Griya Journal of Mathematics Education and Application
Volume 6 Nomor 3, September 2026
e-ISSN 2776-124X| |p-ISSN 2776-1258
https://mathjournal.unram.ac.id/index.php/Griya/index

Optimasi alokasi sumber daya dan mekanisasi pada budidaya padi menggunakan *mixed integer linear programming*

Retno Ayu Zalianti[1*], Lasker Pangarapan Sinaga[2]

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Medan

retnoayuzalianti@mhs.unimed.ac.id

Diterima: 12-06-2026; Direvisi: 30-07-2026; Dipublikasi: 31-07-2026

Abstract
Rice cultivation is an agricultural sector that plays a crucial role in supporting national food security. However, resource management in rice cultivation is often based on farmers' experience, potentially leading to inefficient production costs. In addition to the use of material and labor inputs, the development of agricultural mechanization also requires decision-making regarding the optimal use of agricultural technology. This study aims to develop a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model to optimize resource allocation and mechanization in rice cultivation. The model includes a continuous variable in the form of material input allocation, an integer variable in the form of labor force, and a binary variable in the form of decisions about agricultural machinery use. The research parameters include land area, maximum productivity, grain selling price, material input costs, labor costs, minimum labor requirements, and agricultural machinery usage costs. The optimization model was solved using Python software. The optimization results indicate that the model produces an optimal solution with a maximum profit of Rp37,336,566.00. The model also demonstrates the use of mechanization at the planting, weeding, and harvesting stages. The results demonstrate that the MILP approach can produce a more efficient combination of resource use and mechanization in rice cultivation.

Keywords: optimization; mixed integer linear programming; rice cultivation; mechanization; resource allocation

Abstrak
Budidaya padi merupakan salah satu sektor pertanian yang memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Namun, pengelolaan sumber daya pada budidaya padi masih sering dilakukan berdasarkan pengalaman petani sehingga berpotensi menyebabkan inefisiensi biaya produksi. Selain penggunaan input material dan tenaga kerja, perkembangan mekanisasi pertanian juga menimbulkan kebutuhan pengambilan keputusan terkait penggunaan teknologi pertanian yang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk membangun model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) guna mengoptimalkan alokasi sumber daya dan mekanisasi pada budidaya padi. Model yang dibangun melibatkan variabel kontinu berupa alokasi input material, variabel integer berupa jumlah tenaga kerja, dan variabel biner berupa keputusan penggunaan mesin pertanian. Parameter penelitian meliputi luas lahan, produktivitas maksimum, harga jual gabah, biaya input material, biaya tenaga kerja, kebutuhan minimum tenaga kerja, dan biaya penggunaan mesin pertanian. Model optimasi diselesaikan menggunakan perangkat lunak *Python*. Hasil optimasi menunjukkan bahwa model menghasilkan solusi optimal dengan keuntungan maksimum sebesar Rp37.336.566,00. Model juga menunjukkan penggunaan mekanisasi pada tahap penanaman, penyiangan, dan pemanenan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan MILP mampu menghasilkan kombinasi penggunaan sumber daya dan mekanisasi yang lebih efisien pada budidaya padi.

Kata Kunci: optimasi; *mixed integer linear programming*; budidaya padi; mekanisasi; alokasi sumber daya

1. PENDAHULUAN

Optimasi merupakan salah satu cabang matematika terapan yang digunakan untuk menentukan solusi terbaik dari suatu permasalahan berdasarkan fungsi tujuan dan kendala tertentu. Dalam penerapannya, optimasi bertujuan memperoleh nilai maksimum atau minimum sehingga dihasilkan keputusan yang paling efisien pada berbagai sektor, termasuk sistem produksi dan pertanian (Agustina *et al*., 2021); (Alotaibi & Nadeem, 2021). Salah satu pendekatan optimasi matematis yang terbukti efektif untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya pada tahap perencanaan adalah *Linear Programming* (LP).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengaplikasikan LP untuk mengeksplorasi efisiensi di sektor produksi dan pasok pangan. Pendekatan LP terbukti mampu meminimalkan biaya operasi dan memaksimalkan keuntungan pada industri kuliner dengan memecahkan kombinasi produksi yang paling optimal (Palit et al., 2025). LP yang diintegrasikan dengan analisis *dual* juga berhasil memecahkan permasalahan optimasi distribusi kopi pada berbagai skenario permintaan yang fluktuatif (Afriansyah & Dwikasari, 2026). Namun, LP konvensional memiliki keterbatasan dasar saat berhadapan dengan keputusan diskrit di dunia nyata. Untuk menangani variabel bernilai bilangan bulat yang mutlak tidak dapat dipecah secara kontinu, modifikasi metode berupa *Integer Linear Programming* (ILP) diterapkan dan sukses mengoptimalkan alokasi produksi dengan presisi tinggi (Kapele & Mangobi, 2026).

Pengembangan lebih komprehensif dari metode tersebut adalah *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) yang memampukan model matematis mengakomodasi variabel kontinu, integer, dan biner secara bersamaan, sehingga menghasilkan keputusan yang jauh lebih representatif terhadap kompleksitas kondisi lapangan (Putra *et al*., 2026). Dalam sektor agrikultur, pemodelan MILP telah digunakan untuk meminimalkan beban biaya secara signifikan pada rantai pasok beras di tingkat kabupaten ((Pratiwi et al., 2025), serta menekan biaya operasional keseluruhan dalam mendesain sistem pertanian terpadu (Sinaga et al., 2026). MILP juga terbukti andal dalam merancang solusi perencanaan area tanam yang tangguh (*robust*) dalam merespons ketidakpastian iklim (Zhang et al., 2018), membangkitkan rangkaian solusi rotasi tanam alternatif yang hampir optimal (Makowski et al., 2001), hingga mengevaluasi kelayakan ekonomi dan profitabilitas penggunaan traktor berat pada produksi padi sistem *no-till* (Watkins et al., 2006).

Pada praktiknya, budidaya padi melibatkan banyak tahapan produksi yang menuntut pengelolaan sumber daya secara cermat, mulai dari benih, pupuk, pestisida, alokasi tenaga kerja, hingga pilihan teknologi pertanian. Penggunaan sumber daya yang dikelola sekadar berdasarkan kebiasaan sering kali tidak terencana dengan baik, yang berdampak pada pembengkakan biaya produksi dan penurunan drastis pada keuntungan usaha tani (Rahmah *et al*., 2024). Di sisi lain, seiring meluasnya tren

mekanisasi pertanian, pemanfaatan alternatif teknologi mesin pertanian menjadi sangat krusial untuk meningkatkan kecepatan dan efisiensi kerja, sekaligus mengurangi ketergantungan yang berlebihan pada tenaga kerja manual di tengah keterbatasan upah harian (Arizka *et al*., 2022).

Meskipun metode *Mixed Integer Linear Programming* telah banyak diterapkan pada sektor pertanian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi rantai pasok, perencanaan wilayah tanam, atau evaluasi sistem pertanian pada skala makro. Kajian yang secara khusus mengintegrasikan keputusan alokasi input produksi, jumlah tenaga kerja, dan pemilihan mekanisasi pada tingkat budidaya masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan model MILP yang menggabungkan ketiga keputusan tersebut dalam satu formulasi matematis sehingga dapat mengevaluasi peluang substitusi tenaga kerja dengan mekanisasi pada setiap tahapan budidaya sesuai kondisi sumber daya yang tersedia. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan rekomendasi operasional yang lebih adaptif terhadap keterbatasan tenaga kerja dan kebutuhan efisiensi biaya di tingkat usaha tani.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) sebagai pendekatan optimasi untuk menentukan alokasi sumber daya dan pemilihan teknologi mekanisasi yang paling efisien pada budidaya padi. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menangani variabel keputusan yang bersifat kontinu, integer, dan biner secara simultan, sehingga mampu memberikan solusi yang representatif terhadap kompleksitas operasional di lapangan dibandingkan dengan metode *Linear Programming* (LP) konvensional. Model optimasi dirumuskan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan bantuan pustaka *PuLP* untuk memproses fungsi tujuan dan kendala matematis.

Tabel 1 menjelaskan himpunan indeks yang digunakan dalam model *Mixed Integer Linear Programming*. Indeks tersebut meliputi input material, jenis tenaga kerja, dan tahapan budidaya padi. Penggunaan indeks bertujuan untuk mempermudah penyusunan model matematis dan penulisan fungsi kendala.

Tabel 1. Indeks

No	Simbol	Himpunan	Rentang Nilai	Keterangan
1	i	Input Material	$i = 1, 2, 3$	1 = Benih 2 = Pupuk 3 = Pestisida
2	k	Jenis Tenaga Kerja	$k = 1, 2$	1 = Tenaga Kerja Keluarga 2 = Tenaga Kerja Luar Keluarga
3	t	Tahapan Budidaya	$t = 1, 2, 3, \ldots, 10$	1 = Pengolahan tanah 2 = Persemaian 3 = Pencabutan Persemaian 4 = Penanaman 5 = Penyulaman 6 = Penyianagan 7 = Pengairan 8 = Pemupukan 9 = Pembunuhan Hama 10 = Pemanenan

Tabel 2 menunjukkan pengelompokan tahapan budidaya berdasarkan sistem upah tenaga kerja dan ketersediaan alternatif penggunaan mesin pertanian. Sub himpunan ini digunakan untuk membedakan tahapan budidaya yang menggunakan upah harian, upah borongan, dan mekanisasi.

Tabel 2. Sub Himpunan Tahapan Budidaya

No	Simbol	Rentang Nilai	Keterangan
1	T_h	$T_h = \{2,3,5,6,7,8,9\}$	Himpunan tahapan budidaya dengan sistem upah harian
2	T_b	$T_b = \{1,4,10\}$	Himpunan tahapan budidaya dengan sistem upah borongan
3	T_m	$T_m = \{1,4,6,7,8,9,10\}$	Himpunan tahapan budidaya yang memiliki alternatif penggunaan mesin

Tabel 3 menunjukkan parameter utama yang digunakan dalam model optimasi, meliputi luas lahan, produktivitas maksimum, harga jual gabah, dan modal tersedia. Nilai parameter tersebut diperoleh dari penelitian (Rahmah *et al*., 2024).

Tabel 3. Parameter

No	Simbol	Parameter	Nilai	Satuan
1	L	Luas lahan	1	ha
2	Y	Produktivitas panen maksimum	5.714	kg/ha
3	P	Harga jual gabah	7.500	Rp/kg
4	B	Modal tersedia	20.434.204	Rp
5	C_1	Benih	10.500	Rp/kg
6	C_2	Pupuk	2.600	Rp/kg
7	C_3	Pestisida	90.000	Rp/L
8	R_1	Benih	36,1	kg/ha
9	R_2	Pupuk	177,14	kg/ha
10	R_3	Pestisida	1,14	L/ha

Tabel 4 menunjukkan biaya dan kebutuhan input material berupa benih, pupuk, dan pestisida yang digunakan pada budidaya padi. Nilai parameter mengacu pada penelitian (Ilham Ladonu *et al*., 2024).

Tabel 4. Faktor Penalti Defisit Input Material

No	Input	Asumsi Penurunan Hasil Panen	Nilai	Satuan
1	Pupuk	Kekurangan 10% pupuk menurunkan hasil panen sebesar 5%	16	kg/ha
2	Pestisida	Kekurangan 10% pestisida menurunkan hasil panen sebesar 5%	250	L/ha

Keterangan:

a) Faktor Penalti Defisit Pupuk

Diasumsikan bahwa kekurangan penggunaan pupuk sebesar 10% dari kebutuhan rekomendasi dapat menyebabkan penurunan hasil panen sebesar 5% dari produktivitas maksimum.

Produktivitas maksimum padi: $Y = 5.714$ kg/ha

Kebutuhan pupuk per hektar: $R_2 = 177{,}14 kg/ha$

Defisit pupuk sebesar 10% dihitung sebagai: $0{,}10 \times 177{,}14 = 17{,}714\ kg$

Penurunan hasil panen sebesar 5% dihitung sebagai: $0{,}05 \times 5.714 = 285{,}7 kg$

Sehingga faktor penalti defisit pupuk diperoleh dengan membagi penurunan hasil panen terhadap jumlah defisit pupuk:

$$d_2 = \frac{285.7}{17.714} \approx 16$$

Dengan demikian setiap kekurangan 1 kg pupuk diasumsikan menurunkan hasil panen sebesar 16 kg gabah.

b) Faktor Penalti Defisit Pestisida

Diasumsikan bahwa kekurangan penggunaan pestisida sebesar 10% dari kebutuhan rekomendasi dapat menyebabkan penurunan hasil panen sebesar 5% dari produktivitas maksimum.

Produktivitas maksimum padi: $Y = 5.714$ kg/ha

Kebutuhan pestisida per hektar: $R_3 = 1{,}14\ L/ha$
Defisit pestisida sebesar 10% dihitung sebagai: $0{,}10 \times 1{,}14 = 0{,}114\ L$
Penurunan hasil panen sebesar 5% dihitung sebagai: $0{,}05 \times 5.714 = 285{,}7$ kg
Sehingga faktor penalti defisit pupuk diperoleh dengan membagi penurunan hasil panen terhadap jumlah defisit pestisida:

$$d_3 = \frac{285.7}{0{,}114} \approx 2.506$$

Dengan demikian setiap kekurangan 1 kg pestisida diasumsikan menurunkan hasil panen sebesar 2.506 kg gabah.

Tabel 5. Upah Tenaga Kerja Harian

No	Simbol	Tahap	Keluarga	Luar Keluarga
1	W_{k2}	Persemaian	Rp. 0	Rp. 70.000
2	W_{k3}	Pencabutan Persemaian	Rp. 0	Rp. 70.000
3	W_{k5}	Penyulaman	Rp. 0	Rp. 70.000
4	W_{k6}	Penyiangan	Rp. 0	Rp. 70.000
5	W_{k7}	Pengairan	Rp. 0	Rp. 70.000
6	W_{k8}	Pemupukan	Rp. 0	Rp. 70.000
7	W_{k9}	Pembunuhan hama	Rp. 0	Rp. 70.000

Tabel 5 menjelaskan besarnya upah tenaga kerja harian pada setiap tahapan budidaya padi, baik tenaga kerja keluarga maupun tenaga kerja luar keluarga. Data ini digunakan dalam perhitungan biaya tenaga kerja harian pada model optimasi.

Tabel 6. Upah Tenaga Kerja Borongan

No	Simbol	Tahap	Luar Keluarga
1	WB_1	Pengolahan tanah	Rp. 1.000.000
2	WB_4	Penanaman	Rp. 640.000
3	WB_{10}	Pemanenan	Rp. 860.00

Tabel 6 menunjukkan biaya tenaga kerja borongan pada beberapa tahapan budidaya, yaitu pengolahan tanah, penanaman, dan pemanenan. Parameter ini digunakan untuk menghitung biaya tenaga kerja borongan pada fungsi tujuan.

Tabel 7. Kebutuhan Minimum Tenaga Kerja

No	Simbol	Tahap Budidaya	Total Tenaga Kerja
1	H_{k1}	Pengolahan tanah	3
2	H_{k2}	Persemaian	1
3	H_{k3}	Pencabutan Persemaian	1
4	H_{k4}	Penanaman	9
5	H_{k5}	Penyulaman	1
6	H_{k6}	Penyiangan	12
7	H_{k7}	Pengairan	6
8	H_{k8}	Pemupukan	6
9	H_{k9}	Pembunuhan hama	7
10	H_{k10}	Pemanenan	32

Tabel 7 menunjukkan kebutuhan minimum tenaga kerja pada setiap tahapan budidaya padi. Nilai parameter mengacu pada penelitian (Zahasfana *et al*., 2017).

Tabel 8. Kapasitas Tenaga Kerja

No	Simbol	Keterangan	Nilai	Satuan
1	K_{1t}	Kapasitas maksimum tenaga kerja keluarga pada tahap t	20	HOK
2	K_{2t}	Kapasitas maksimum tenaga kerja luar keluarga pada tahap t	20	HOK

Tabel 8 menunjukkan kapasitas maksimum tenaga kerja keluarga dan tenaga kerja luar keluarga yang tersedia pada setiap tahapan budidaya. Parameter ini digunakan untuk membatasi jumlah tenaga kerja yang dapat dialokasikan dalam model.

Tabel 9. Biaya Sewa Mesin

No	Simbol	Tahap	Jenis Mesin	Biaya Sewa	Satuan
1	F_1	Pengolahan tanah	Traktor Roda 2	1.050.000	Rp/ha
2	F_2	Persemaian	-	-	Rp/ha
3	F_3	Pencabutan Persemaian	-	-	Rp/ha
4	F_4	Penanaman	Rice Transplanter	600.000	Rp/ha
5	F_5	Penyulaman	-	-	Rp/ha
6	F_6	Penyiangan	Power Weeder	246.220	Rp/ha
7	F_7	Pengairan	Pompa Air Listrik	1.049.528	Rp/ha
8	F_8	Pemupukan	Fertilizer Applicator	1.408.013	Rp/ha
9	F_9	Pembunuhan hama	Drone Sprayer	250.000	Rp/ha
10	F_{10}	Pemanenan	Combine Harvester	2.450.000	Rp/ha

Tabel 9 menunjukkan biaya sewa mesin pertanian pada setiap tahapan budidaya. Nilai parameter Traktor Roda 2 dan Combine Harvester mengacu pada penelitian (Arizka *et al*., 2022), Rice Transplanter mengacu pada penelitian (Gunawan *et al*., 2023), Power Weeder mengacu pada penelitian (Harnel & Buharman, 2011), Pompa Air Listrik mengacu pada penelitian (Nugroho *et al*., 2019), Fertilizer Applicator mengacu pada penelitian (Novitasari *et al*., 2025), dan Drone Sprayer mengacu pada penelitian (Dhamayanti, 2025)

Tabel 10. Variabel Keputusan

No	Simbol	Jenis Variabel	Keterangan	Satuan
1	x_i	Kontinu (≥ 0)	Jumlah input material ke-i yang di alokasikan	kg atau L
2	s_i	Kontinu (≥ 0)	Jumlah kekurangan input material ke-i dari kebutuhan yang direkomendasikan	kg atau L
3	y_{kt}	Integer (Z^+)	Jumlah tenaga kerja jenis k yang di alokasikan pada tahap t	HOK
4	z_t	Biner (0,1)	Keputusan penggunaan mesin pada tahap t, dengan $z_t = 1$ jika menggunakan mesin dan $z_t = 0$ jika menggunakan tenaga kerja	-

Tabel 10 menjelaskan variabel keputusan yang digunakan dalam model *Mixed Integer Linear Programming*. Variabel kontinu digunakan untuk alokasi input material dan defisit input material, variabel integer digunakan untuk tenaga kerja, sedangkan variabel biner digunakan untuk keputusan penggunaan mesin pertanian.

$$Maks\ Z = P.\left(Y.L - \sum_{i=2}^{3} d_i\, s_i\right) - \left(\sum_{i=1}^{3} C_i xi + \sum_{t\in T_h}\sum_{k=1}^{2} W_{kt} y_{kt} + \sum_{t\in T_b} WB_t\,.L.(1-z_t) + \sum_{t=1}^{10} F_t L z_t\right)$$

Fungsi tujuan pada model Mixed Integer Linear Programming digunakan untuk memaksimumkan keuntungan budidaya padi. Keuntungan diperoleh dari selisih antara total pendapatan hasil panen dengan total biaya produksi yang meliputi biaya input material, biaya tenaga kerja, dan biaya penggunaan mesin pertanian.

$$\sum_{i=1}^{3} C_i xi + \sum_{t\in T_h}\sum_{k=1}^{2} W_{kt} y_{kt} + \sum_{t\in T_b} WB_t\,.L.(1-z_t) + \sum_{t=1}^{10} F_t L z_t \leq B$$

Fungsi kendala pada model meliputi kendala modal, kebutuhan input material, kapasitas tenaga kerja, keterlibatan tenaga kerja, ketersediaan mesin, pemilihan

penggunaan mesin atau tenaga kerja, serta kendala domain variabel. Hasil penyelesaian model menghasilkan solusi optimal berupa alokasi sumber daya, penggunaan tenaga kerja, dan pemilihan teknologi pada budidaya padi.

Kendala Kebutuhan Input Material

a) Kebutuhan Benih

Jumlah benih yang digunakan tidak boleh kurang dari kebutuhan minimum berdasarkan luas lahan.

$$x_1 \geq R_1 \,.\, L,$$

b) Kebutuhan Pupuk dan Pestisida

Jumlah pupuk dan pestisida yang digunakan dapat mengalami kekurangan dari kebutuhan rekomendasi dan direpresentasikan melalui variabel defisit.

$$x_i + s_i = R_i \,.\, L, \qquad \forall_i \in \{2,3\}$$

Kendala Kapasitas Tenaga Kerja

Jumlah tenaga kerja keluarga yang digunakan pada setiap tahap budidaya tidak boleh melebihi kapasitas maksimum yang tersedia.

$$y_{it} \leq K_{it}, \qquad \forall_t \in T$$

Kendala Keterlibatan Tenaga Kerja

Tenaga kerja hanya dapat dialokasikan pada tahap budidaya yang sesuai dengan parameter keterlibatan tenaga kerja.

$$y_{kt} \leq \alpha_{kt}.M, \qquad \forall_k \in K, \forall_t \in T$$

Kendala ini memastikan bahwa apabila $\alpha_{kt} = 0$ maka $y_{kt} = 0$ yang berarti tenaga kerja jenis k tidak dapat digunakan pada tahap t.

Kendala Ketersediaan Mesin

Penggunaan mesin hanya diperbolehkan pada tahap budidaya yang memiliki alternatif mesin.

$$z_t \leq \beta_t, \qquad \forall_t \in T$$

Kendala Pemilihan: Mesin atau Tenaga Kerja (Either-Or)

a) Jika Mesin Digunakan

Apabila mesin digunakan pada tahap budidaya tertentu ($z_t = 1$), maka tenaga kerja tidak dialokasikan pada tahap tersebut.

$$y_{kt} \leq M.(1 - z_t), \qquad \forall_k \in K, \forall_t \in T_m$$

b) Jika Tenaga Kerja Digunakan

Apabila mesin tidak digunakan ($z_t = 0$), maka kebutuhan minimum tenaga kerja harus dipenuhi.

$$y_{kt} \geq H_{kt} \,.L\,.(1 - z_t).\alpha_{kt}, \qquad \forall_k \in K, \forall_t \in T$$

Kendala Domain

1. Variabel Kontinu:

$$x_i \geq 0, \qquad \forall_i \in I$$
$$s_i \geq 0, \qquad \forall_i \in \{2,3\}$$

2. Variabel Integer:

$$y_{kt} \in \mathbb{Z}^+, \qquad \forall_k \in K, \forall_t \in T$$

Variabel y_{kt} merupakan variabel integer nonnegatif yang menyatakan jumlah tenaga kerja yang dialokasikan pada setiap tahap budidaya.

3. Biner:

$$z_t \in \{0,1\}, \qquad \forall_t \in T$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil optimasi menggunakan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) memberikan solusi optimal dengan total keuntungan maksimum sebesar Rp37.336.566,00. Solusi tersebut diperoleh setelah seluruh fungsi tujuan dan kendala model dipenuhi, sehingga kombinasi penggunaan input material, tenaga kerja, dan mekanisasi mampu menghasilkan keuntungan maksimum. Perincian hasil optimasi disajikan pada Tabel 11 berikut:

Tabel 11. Alokasi Material

Input	Dialokasikan	Defisit	Target Ideal
Benih (kg)	36.1	0	36.1
Pupuk (kg)	177.14	0	177.14
Pestisida (L)	1.14	0	1.14

Hasil optimasi menunjukkan bahwa seluruh kebutuhan input material dapat dipenuhi tanpa mengalami defisit. Alokasi benih sebesar 36,1 kg, pupuk sebesar 177,14 kg, dan pestisida sebesar 1,14 liter sesuai dengan kebutuhan ideal budidaya padi. Tidak adanya defisit menunjukkan bahwa modal yang tersedia masih mampu memenuhi kebutuhan input material sehingga produktivitas maksimum tetap dapat dipertahankan.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa model MILP mampu menentukan kombinasi alokasi input yang optimal tanpa mengurangi kebutuhan dasar tanaman. Kemampuan ini sesuai dengan karakteristik MILP yang dapat menangani variabel kontinu beserta berbagai kendala secara simultan sehingga menghasilkan solusi yang optimal pada permasalahan optimasi yang kompleks. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Minh et al., 2025) yang menyatakan bahwa model MILP mampu menghasilkan solusi optimal melalui integrasi berbagai variabel keputusan dan kendala sehingga diperoleh keseimbangan antara efisiensi biaya dan efektivitas operasional. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung penelitian (Saves et al., 2022) yang menunjukkan bahwa optimasi pada sektor pertanian mampu menghasilkan penggunaan sumber daya yang lebih efisien dibandingkan pengalokasian berdasarkan kebiasaan petani.

Tabel 12. Penggunaan Teknologi Dan Tenaga Kerja

No	Tahap	Teknologi	HOK Keluarga	HOK Luar Keluarga	Total HOK
1	Pengolahan Tanah	Manual	0	3	3
2	Persemaian	Manual	5	0	5
3	Pencabutan Persemaian	Manual	5	0	5
4	Penanaman	Mesin	0	0	0
5	Penyulaman	Manual	5	0	5
6	Penyiangan	Mesin	0	0	0
7	Pengairan	Manual	5	1	6
8	Pemupukan	Manual	5	1	6
9	Penyemprotan	Manual	5	2	7
10	Pemanenan	Mesin	0	0	0

Model memilih penggunaan mekanisasi pada tahap penanaman, penyiangan, dan pemanenan, sedangkan tahapan lainnya masih menggunakan kombinasi tenaga kerja keluarga dan tenaga kerja luar keluarga sesuai kebutuhan minimum. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan mesin tidak selalu dipilih pada seluruh tahapan budidaya, tetapi hanya pada kegiatan yang memberikan keuntungan ekonomi lebih besar dibandingkan penggunaan tenaga kerja manual.

Keputusan tersebut dihasilkan melalui variabel biner pada model MILP yang berfungsi menentukan alternatif penggunaan mesin atau tenaga kerja pada setiap tahapan budidaya. Dengan demikian, model tidak hanya menentukan jumlah sumber daya yang digunakan, tetapi juga memilih teknologi yang memberikan keuntungan maksimum. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Wicaksono et al., 2024) yang menerapkan MILP pada penjadwalan operasi pembangkit listrik. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa MILP mampu memilih kombinasi operasi yang paling efisien dengan tetap memenuhi seluruh kendala sistem. Pada konteks penelitian ini, konsep yang sama diterapkan untuk menentukan pemilihan mekanisasi sehingga biaya produksi dapat ditekan tanpa mengurangi kualitas proses budidaya. Penggunaan mekanisasi pada tahap penanaman, penyiangan, dan pemanenan juga mendukung penelitian Arizka et al. yang menyatakan bahwa pemanfaatan alat dan mesin pertanian mampu meningkatkan efisiensi kerja serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual.

Tabel 13. Ringkasan Finansial

Keterangan	Nilai
Total Pendapatan	Rp42.855.000
Biaya Input Material	Rp942.214
Biaya Tenaga Kerja (Harian)	Rp280.000
Biaya Tenaga Kerja (Borongan)	Rp1.000.000
Biaya Sewa Mesin	Rp3.296.220
TOTAL BIAYA PRODUKSI	Rp5.518.434

Berdasarkan hasil optimasi diperoleh total pendapatan sebesar Rp42.855.000,00 dengan total biaya produksi sebesar Rp5.518.434,00 sehingga keuntungan maksimum yang dihasilkan model mencapai Rp37.336.566,00. Biaya produksi terdiri atas biaya input material, biaya tenaga kerja harian, tenaga kerja borongan, dan biaya penggunaan mesin pertanian. Komponen biaya terbesar berasal dari penggunaan mesin pertanian, namun biaya tersebut mampu diimbangi oleh peningkatan efisiensi tenaga kerja sehingga keuntungan yang diperoleh tetap maksimum.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan MILP tidak hanya mampu mengoptimalkan satu komponen biaya, tetapi mampu mengintegrasikan seluruh komponen biaya produksi ke dalam satu model optimasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sinaga et al. yang menyatakan bahwa pendekatan Mixed Integer Linear Programming mampu menghasilkan perencanaan biaya operasional yang lebih efisien melalui integrasi berbagai komponen biaya dalam satu model matematis. Selain itu, hasil penelitian ini mendukung konsep optimalisasi sumber daya pertanian yang dikemukakan oleh (Rhofita, 2022), bahwa pengelolaan sumber daya secara optimal merupakan salah satu strategi penting untuk meningkatkan efisiensi sistem pertanian dan mendukung keberlanjutan pemanfaatan sumber daya pertanian.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi variabel kontinu, integer, dan biner dalam model *Mixed Integer Linear Programming* menghasilkan keputusan yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan optimasi yang hanya mempertimbangkan satu jenis variabel keputusan. Model tidak hanya menentukan jumlah input material dan tenaga kerja yang optimal, tetapi juga memilih tahapan budidaya yang lebih efisien untuk dialihkan dari tenaga kerja manual menuju mekanisasi tanpa melanggar batasan modal dan kebutuhan operasional.

Secara praktis, model ini berpotensi digunakan sebagai perangkat pendukung keputusan oleh Penyuluh Pertanian Lapangan (PPL) dalam menyusun rekomendasi teknis bagi petani atau kelompok tani. Melalui parameter yang dapat disesuaikan dengan kondisi lokal, seperti luas lahan, harga input, biaya tenaga kerja, dan biaya sewa mesin, PPL dapat mengevaluasi alternatif penggunaan mekanisasi sebelum musim tanam dimulai. Pendekatan tersebut membantu petani menentukan tahapan budidaya yang lebih menguntungkan apabila dialihkan ke mekanisasi sekaligus mengidentifikasi tahapan yang masih lebih efisien dikerjakan menggunakan tenaga kerja manual. Dengan demikian, rekomendasi yang diberikan tidak lagi hanya didasarkan pada pengalaman lapangan, tetapi juga pada hasil optimasi matematis yang mempertimbangkan berbagai kendala operasional secara simultan.

Dari sisi teoritis, penelitian ini memperluas penerapan Mixed Integer Linear Programming pada optimasi mikro budidaya padi, yaitu pada tingkat pengambilan keputusan di level usaha tani. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang lebih banyak

berfokus pada optimasi rantai pasok, distribusi, atau sistem pertanian secara makro, model yang dikembangkan menempatkan keputusan alokasi input material, penggunaan tenaga kerja, dan pemilihan mekanisasi dalam satu formulasi matematis yang terintegrasi. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa optimasi mikro mampu menjadi jembatan antara teori optimasi matematis dan pengambilan keputusan operasional pada tingkat budidaya.

4. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil membangun model *Mixed Integer Linear Programming* untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya dan mekanisasi pada budidaya padi. Model yang dibangun melibatkan variabel kontinu berupa input material, variabel integer berupa tenaga kerja, dan variabel biner berupa keputusan penggunaan mesin pertanian. Hasil optimasi menunjukkan bahwa model menghasilkan solusi optimal dengan keuntungan maksimum sebesar Rp37.336.566,00. Model juga menunjukkan penggunaan mekanisasi pada tahap penanaman, penyiangan, dan pemanenan. Pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* mampu menghasilkan kombinasi penggunaan sumber daya dan mekanisasi yang lebih efisien sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan budidaya padi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada keluarga, dosen pembimbing, serta pihak-pihak yang telah membantu dalam proses pengumpulan data, penyusunan model, dan penyelesaian penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada berbagai sumber referensi ilmiah yang digunakan sebagai pendukung dalam penyusunan penelitian ini sehingga penelitian dapat diselesaikan dengan baik.

6. REFERENSI

Afriansyah, D., & Dwikasari, L. G. (2026). Optimization of Coffee Production and Distribution under Multi-Demand Scenarios: A Linear Programming and Dual Analysis Approach. *Griya Journal of Mathematics Education and Application*, *6*(2), 1205–1220. https://doi.org/10.29303/griya.v6i2.1209

Agustina, E., Sufri, S., & Rozi, S. (2021). Optimasi Keuntungan Menggunakan Metode Karush-Kuhn-Tucker (Studi Kasus: Mi Aceh Pattimura Di Jambi). *Factor M*, *3*(2), 83–98. https://doi.org/10.30762/factor-m.v3i2.3226

Alotaibi, A., & Nadeem, F. (2021). A Review of Applications of Linear Programming to Optimize Agricultural Solutions. *Information Engineering and Electronic Business*, *13*(2), 11–21. https://doi.org/10.5815/ijieeb.2021.02.02

Arizka, A. A., Nugroho, A. P., & Nuha, M. S. (2022). Keragaan Usaha Pelayanan Jasa Alat Dan Mesin Pertanian (UPJA) dalam Pemanfaatan Alat Mesin Pertanian di Kabupaten Madiun. *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*, *8*(2), 203–214.

https://doi.org/10.26858/jptp.v8i2.31203

Dhamayanti, C. S. (2025). Peran Stakeholder Pada Kegiatan Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman Padi Secara Hayati oleh Kelompok Tani SedyonRukun Kapanewon Bantul. *Journal of Agricultural Sociaal and Business*, *4*(1), 9–15.

Gunawan, G., Permana, N. S., Sukmawati, D., & Dahtiar, A. (2023). Faktor yang Mempengaruhi Keputusan Pemanfaatan Alat Rice Transplanter dan Dampaknya Terhadap Efisiensi Biaya Produksi dan Pendapatan Usahatani Padi (Oryza sativa, L) (Suatu Kasus pada Petani Padi Sawah di Kecamatan Majalaya, Kabupaten Karawang, Provinsi J. *Jurnal Greenation Pertanian Dan Perkebunan*, *1*(3), 133–141. https://doi.org/10.38035/jgpp.v2i

Harnel, & Buharman. (2011). Kajian Teknis dan Ekonomis Mesin Penyiang (Power Weeder) Padi di Lahan Sawah Tadah Hujan. *Jurnal Pengkajian Dan Pengembangan Teknologi Pertanian*, *14*(1), 1–10.

Ilham Ladonu, M., Bahri Madaa, S., A. Zaenudin, R., Rustiawati, Y., & Djamaluddin, I. (2024). Analisis Pendapatan Usahatani Padi Sawah Di Kelurahan Sisipan Kecamatan Batui Kabupaten Banggai. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Fakultas Pertanian*, *4*(3), 487–496. https://doi.org/10.52045/jimfp.v4i3.735

Makowski, D., Hendrix, E. M. T., Van Ittersum, M. K., & Rossing, W. A. H. (2001). Generation and presentation of nearly optimal solutions for mixed-integer linear programming, applied to a case in farming system design. *European Journal of Operational Research*, *132*(2), 425–438. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00134-X

Minh, N. T., Ha, N. T. T., & Duong, N. D. (2025). Application Of Mixed Integer Linear Programming Model In Optimizing The Export Wood Transportation Network For Small And Medium Enterprises In Hanoi. *International Journal of Applied Mathematics*, *38*(10), 1898–1909.

Novitasari, R., Iswahyono, Dinsaputro, M. L., Djamila, S., & Sari, E. K. N. (2025). Analisis Biaya Pemupukan Secara Manual dan Mekanis Menggunakan Fertilizer Applicator pada Budidaya Tebu di PG. Madukismo Yogyakarta. *Jurnal Teknik Pertanian Terapan*, *3*(1), 16–27.

Nugroho, T., Abidin, Z., & Marlina, L. (2019). Dampak Fenomena El Nino Terhadap Pendapatan Usahatani dan Pola Tanam Petani Padi di Kecamatan Natar Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Ilmu-Ilmu Agribisnis*, *7*(1), 75–82.

Palit, C., Sabubun, A., Zalalludin, A., Kapele, D., Kusnadi, D., Zendrato, J., & Bisuan, S. (2025). Optimalisasi Produksi Usaha Kuliner: Pendekatan Linear Programming Pada Rumah Makan Jawa Lumintu. *Griya Journal of Mathematics Education and Application*, *5*(4), 2217–2233. https://doi.org/10.29303/griya.v5i4.992

Pratiwi, A. I., Mansur, A., & Prawibowo, S. T. (2025). A Mixed-Integer Linear Programming Model for the Rice Supply Chain in Karawang Regency to Minimize Costs. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, *4*(3), 993–1006.

Putra, I. M. A. P., Manurung, J., & Saragih, H. (2026). Mixed integer linear programming for cadet dormitory placement at Indonesia Defense University. *Jurnal Mandiri IT*, *14*(3), 318–331.

Rahmah, A. F., Mandamdari, A. N., & Sukmaya, S. G. (2024). Analisis Usahatani dan Perhitungan Harga Pokok Produksi Padi Protani di Kecamatan Kemangkon dan Kecamatan Padamara Kabupaten Purbalingga. *Mimbar Agribisnis : Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, *10*(2), 1843–1851. https://doi.org/13643

Rhofita, E. I. (2022). Optimalisasi Sumber Daya Pertanian Indonesia untuk Mendukung Program Ketahanan Pangan Dan Energi Nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, *28*(1), 82–100.

Saves, F., Soebagio, & Widodo, W. T. (2022). Optimalisasi Keuntungan Produksi Tanaman

Menggunakan Program Linear Berdasarkan Pola Tata Tanam. *Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa, Dan Teknologi*, *10*(1), 232–241. https://doi.org/10.37971/radial.v10i1.247

Sinaga, L. P., Habibi, R., & Panggabean, S. (2026). Optimization of operational cost planning in integrated farming systems using a mixed-integer linear programming approach. *AXIOM : Jurnal Pendidikan Dan Matematika*, *15*(1), 42. https://doi.org/10.30821/axiom.v15i1.26491

Watkins, K. B., Hill, J. L., Anders, M. M., & Windham, T. E. (2006). Whole-Farm Evaluation of No-Till Profitability in Rice Production using Mixed Integer Programming. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, *38*(3), 611–627. https://doi.org/10.1017/s1074070800022653

Wicaksono, A., Wibowo, R. S., & Negara, I. M. Y. (2024). Optimasi Perencanaan Operasi Pembangkit Listrik Berbasis Mixed Integer Linear Programming (Milp) Pada Sistem Isolated Selayar. *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, *7*(3), 727–737.

Zahasfana, L. L., Kuntadi, E. B., & Aji, J. M. M. (2017). Curahan Tenaga Kerja Pada Usahatani Padi Di Desa Gumelar Kecamatan Balung Kabupaten Jember. *Agribest*, *01*(02), 168–179.

Zhang, C., Engel, B. A., Guo, P., Zhang, F., Guo, S., Liu, X., & Wang, Y. (2018). An inexact robust two-stage mixed-integer linear programming approach for crop area planning under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, *204*, 489–500. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.005