Membangun Model Pola Tanam Pertanian pada Keadaan Cuaca Ekstrem dengan Pendekatan MILP

Septia Cahaya Sari Sipayung*, Lasker Pangarapan Sinaga[2]
[1,2] Matematika, Universitas Negeri Medan, Kota Medan, 20221, Indonesia
*Corresponding Author:septiacahayasari@gmail.com

Abstrak

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang sangat rentan terhadap dampak cuaca ekstrem yang ditandai dengan fluktuasi curah hujan, suhu, kelembaban, serta gangguan hama, sehingga berimplikasi pada penurunan hasil produksi dan peningkatan biaya usahatani. Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini membangun model pola tanam dengan pendekatan Mixed Integer Linear Programming (MILP) yang memadukan variabel keputusan diskrit (pemilihan jenis tanaman dan waktu tanam) serta kontinu (hasil produksi aktual) dengan tujuan memaksimalkan keuntungan bersih petani. Model dirancang dengan mengintegrasikan dua parameter utama, yaitu faktor reduksi produksi akibat kerusakan tanaman (ω) dan faktor kenaikan biaya akibat kebutuhan input protektif (φ). Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat gangguan iklim, keuntungan petani menurun signifikan hingga mencapai batas bawah keuntungan (profit floor) yang tetap stabil meskipun ω dan φ terus meningkat. Selain itu, diversifikasi tanaman cenderung berkurang, sehingga pada kondisi ekstrem hanya dua komoditas yang dapat dipertahankan secara optimal. Penelitian ini menegaskan bahwa MILP dapat digunakan sebagai pendekatan kuantitatif untuk merumuskan strategi pola tanam adaptif dan resilien terhadap cuaca ekstrem, sekaligus mendukung pengambilan keputusan pertanian yang lebih berbasis data dan berkelanjutan.
Kata kunci: Pola tanam, MILP, cuaca ekstrem

Abstract

The agricultural sector is one of the sectors that is very vulnerable to the impact of extreme weather characterized by fluctuations in rainfall, temperature, humidity, and pest infestation, which has implications for reducing production yields and increasing farming costs. To address these challenges, this research builds a cropping pattern model with a Mixed Integer Linear Programming (MILP) approach that combines discrete (crop selection and planting time) and continuous (actual production yield) decision variables with the aim of maximizing farmers' net profit. The model was designed by integrating two main parameters, namely the production reduction factor due to crop damage (ω) and the cost increase factor due to protective input requirements (φ). The simulation results show that as the level of climate disturbance increases, farmers' profits decrease significantly until they reach a profit floor that remains stable even though ω and φ continue to increase. In addition, crop diversification tends to decrease, so that under extreme conditions only a few commodities can be optimally maintained. This study confirms that MILP can be used as a quantitative approach to formulate strategies for adaptive and resilient cropping patterns to extreme weather, while supporting more data-driven and sustainable agricultural decision-making.
Keywords: Cropping pattern, MILP, extreme weather

Citation: Sipayung, S. C. S. & Sinaga, L. P. (2025). Membangun Model Pola Tanam Pertanian pada Keadaan Cuaca Ekstrem dengan Pendekatan MILP. *Prodising Seminar Nasional Jurusan Matematika 2025*. 722 – 728.

PENDAHULUAN

Produk pertanian memiliki risiko tinggi terhadap dampak perubahan iklim yang memengaruhi pola tanam, jadwal tanam, hingga kualitas hasil panen. Pergeseran curah hujan dan suhu ekstrem sering kali memicu kegagalan panen (Amalyah, 2025), yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap ketahanan pangan global. Dalam pembangunan nasional, pertanian memegang peran strategis karena sebagian besar komoditasnya merupakan kebutuhan pokok masyarakat. Di antara subsektor pertanian, hortikultura menempati posisi penting sebagai komoditas bernilai ekonomi tinggi dengan permintaan pasar yang terus meningkat (Saninov et al., 2022). Oleh karena itu, pengembangannya membutuhkan dukungan informasi iklim yang akurat serta pemanfaatan sumber daya lahan secara optimal (Tentua et al., 2022). Penentuan waktu tanam dengan pendekatan tradisional kini semakin berisiko akibat kondisi cuaca yang tidak menentu. Sebagian wilayah menghadapi hujan ekstrem dan banjir, sementara daerah lain mengalami kekeringan parah (Manalu, 2020). Cuaca ekstrem ditandai oleh perubahan pola curah hujan, suhu udara, kelembaban, arah dan kecepatan angin, serta faktor lingkungan lain yang dapat menimbulkan kerugian besar (Karnawati, 2022). Ketidakmampuan petani memprediksi musim tanam secara akurat mengakibatkan penurunan indeks pertanaman (IP), kegagalan panen, kerusakan sumber daya, serta meningkatnya serangan hama dan penyakit tanaman.

Pola tanam menjadi salah satu strategi penting untuk memperoleh hasil optimal dengan mempertimbangkan kondisi iklim dan kesesuaian lahan. Pengaturan pola tanam berfungsi mengurangi risiko kegagalan panen sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya (Hilman et al., 2019). Dalam konteks ini, optimasi operasional pertanian

© Jurusan Matematika - Universitas Negeri Medan

dibutuhkan agar petani dapat mengambil keputusan yang tepat. Optimasi merupakan proses mencari solusi terbaik dari suatu masalah dengan tujuan meminimalkan atau memaksimalkan fungsi tujuan sambil memenuhi batasan tertentu (Gunantara, 2018). Dalam bidang pertanian, fungsi tujuan biasanya terkait peningkatan hasil produksi, pendapatan petani, atau efisiensi biaya produksi, sementara batasan dapat berupa luas lahan, musim tanam, tenaga kerja, hingga kondisi iklim. Kompleksitas pengambilan keputusan yang melibatkan variabel kontinu (misalnya luas tanam) maupun diskrit (pemilihan jenis tanaman) memerlukan metode optimasi yang tepat. *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) merupakan salah satu pendekatan yang sesuai karena mampu menangani kedua jenis variabel tersebut secara bersamaan, sehingga menghasilkan rencana pola tanam yang lebih optimal (Rindengan & Langi, 2018).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan keberhasilan MILP dalam bidang pertanian. Maqrot et al. (2020) mengembangkan sistem pola tanam buah dan sayuran untuk meningkatkan produksi dan memenuhi permintaan pasar lokal. Pehlivan et al. (2021) menerapkan MILP pada penjadwalan rotasi tanaman dan tumpangsari untuk memaksimalkan pendapatan. Guo et al. (2024) menganalisis pengaruh jenis plot dan musim terhadap biaya, hasil, dan penjualan. Gao & Guan (2025) menggunakan MILP untuk mengatasi krisis pangan dengan memaksimalkan keuntungan jangka panjang. Xie et al. (2025) mengoptimalkan struktur penanaman di desa pegunungan Utara China, sementara Wang et al. (2025) merancang skema penanaman yang efisien guna meningkatkan produktivitas. Berdasarkan permasalahan tersebut dan temuan penelitian terdahulu, penelitian ini bertujuan mengembangkan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk mengoptimalkan pola tanam dalam menghadapi tantangan cuaca ekstrem. Model ini diharapkan dapat menghasilkan kombinasi jenis tanaman dan waktu tanam yang adaptif serta mampu memaksimalkan keuntungan petani

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan studi literatur dan pemodelan matematika. Metode kuantitatif dipilih karena penelitian berfokus pada perumusan model matematis yang bersifat numerik untuk mengoptimalkan pola tanam dalam menghadapi kondisi cuaca ekstrem. Pendekatan studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan, menelaah, serta menganalisis berbagai penelitian terdahulu yang relevan, baik mengenai optimasi pola tanam, penerapan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), maupun pengaruh cuaca ekstrem terhadap produksi pertanian. Hasil kajian literatur tersebut menjadi dasar dalam membangun model yang sesuai dengan konteks permasalahan penelitian.

Pemodelan matematika digunakan sebagai strategi utama pemecahan masalah, di mana model disusun dalam bentuk fungsi tujuan dan fungsi kendala. Tahapan pemodelan dalam penelitian ini mengikuti langkah-langkah yang diadaptasi dari Marom (2020), yaitu; (1) merumuskan masalah dengan jelas; (2) mengidentifikasi variabel keputusan, indeks, dan parameter yang terlibat; (3) menyusun formulasi model berupa fungsi tujuan, fungsi kendala, serta syarat-syarat yang diperlukan; (4) menyelesaikan model menggunakan perangkat lunak optimasi yaitu dengan pustaka Pulp phyton; dan (5) melakukan validasi model dengan analisis sensitiitas. Melalui metode ini, diharapkan diperoleh formulasi pola tanam optimal yang tidak hanya meningkatkan keuntungan petani, tetapi juga adaptif terhadap risiko cuaca ekstrem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permasalahan utama dalam penentuan pola tanam pada kondisi cuaca ekstrem adalah adanya ketidakpastian yang memengaruhi dua aspek penting, yaitu penurunan hasil produksi akibat kerusakan tanaman dan peningkatan biaya produksi karena kebutuhan input tambahan untuk menjaga produktivitas. Dalam praktiknya, cuaca ekstrem menyebabkan sebagian hasil panen berkurang (ω) sekaligus mendorong petani mengeluarkan biaya protektif lebih besar (φ) untuk pupuk maupun pestisida. Oleh karena itu, diperlukan suatu model optimasi yang mampu merumuskan keputusan pola tanam secara sistematis dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, serta kendala nyata seperti keterbatasan lahan. Sebelum membangun formulasi matematis, terlebih dahulu didefinisikan notasi yang akan digunakan dalam model. Notasi ini mencakup indeks, variabel keputusan, serta parameter yang relevan dalam penyusunan model optimasi. Pendefinisian notasi diperlukan agar penyusunan fungsi tujuan dan fungsi kendala dapat lebih sistematis, jelas, dan mudah dipahami. Model ini menggunakan notasi untuk mempermudah representasi matematis dari elemen-elemen penting dalam pengambilan keputusan pola tanam. Tabel 1 menunjukkan beberapa notasi model yang digunakan.

Tabel 1 Daftar Indeks Dalam Model

Indeks	Keterangan
i	mendeskripsikan jenis tanaman ke$-i$ dari himpunan semua jenis tanaman $(i = 1,2,3,4,5,6)$
j	mendeskripsikan bulan ke-j yang menyatakan waktu mulai tanam

b	Indeks bulan ke-b yang aktif pemeriksaan total luas lahan yang aktif, $b = 1,2,3,\ldots,12$, dan digunakan untuk fungsi kendala

Tabel 2 Daftar Variabel Keputusan dan Parameter dalam Model

No.	Variabel	Keterangan	Satuan
1	z_{ij}	Variabel biner: bernilai 1 jika tanaman ke-i mulai ditanam pada bulan ke- j, dan 0 jika tidak ditanam pada bulan tersebut. $y_{ij} \in \{0,1\}$	0 atau 1
2	Q_{ij}	Produksi aktual dari tanaman ke-i yang mulai ditanam pada bulan ke-j	kg
3	h_i	Produksi maksimum tanaman ke $-i$ per hektar dalam kondisi normal (tanpa risiko)	$kg/rante$
4	$\tilde{k}_{ij}$	Biaya produksi efektif tanaman ke- i pada bulan ke- j, setelah disesuaikan dengan penalti cuaca	$Rp/rante$
5	k_i	Biaya produksi tanaman ke-i per hektar dalam kondisi normal (tanpa penalti)	$Rp/rante$
6	p_i	Harga jual hasil panen tanaman ke-i per kilogram	Rp/kg
7	l_i	Luas tanam rata-rata tanaman ke-i	$rante$
8	ω	Persentase penurunan hasil produksi akibat cuaca ekstrem	$Rasio\ (\%)$
9	φ	Persentase kenaikan biaya produksi akibat cuaca ekstrem	$Rasio\ (\%)$
10	A	Luas lahan total yang tersedia setiap bulan	$rante$
11	δ_{ijb}	Fungsi indikator: bernilai 1 jika bulan ke-b berada dalam durasi tanaman ke-i yang dimulai pada bulan ke- j	$(0\ atau\ 1)$

Fungsi tujuan pada model ini dirancang untuk memaksimalkan keuntungan bersih dari sistem pola tanam dalam kondisi cuaca ekstrem. Keuntungan dihitung dari selisih antara pendapatan kotor yang diperoleh petani dengan biaya produksi yang dikeluarkan untuk setiap jenis tanaman yang ditanam pada bulan tertentu, sebagaimana diterapkan pada model Septiadi *et al.* (2021). Perbedaannya dalam penelitian ini model dikembangkan dengan menambah parameter ω yaitu penurunan produksi tanaman dikarenakan tanaman rusak dan parameter φ dikarenakan aktivitas petani dalam menjaga tanaman tetap terjaga dengan menambah penggunakan pestisida maupun pupuk sehingga biaya produksi meningkat. Secara umum, fungsi tujuan pada penelitian ini terdiri atas tiga komponen utama: pertama, pendapatan kotor dihitung berdasarkan hasil kali antara hasil produksi aktual dari tanaman ke-i yang mulai ditanam pada bulan ke-j (Q_{ij}) dengan harga jual hasil panen tanaman ke-i per kilogram (p_i). Pada penelitian ini harga jual p_i diasumsikan tetap sepanjang tahun yang diperoleh dari rata-rata harga pasar lokal. Maka, secara matematis pendapatan kotor dapat dituliskan sebagai:

$$Pendapatan_{ij} = Q_{ij} \cdot p_i \tag{1}$$

Kedua biaya produksi adalah seluruh pengeluaran yang dikeluarkan petani dalam proses usahatani untuk menghasilkan suatu produk pertanian, baik berupa biaya tetap (*fixed cost*) maupun biaya variabel (*variable cost*). Biaya tetap perperiode untuk komoditas ke-i, mencakup pengeluaran yang tidak berubah meskipun jumlah produksi berbeda, seperti sewa lahan dan penyusutan alat (k_i^{fix}). Sementara itu, biaya variabel meliputi pengeluaran komoditas ke-i yang berubah pada periode ke-j sesuai dengan skala produksi, misalnya pembelian benih, pupuk, pestisida, serta upah tenaga kerja (k_{ij}^{var}). Sehingga dalam kondisi normal biaya produksi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k_i^{total}(j) = k_i^{fix} + k_{ij}^{var} \tag{2}$$

Dalam praktiknya, biaya variabel sering mengalami peningkatan, terutama ketika kondisi lingkungan tidak mendukung atau ketika terjadi gangguan cuaca ekstrem $(1 + \varphi)$. Petani berupaya mempertahankan produksi agar tetap optimal, atau setidaknya tidak mengalami kerugian. Upaya tersebut biasanya dilakukan dengan menambah input produksi, seperti penggunaan pupuk yang lebih banyak untuk menjaga kesuburan tanah, serta peningkatan penggunaan pestisida guna mengendalikan hama yang lebih mudah berkembang pada kondisi cuaca tidak menentu. Maka secara matematis biaya produksi adalah sebagai berikut:

$$\tilde{k}_{ij} = \begin{cases} k_i \cdot l_i \cdot (1+\varphi), & \text{jika } e_j = 1 \text{ dan } i \neq i^* \\ k_i \cdot l_i, & lainnya \end{cases} \tag{3}$$

Dengan $\varphi \geq 0$ merepresentasikan proporsi kenaikan biaya rata-rata akibat biaya protektif. Biaya produksi ini kemudian dikalikan dengan z_{ij} yaitu variabel keputusan yang bernilai 1 jika tanaman ditanam dan 0 jika tidak. Sehingga biaya produksi yang dikoreksi menjadi:

$$biaya\ pada\ (i,j) = \tilde{k}_{ij} \cdot z_{ij} \tag{4}$$

Kemudian variabel selanjutnya keuntungan bersih diperoleh dari selisih antara pendapatan kotor dengan biaya produksi untuk setiap jenis tanaman ke-i yang ditanam pada bulan ke-j. Selanjutnya dijumlahkan secara keseluruhan.

$$\max Z = \sum_{i}^{m} \sum_{j}^{t} [Q_{ij} \cdot p_i - \tilde{k}_{ij} \cdot z_{ij}] \tag{5}$$

Fungsi tujuan ini dapat diuraikan misalnya seorang petani ingin membudiayakan empat jenis tanaman dalam setahun sehingga $i = 1,2,3,4$ dan $j = 1,2,3 \dots 12$ dan bulan ekstrem misalnya ulan juni hingga desember $j' = 6,7,8,9,10$ maka secara eksplisit model dapat dituliskan

$$\max Z = \sum_{i}^{4}\sum_{j}^{12}[Q_{ij} \cdot p_i - \tilde{k}_{ij} \cdot z_{ij}] = \sum_{i=1}^{4}[\,(Q_{i1} \cdot p_i - \tilde{k}_{\,i1} \cdot z_{i1}) + (Q_{i2} \cdot p_i - \tilde{k}_{\,i2} \cdot z_{i2}) + \cdots + (Q_{i12} \cdot p_i - \tilde{k}_{\,i12} \cdot z_{i12})]$$

$$\begin{aligned}\max Z = [&(Q_{11} \cdot p_1 - \tilde{k}_{\,11} \cdot z_{11}) + (Q_{12} \cdot p_1 - \tilde{k}_{\,12} \cdot z_{12}) + \cdots + (Q_{112} \cdot p_1 - \tilde{k}_{\,112} \cdot z_{112})) + ((Q_{21} \\ &\cdot p_2 - \tilde{k}_{\,21} \cdot z_{21}) + (Q_{22} \cdot p_2 - \tilde{k}_{\,22} \cdot z_{22}) + \cdots + (Q_{212} \cdot p_2 - \tilde{k}_{\,212} \cdot z_{212})) + (((Q_{31} \cdot p_3 \\ &-\tilde{k}_{\,31} \cdot z_{31}) + (Q_{32} \cdot p_3 - \tilde{k}_{\,32} \cdot z_{32}) + \cdots + (Q_{312} \cdot p_3 - \tilde{k}_{\,312} \cdot z_{312})) + ((Q_{41} \cdot p_4 - \tilde{k}_{\,41} \\ &\cdot z_{41}) + (Q_{42} \cdot p_4 - \tilde{k}_{\,42} \cdot z_{42}) + \cdots + (Q_{412} \cdot p_4 - \tilde{k}_{\,412} \cdot z_{412}))\end{aligned}$$

Persamaan ini mencerminkan strategi optimasi untuk menentukan pola tanam yang paling menguntungkan dengan mempertimbangkan faktor cuaca ekstrem yang dapat mempengaruhi hasil produksi maupun biaya tanam

Kendala total luas lahan aktif maksimum per bulan ini mengikuti model Islam *et al.* (2018). Kendala ini memastikan bahwa total luas lahan yang sedang digunakan untuk kegiatan budidaya tanaman pada bulan tertentu tidak melebihi kapasitas maksimum yang tersedia (A). Dalam praktikannya, meskipun setiap tanaman hanya membutuhkan sebagian dari total luas lahan tetap diperlukan pengaturan agar tidak terjadi penumpukan tanaman. Pada penelitian ini dikembangkan dengan menambahkan indeks bulan ke-b yang merepresentasikan bulan tanam yang dimulai pada saat durasi tanaman ke-i belum selesai. Jika model memilih tanaman untuk ditanam pada bulan ke-b maka akan dikalikan dengan fungsi indikator δ_{ijb}, yang bernilai 1 jika bulan ke-b termasuk dalam periode tanam tanaman ke-i yang dimulai pada bulan ke-j dan bernilai 0 jika tidak. Secara matematis fungsi kendala ini adalah hasil penjumlahan seluruh kombinasi tanaman ke-i dari hasil kali luas tanam rata-rata l_i dengan variabel keputusan biner z_{ij} dan fungsi indikator δ_{ijb}.
Fungsi kendala ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{t} l_i \cdot z_{ij} \cdot \delta_{ijb} \le A\,, \qquad \forall b = 1,2,\dots.12 \tag{6}$$

dengan:

$$\delta_{ijb} \quad = \quad \begin{cases} 1 & ,\text{jika } j \le b < j + d_i \\ 0 & ,\text{lainnya} \end{cases}$$

Fungsi kendala ini dapat diuraikan sebagai berikut:

$$\sum_{i}^{4}[(l_i \cdot z_{i1} \cdot \delta_{i1b}) + (l_i \cdot z_{i2} \cdot \delta_{i2b}) + \cdots + (l_i \cdot z_{i12} \cdot \delta_{i12b})] \le A$$

$$\begin{aligned}\rightarrow [&((\,l_1 \cdot z_{11} \cdot \delta_{11b}) + (\,l_1 \cdot z \cdot \delta_{12b}) + \cdots + (\,l_1 \cdot z_{112} \cdot \delta_{112b})) \\ &+((\,l_2 \cdot z_{21} \cdot \delta_{21b}) + (\,l_2 \cdot z_{22} \cdot \delta_{22b}) + \cdots + (\,l_2 \cdot z_{212} \cdot \delta_{212b})) \\ &+((\,l_3 \cdot z_{31} \cdot \delta_{31b}) + (\,l_3 \cdot z_{32} \cdot \delta_{32b}) + \cdots + (\,l_3 \cdot z_{312} \cdot \delta_{312b})) \\ &+((\,l_4 \cdot z_{41} \cdot \delta_{41b}) + (\,l_4 \cdot z_{42} \cdot \delta_{42b}) + \cdots + (\,l_4 \cdot z_{412} \cdot \delta_{412b}))] \le A\end{aligned}$$

Untuk setiap $b = 1,2,\dots,12$

Kendala satu kali tanam per tahun ini mengacu pada fungsi kendala model Pehlivan *et al.* (2021) kemudian disesuaikan dengan permasalahan yang dihadapi petani. Kendala ini tidak mengizinkan penanaman ulang pada satu tahun budidaya untuk menjaga praktik rotasi tanaman. Pembatasan ini mendorong pemilihan urutan jenis tanaman yang paling menguntungkan. Secara teknis, kendala ini memastikan bahwa total keputusan tanam z_{ij} untuk setiap tanaman i tidak lebih dari satu sepanjang tahun. Apabila nilai kumulatif dari seluruh bulan tanam melebihi satu , maka solusi tersebut tidak valid karena telah melanggar batasan ini. Secara matematis kendala ini dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{j=1}^{m} z_{ij} \le 1, \qquad \forall i \tag{7}$$

Fungsi kendala ini dapat diuraikan sebagai berikut; Untuk $i = 1$ (kentang) dengan $z_{11} + z_{12} + z_{13} + \cdots + z_{112} \le 1$; untuk $i = 2$ (tomat) dengan $z_{21} + z_{22} + z_{23} + \cdots + z_{212} \le 1$; untuk $i = 3$ (sawi) dengan $z_{31} + z_{32} + z_{33} + \cdots + z_{312} \le 1$; untuk $i = 4$ (kubis) dengan $z_{41} + z_{42} + z_{43} + \cdots + z_{412} \le 1$

Kendala produksi dalam model ini mempertimbangkan pengaruh cuaca ekstrem terhadap hasil panen. Cuaca ekstrem berimplikasi langsung pada penurunan produktivitas tanaman, sehingga hasil produksi aktual tidak hanya bergantung pada luas lahan yang ditanami dan produktivitas rata-rata, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor reduksi akibat

cuaca ekstrem (ω). Dengan demikian, pada bulan ekstrem, hasil produksi tanaman ke-i pada musim ke-j dinyatakan sebagai

$$Q_{ij} = (1-\omega) \cdot h_i \cdot l_i \cdot z_{ij} \ , s_i = 1 \quad (8)$$

Jika tanaman tahan cuaca ektrem ($s_i = 0$), maka nilai ω tidak diberlakukan. Pada bulan normal, hasil produksi tidak mengalami reduksi, sehingga diperoleh:

$$Q_{ij} = h_i \cdot l_i \cdot z_{ij} \quad (9)$$

Dalam penyusunan model *Mixed Integer Linear Programming* pada penelitian ini ditetapkan domain variabel keputusan yang digunakan untuk memvalidasi model. Terdapat dua variabel utama dalam model yaitu variabel keputusan penanaman (z_{ij}) dan variabel keputusan hasil produksi aktual (Q_{ij}). Variabel z_{ij} merupakan variabel keputusan biner yang hanya dapat bernilai 1 tanaman ke i ditanam pada bulan ke-j atau 0 jika tidak. Sifat biner ini penting untuk menangkap keputusan diskrit dalam praktik pertanian yaitu antara "menanam" dan "tidak menanam". Sementara itu, variabel keputusan kontinu Q_{ij} yang menunjukkan hasil produksi aktual dari tanaman ke- i yang mulai ditanam pada bulan ke- j, nilainya berupa bilangan real non negatif. Secara matematis, batasan domain variabel ini dituliskan sebagai:

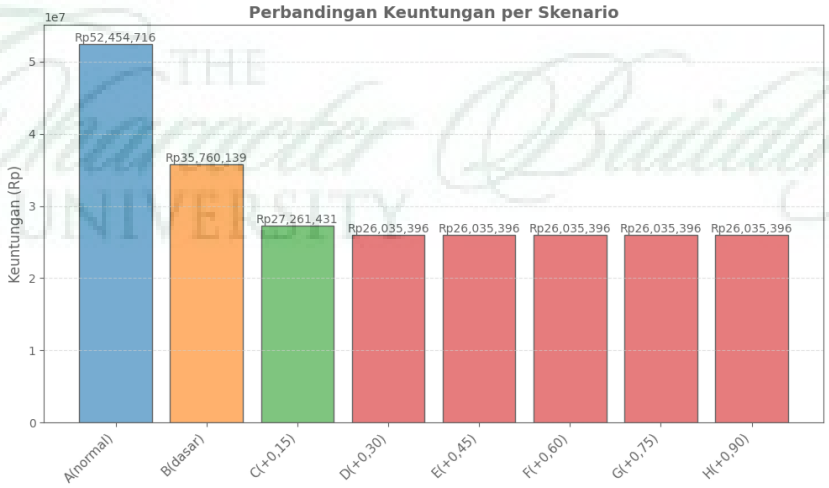
$$z_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j \ \text{dan} \ Q_{ij} \geq 0, \qquad \forall i,j \quad (10)$$

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PuLP dengan validasi melalui analisis sensitivitas terhadap faktor reduksi produksi akibat cuaca ekstrem (ω)dan faktor biaya tambahan (φ). Empat jenis tanaman yang dianalisis adalah kubis, kentang, tomat, dan sawi. Hasil simulasi ditunjukan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Model

Skenario	ω	φ	Keuntungan	Status
A(normal)	0,00	0,00	52.454.716,43	Optimal
B(dasar)	0,10	0,15	35.760.139,27	Optimal
C(+0,15)	0,25	0,30	27.261.430,74	Optimal
D(+0,30)	0,40	0,45	26.035.395,90	Optimal
E(+0,45)	0,55	0,60	26.035.395,90	Optimal
F(+0,60)	0,70	0,75	26.035.395,90	Optimal
G(+0,75)	0,85	0,90	26.035.395,90	Optimal
H(+0,90)	1,00	1,05	26.035.395,90	Optimal

Tabel hasil simulasi memperlihatkan bahwa pada kondisi normal (Skenario A) ketika tidak ada dampak cuaca ekstrem ($\omega = 0, \varphi = 0$), keuntungan optimal yang diperoleh mencapai Rp52.454.716,43. Namun, begitu nilai ω dan φ meningkat, keuntungan secara konsisten menurun. Pada Skenario B (dasar) dengan ($\omega = 0{,}10, \varphi = 0{,}15$) keuntungan turun menjadi Rp35.760.139,27. Penurunan yang signifikan terjadi pada Skenario C hingga D, yaitu ketika ω meningkat menjadi $0{,}25 - 0{,}40$ dan φ menjadi $0{,}30 - 0{,}45$, keuntungan hanya berkisar Rp27 juta – Rp26 juta. Lebih lanjut, mulai Skenario D hingga H, keuntungan berhenti menurun dan bertahan konstan sebesar Rp26.035.395,90 meskipun ω dan φ terus meningkat (Gambar 1). Hal ini menunjukkan bahwa terdapat batas bawah keuntungan (profit floor) yang masih dapat dicapai petani melalui kombinasi pola tanam yang lebih tahan terhadap guncangan cuaca ekstrem.



Gambar 1. Perbandingan Keuntungan Setiap Skenario Optimal

Selanjutnya, kombinasi pola tanam yang optimal disajikan pada Tabel 4, Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat gangguan cuaca ekstrem, maka jadwal tanam menjadi lebih sederhana dan pilihan tanaman yang dapat diusahakan semakin berkurang. Pada kondisi normal, rotasi empat jenis tanaman masih dapat dilakukan secara

berurutan sepanjang tahun. Namun ketika nilai faktor penalti meningkat, pola tanam mengalami pergeseran dengan jadwal yang lebih terbatas, bahkan hanya menyisakan dua komoditas utama yang dianggap paling adaptif terhadap tekanan iklim. Hal ini menegaskan bahwa cuaca ekstrem tidak hanya menurunkan potensi keuntungan, tetapi juga secara signifikan mengurangi diversifikasi tanaman serta fleksibilitas dalam penentuan kalender tanam.

Tabel 4. Hasil Pola Tanam Optimal Setiap Skenario

Skenario	Pola Tanam
A(normal)	Kubis (Januari-May) → Kentang (April-Agustus)→ Tomat (September-Februari) →Sawi (November-Januari)
B(dasar)	Kentang (Januari-May)→Kubis (Februari-Juni)→ Tomat (Juni-November)→ Sawi (Desember-Februari)
C(+0,15)	Kentang (Januari-May)→Kubis (November-Juni)→ Sawi (November-Januari)
D(+0,30)	Kentang (Januari-May)→ Sawi (Februari-April)
E(+0,45)	Kentang (Januari-May)→ Sawi (Februari-April)
F(+0,60)	Kentang (Januari-May)→ Sawi (Februari-April)
G(+0,75)	Kentang (Januari-May)→ Sawi (Februari-April)
H(+0,90)	Kentang (Januari-May)→ Sawi (Februari-April)

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membangun model pola tanam hortikultura pada kondisi cuaca ekstrem dengan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Model yang dikembangkan mengintegrasikan dua parameter utama, yaitu faktor reduksi produksi akibat kerusakan tanaman (ω) dan faktor kenaikan biaya produksi akibat upaya protektif (φ). Melalui formulasi fungsi tujuan untuk memaksimalkan keuntungan bersih dan fungsi kendala yang mencerminkan keterbatasan lahan, aturan satu kali tanam per tahun, serta pengaruh durasi budidaya, model ini mampu merepresentasikan kondisi nyata yang dihadapi petani.Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat cuaca ekstrem, keuntungan petani menurun signifikan hingga mencapai batas bawah keuntungan (*profit floor*) yang stabil meskipun nilai ω dan φ terus meningkat. Temuan ini menegaskan adanya tingkat keuntungan minimum yang masih dapat dipertahankan melalui kombinasi pola tanam yang lebih adaptif. Selain itu, diversifikasi tanaman cenderung menurun seiring meningkatnya tekanan iklim, di mana pada kondisi ekstrem hanya dua komoditas yang dapat dipertahankan secara optimal. Dengan demikian, MILP terbukti menjadi pendekatan yang dapat digunakan untuk menyusun strategi pola tanam yang lebih tahan terhadap guncangan iklim, sekaligus memberikan dasar bagi pengambilan keputusan pertanian yang berbasis data dan berorientasi pada keberlanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Amaliyah, D., Tamburaka, I. P., & Armawaddin, M. (2025). Strategi Adaptasi Dalam Menghadapi Perubahan Iklim untuk Mempertahankan Produksi Padi di Kecamatan Rumbia Kabupaten Bombana. *JURNAL EKONOMI*, *10*(1), 81-86. Diakses dari https://jurnal-ekonomi.uho.ac.id/index.php/journal/article/view/80

Gao, C. & Guan, S. (2025). Research on Optimal Crop Planting Strategy Based on Mixed Integer Linear Programming. *Highlights in Business, Economics and Management* 51, 198-206. Diakses dari https://www.researchgate.net/publication/391005986.

Gunantara, N. (2018). *Teknik Optimasi* . Bali: Udayana University Press.

Guo, C., Zhang, J. & Lan, Y. (2024). Research on Optimal Crop Planting Strategy Based on Mixed Integer Programming. *Academic Journal of Science and Technology 13*(2), 1–6. Diakses dari https://www.researchgate.net/publication/391005986_ Research_ on_Optimal_crop_planting_ strategy_ based_on_Mixed_Integer_Linear_Programming

Hilman, Y., Suciantini, S., & Rosliani, R. (2019). Adaptasi Tanaman Hortikultura Terhadap Perubahan Iklimpada Lahan Kering Adaptation of Horticultural Crops to Climate Change in the Upland. Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian, 38(1). https://doi.org/10.21082/jp3.v38n1.2019.p55-64

Islam, M.K., Alam, M.M, Uddin, M.F., & Faruque, G. M. O. (2020). Mathematical Modeling and Distribution Design for Agricultural Products in Bangladesh. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 6(1), 34–42. https://doi.org/10.9734/ajpas/2020/v6i130152

Karnawati, D.(2020). Peraturan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Republik Indonesia Nomor 9 Tahun 2022 Tentang Penyediaan dan Penyebarluasan Peringatan Dini Cuaca Ekstrem. *bmkg.go.id*. https://jdih.bmkg.go.id/common/ dokumen/perbanno.9tahun2022.pdf diakses secara online pada 18 Maret 2025.

Manalu, S. (2024). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produksi Pertanian di Indonesia. *literacy notes*, *2*(1). Diakses dari https://liternote.com/index.php /ln/article/view/169

Maqrot, S., Degivry, S., Quesnel, G., & Tchamitchian, M. (2017). A Mixed Integer Programming Reformulation of the Mixed Fruit-Vegetable Crop Allocation Problem. *30th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2017 Part II 30* (pp. 237-250). France: Arras, France Proceedings.

Marom, S. (2020). *Pemodelan Matematika*. Salatiga: Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat.

Pehlivan, C., Yeung, T.G. & Munguia, A. S. A. (2021). Crop Selection and Scheduling for Green Production with Intercropping and Rotation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, *632 IFIP*, 411–420. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85906-0_46.

Rindengan, A.J. & Langi, Y. A.R. (2018). *Program Linear.* Bandung: CV. Patra Media Grafindo Bandung

Tentua, E., Laimeheriwa, S., & Patty, J. R. (2022). Analisis musim tanam dan pengaturan pola tanam tanaman pangan pada berbagai kondisi curah hujan di daerah Amahai Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Pertanian Kepulauan*, *6*(1), 23-37. Diakses dari https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/jpk/article/view/7454

Saninov, A. A., Alamsyah, Z., & Suryani, M. (2022). Optimasi Pola Tanam Hortikultura di Desa Rantau Makmur Kecamatan Berbak Kabupaten Tanjung Jabung Timur. *Jurnal Ilmiah Sosio-Ekonomika Bisnis*, *15*(2). Diakses dari https://mail.online-journal.unja.ac.id/jseb/article/view/2749

Septiadi, D., Utama, F. R., Fria, A., & Ardana, Y. (2021). Optimasi Produksi Usahatani Terintegrasi Sebagai Upaya Peningkatan Pendapatan Petani di Kabupaten Lombok Timur. *Jurnal Hexagro*, *5*(1), 456705. https://doi.org/10.36423/hexagro.v5i1.570

Wang, S., Zeng, J., Wu, Y., & Wang, H. (2025). A mixed integer 0-1 planning crop planting strategy model based on robust optimization. *Academic Journal of Computing & Information Science*, *8*(1).

Xie, X., Xu, Y., Qiu, Y. (2025). Optimization of crop planting strategies in mountainous areas of North China based on mixed integer programming and Monte Carlo simulation. *Higlights in Science, Engineering and Technoogy*. Diakses dari https://hsetdata.com/index.php/ojs/article/view /574/535

© Jurusan Matematika - Universitas Negeri Medan