional dan manajemen risiko [20]. Sejalan dengan itu, analisis sensitivitas dalam penelitian ini dilakukan setelah menemukan solusi optimal, dengan menguji perubahan sebesar 10% pada setiap parameter utama untuk mengecek ketahanan model terhadap variasi data atau ketidakpastian lingkungan. Dengan demikian, pemilihan angka 10% bersifat rasional, konservatif, dan relevan baik dalam perencanaan persediaan maupun dalam proses evaluasi kestabilan model optimasi [21].

Pendekatan ini bertujuan untuk memahami sejauh mana solusi optimal tetap berlaku ketika terjadi variasi dalam parameter seperti kapasitas pasokan, permintaan, kapasitas gudang, biaya pembelian, biaya penyimpanan, stok pengaman (*safety stock*), serta tingkat ketidakpastian pasokan. Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan pada parameter utama, terutama permintaan dan ketidakpastian pasokan, memiliki dampak yang signifikan terhadap solusi optimal. Ketika kedua parameter ini mengalami kenaikan atau penurunan sebesar 10%, sistem tidak mampu menghasilkan solusi optimal, yang ditandai dengan nilai solusi yang menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi pada permintaan dan ketidakpastian pasokan secara langsung mempengaruhi keseimbangan dalam model.

Sementara itu, perubahan pada kapasitas pasokan dan biaya pembelian menunjukkan dinamika yang lebih fleksibel. Penurunan kapasitas pasokan justru meningkatkan solusi optimal, sedangkan kenaikan biaya pembelian juga berdampak pada peningkatan solusi optimal. Sebaliknya, perubahan kapasitas gudang memberikan

pengaruh yang berbeda, di mana peningkatan kapasitas tidak mempengaruhi solusi optimal, tetapi penurunan kapasitas gudang menyebabkan solusi optimal menjadi nol. Temuan ini menggaris bawahi pentingnya pengelolaan parameter-parameter utama dalam sistem optimasi agar dapat menjaga kinerja dan stabilitas dalam menghadapi kondisi yang berfluktuasi. Dengan melakukan analisis sensitivitas, pengambil keputusan dapat mengevaluasi ketahanan model dan merancang strategi yang lebih adaptif guna memastikan solusi optimal tetap efektif dalam berbagai skenario.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, disimpulkan bahwa model matematis yang digunakan untuk mengoptimalkan persediaan beras dengan mempertimbangkan ketidakpastian pasokan melibatkan beberapa variabel keputusan, seperti jumlah beras yang dibeli dari pemasok, jumlah yang disimpan, serta biaya-biaya yang terkait. Ketidakpastian pasokan diwakili oleh variabel acak yang mencerminkan fluktuasi dari masing-masing pemasok, sehingga memungkinkan penentuan jumlah persediaan optimal di setiap periode dengan tujuan untuk meminimalkan total biaya, termasuk biaya pembelian dan penyimpanan. Penerapan metode *Integer Linear Programming* (ILP) di Perum BULOG Gorontalo berhasil menurunkan total biaya persediaan dari Rp 208.423.972 menjadi Rp 171.813.600, yang berarti terdapat penghematan sebesar Rp 36.610.372 atau sekitar 17,6%.

Analisis sensitivitas terhadap model optimasi menunjukkan bahwa perubahan pada parameter utama, seperti permintaan, kapasitas pasokan, dan biaya penyimpanan, memiliki dampak signifikan terhadap solusi optimal. Kenaikan atau penurunan permintaan dan ketidakpastian pasokan sebesar 10% dapat menyebabkan solusi optimal menjadi nol, yang menunjukkan bahwa sistem tidak dapat beroperasi dengan baik dalam kondisi tersebut. Di sisi lain, perubahan dalam kapasitas pasokan dan biaya pembelian menunjukkan respons yang lebih adaptif, di mana penurunan kapasitas pasokan dapat meningkatkan solusi optimal. Temuan ini mengindikasikan bahwa model optimasi yang dikembangkan efektif dalam menanggapi perubahan kondisi dan memberikan pemahaman mengenai sensitivitas sistem terhadap faktor-faktor eksternal.

Adapun saran yang dapat dikembangkan berdasarkan penelitian ini yaitu untuk peneliti selanjutnya dapat mengembangkan model *Integer Linear Programming* yang tidak hanya mempertimbangkan biaya, tetapi juga aspek lain seperti waktu pengiriman, kualitas produk, dan dampak lingkungan untuk memberikan solusi yang lebih holistik serta memperkuat ketahanan model terhadap ketidakpastian yang lebih kompleks.

Daftar Pustaka

- [1] F. Abdullah, S. Imran, and A. Rauf, "Analisis Ketersediaan Beras di Kabupaten Gorontalo Selang Tahun 2021-2030," *AGRINESIA: Jurnal Ilmiah Agribisnis*, vol. 6, no. 3, pp. 187–197, 2022.
- [2] Badan Pusat Statistik Provinsi Gorontalo, "Luas Panen dan Produksi Padi di Provinsi Gorontalo, 2023 (Angka Tetap)," *Berita Resmi Statistik*, vol. 2023, no. 17, pp. 1–16, 2023.
- [3] S. Wijayanti, S. Candra, and H. Sarjono, "Analisis Persediaan Beras Nasional dalam Memenuhi Kebutuhan Beras Nasional pada Perusahaan Umum Bulog," vol. 12, no. 1,

- pp. 82–96, 2011.
- [4] A. Mardiana, S. Rauf, and S. M. Lestari, "Analisis Komoditi Beras di Provinsi Gorontalo," *SEIKO: Journal of Management & Business*, vol. 6, no. 1, pp. 42–47, 2023.
 - [5] A. Djama, R. Indriani, and A. Moonti, "Optimalisasi Manajemen Rantai Pasok Beras dalam Menjaga Ketahanan Pangan (Studi Kasus Perum Bulog Kantor Cabang Gorontalo)," *Media Agribisnis*, vol. 7, no. 1, pp. 107–115, 2023.
 - [6] Haslindah, A. S. Iriani, M. Ardi, and Zulkifli, "Penerapan Manajemen Persediaan dalam Mengantisipasi Kerugian Barang Dagangan di Toko Mega Jilbab," *Journal Manajemen dan Perbankan Syariah*, vol. 2, no. November, pp. 58–69, 2020.
 - [7] E. Badakhshan and P. Ball, "A Simulation-optimization Approach for Integrating Physical and Financial Flows in a Supply Chain Under Economic Uncertainty," *Operations Research Perspectives*, vol. 10, no. February, p. 100270, 2023.
 - [8] E. Safitri, S. Basriati, and H. Najmi, "Penerapan Metode Branch and Bound dalam Optimalisasi Produk Mebel (Studi Kasus: Toko Mebel di Jalan Marsan, Panam)," *Kubik: Jurnal Publikasi Ilmiah Matematika*, vol. 5, no. 1, pp. 43–53, 2020.
 - [9] S. Ismail, I. Djakaria, and D. Wungguli, "Optimasi Pendistribusian Produk Menggunakan Metode Integer Linear Programming (Studi Kasus: PT. Awet Sarana Sukses Gorontalo)," *Jurnal Riset dan Aplikasi Matematika (JRAM)*, vol. 5, no. 1, p. 68, 2021.
 - [10] M. Yetrina, Rifki Muhida, and Abu Bakri, "Penerapan Metode Silver Meal Heuristic untuk Minimasi Biaya Persediaan Bahan Baku Tahu," *Jurnal Teknologi*, vol. 13, no. 1, pp. 26–32, 2023.
 - [11] J. A. Palepong, A. E. Loho, and M. H. Montolalu, "Analisis Persediaan Beras Menggunakan Metode Economic Order Quantity pada Bulog Divisi Regional Sulawesi Utara," *Agri-Sosioekonomi*, vol. 20, no. 1, pp. 157–164, 2024.
 - [12] T. P. Adhiana, I. D. Febrianty, and A. A. Sibarani, "Optimization of Platelet-Type Blood Supply using Integer Programming Method," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2482, no. February, 2023.
 - [13] S. T. Lestari and Caturiyati, "Optimasi Model Integer Linear Programming pada Produksi Getuk Goreng menggunakan Algoritma B&B," *Jurnal Kajian dan Terapan Matematika*, vol. 9, no. 3, pp. 1–13, 2023.
 - [14] W. Mendenhall, *Introduction to Probability & Statistics*, Barbara M. University of Florida, Emeritus, 2009.
 - [15] B. N. Abdallah, N. F. Khairani, and M. Muqimuddin, "Analisis Kuantitas Pemesanan Beras dengan Mempertimbangkan Ketidakpastian Permintaan Menggunakan Metode Economic Order Quantity," *Jurnal Optimasi Teknik Industri (JOTI)*, vol. 5, no. 2, p. 72, 2023.
 - [16] I. Djakaria, F. B. Mohamad, and D. Wungguli, "Optimasi Trim Loss menggunakan Integer Linear Programming pada Cutting Stock Problem untuk Industri Meubel (Studi Kasus pada UD. Flybers)," *AKSIOMA: Jurnal Matematika dan Pendidikan Matematika*, vol. 12, no. 1, pp. 80–108, 2021.
 - [17] C. N. Rosyidi, N. S. Sulistiani, and P. W. Laksono, "A Mixed Integer Linear Programming Model of Order Allocation Involving Mass Customization Logistic Service (MCLS)," *CAUCHY: Jurnal Matematika Murni dan Aplikasi*, vol. 7, no. 3, pp.

- 474–482, 2022.
- [18] M. Ismail, N. Achmad, and S. L. Mahmud, “Analisis Sensitivitas dalam Optimasi Keuntungan Produksi Kue Ulang Tahun dengan Metode Branch and Bound,” *Euler : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains dan Teknologi*, vol. 10, no. 2, pp. 282–291, 2022.
- [19] BULOG, “Laporan Tahunan Perusahaan Umum BULOG (Perum BULOG) Tahun 2023,” pp. 1–430, 2023.
- [20] D. J. Pannell, *Sensitivity Analysis of Normative Economic Models: Theoretical Framework and Practical Strategies*, vol. 16, no. 2. 1997.
- [21] D. Bertsimas and A. Thiele, *A Robust Optimization Approach to Inventory Theory*, vol. 54, no. 1. 2006.