

Optimalisasi Lahan Pemanenan Kayu Cempaka Menggunakan *Mixed Integer Linear Programming* di Tareran Minahasa Selatan

Nofrani A. M. Repi¹, Yohanes A. R. Langi¹, Charles E. Mongi^{1*}

¹Jurusan Matematika–Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam–Universitas Sam Ratulangi Manado, Indonesia

*Corressponding author: charlesmongi@unsrat.ac.id

ABSTRAK

Pengelolaan hutan milik secara optimal merupakan langkah penting dalam menjaga kelestarian sumber daya alam dan memaksimalkan pendapatan petani. Penelitian ini mengembangkan model matematika dengan pendekatan *Mixed integer linear programming* (MILP). Tujuan penelitian ini untuk menentukan strategi optimal pemanenan kayu cempaka dalam lima periode (sepuluh tahun) yang mencakup penjadwalan pemanenan dan proporsi pemanenan untuk menghasilkan pendapatan maksimum petani. Model ini diterjemahkan ke bahasa pemrograman Python menggunakan *library PuLP*. Hasil penelitian dari 14 lahan menunjukkan bahwa pendapatan maksimum yang dapat diperoleh selama lima periode pemanenan sebesar Rp27.341.999.997. Pemilihan lahan pemanenan selama lima periode adalah sebagai berikut: pada periode 1, lahan 4, 6, dan 13 dipanen seluruhnya yaitu 100%, sedangkan lahan 3 dipanen dengan proporsi sebesar 92,97%. Pada periode 2, lahan 14 dipanen seluruhnya, sedangkan lahan 1 dipanen dengan proporsi 64,65%, lahan 2 dan 8 dengan proporsi masing-masing 1%, serta lahan 10 dengan proporsi 58,13%. Pada periode 3, lahan 9 dipanen seluruhnya yaitu 100%, sedangkan lahan 5 dipanen dengan proporsi 85,40%. Pada periode 4, lahan 11 dipanen seluruhnya yaitu 100%, sedangkan lahan 10 dipanen dengan proporsi 41,87%. Pada periode 5, lahan 12 dipanen seluruhnya yaitu 100%, sedangkan lahan 2 dipanen dengan proporsi 99% dan lahan 7 dipanen dengan proporsi 13,55%.

ABSTRACT

Optimal management of privately owned forests is a crucial step in preserving natural resources while maximizing farmers' income. This study develops a mathematical model using the Mixed Integer Linear Programming (MILP) approach. The objective of this research is to determine an optimal harvesting strategy for cempaka wood across five periods (ten years), resulting harvesting decisions and harvesting proportions to achieve maximum farmer revenue. The model was implemented in Python programming language using the PuLP library. The research results from 14 plots showed that the maximum revenue obtainable over five harvesting periods amounts to IDR 27,341,999,997. The harvesting schedule across the five periods was structured as follows: In Period 1, Plots 4, 6, and 13 are allocated full harvesting (100% proportion), while Plot 3 is allocated a 92.97% harvest proportion. Period 2 allocates Plot 14 for full harvest (100%), while Plot 1 allocated 64.65% harvest proportion, Plots 2 and 8 are allocated 1% each and Plot 10 allocated 58.13% proportions respectively. During Period 3, Plot 9 is allocated complete harvesting (100%), Plot 5 is allocated an 85.40% proportion. Period 4 allocates Plot 11 for full harvest (100%), with Plot 10 allocated a 41.87% proportion. Period 5 allocates Plot 12 for complete harvesting (100%), while Plots 2 and 7 are allocated 99% and 13.55% proportions.

INFO ARTIKEL

Diterima :

Diterima setelah revisi :

Tersedia online :

Kata Kunci:

Kayu Cempaka
Optimalisasi Lahan
Mixed Integer Linear Programming
Pendapatan Petani
PuLP

ARTICLE INFO

Accepted :

Accepted after revision :

Available online :

Keywords:

Cempaka Wood
Land Optimization
Mixed Integer Linear Programming
Farmers' Income
PuLP

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan hutan merupakan aspek penting dalam pembangunan nasional yang bertujuan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Pemanfaatan ekosistem hutan sangat penting bagi kehidupan

masyarakat, namun harus dilakukan secara bijak untuk memastikan kelestarian dan keberlanjutan sumber daya alam [1]. Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki sumber daya alam hutan milik berupa kayu cempaka adalah Sulawesi Utara. Kayu cempaka di

daerah Sulawesi Utara banyak digunakan sebagai bahan bangunan karena kualitasnya yang baik [2]. Selain itu, kayu cempaka sering dimanfaatkan sebagai bahan untuk pembuatan meubel, termasuk papan, balok, lantai, kusen, pintu, dan jendela [3].

Salah satu lokasi yang banyak ditemukan hutan milik yang ditanami kayu cempaka adalah Tareran, Minahasa Selatan [4]. Penjadwalan lahan yang optimal untuk pemanenan sangat penting, tidak hanya dari aspek ekonomi tetapi juga pelestarian keanekaragaman hayati. Jika lahan pemanenan yang dipilih tidak optimal, maka hasil kayu yang diperoleh tidak maksimal [5].

Penjadwalan lahan pemanenan kayu cempaka perlu dioptimalkan dengan pendekatan yang tepat. Salah satu metode yang efektif adalah *mixed integer linear programming* (MILP), karena mampu mempertimbangkan berbagai kendala dan tujuan. Penelitian ini menerapkan MILP untuk mengoptimalkan penjadwalan pemanenan kayu cempaka di Tareran, Minahasa Selatan dalam lima periode, dengan masing-masing periode terdiri atas dua tahun. Pemilihan waktu pemanenan mempertimbangkan prinsip pengelolaan hutan lestari, agar tegakan dapat pulih dan dampak negatif terhadap ekologis dapat diminimalkan.

Mixed Integer Linear Programming

Program linear bertujuan untuk membuat rencana kegiatan agar memperoleh hasil yang optimal [6]. Nilai optimal adalah nilai yang didapat melalui suatu proses dan dianggap menjadi solusi jawaban paling baik [7]. *Mixed integer linear programming* (MILP) adalah suatu metode optimasi yang menggabungkan variabel bilangan bulat dan kontinu dalam satu model. MILP digunakan untuk memecahkan masalah optimasi dengan fungsi tujuan linear yang ingin dimaksimalkan atau diminimalkan, serta kendala berbentuk persamaan atau pertidaksamaan linear. Dalam model MILP, variabel keputusan dapat berupa bilangan bulat, bilangan bulat positif, atau bilangan kontinu [8]. Bentuk umum dari model MILP diformulasikan sebagai berikut:

Maksimum/minimum:

$$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

Kendala

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_i x_j & (\geq / = / \leq b_j) \\ x_j & \geq 0, \text{ untuk setiap } x_j \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk $i = 1, 2, 3, \dots, m$ dan $j = 1, 2, 3, \dots, n$

Keterangan

- z : Fungsi tujuan;
- c_j : Parameter fungsi tujuan;
- x_j : Variabel keputusan;
- a_i : Parameter fungsi kendala;
- b_j : Nilai ruas kanan.

PuLP

Python adalah bahasa pemrograman populer yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk optimasi karena ekosistem *library*-nya yang luas [8]. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan Python dan *library* PuLP untuk menyelesaikan masalah MILP. PuLP

memungkinkan penyusunan model matematis, mengatur kendala-kendala, penentuan fungsi tujuan, dan pencarian solusi optimal.

Perhitungan Volume Pohon

Pendugaan volume pohon dapat dilakukan dengan pendekatan rumus geometrik yang menyatakan bahwa volume pohon merupakan hasil perkalian antara volume silinder dengan angka bentuk batang. Pendugaan volume dapat dihitung dengan rumus pada Persamaan 3 [9],

$$V = 0,25\pi \times \left(\frac{Dbh}{100}\right)^2 \times H \times F \quad (3)$$

Keterangan:

- V : Volume pohon (m^3)
- π : 3,14
- Dbh : Diameter pohon setinggi dada (cm)
- H : Tinggi pohon (m)
- F : Angka bentuk (0,6)

Perhitungan Riap Pohon

Pendekatan perhitungan riap yang digunakan dalam penelitian ini adalah MAI (*Mean Annual Increment*) atau riap rata-rata tahunan. Perhitungan riap diameter pohon setinggi dada Dbh (*Diameter at Breast Height*) dilakukan menggunakan rumus pada Persamaan 4 [10].

$$MAI \ Dbh = \frac{Dbh_t}{t} \quad (4)$$

Selain itu, Perhitungan riap tinggi pohon dilakukan dengan rumus pada Persamaan 5.

$$MAI \ H = \frac{H_t}{t} \quad (5)$$

Keterangan:

- Dbh_t : Diameter pohon setinggi dada pada umur ke- t (cm)
- H_t : Tinggi pohon pada umur ke- t (m)
- t : Umur (tahun)

2. METODE PENELITIAN

Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer berupa harga jual kayu cempaka dan data sekunder volume kayu cempaka, luas lahan, serta informasi ketetanggaan antar lahan pada tahun 2024.

Sumber Data

Sumber data primer diperoleh melalui wawancara dan sumber data sekunder diperoleh melalui sumber internal yang melakukan survei langsung ke lapangan.

Tahapan Penelitian

Adapun tahapan dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

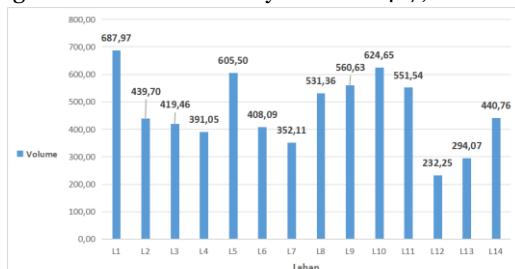
1. Pengumpulan Data
2. Mengidentifikasi Variabel Keputusan, Fungsi Kendala dan Fungsi Tujuan
3. Memformulasikan Model Matematis MILP
4. Olah Model Menggunakan Python
5. Interpretasi Hasil dan Menarik Kesimpulan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Data

Volume Kayu Cempaka

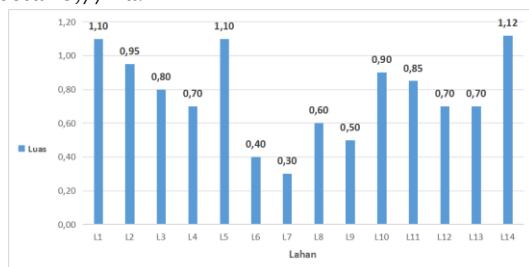
Gambar 1 memperlihatkan volume kayu cempaka dari 14 lahan pada tahun 2024. Lahan 1 atau L1 memiliki volume tertinggi sebesar 687,97 m³. Sebaliknya Lahan 12 atau L12 memiliki volume terendah yaitu 232,23 m³. Dengan rata-rata volume kayu sebesar 467,08 m³.



Gambar 1. Volume Kayu Pada Setiap Lahan (m³)

Luas Lahan Pemanenan

Luas lahan menggambarkan total area dari setiap lahan yang menjadi objek penelitian, dinyatakan dalam satuan hektare (ha). Gambar 3 berikut menyajikan luas dari 14 lahan. Lahan 14 atau L14 memiliki luas terbesar yaitu 1,12 hektare, sedangkan Lahan 7 atau L7 memiliki luas terkecil yaitu 0,30 ha. Dengan rata-rata luas lahan sebesar 0,77 ha.



Gambar 2. Luas Lahan (hektare)

Harga Jual Kayu Cempaka

Berdasarkan observasi yang dilakukan pada Desember 2024, harga kayu cempaka berkisar antara Rp2.500.000–Rp3.000.000 per m³, sehingga digunakan rata-rata yaitu Rp2.750.000 per m³. Harga diasumsikan naik 5% setiap periode dengan pertimbangan dinamika permintaan pasar [11]. Harga jual kayu cempaka per m³ dalam setiap periode yang disajikan pada Tabel 1.

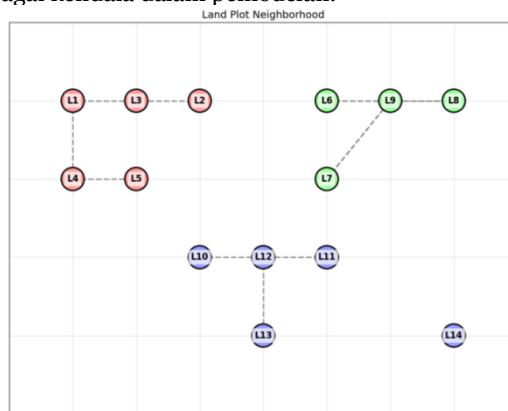
Tabel 1. Harga Jual Kayu Cempaka dalam Setiap Periode (Juta Rupiah)

Periode	Harga Jual
1	2,75
2	2,89
3	3,03
4	3,18
5	3,34

Ketetanggaan Lahan

Gambar 3 memperlihatkan visualisasi 14 lahan pemanenan kayu cempaka yang dikelompokkan berdasarkan lokasi ketetanggaan. Lahan 1 bersebelahan dengan Lahan 3 dan Lahan 4. Lahan 2 bersebelahan dengan Lahan 3, Lahan 4 bersebelahan dengan Lahan 5, Lahan 6 bersebelahan dengan Lahan 8 dan Lahan 9, Lahan 7 bersebelahan dengan Lahan 9, Lahan 8 juga

bersebelahan dengan Lahan 9, Lahan 10 bersebelahan dengan Lahan 12, Lahan 11 bersebelahan dengan Lahan 12, dan Lahan 12 bersebelahan dengan Lahan 13. Visualisasi ini memberikan gambaran mengenai persebaran lokasi lahan penelitian yang akan digunakan sebagai kendala dalam pemodelan.



Gambar 3. Visualisasi Lahan Pemanenan Berdasarkan Lokasi Ketetanggaan

Dalam model matematika, hubungan ketetanggaan lahan dinyatakan sebagai himpunan pasangan berurutan:

$$A = \{(1,3), (1,4), (2,3), (4,5), (6,8), (6,9), (7,9), (8,9), (10,12), (11,12), (12,13)\}$$

Pengolahan Data

Proyeksi Volume Pohon

Proyeksi volume pohon pada setiap lahan dihitung berdasarkan rata-rata tahunan (*Mean Annual Increment/MAI*). Perkiraan pertumbuhan diameter dan tinggi pohon untuk setiap periode dilakukan dengan menambahkan hasil riap pada nilai awal, sehingga diperoleh proyeksi *Dbh* dan tinggi pohon di periode berikutnya. Data proyeksi volume pohon pada 14 lahan selama lima periode pemanenan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Perkiraan Volume Setiap Lahan dalam Setiap Periode (m³)

Nama Lahan	Periode 1 Tahun 2026	Periode 2 Tahun 2028	Periode 3 Tahun 2030	Periode 4 Tahun 2032	Periode 5 Tahun 2034
L1	834,95	1001,49	1188,82	1398,17	1630,75
L2	533,63	640,07	759,80	893,59	1042,24
L3	509,07	610,61	724,83	852,47	994,28
L4	474,58	569,25	675,73	794,72	926,92
L5	715,34	837,72	973,33	1122,83	1286,90
L6	495,27	594,06	705,18	829,37	967,33
L7	443,56	549,61	671,35	809,85	966,20
L8	644,88	773,51	918,19	1079,89	1259,53
L9	680,40	816,11	968,77	1139,37	1328,90
L10	758,09	909,30	1079,39	1269,46	1480,64
L11	694,78	860,89	1051,57	1268,52	1513,41
L12	292,57	362,52	442,82	534,17	637,30
L13	356,89	428,08	508,15	597,64	697,06
L14	520,72	609,81	708,52	817,35	936,78

Pengembangan Model Matematika

Model MILP bertujuan untuk mengoptimalkan lahan pemanenan kayu cempaka dengan memaksimalkan pendapatan. Pengembangan model matematika ini terdiri dari *set*, parameter, variabel keputusan, fungsi tujuan, dan fungsi kendala.

1. Set

I : Himpunan lahan pemanenan

$$I = \{1, 2, 3, \dots, 14\}$$

T : Himpunan periode waktu pemanenan

$$T = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$A = \{(i,j) \mid \text{lahan } i \text{ dan } j \text{ saling berdekatan}\}$$

$$A = \{(1,3), (1,4), (2,3), (4,5), (6,8), (6,9), (7,9), (8,9), (10,12), (11,12), (12,13)\}$$

2. Parameter

V_{it} : Volume kayu yang dipanen di lahan i pada periode t (m^3)

P_{it} : Harga jual kayu di lahan i pada periode t (jutarupiah)

V_{max} : Batas volume kayu yang dapat dipanen per periode (m^3)

3. Variabel Keputusan

X_{it} : Variabel yang menunjukkan apakah lahan i dipanen pada periode t . Variabel ini merupakan variabel biner, dengan nilai:

$$X_{it} = \begin{cases} 1, & \text{jika lahan } i \text{ dipanen pada periode } t \\ 0, & \text{jika tidak dipanen} \end{cases}$$

Y_{it} : Variabel yang menunjukkan proporsi pemanenan kayu pada lahan i di periode t . Variabel ini merupakan variabel kontinu dalam rentang 0 sampai 1

$$0 \leq Y_{it} \leq 1$$

4. Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dalam model MILP ini adalah memaksimalkan total pendapatan dari pemanenan kayu cempaka pada 14 lahan selama lima periode (masing-masing dua tahun). Pendapatan dihitung berdasarkan harga jual per meter kubik, volume kayu yang tersedia di setiap lahan dan periode, serta proporsi kayu yang dipanen. Model matematis fungsi tujuan dirumuskan untuk memperoleh hasil panen dan pendapatan maksimum dari seluruh lahan dan periode pemanenan yang dimodelkan pada Persamaan 6.

$$\max z = \sum_{i=1}^{14} \sum_{t=1}^5 P_{it} V_{it} Y_{it} \quad (6)$$

5. Fungsi Kendala

Adapun kendala-kendala dalam pemanenan kayu cempaka adalah sebagai berikut:

A. Kendala 1: Batasan Pemanenan Lahan

Pemanenan lahan dilakukan minimal satu kali untuk setiap lahan dalam lima periode. Batasan ini dibuat untuk memastikan bahwa seluruh lahan memperoleh giliran pemanenan selama periode perencanaan, sehingga tidak ada lahan yang terabaikan.

$$\sum_{t=1}^5 X_{it} \geq 1; \forall i \in I \quad (7)$$

B. Kendala 2: Batasan Proporsi Pemanenan

Batasan ini memastikan bahwa total pemanenan dalam suatu lahan tidak melebihi 100% selama lima periode.

$$\sum_{t=1}^5 Y_{it} \leq 1; \forall i \in I \quad (8)$$

C. Kendala 3: Batasan Volume Kayu

Total volume kayu yang dipanen pada setiap periode dibatasi maksimal 1.800 m^3 . Pembatasan ini bertujuan untuk mencegah pemanenan serentak di seluruh lahan pada periode yang sama sehingga risiko kegundulan hutan dapat diminimalkan. Nilai batas ini berada di bawah nilai kapasitas pertumbuhan volume kayu dan sejalan dengan regulasi kehutanan Indonesia, yang menekankan pentingnya menjaga keseimbangan antara

pemanfaatan dan pelestarian, sebagaimana tercantum dalam standar *Indonesian Forestry Certification Cooperation* (IFCC) yang menyatakan bahwa pemanenan hasil hutan harus tidak melebihi rata-rata pertumbuhan tahunan.

$$\sum_{i=1}^{14} V_{it} Y_{it} \leq 1.800 (\text{m}^3); \forall t \in T \quad (9)$$

D. Kendala 4: Batasan Larangan Pemanenan Dua Lahan yang Berdekatan

Jika dua lahan saling berdekatan, keduanya tidak boleh dipanen pada periode yang sama. Hanya satu dari dua lahan yang berdekatan yang boleh dipanen dalam satu periode.

$$X_{it} + X_{jt} \leq 1; \forall (i,j) \in A \text{ dan } \forall t \in T \quad (10)$$

E. Kendala 5: Hubungan antara X_{it} dan Y_{it}

Batasan ini memastikan konsistensi antara keputusan pemanenan dan proporsi pemanenan.

Jika $X_{it} = 0$, maka $Y_{it} = 0$ artinya tidak ada pemanenan.

Jika $X_{it} = 1$, maka $0 < Y_{it} \leq 1$ artinya pemanenan bisa dilakukan sebagian atau sepenuhnya.

$$Y_{it} \leq X_{it} \quad (11)$$

$$Y_{it} \geq 0.01 \cdot X_{it} \quad (12)$$

Pengembangan Model Python

Model optimasi dalam penelitian ini diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dan *library* PuLP pada platform Google Colab. Python dipilih karena mudah digunakan, fleksibel, dan bersifat *open source*, sedangkan PuLP digunakan untuk memformulasikan dan menyelesaikan masalah optimasi linear dan *integer*. Program yang dibuat merepresentasikan pemodelan matematika penelitian dan menghasilkan solusi optimal sesuai fungsi tujuan. Pengembangan model Python disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pemodelan Matematika Menggunakan Python

Variabel Keputusan	$X = pulp.LpVariable.dicts("X", [(i, t) for i in LAHAN for t in PERIODE], cat='Binary')$ $Y = pulp.LpVariable.dicts("Y", [(i, t) for i in LAHAN for t in PERIODE], lowBound=0, upBound=1, cat='Continuous')$
Model Maksimum	$model = pulp.LpProblem("Maximize_Revenue", pulp.LpMaximize)$
Fungsi Tujuan	$model += pulp.lpSum(P[(i, t)] * V[(i, t)] * Y[(i, t)] for i in LAHAN for t in PERIODE)$
Fungsi Kendala 1	$for i in LAHAN:$ $model += pulp.lpSum(X[(i, t)] for t in PERIODE) \geq 1$
Fungsi Kendala 2	$for i in LAHAN:$ $model += pulp.lpSum(Y[(i, t)] for t in PERIODE) \leq 1$
Fungsi Kendala 3	$for t in PERIODE:$ $model += pulp.lpSum(V[(i, t)] * Y[(i, t)] for i in LAHAN) \leq 1800$
Fungsi Kendala 4	$for i in LAHAN:$ $for j in LAHAN:$ $if A.get((i, j), 0) == 1:$ $for t in PERIODE:$ $model += X[(i, t)] + X[(j, t)] \leq 1$
Fungsi Kendala 5	$for i in LAHAN:$ $for t in PERIODE:$ $model += Y[(i, t)] \leq X[(i, t)]$ $model += Y[(i, t)] \geq 0.01 * X[(i, t)]$

Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan untuk memastikan bahwa program MILP berjalan sesuai logika yang

Optimalisasi Lahan Pemanenan Kayu Cempaka Menggunakan Mixed Integer Linear Programming di Tareran Minahasa Selatan

d'Cartesian: Jurnal Matematika dan Aplikasi, Vol. 14, No. 2, (September 2025): 129-135

dirancang. Model dinyatakan tervalidasi jika dapat dijalankan tanpa *error* dan menghasilkan *output* variabel keputusan serta nilai fungsi tujuan yang sesuai. Hasil *run* model menunjukkan status optimal, menampilkan hasil total pendapatan maksimum dalam seluruh periode dan *output* variabel keputusan sehingga model dapat dikatakan tervalidasi, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Run Model Pada Program Python

Status	Optimal
Total Pendapatan Maksimum	27341.999997112496
Variabel Keputusan	X('L1',_1)= 0.0 Y('L1',_1)= 0.0 X('L2',_1)= 0.0 Y('L2',_1)= 0.0 X('L3',_1)= 1.0 Y('L3',_1)= 0.92965604 X('L4',_1)= 1.0 Y('L4',_1)= 1.0 X('L5',_1)= 0.0 Y('L5',_1)= 0.0 X('L6',_1)= 1.0 Y('L6',_1)= 1.0 X('L7',_1)= 0.0 Y('L7',_1)= 0.0 X('L8',_1)= 0.0 Y('L8',_1)= 0.0 X('L9',_1)= 0.0 Y('L9',_1)= 0.0 X('L10',_1)= 0.0 Y('L10',_1)= 0.0 X('L11',_1)= 0.0 Y('L11',_1)= 0.0 X('L12',_1)= 0.0 Y('L12',_1)= 0.0 X('L13',_1)= 1.0 Y('L13',_1)= 1.0 X('L14',_1)= 0.0 Y('L14',_1)= 0.0

Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk memastikan solusi yang dihasilkan memenuhi seluruh fungsi tujuan dan kendala yang telah dirumuskan. Proses ini mencakup pengecekan pemenuhan kendala, konsistensi variabel keputusan, dan validasi fungsi tujuan. Hasil validasi menunjukkan seluruh kendala telah terpenuhi dan solusi yang diperoleh sudah tervalidasi dan tindak melanggar fungsi kendala seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Validasi Model dengan Peninjauan Fungsi Kendala

No	Fungsi Kendala	Hasil	Keterangan
1.	Memastikan pemanenan setiap lahan dilakukan minimal satu kali dalam lima periode.	Setiap lahan dipanen minimal satu kali dalam lima periode yang tersedia.	Terpenuhi
2.	Memastikan proporsi pemanenan dari setiap lahan dalam seluruh periode tidak melebihi 100%.	Seluruh lahan memiliki proporsi pemanenan yang tidak melebihi 100% dalam setiap periode.	Terpenuhi
3.	Memastikan total volume kayu yang dipanen pada setiap periode tidak melebihi volume maksimal yang dapat dipanen.	Total volume kayu yang dipanen pada setiap periode tidak melebihi batas maksimal yang ditentukan.	Terpenuhi
4.	Memastikan dua lahan yang berdekatan tidak dipanen pada periode yang sama.	Tidak ada dua lahan berdekatan yang dipanen pada periode yang sama.	Terpenuhi
5.	Mendefinisikan hubungan variabel keputusan proporsi pemanenan bergantung pada variabel keputusan pemanenan (dipanen atau tidak).	Setiap lahan yang dipanen memiliki proporsi pemanenan yang bergantung pada status lahan tersebut (dipanen atau tidak).	Terpenuhi

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan manual terhadap fungsi tujuan. Perhitungan yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Validasi Peninjauan Fungsi Tujuan

Periode	Lahan yang Dipanen	Harga Jual (Juta Rupiah)	Volume (m³)	Proporsi Pemanenan (%)	max z (Juta Rupiah)
Periode 1	L3	2,75	509,07	92,97	1301,465001
Periode 1	L4	2,75	474,58	100,00	1305,095000
Periode 1	L6	2,75	495,27	100,00	1361,992500
Periode 1	L13	2,75	356,89	100,00	981,447500
Periode 2	L1	2,89	1001,49	64,65	1871,122932
Periode 2	L2	2,89	640,07	1,00	18,498023
Periode 2	L8	2,89	773,51	1,00	22,354439
Periode 2	L10	2,89	909,30	58,13	1527,673722
Periode 2	L14	2,89	609,81	100,00	1762,350900
Periode 3	L5	3,03	973,33	85,40	2518,626902
Periode 3	L9	3,03	968,77	100,00	2935,373100
Periode 4	L10	3,18	1269,46	41,87	1690,106382
Periode 4	L11	3,18	1268,52	100,00	4033,893600
Periode 5	L2	3,34	1042,24	99,00	3446,270784
Periode 5	L7	3,34	966,20	13,55	437,147212
Periode 5	L12	3,34	637,30	100,00	2128,582000
TOTAL (max z)					27341,9999997

Dari hasil perhitungan menggunakan program Python yang disajikan pada Tabel 4 dan perhitungan manual yang disajikan pada Tabel 6, didapatkan nilai fungsi tujuan berupa nilai maksimum dari pendapatan pemanenan yang sama, yaitu sebesar Rp27.341.999.997. Dari kedua hasil ini, dapat dilihat bahwa tidak ada perbedaan dalam perhitungan. Selain itu, semua fungsi kendala telah terpenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa hasil model telah tervalidasi.

Hasil Pengolahan Data

Model MILP yang dikembangkan menghasilkan solusi optimal dengan pendapatan maksimum sebesar Rp27.341.999.997 selama lima periode pemanenan. Keputusan pemanenan dan proporsi panen setiap lahan pada masing-masing periode ditentukan berdasarkan hasil optimasi. Lahan yang dipanen pada setiap periode serta proporsi panennya bervariasi, menyesuaikan faktor volume, nilai ekonomi, dan batasan keberlanjutan. Rincian hasil dari variabel keputusan pemanenan dan proporsi pemanenan disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perencanaan Pemanenan Kayu Cempaka dalam Lima Periode

Lahan	Periode 1		Periode 2		Periode 3		Periode 4		Periode 5	
	X	Y (%)								
L1	0	0	1	64,65	0	0	0	0	0	0
L2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	99
L3	1	92,97	0	0	0	0	0	0	0	0
L4	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0
L5	0	0	0	0	1	85,40	0	0	0	0
L6	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0
L7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	13,55
L8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
L9	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0
L10	0	0	1	58,13	0	0	1	41,87	0	0
L11	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0
L12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100
L13	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0
L14	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0

Hasil menunjukkan, pada periode 1 yaitu tahun 2026, lahan 4, 6, dan 13 dipanen seluruhnya atau 100%, sedangkan lahan 3 dipanen dengan proporsi 92,97%. Pada periode 2 yaitu tahun 2028, lahan 14 dipanen seluruhnya atau 100%, lahan 1 dipanen dengan proporsi 64,65%, lahan 2 dan 8 dipanen dengan proporsi masing-masing 1%, dan lahan 10 dipanen dengan proporsi 58,13%. Pada periode 3 yaitu tahun 2030, lahan 9 dipanen seluruhnya atau 100% dan lahan 5 dipanen dengan proporsi 85,40%. Pada periode 4 yaitu tahun 2032, lahan 11 dipanen seluruhnya atau 100% dan lahan 10 dipanen dengan proporsi 41,87%. Pada periode 5 yaitu tahun 2034, lahan 12 dipanen seluruhnya atau 100%, lahan 2 dipanen dengan proporsi 99%, dan lahan 7 dipanen dengan proporsi 13,55%.

Estimasi jumlah pohon yang dipanen diperoleh dengan membagi volume panen hasil optimasi dengan rata-rata volume per pohon di setiap lahan dan periode. Hasilnya, jumlah pohon yang dipanen pada setiap lahan dan periode bervariasi sesuai dengan proporsi dan volume panen yang telah dioptimalkan.

Pada periode 1, kegiatan pemanenan dilakukan pada beberapa lahan dengan jumlah pohon yang dipanen sebagai berikut: Lahan 3 sebanyak 464 pohon, Lahan 4 sebanyak 437 pohon, Lahan 6 sebanyak 280 pohon, dan Lahan 13 sebanyak 437 pohon. Sedangkan periode 2, pemanenan dilakukan di Lahan 1 sebanyak 444 pohon, Lahan 2 sebanyak 5 pohon, Lahan 8 sebanyak 3 pohon, Lahan 10 sebanyak 326 pohon, dan Lahan 14 sebanyak 700 pohon. Pada periode 3, pemanenan dilakukan pada Lahan 5 sebanyak 586 pohon dan Lahan 9 sebanyak 462 pohon. Pada periode 4, pemanenan dilakukan pada Lahan 10 sebanyak 235 pohon dan lahan 11 sebanyak 531 pohon. Pada periode 5 pemanenan dilakukan di Lahan 2 sebanyak 587 pohon, Lahan 7 sebanyak 37 pohon, dan Lahan 12 sebanyak 437 pohon.

4. PENUTUP **Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian untuk optimalisasi lahan pemanenan kayu cempaka menggunakan *mixed integer linear programming* pada hutan milik di Taeran, Minahasa Selatan, dapat disimpulkan bahwa model MILP mampu memberikan solusi optimal untuk penjadwalan pemanenan selama lima periode. Model ini mempertimbangkan fungsi tujuan berupa memaksimalkan pendapatan dan mempertimbangkan berbagai kendala.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pemanenan selama lima periode menghasilkan total pendapatan maksimum sebesar Rp27.341.999.997. Pada periode 1, lahan 4, 6, dan 13 dipanen seluruhnya, sedangkan lahan 3 dipanen dengan proporsi sebesar 92,97%. Pada periode 2, lahan 14 dipanen seluruhnya, sedangkan lahan 1 dipanen dengan proporsi 64,65%, lahan 2 dan 8 dengan proporsi masing-masing 1%, serta lahan 10 dengan proporsi 58,13%. Pada periode 3, lahan 9 dipanen seluruhnya, sedangkan lahan 5 dipanen 85,40%. Pada periode 4, lahan 11 dipanen seluruhnya,

sedangkan lahan 10 dipanen 41,87%. Pada periode 5, lahan 12 dipanen seluruhnya, sedangkan lahan 2 dipanen 99% dan lahan 7 dipanen dengan proporsi 13,55%.

REFERENSI

- [1] Wiyanto, A. 2022. *Hutan, Manusia dan Dinamika Pengelolaannya*. Bogor: Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- [2] Kurniawan, E. 2013. Teknik Pembuatan Bibit Cempaka (*Elmerrilia tsiampacca*) sebagai Materi Pembangunan Kebun Benih Semai Generasi Pertama (F-1). *Buletin Eboni*. **(10)1:** 1-13.
- [3] Langi, Y. A. R., Rindengan A. J., Mongi, C. E., Tumilaar, R., dan M. Langi. 2019. Optimal Model to Estimate Biomass and Carbon Stock at Agroforestry Stand Cempaka (*Elmerillia Sp*) in Minahasa District. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. **8(2S7):** 169-172.
- [4] Matitaputty, D. R., Langi, M. A., dan H. D. Walangitan. 2023. Persepsi Petani Terhadap Pengelolaan Hutan Rakyat Cempaka di Kabupaten Minahasa. *AGRI-SOSIOEKONOMI*. **19(2):** 1067-1074.
- [5] Damanik, S. E., Purwoko, A., dan R. Hidayat. 2019. A Mixed Integer Programming Model for Forest Harvest Scheduling Problem. In *Journal of Physics: Conference Series*. **1175(1):** 012-044.
- [6] Repi, J. Y. A., Paendong, M. S., dan M. L. Mananohas. 2024. Penerapan Metode Hungarian dalam Masalah Penugasan untuk Mengoptimalkan Waktu Karyawan di PT Ninja Express Amurang Minahasa Selatan. *d'CARTESIAN: Jurnal Matematika dan Aplikasi*. **13(1):** 30-36.
- [7] Manuputty, D. E. A., Montolalu, C. E. J. C., dan T. Manurung. 2021. Penentuan Jalur Terpendek Distribusi Air Mineral Menggunakan Ant Colony Optimization. *d'CARTESIAN: Jurnal Matematika dan Aplikasi*. **10(2):** 76-82.
- [8] Wantuah, A. 2024. Optimasi Biaya Distribusi Metode Hub & Spoke Menggunakan Mixed Integer Linear Programming (MILP) Pada Area Kalimantan-Sulawesi [skripsi]. Universitas Indonesia.
- [9] Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., dan R. Imanuddin. 2012. *Monograph Allometric Models for Estimating Tree Biomass at Various Forest Ecosystem Types in Indonesia*. Bogor: Research and Development Center for Conservation and Rehabilitation, Forestry Research and Development Agency.
- [10] Kesuma, R. A., Kustanti, A., dan R. Hilmanto. 2016. Pertumbuhan Riap Diameter Pohon Bakau Kurap (*Rhizophora Mucronata*) di Lampung Mangrove Center. *Jurnal Sylva Lestari*. **4(3):** 97-106.

- [11] Langi, Y. A. R., Manurung, T., Montolalu, C., Tumilaar, R., dan M. Langi. 2023. Sustainable Harvest System Optimization Model of Cempaka Tree (*Elmerillia sp.*) in Carbon Trade Scenario. AIP Conference Proceedings; Manado, 26 April 2023.

Nofrani Anastasya Mayasari Repi

(repinofrani@gmail.com)



Lahir di Kotamobagu, Sulawesi Utara pada tanggal 12 November 2003. Menempuh pendidikan tinggi Jurusan Matematika, FMIPA, Universitas Sam Ratulangi Manado. Tahun 2025 adalah tahun terakhir ia menempuh studi. Makalah ini merupakan hasil penelitian skripsinya yang dipublikasikan.

Yohanes A. R. Langi (varlangi@gmail.com)



Lahir di Jakarta pada tanggal 13 Juni 1970. Pada tahun 1994 mendapatkan gelar Sarjana Sains (S.Si) yang diperoleh dari Universitas Kristen Indonesia-Tomohon. Gelar Magister Sains diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2007. Ia bekerja di UNSRAT di Program Studi Matematika sebagai pengajar akademik tetap UNSRAT.

Charles E. Mongi (charlesmongi@unsrat.ac.id)



Lahir di Tondano pada tanggal 4 Januari 1984. Pada tahun 2006 memperoleh Gelar Sarjana pada Program Studi Matematika, Universitas Sam Ratulangi. Gelar Magister Sains diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2014. Menjadi dosen di Jurusan Matematika FMIPA Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2008 sampai sekarang.