

Optimasi Persediaan Produk *Perishable* dengan Mempertimbangkan Penurunan Kualitas dan Emisi Karbon Studi Kasus Cabai

Lusi Mei Cahya Wulandari* dan Nyoman Sri Widari

Universitas Katolik Darma Cendika, Surabaya, Indonesia

*lusi.mei19@gmail.com

OPEN ACCESS

Citation: Lusi Mei Cahya Wulandari dan Nyoman Sri Widari. 2025. Optimasi Persediaan Produk *Perishable* dengan Mempertimbangkan Penurunan Kualitas dan Emisi Karbon: Studi Kasus Cabai. *Journal of Research and Technology* Vol. 11 No. 2 Desember 2025: Page 271–286.

Abstract

Perishable products have a limited shelf life, requiring specific methods to maintain their quality. The main challenge lies in determining the appropriate supply quantity before the product expires. This study aims to maximize profits by considering quality degradation. The model involves two inventory phases: the first phase stores cabai segar peppers, while the second phase stores cabai kering peppers. The supply comes from a single source—cabai segar peppers—which is used to meet two different types of demand. The process, referred to as the renewal process, is carried out through drying, which extends the product's shelf life. Leftover products from the first phase can be processed further through renewal. Additionally, the study incorporates carbon emission constraints during the storage of cabai segar peppers. Two scenarios are examined to represent real-world system conditions: the first scenario assumes stable demand, while the second assumes fluctuating demand. The results reveal significant differences between the two scenarios in terms of efficiency and adaptability. The first scenario is more cost-efficient due to its lower total costs, particularly in inventory costs (IDR 185,593 and IDR 204,784), and smaller inventory levels, making it suitable for stable demand. In contrast, the second scenario is more adaptable to fluctuating demand despite its higher total costs. Describe the problem faced in the research.

Keywords: Inventory Management, Quality Deterioration, Perishable Products, Renewal Process.

Abstrak

Produk perishable memiliki masa simpan terbatas, sehingga diperlukan metode tertentu untuk mempertahankan kualitasnya. Tantangan utamanya adalah menentukan jumlah pasokan yang dibutuhkan sebelum produk tersebut kedaluwarsa. Penelitian ini bertujuan memaksimalkan keuntungan dengan mempertimbangkan penurunan kualitas produk. Model yang digunakan melibatkan dua fase persediaan: fase pertama untuk menyimpan cabai segar, dan fase kedua untuk menyimpan cabai kering. Sumber pasokan

hanya berasal dari satu jenis, yaitu cabai segar, yang digunakan untuk memenuhi dua jenis permintaan berbeda. Proses yang disebut renewal process dilakukan melalui pengeringan, yang dapat memperpanjang masa simpan produk. Sisa produk dari fase pertama dapat diproses lebih lanjut melalui renewal. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan kendala emisi karbon selama penyimpanan cabai segar. Terdapat dua skenario yang merepresentasikan kondisi sistem nyata: skenario pertama dengan permintaan tetap dan skenario kedua dengan permintaan fluktuatif. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua skenario dalam hal efisiensi dan adaptabilitas. Skenario pertama lebih hemat biaya karena total biayanya lebih rendah, terutama pada biaya inventori (Rp 185.593 dan Rp 204.784), dan jumlah inventori lebih kecil, sehingga cocok untuk permintaan yang stabil. Sebaliknya, skenario kedua lebih adaptif terhadap permintaan yang fluktuatif meskipun total biayanya lebih tinggi.

Keywords: *Manajemen Inventori, Penurunan Kualitas, Produk Perishable, Proses Pembaruan.*

1. Pendahuluan

Manajemen persediaan untuk produk yang mudah rusak memiliki tantangan manajemen yang lebih rumit. Industri makanan yang memproduksi barang-barang mudah rusak dihadapkan pada permasalahan tentang bagaimana menentukan pasokan yang diperlukan sebelum produk habis masa pakainya. Produk yang mudah rusak memiliki masa pakai terbatas, menyebabkan penurunan kualitas dari waktu ke waktu. Kehandalan kualitas produk yang mudah rusak sangat dipengaruhi oleh seberapa lama dan kondisi suhu tempat penyimpanannya [1]. Ketika produk yang mudah rusak mencapai masa pakai akhirnya, nilainya akan menurun [2]. Penurunan kualitas ini terus berlanjut sampai produk tersebut tidak lagi layak untuk dikonsumsi [3]. Perubahan kualitas dari waktu ke waktu dapat mengakibatkan kerugian hingga 15% karena adanya makanan yang mudah rusak dan membusuk [4]. Kualitas produk yang mudah rusak merupakan satu aspek yang harus dipertimbangkan dalam rangkaian rantai pasokan [5]. Saat ini, konsumen lebih mengutamakan kualitas dan keamanan dari produk yang mudah rusak seperti sayuran, daging segar, ikan, dan produk susu. Tingkat kesegaran dari suatu produk akan berdampak pada nilai jual produk sayuran tersebut [6].

Penelitian [7] menunjukkan bahwa lebih dari separuh konsumen memeriksa tanggal kedaluwarsa sebelum membeli produk, yang menegaskan pentingnya pengelolaan kualitas dalam rantai pasok produk *perishable*. Untuk menjamin keamanan dan kualitas produk sekaligus mencapai kinerja ekonomi yang optimal, manajemen rantai pasok produk mudah rusak memerlukan komitmen pengendalian yang kuat [8]. Hampir seluruh produk hortikultura dan pangan segar, seperti buah, sayuran, dan daging, mengalami penurunan kualitas selama penyimpanan—dengan pengecualian terbatas seperti anggur dan keju—yang tercermin dalam

perubahan tekstur, rasa, warna, dan nilai gizi, di mana laju perubahan tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan penyimpanan, termasuk oksigen, kelembapan, cahaya, pertumbuhan mikroba, dan suhu [9]. Buah-buahan sebagai salah satu kategori utama produk *perishable* juga mengalami penurunan kandungan vitamin selama penyimpanan, sehingga memerlukan perlakuan tambahan untuk memperpanjang umur simpan dan menekan degradasi kualitas nutrisi [10]. Secara konseptual, kualitas sayuran segar berada pada tingkat maksimum ketika produk dijual segera setelah panen pada harga normal, dan nilai kualitas tersebut menurun secara progresif seiring berjalannya waktu hingga akhirnya mencapai nol ketika produk kehilangan nilai komersial akibat pembusukan.

Pada prakteknya, telah umum dilakukan metode-metode dalam mempertahankan kualitas produk *perishable*. Metode tersebut diantaranya dengan didinginkan, dikeringkan, dan digarami. Semakin rendah temperatur yang digunakan pada suatu *cold storage* akan memperpanjang *shelf life* produk [11]. Dengan penggunaan *cold storage* berdampak pada tingginya penggunaan energi yang dibutuhkan. Oleh karena itu, penggunaan energi secara tepat diperlukan dalam suatu rangkaian *cold chain*. Penentuan temperatur pada *cold storage* merupakan trade off antara kualitas produk dan biaya energi yang akan ditimbulkan. Dengan tujuan untuk pemeliharaan kualitas produk [12].

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa proses pengolahan dapat digunakan sebagai strategi untuk memperpanjang umur simpan produk *perishable*. [4] menunjukkan bahwa proses penggaraman mampu memperpanjang umur simpan sawi, khususnya ketika pasokan berada pada tingkat yang tinggi, sehingga sawi segar dapat diawetkan terlebih dahulu melalui penggaraman sebelum digunakan sebagai bahan baku kimchi. Selain penggaraman, proses pengeringan juga banyak digunakan sebagai metode untuk memperpanjang umur simpan produk pangan, tidak hanya dengan mengurangi volume dan berat produk, tetapi juga dengan menekan laju deteriorasi kualitas [13]. Salah satu teknik yang banyak dimanfaatkan dalam industri pangan adalah *spray drying*, meskipun metode ini menghadapi kendala pada produk dengan kandungan gula tinggi karena sifat lengket yang dapat menyebabkan pengendapan dan penurunan kualitas produk [14]. Oleh karena itu, kondisi proses pengeringan perlu dioptimalkan untuk memperoleh hasil yang efektif dan produk yang dapat diterima secara kualitas. [15] menunjukkan bahwa pada produksi bubuk minuman kedelai, suhu udara pengering merupakan faktor kunci yang memengaruhi sebagian besar parameter kualitas produk, yang menegaskan pentingnya pengendalian proses dalam pengolahan produk *perishable*.

Berbagai penelitian telah mengkaji manajemen persediaan untuk produk *perishable*, termasuk penentuan kuantitas persediaan optimal dalam sistem single-vendor–multi-buyer [11]. Mengingat produk *perishable* memiliki umur simpan yang terbatas, sebagian besar studi memfokuskan pemodelannya pada percepatan perputaran persediaan melalui strategi harga dan promosi untuk meningkatkan tingkat penjualan. Sejumlah penelitian lain mengintegrasikan keputusan produksi dan distribusi serta menunjukkan bahwa kinerja sistem persediaan sangat bergantung pada tingkat kesegaran produk saat didistribusikan, termasuk dalam upaya meminimalkan total biaya rantai pasok yang mencakup biaya kerusakan produk [16]. Namun,

sebagian besar penelitian tersebut masih memodelkan deteriorasi kualitas produk secara agregat dan belum merepresentasikan secara eksplisit dinamika perubahan kondisi produk sepanjang siklus hidup persediaan. Selain itu, meskipun isu keberlanjutan semakin mendapat perhatian, hanya sedikit studi yang secara simultan mengintegrasikan dampak emisi karbon dari aktivitas penyimpanan, penanganan, dan distribusi ke dalam kerangka pengambilan keputusan persediaan produk *perishable*.

Dalam literatur, produk *perishable* umumnya diklasifikasikan berdasarkan karakteristik umur simpannya menjadi produk dengan fixed shelf life dan loose shelf life. Produk segar (fresh produce) pada umumnya diperlakukan sebagai item dengan pola kerusakan yang bersifat acak dan umur simpan yang sangat singkat, di mana kualitas produk menurun secara progresif seiring berjalannya waktu hingga akhirnya kehilangan nilai komersial. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa permintaan terhadap produk segar tidak hanya dipengaruhi oleh ketersediaan stok, tetapi juga oleh tingkat kesegaran produk yang ditampilkan kepada konsumen [17]. Karakteristik ini menunjukkan bahwa pengambilan keputusan persediaan untuk produk segar pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dari dinamika kualitas produk sepanjang waktu.

Penelitian ini mengambil cabai sebagai objek kajian karena komoditas tersebut merupakan produk hortikultura musiman yang bersifat sangat mudah rusak (*highly perishable*) dan memiliki peran strategis dalam perekonomian Indonesia. Cabai (*Capsicum annum L.*) telah mendapat perhatian intensif secara nasional, khususnya pada periode 2015–2019, karena volatilitas pasokan dan harganya yang secara signifikan berkontribusi terhadap inflasi nasional (Direktorat Jenderal Hortikultura). Kondisi ini menunjukkan bahwa inefisiensi dalam pengelolaan persediaan dan distribusi cabai tidak hanya berdampak pada pelaku rantai pasok, tetapi juga memiliki implikasi makroekonomi yang luas. Cabai merah besar memiliki nilai ekonomi yang tinggi dan telah ditetapkan sebagai salah satu komoditas unggulan nasional, didukung oleh perannya yang esensial dalam hampir seluruh masakan Indonesia, prospek ekspor yang menjanjikan, daya adaptasi agroekologis yang luas, serta kemampuannya menyerap tenaga kerja dalam jumlah besar. Namun, tingginya tingkat kehilangan pascapanen akibat sifat mudah rusak dan lemahnya perencanaan persediaan menunjukkan bahwa praktik pengelolaan yang ada masih belum optimal.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan dalam pengembangan model persediaan untuk produk *perishable* yang secara simultan mampu merepresentasikan dinamika penurunan kualitas produk sepanjang siklus hidupnya dan mengintegrasikan pertimbangan emisi karbon ke dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan kerangka pemodelan persediaan yang mengintegrasikan dinamika kualitas produk dan aspek keberlanjutan, serta menyediakan alat bantu pengambilan keputusan kuantitatif bagi distributor, pengolah, dan perumus kebijakan untuk merancang strategi pemesanan, penyimpanan, dan distribusi yang lebih efisien, stabil, dan berkelanjutan, khususnya untuk komoditas cabai.

2. Metode Penelitian

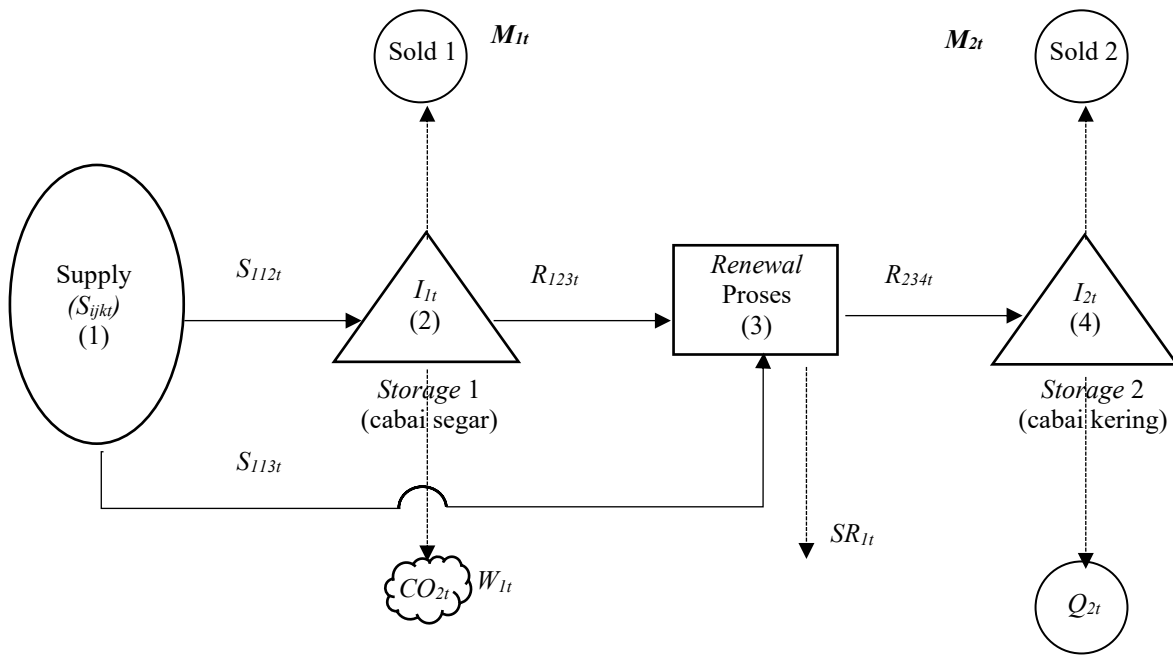
Metodologi penelitian ini disusun secara sistematis dan dimulai dengan perumusan model konseptual yang menggambarkan struktur sistem persediaan, aliran produk, serta proses penurunan kualitas dan pengolahan. Tahap selanjutnya adalah pengembangan model matematis yang memformalkan hubungan antarvariabel keputusan, fungsi tujuan, dan kendala operasional yang relevan. Setelah itu, dilakukan analisis dan penurunan metode penyelesaian untuk memperoleh solusi optimal atau kebijakan persediaan yang optimal. Model yang diusulkan kemudian diuji melalui perhitungan numerik dan eksperimen komputasi menggunakan berbagai skenario permintaan untuk mengevaluasi perilaku solusi dan kinerja model. Hasil perhitungan selanjutnya dianalisis dan didiskusikan untuk menginterpretasikan implikasi operasional dan manajerialnya, sebelum akhirnya penelitian ini ditutup dengan perumusan kesimpulan.

2.1 Model Konseptual

Aliran produk cabe dalam manajemen persediaan 2 fase disajikan dalam gambar 1. Pasokan produk berupa cabe segar. Cabai segar memiliki kadar air yang sangat tinggi antara 60%-80%. Kadar air yang tinggi ini menyebabkan cabai segar memiliki usia simpan yang pendek. Pasokan cabai segar sebagian akan disimpan pada *storage* 1 (cabai segar) dan sebagian lagi akan menuju *renewal* proses berupa proses pengeringan yang bertujuan untuk mengeringkan cabai segar menjadi cabai kering. Cabai segar memiliki umur simpan 1 minggu pada suhu ruang, jika penyimpanan lebih dari 1 minggu maka produk akan rusak menjadi limbah/sampah, produk yang menjadi sampah akan menghasilkan emisi karbon dengan jumlah tertentu. Untuk menyederhanakan permasalahan dalam penelitian ini, cabai segar yang masuk persediaan hanya dapat dijual minimal mengalami penyimpanan 1 periode perencanaan artinya tidak dapat dijual pada minggu yang sama dengan saat masuk persediaan.

Renewal proses merupakan proses pengeringan cabai segar menjadi cabai kering. Proses pengeringan bisa dilakukan secara alami maupun dengan oven. Cabai kering memiliki kadar air cabai kering maksimal 11% sesuai yang ditetapkan Standar Nasional Indonesia (SNI 01-3389-1994) memiliki usia simpan yang jauh lebih panjang bahkan dari beberapa bulan sampai 1 tahun tahun. Penurunan kadar air dalam proses pengeringan ini hingga mencapai 50%. Waktu yang diperlukan untuk *renewal* proses tidak diperhitungkan dalam penelitian ini, pengeringan alami membutuhkan waktu 8-10 hari dan pengeringan dengan oven membutuhkan waktu 3-4 jam.

Cabai kering hasil dari *renewal* proses akan disimpan dalam *storage* 2. Dalam bentuk cabai kering diasumsikan produk bisa bertahan hingga 4 minggu, minggu kelima cabai kering akan mengalami penurunan harga yang signifikan berupa *salvage value*.

Gambar 1. Manajemen Persediaan 2 Fase untuk Produk *Perishable*

2.2 Model Matematis

Asumsi

Ruang lingkup penelitian ini Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari satu pemasok, satu konsumen, dua jenis produk, dan dua fase penyimpanan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Permintaan konsumen bersifat deterministik
- Selama periode perencanaan tidak ada perubahan harga produk
- Bila terjadi shortage tidak dipertimbangkan sebagai kerugian penjualan
- Biaya persediaan semua produk diasumsikan sama
- Tidak ada penurunan kualitas dan penyusutan berat produk selama penyimpanan
- Cabai segar yang disimpan melebihi umur simpan dipertimbangkan sebagai limbah/sampah yang tidak bernilai ekonomis
- Cabai kering yang disimpan melebihi usia simpan dipertimbangkan sebagai *salvage value* dengan nilai 10% dari harga produk
- Penyusutan berat cabai segar pada *renewal* proses sebesar 50% berat awal
- Usia simpan cabai segar = 1 minggu dan usia simpan cabai kering = 4 minggu

Notasi yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

- t = Indeks waktu perencanaan ($t = 1, \dots, te$)
 te = Akhir indeks waktu perencanaan ($te = 6$)
 i = Indeks tipe produk ($i = 1, 2$; 1 = cabai segar, 2 = cabai kering)
 $n1$ = Umur simpan cabai segar ($n1 \in N$)
 $n2$ = Umur simpan cabai kering ($n2 \in N$)

- j = Indeks asal pasokan produk ($j = 1, 2, 3$)
 k = Indeks tujuan produk ($k = 2, 3, 4$)
 St = Total pasokan cabai segar dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $D1t$ = Permintaan cabai segar dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $D2t$ = Permintaan cabai kering dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 P_i = Harga produk i ($i = 1, 2$)
 $SV2$ = *Salvage value* dari cabai kering dalam
 S_{ijkt} = Pasokan produk i ($i = 1, 2$) yang berpindah dari j ($j = 1, 2, 3$) menuju k ($k = 2, 3, 4$) dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $Rijkt$ = Pasokan Produk i ($i = 1, 2$) yang berpindah dari j ($j = 1, 2, 3$) menuju k ($k = 2, 3, 4$) dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $SR1t$ = Kuantitas penyusutan cabai segar selama *renewal* proses dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 α = Koefisien penyusutan pada *renewal* proses cabai segar menjadi cabai kering ($\alpha = 50\%$)
 Iit = Tingkat persediaan produk i ($i = 1, 2$) pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $M1(t-1)$ = Kuantitas penjualan cabai segar yang telah berada dalam penyimpanan selama 1 minggu pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $M2(t-1)$ = Kuantitas penjualan cabai kering yang telah berada dalam penyimpanan selama 1 minggu pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $M2(t-2)$ = Kuantitas penjualan cabai kering yang telah berada dalam penyimpanan selama 2 minggu pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $M2(t-3)$ = Kuantitas penjualan cabai kering yang telah berada dalam penyimpanan selama 3 minggu pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $M2(t-4)$ = Kuantitas penjualan cabai kering yang telah berada dalam penyimpanan selama 4 minggu pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 Mit = Kuantitas penjualan produk i ($i = 1, 2$) dengan harga terbaik pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $W1t$ = Kuantitas cabai segar yang menjadi limbah dalam pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 $EQ1t$ = Nilai setara karbon yang dihasilkan pada periode t ($t = 1, \dots, te$)
 ρ = Koefisien karbon ekivalensi limbah organik ($\rho = 0,5$)
 $Q2t$ = Kuantitas salvage cabai kering dalam periode t ($t = 1, \dots, te$)
 PC = Biaya pembelian cabai segar
 RC = Biaya *renewal* proses cabai segar menjadi cabai kering
 HC = Biaya penyimpanan produk i ($i = 1, 2$) per unit waktu
 CR = Kapasitas *renewal* proses
 CLi = Kapasitas penyimpanan *storage* i ($i = 1, 2$)

Formulasi Matematis

Bagian ini akan menjelaskan model matematis dari manajemen persediaan 2 fase untuk produk *perishable*. Fungsi tujuan dan kendala-kendala sistem diuraikan sebagai representasi dari model konseptual dan asumsi penelitian.

Fungsi Tujuan

Model manajemen persediaan 2 fase untuk produk *perishable* ini menentukan kuantitas cabai segar yang diorder dan cabai kering yang diproduksi guna memenuhi permintaan pelanggan untuk memaksimalkan profit penjualan total dengan mempertimbangkan umur simpan produk yang pendek.

$$\text{Max} \sum_{t=1}^{t_e} \left(\sum_{i=1}^2 ((P_{it} - PC_i) \times M_{it}) \right) + Q_{2t} \times SV - (S_{113t} + R_{123t}) \times RC - \left(\sum_{i=1}^2 (I_{it} \times HC) \right) \quad (1)$$

Batasan - batasan

Keseimbangan Pasokan Cabai segar

$$S_{112t} + S_{113t} = S_t \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (2)$$

Keseimbangan pada *Storage* 1

$$I_{1t} = I_{1(t-1)} + S_{112t} - R_{123t} - M_{1t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (4)$$

$$I_{1t} \leq CI_1 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (5)$$

$$M_{1t} \leq D_{1t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (6)$$

$$M_{1t} \leq I_{1(t-1)} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (7)$$

Kendala *Perishable* Cabai segar

$$I_{1t} \leq \sum_{i=1}^{n_1} (M_{1(t+i)} + R_{123(t+i)}) \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (8)$$

Persamaan timbulan limbah cabai segar ketika cabai segar berada dalam penyimpanan lebih dari 1 minggu

$$W_{1t} = I_{1t} - \sum_{i=1}^{n_1} (M_{1(t+i)} + R_{123(t+i)}), \quad \text{if } 0 \leq I_{1t} - \sum_{i=1}^{n_1} (M_{1(t+i)} + R_{123(t+i)}) \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (9)$$

$$EQ_{1t} = \rho \times W_{1t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (10)$$

Keseimbangan pada *Renewal* proses

$$S_{113t} + R_{123t} = R_{234t} + SR_{1t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (11)$$

$$SR_{1t} = \rho \times (S_{113t} + R_{123t}) \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (12)$$

$$S_{113t} + R_{123t} \leq CR \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (13)$$

Keseimbangan pada *Storage* 2

$$I_{2t} = I_{2(t-1)} + R_{234t} - M_{2t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (14)$$

$$I_{2t} \leq CI_2 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (15)$$

Kendala *Perishable* cabai kering, cabai kering akan dinilai sebagai *salvage value* ketika berada dalam penyimpanan lebih dari 4 minggu.

$$I_{2t} \leq \sum_{i=1}^{n_2} (M_{2(t+i)}) \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (16)$$

$$M_{2t} \leq D_{2t} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (17)$$

$$M_{2t} \leq I_{2(t-1)} \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (18)$$

$$Q_{2t} = I_{2t} - \sum_{i=1}^{n_1} (M_{1(t+i)}), \quad \text{if } 0 \leq I_{2t} - \sum_{i=1}^{n_1} (M_{2(t+i)})$$

(untuk $t = 1, \dots, t_e$) (19)

Batasan *Non negativitas*

$$S_{ijkt} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (20)$$

$$R_{ijkt} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (21)$$

$$I_{it} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (22)$$

$$M_{it} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (23)$$

$$Q_{2t} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (24)$$

$$SR_{1t} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (25)$$

$$W_{1t} \geq 0 \quad (\text{untuk } t = 1, \dots, t_e) \quad (26)$$

Model yang diusulkan dibangun melalui serangkaian kendala yang merepresentasikan keseimbangan aliran material, keterbatasan kapasitas, umur simpan produk, serta proses *renewal*. Kendala keseimbangan pasokan memastikan bahwa seluruh pasokan cabai segar pada setiap periode dialokasikan baik ke penyimpanan maupun ke proses *renewal*. Keseimbangan persediaan pada storage cabai segar dan cabai kering menjamin bahwa tingkat persediaan setiap periode berasal dari stok periode sebelumnya, ditambah aliran masuk, dan dikurangi aliran keluar untuk penjualan atau pemrosesan, serta selalu berada dalam batas kapasitas penyimpanan. Kendala umur simpan membatasi bahwa hanya produk yang masih berada dalam rentang umur simpan yang diizinkan yang dapat dijual, sementara produk yang melampaui batas tersebut dikategorikan sebagai limbah atau salvage, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung emisi karbon. Proses *renewal* dimodelkan melalui kendala keseimbangan massa yang menghubungkan input cabai segar, output cabai kering, dan faktor penyusutan, serta dibatasi oleh kapasitas maksimum proses. Secara keseluruhan, rangkaian kendala ini memastikan bahwa solusi yang dihasilkan tidak hanya layak secara matematis, tetapi juga konsisten secara fisik, operasional, dan lingkungan.

Tabel 1 menunjukkan notasi, parameter dan nilai dari tiap parameter.

Tabel 1. Notasi dan Parameter Model

No.	Notasi	Parameter	Nilai
1.	t_e	Akhir indeks waktu perencanaan	6 minggu
2.	n_1	Umur simpan cabai segar	1 minggu
3.	n_2	Umur simpan cabai kering ($n_2 \in N$)	4 minggu
4.	α	Koefisien penyusutan pada <i>renewal</i> proses cabai segar menjadi cabai kering	50%
5.	ρ	Koefisien karbon ekivalensi limbah organik	0,5
6.	RC	Biaya <i>renewal</i> proses cabai segar menjadi cabai kering	RP 5.000 /kg
7.	HC	Biaya penyimpanan produk	RP 50 /kg/minggu
8.	P_1	Harga cabai segar	RP 45.000 /kg
9.	P_2	Harga cabai kering	RP 120.000 /kg

No.	Notasi	Parameter	Nilai
10.	SV_2	Salvage value cabai kering	RP 5.500 /kg
11.	PC_1	Biaya pembelian cabai segar	RP 30.000 /kg
12.	CR	Kapasitas <i>renewal</i> proses	1.500 kg
13.	CI_1	Kapasitas penyimpanan <i>storage</i> 1	1.500 kg
14.	CI_2	Kapasitas penyimpanan <i>storage</i> 2	1.500 kg
15.	I_{10}	Persediaan awal cabai segar	400 kg
16.	I_{20}	Persediaan awal cabai kering	400 kg

3. Hasil dan Diskusi

Perhitungan Numerik

Pada tahap ini eksperimen dilakukan dengan 2 skenario. Skenario pertama dengan permintaan tetap setiap periode, skenario 2 menggunakan permintaan fluktuatif setiap periode dengan total permintaan sama, 2.400 kg.

Tabel 2. Permintaan Cabai Segar dan Cabai Kering Setiap Periode pada Skenario Pertama (SK-1)

No.	Produk	Periode						Total Permintaan Produk
		1	2	3	4	5	6	
1.	Permintaan cabai segar (kg)	400	400	400	400	400	400	2.400
2.	Permintaan cabai kering (kg)	400	400	400	400	400	400	2.400

Tabel 3. Permintaan Cabai Segar dan Cabai Kering Setiap Periode pada Skenario Kedua (SK-2)

No.	Produk	Periode						Total Permintaan Produk
		1	2	3	4	5	6	
1.	Permintaan cabai segar (kg)	100	800	200	1.000	100	200	2.400
2.	Permintaan cabai kering (kg)	300	100	1.000	100	500	400	2.400

3.1 Perhitungan Numerik untuk Skenario 1

Untuk menggambarkan bagaimana model mengalokasikan pasokan cabai segar pada setiap periode dalam Skenario 1 (permintaan stabil), dilakukan analisis aliran pasokan antara cabai segar yang langsung disimpan di storage dan cabai segar yang dialokasikan ke proses *renewal*. Tabel 4 menyajikan rincian kuantitas pasokan cabai segar pada setiap periode, termasuk distribusinya ke masing-masing jalur pemanfaatan, serta total pasokan yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan sistem.

Tabel 4. Pasokan Cabai segar untuk Memenuhi Permintaan pada Setiap Periode (kg)

Periode	Pasokan Cabai Segar yang menuju <i>Storage</i> 1	Pasokan Cabai Segar yang menuju <i>Renewal</i> Proses	Jumlah Total Pasokan Cabai Segar
0			
1	400	0	400
2	0	1.490	1.490
3	449	1.363	1.812
4	1.056	0	1.056
5	351	492	842
6	82	318	399
	3.663	2.337	6.000

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa total pasokan cabai segar selama horizon perencanaan sebesar 2.400 kg dialokasikan secara fleksibel antara penyimpanan dan proses *renewal* sesuai dengan kebutuhan sistem pada setiap periode. Dari jumlah tersebut, sebanyak 3.663 kg dialokasikan ke storage, sementara 2.337 kg dialokasikan ke proses *renewal*. Variasi distribusi pasokan antarperiode mencerminkan mekanisme adaptif model dalam menyeimbangkan kebutuhan pemenuhan permintaan, keterbatasan kapasitas, dan pengendalian risiko deteriorasi produk. Pola ini menegaskan bahwa keputusan pasokan tidak bersifat statis, melainkan disesuaikan secara dinamis untuk menjaga kelayakan solusi dan efisiensi sistem persediaan.

Eksperimen dilakukan dengan memanfaatkan *Solver* pada Microsoft Excel. Dengan memasukkan model matematis baik fungsi tujuan maupun fungsi kendala didapatkan profit terbaik Rp. 159.814.407,-.

Tabel 5. Total Pendapatan, Total Biaya, dan Profit untuk Tiap Produk

No.	Uraian	Cabai Segar	Cabai Kering	Total
A	Komponen Pendapatan			
1.	Pendapatan Penjualan	108.000.000	288.000.000	396.000.000
2.	Pendapatan <i>Salvage value</i>	0	0	0
	Total pendapatan			396.000.000
B	Komponen Biaya			
1.	Biaya Pembelian	72.000.000	144.000.000	216.000.000
2.	Biaya Penyimpanan	93.568	92.025	185.593
3.	Biaya <i>Renewal</i> Proses	20.000.000		20.000.000
	Total Biaya			236.185.593
	Total Profit			159.814.407

3.2 Perhitungan Numerik Skenario 2

Pada skenario kedua ini untuk memenuhi jumlah pasokan total cabai segar untuk memenuhi permintaan cabai segar dan cabai kering sebesar 2.400 kg sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pasokan Cabai segar untuk memenuhi permintaan pada setiap periode

Periode	Pasokan Cabai segar yang Menuju <i>Storage</i> 1	Pasokan Cabai Segar yang Menuju <i>Renewal</i> Proses	Jumlah Total Pasokan Cabai Segar
0			
1	1.000	0	1.000
2	200	0	200
3	652	1.500	2.152
4	348	1.038	1.386
5	381	699	1.079
6	182	0	182
	2.763	3.237	6.000

Tingkat persediaan *storage* 1 pada setiap periode dan total biaya persediaan *storage* 1 (cabai segar) disajikan pada Tabel 7. Sedangkan tingkat persediaan *storage* 2 pada setiap periode dan total biaya persediaannya disajikan pada Tabel 8.

Tabel 7. Tingkat Persediaan *Storage* 1 pada Setiap Periode dan Biaya Persediaan pada *Storage* 1

Periode	Kapasitas persediaan	Tingkat Persediaan <i>Storage</i> 1	Biaya Persediaan/ kg/minggu	Total Biaya Persediaan <i>Storage</i> 1
0	1.500	400	50	20.000
1	1.500	950	50	47.499
2	1.500	200	50	10.000
3	1.500	652	50	32.619
4	1.500	0	50	0
5	1.500	281	50	14.028
6	1.500	0	50	0
		2.483		124.146

Tingkat persediaan *storage* 1 cabai segar pada setiap periode masih dibawah kapasitas persediaan *storage* 1, sedangkan total biaya persediaan *storage* 1 sebesar Rp. 124.146.

Tabel 7 juga menunjukkan bahwa batasan kapasitas persediaan *storage* 1 dapat dipenuhi oleh model.

Tabel 8. Tingkat persediaan *storage* 2 pada setiap periode dan biaya persediaan pada *storage* 2

Periode	Kapasitas Persediaan	Tingkat Persediaan <i>Storage</i> 2	Biaya Persediaan/ kg/minggu	Total Biaya Persediaan <i>Storage</i> 2
0	1.500	400	50	20.000
1	1.500	275	50	13.751
2	1.500	250	50	12.500
3	1.500	0	50	0
4	1.500	419	50	20.959
5	1.500	269	50	13.429
6	1.500	0	50	0
		1.618		80.638

Tingkat persediaan *storage* 2 cabai kering pada setiap periode masih dibawah kapasitas persediaan *storage* 2, sedangkan total biaya persediaan *storage* 2 sebesar Rp. 80.025,-. Tabel 8 juga menunjukkan bahwa batasan kapasitas persediaan *storage* 2 dapat dipenuhi oleh model.

Keseimbangan pada material ditunjukkan dengan adanya keseimbangan cabai segar yang masuk ke *renewal* proses dengan jumlah kuantitas material yang dikeluarkan *renewal* proses baik berat penyusutan maupun cabai kering yang dihasilkan pada setiap periode. Tabel 9 menunjukkan keimbangan pada *renewal* proses.

Tabel 9. Keseimbangan Aliran Material, Pemanfaatan Kapasitas, dan Implikasi

Periode	Kapasitas <i>Renewal</i> Proses	Cabai Segar yang Berasal dari <i>Storage</i> 1	Cabai Segar yang Berasal dari Pemasok	Total Cabai Segar yang Masuk <i>Renewal</i> Proses	Kuantitas penyusutan Cabai Segar	Cabai kering yang Dihasilkan <i>Renewal</i> Proses	Total Material yang Dihasilkan <i>Renewal</i> proses	Biaya <i>Renewal</i> Proses
0	1.500			0			0	
1	1.500	350	0	350	175	175	350	1.750.117
2	1.500	150	0	150	75	75	150	749.883
3	1.500	0	1.500	1.500	750	750	1.500	7.500.000
4	1.500	0	1.038	1.038	519	519	1.038	5.191.715
5	1.500	0	699	699	349	349	699	3.494.040
6	1.500	263	0	263	131	131	263	1.314.245
				4.000			4.000	20.000.000

Tabel 9 menunjukkan bahwa pada setiap periode ada keseimbangan kuantitas cabai segar yang masuk ke *renewal* proses dan material yang dikeluarkan dari *renewal* proses.

Dari hasil eksperimen juga diperoleh bahwa tidak ada limbah yang dihasilkan penyimpanan cabai segar sehingga tidak ada emisi karbon yang dikeluarkan seperti disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Karbon Ekivalensi dan Kuantitas Salvage *Dried Chili*

Periode	Limbah Cabai segar	Emisi Karbon (EQ)	Kuantitas Salvage <i>Dried Chili</i>
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

Dengan tidak adanya limbah cabai segar dan kuantitas *salvage* cabai kering menunjukkan bahwa dalam setiap periode cabai segar yang berada dalam *storage* 1 dan cabai kering yang berada dalam *storage* 2 tidak melebihi umur simpannya.

Pada Tabel 11. disajikan rekapitulasi komponen pendapatan, biaya dan total profit dari model yang dibuat.

Tabel 11. Rekapitulasi Perhitungan Pendapatan dan Biaya

No.	Uraian	Cabai segar	Cabai kering	Total
A	Komponen Pendapatan			
1.	Pendapatan Penjualan	108.000.000	288.000.000	396.000.000
2.	Pendapatan <i>Salvage value</i>	0	0	0
	Total komponen pendapatan			396.000.000
B	Komponen Biaya			
1.	Biaya Pembelian	72.000.000	144.000.000	216.000.000
2.	Biaya Penyimpanan	124.146	80.638	204.784
3.	Biaya <i>Renewal</i> Proses	20.000.000		20.000.000
	Total komponen Biaya			236.204.784
	Total Profit			159.795.216

Untuk mengevaluasi kinerja model di bawah karakteristik permintaan yang berbeda, dilakukan perbandingan hasil antara Skenario 1 dengan pola permintaan stabil dan Skenario 2 dengan pola permintaan fluktuatif. Perbandingan ini mencakup aspek ekonomi, operasional, serta keberlanjutan guna menilai konsistensi dan robustnes solusi yang dihasilkan. Tabel 13 menyajikan ringkasan perbandingan kedua skenario tersebut berdasarkan kriteria utama yang relevan dengan tujuan penelitian.

Tabel 13. Perbandingan Hasil Skenario 1 dan 2

No.	Kriteria	Skenario Pertama	Skenario Kedua	Keterangan
1.	Pencapaian fungsi tujuan	Rp 159.814.407	Rp 159.795.216	Skenario pertama lebih baik
	Pendapatan Penjualan	Rp 396.000.000	Rp 396.000.000	
	Pembelian	Rp 216.000.000	Rp 216.000.000	
	Biaya Persediaan	Rp 185.593	Rp 204.784	
	Biaya <i>Renewal</i> Proses	Rp 20.000.000	Rp 20.000.000	
2.	Tingkat pemenuhan permintaan pelanggan	Terpenuhi sesuai dengan permintaan	Terpenuhi sesuai dengan permintaan	Dua skenario sama baik
3.	Tingkat pemenuhan terhadap kendala kapasitas persediaan	Terpenuhi	Terpenuhi	Dua skenario sama baik
4.	Jumlah produk dalam persediaan	3.712 unit	4.096 unit	Skenario pertama lebih baik
5.	Tingkat pemenuhan kendala kapasitas <i>renewal</i> proses	Terpenuhi	Terpenuhi	Dua skenario sama baik
6.	Kendala umur simpan	Terpenuhi	Terpenuhi	Dua skenario sama baik
7.	Emisi karbon	Tidak Ada	Tidak Ada	Dua skenario sama baik
8.	Timbulan limbah	Tidak Ada	Tidak Ada	Dua skenario

Tabel 13 membandingkan kinerja model pada dua pola permintaan yang berbeda, yaitu permintaan stabil (Skenario 1) dan permintaan fluktuatif (Skenario 2). Hasil menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan solusi yang layak dan konsisten pada kedua kondisi permintaan, yang ditunjukkan oleh terpenuhinya seluruh kendala utama, termasuk pemenuhan permintaan pelanggan, kapasitas persediaan, kapasitas proses *renewal*, dan umur simpan produk. Selain itu, pada kedua skenario tidak muncul emisi karbon maupun timbunan limbah, sehingga solusi yang dihasilkan tetap memenuhi kriteria keberlanjutan yang ditetapkan. Perbedaan nilai fungsi tujuan dan tingkat persediaan antara kedua skenario mencerminkan respons adaptif model terhadap karakteristik pola permintaan yang berbeda, di mana permintaan fluktuatif pada Skenario 2 mendorong tingkat persediaan yang lebih tinggi sebagai penyangga ketidakpastian. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa model yang diusulkan bersifat *robust* dan mampu menyesuaikan kebijakan persediaan secara rasional terhadap perubahan pola permintaan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pada dua tabel terakhir, dapat disimpulkan bahwa model yang diusulkan menghasilkan solusi yang layak secara operasional, konsisten secara struktural, dan adaptif terhadap perbedaan pola permintaan. Keseimbangan aliran material pada proses *renewal* menunjukkan bahwa seluruh input cabai segar diproses secara efisien tanpa menghasilkan limbah, serta selalu berada dalam batas kapasitas yang tersedia, sehingga menegaskan validitas formulasi kendala dan kelayakan solusi. Sementara itu, perbandingan antara skenario permintaan stabil dan fluktuatif menunjukkan bahwa ketidakpastian permintaan mendorong peningkatan kebutuhan penyangga persediaan, yang tercermin pada kenaikan biaya persediaan sekitar 10,3% pada skenario permintaan fluktuatif. Meskipun demikian, model tetap mampu memenuhi seluruh kendala sistem dan menjaga kinerja ekonomi serta keberlanjutan. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa model yang dikembangkan robust terhadap perubahan karakteristik permintaan dan dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan persediaan produk perishable dalam lingkungan yang tidak pasti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Song, B. D. and Ko, Y. D. (2016) ‘A vehicle routing problem of both refrigerated- and general-type vehicles for *perishable* food products delivery’, *Journal of Food Engineering*. Elsevier Ltd, 169, pp. 61–71. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.08.027.
- [2] Agustina, D., Lee, C. K. M. and Piplani, R. (2014) ‘Int. J. Production Economics Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains’, *Intern. Journal of Production Economics*. Elsevier, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.01.002.
- [3] Boundless (2015) *Food Spoilage by Microbes*. Available at: <https://www.boundless.com/microbiology/textbooks/%0Aboundless-microbiology-textbook/industrial-microbiology-17/food-preservation-202/food-spoilage-by-microbes-1015-5468/>.
- [4] Zhang, J. *et al.* (2009) ‘Development of temperature-managed traceability system for frozen and chilled food during *storage* and transportation’, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(3&4), 28.

- [5] Sahin, E. *et al.* (2007) ‘Ensuring supply chain safety through time temperature integrators’, *Int. J Logistics Manag*, 18(1), pp. 102–124.
- [6] Osvald, A. and Stirn, L. Z. (2008) ‘A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar *perishable* food’, 85, pp. 285–295. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.008.
- [7] Tsiros, M. and Heilman, C. (2005) ‘The effect of expiration dates and perceived risk on purchasing behavior in grocery store *perishable* categories. Journal of Marketing’, *Journal of Marketing*, 69, pp. 114–129.
- [8] Wang, X. and Li, D. (2012) ‘A dynamic product quality evaluation based pricing model for *perishable* food supply chains’, *Omega*, 40(6), pp. 906–917.
- [9] Tanner, D. *et al.* (2016) *Impacts of Storage on Food Quality, Reference Module in Food Science*. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.03479-X.
- [10] Tontul, I. and Topuz, A. (2017) ‘Trends in Food Science & Technology Spray-drying of fruit and vegetable juices : Effect of drying conditions on the product yield and physical properties’, *Trends in Food Science & Technology*. Elsevier Ltd, 63, pp. 91–102. doi: 10.1016/j.tifs.2017.03.009.
- [11] Chen, Z. (2019) ‘International Journal of Production Economics Reprint of “ Optimization of production inventory with pricing and promotion effort for a single-vendor multi-buyer system of *perishable* products ”’, *Intern. Journal of Production Economics*. Elsevier B.V., 209(March 2018), pp. 285–301. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.040.
- [12] Duong, L. N. K., Wood, L. C. and Wang, W. Y. C. (2015) ‘A multi-criteria inventorymanagement system for *perishable* & substitutable products’, *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V., 2(February), pp. 66–76. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.012.
- [13] Shin, M. *et al.* (2019) ‘A two-phased *perishable* inventory model for production planning in a food industry’, 133(June 2018), pp. 175–185.
- [14] Aktas, T. *et al.* (1999) ‘Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying characteristics and quality of dried products’, 85, pp. 178–183. doi: 10.1205/fbp07037.
- [15] Giri, S. kumar *et al.* (2017) ‘Nutrition & Food Science’. doi: 10.1108/NFS-04-2016-0039.
- [16] Amorim, P., Günther, H. O. and Almada-Lobo, B. (2012) ‘Multi-objective integrated production and distribution planning of *perishable* products.’, *International Journal of Production Economics*, 138(1), pp. 89–101.
- [17] Bai, R. and Kendall, G. (2008) ‘A Model for Fresh Produce Shelf-Space Allocation and Inventory Management with Freshness-Condition- Dependent Demand A Model for Fresh Produce Shelf-Space Allocation and Inventory Management with Freshness-Condition-Dependent Demand’, (April 2014). doi: 10.1287/ijoc.1070.0219.