

Strategi Penguatan Pasokan Bahan Baku Biomassa Berkelanjutan Melalui Budidaya Tanaman Energi : Analisis Biofisik dan Kelayakan Finansial

Indah Irayani^{1*}, Widayat^{1,2}, Endang Kusdiantini^{1,3}, Jafron Wasiq Hidayat³

¹ Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang 50241 Indonesia

² Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang 50275 Indonesia

³ Departemen Biologi, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang 50275 Indonesia

*Email: indahirayani4@gmail.com

Artikel diterima: 20 November 2025 Revisi diterima: 15 Mei 2026.

ABSTRACT

Indonesia's efforts to achieve its renewable energy mix targets remain constrained by the instability of biomass feedstock supply. Enhancing the cultivation of high-productivity energy crops presents a strategic pathway to ensure a renewable and sustainable biomass supply chain. This study aims to assess land suitability for energy crop cultivation, estimate potential biomass yields from cultivation, and evaluate the economic feasibility of bioenergy production, specifically wood pellets derived from cultivated biomass. Land suitability analysis was performed through spatial overlay of slope, soil type, and rainfall parameters, employing the Land Suitability Index. Biomass potential was estimated using allometric models, while financial feasibility was assessed using standard economic indicators. Results show that 84,17 percent of the KHDTK Wanadipa area is classified as Permanent Production Forest, making it appropriate for cultivation development. *Calliandra* demonstrates higher biomass productivity compared to *Gliricidia*, reaching 32 tons/ha/year due to more frequent harvest cycles, whereas *Gliricidia* produces approximately 26,96 tons/ha/year. This productivity differential drives higher economic viability, reflected by an increased IRR for *Calliandra*-based pellet production (21%) compared to *Gliricidia*-based production (18%). An integrated scenario combining *Calliandra* cultivation, wood pellet production, and stingless bee honey farming delivers the strongest financial performance, achieving the highest net profit, an IRR of 24%, a positive NPV, and a payback period of 3.98 years. These findings indicate that optimizing crop productivity and diversifying revenue through integrated forestry business streams substantially improve project profitability and reinforce the investment feasibility of bioenergy development.

Key words: *Calliandra*, *Gliricidia*, Biopellet, Integrated Forestry Business, KHDTK Wanadipa.

ABSTRAK

Upaya Indonesia mencapai target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) terkendala pada stabilitas pasokan bahan baku. Pengembangan budidaya tanaman energi yang memiliki produktivitas tinggi sebagai sumber pasokan bahan baku biomassa yang terbarukan, dapat dijadikan sebagai solusi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kesesuaian lahan untuk budidaya, menganalisis potensi volume biomassa dari budidaya, dan menganalisis kelayakan ekonomi produksi bioenergi yaitu biopellet dari bahan baku biomassa hasil budidaya. Analisis kesesuaian lahan dilaksanakan melalui *overlay* spasial parameter kemiringan lereng, jenis tanah, dan curah hujan menggunakan Indeks Kesesuaian Lahan. Estimasi potensi biomassa dihitung dengan model alometrik, sementara kelayakan usaha dianalisis berdasarkan indikator finansial. Hasil analisis menunjukkan bahwa 84,17 persen area KHDTK Wanadipa diklasifikasikan sebagai Hutan Produksi Tetap sehingga layak untuk pengembangan budidaya. *Kaliandra* memiliki potensi produksi biomassa lebih tinggi dibanding gamal, dengan produktivitas mencapai 32 ton/ha/tahun akibat frekuensi panen yang lebih intensif, sedangkan gamal hanya sekitar 27 ton/ha/tahun. Perbedaan produktivitas tersebut berkontribusi pada peningkatan kelayakan ekonomi, di mana nilai IRR usaha biopellet *kaliandra* meningkat lebih tinggi (21%) dibandingkan usaha biopellet gamal (18%). Skenario integrasi budidaya *Kaliandra*, produksi biopellet, dan budidaya madu kelulut menghasilkan kinerja finansial paling unggul dengan laba bersih tertinggi, IRR 24%, NPV positif dan PBP 3,98 tahun. Temuan ini menegaskan bahwa optimalisasi produktivitas tanaman dan diversifikasi pendapatan melalui multiusaha kehutanan mampu memperkuat profitabilitas dan meningkatkan kelayakan investasi bioenergi.

Kata kunci: *Kaliandra*, Gamal, Biopellet, Multiusaha Kehutanan, KHDTK Wanadipa.

PENDAHULUAN

Merespon krisis iklim akibat tingginya emisi Gas Rumah Kaca (GRK), pemerintah Indonesia sejak 2017 menargetkan penurunan penggunaan energi fosil melalui pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan target bauran sebesar 23% pada 2025 (PP No. 79, 2014). Namun hingga September 2025, target tersebut belum tercapai. Pemerintah kemudian merevisi Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui PP No. 40 Tahun 2025 yang menyesuaikan target bauran energi menjadi 19–23% pada 2030 dan meningkat hingga 70–72% pada 2060. Dalam kebijakan ini, energi biomassa ditargetkan berkontribusi 7,2–9% pada 2030 dan tetap stabil sekitar 7% hingga 2060, menjadikannya penyumbang bauran EBT terbesar ketiga setelah energi surya dan nuklir (PP No 40, 2025).

Pemanfaatan biomassa diarahkan untuk menggantikan sebagian bahan bakar batubara di PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) melalui program co-firing, serta untuk produksi biogas industri dan transportasi. Beberapa bentuk bahan bakar biomassa yang biasa digunakan berupa cacahan (chip), serbuk (sawdust), dan pelet (pellet). Berdasarkan RUPTL PLN 2024–2033 dan data EBTKE (2024), tercatat sekitar 35 PLTU telah menerapkan *co-firing* biomassa secara konsisten dari total target 52 unit, dengan kapasitas mencapai 3.200 MW dan kebutuhan biomassa sekitar 10 juta ton per tahun. Angka ini menunjukkan bahwa kebutuhan bahan baku berada pada skala yang sangat besar dan memerlukan pasokan yang stabil serta berkelanjutan.

Indonesia memiliki potensi biomassa 146,7 juta ton per tahun yang sebagian besar diperoleh dari residu pertanian, perkebunan, peternakan, dan limbah pemukiman (Primadanty, 2024). Hermawan et al., (2024) misalnya, menganalisis pemanfaatan limbah Hutan Tanaman Industri (HTI) sebesar 105.379 ton/tahun sebagai pasokan bahan baku pabrik pelet kayu berkapasitas 80.000 ton/tahun. Penelitian Pantaleo et al., (2020) juga memanfaatkan biomassa limbah sawit sebagai bahan baku produksi bahan bakar pellet kayu. Pendekatan berbasis limbah dinilai efisien karena menekan biaya pengadaan bahan baku dan sekaligus mengurangi beban limbah. Namun, ketergantungan pada residu menjadikan sistem pasokan biomassa sangat dipengaruhi oleh dinamika sektor hulunya.

Ketersediaan bahan baku biomassa tidak sepenuhnya dapat dikendalikan karena bergantung pada luas lahan, kondisi iklim, produktivitas pertanian, serta volume residu yang dihasilkan. Dalam kondisi tertentu, seperti penurunan produksi akibat perubahan iklim atau gangguan sektor

pertanian, pasokan biomassa dapat mengalami fluktuasi yang signifikan. Rafique et al., (2021) menegaskan bahwa stabilitas dan keberlanjutan pasokan merupakan tantangan utama dalam pengembangan bioenergi, sementara (Zoma & Sawadogo, 2023) menunjukkan bahwa ketersediaan bahan baku menjadi faktor kunci dalam menjaga keberlanjutan produksi. Dengan demikian, ketersediaan bahan baku tidak hanya menjadi isu teknis, tetapi juga faktor penentu kelayakan ekonomi produksi bioenergi.

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan kepastian pasokan biomassa adalah melalui budidaya tanaman energi yang secara khusus ditujukan sebagai sumber bahan baku biopellet. Berbeda pasokan bahan baku dari residu, budidaya memungkinkan perencanaan produksi biomassa yang lebih terkontrol. Namun, efektivitas pendekatan ini sangat ditentukan oleh kesesuaian kondisi biofisik lahan dengan karakteristik tanaman energi yang dikembangkan. Oleh karena itu, analisis kesesuaian lahan perlu dilakukan sebagai tahap awal untuk memastikan produktivitas budidaya dan mendukung keberlanjutan pasokan bahan baku.

Menurut Williams et al., (2015), tidak semua jenis tanaman kehutanan dapat dijadikan sumber bahan baku biomassa energi. Untuk memaksimalkan efisiensi ekonomi, hanya tanaman kehutanan yang tidak termasuk dalam kelas kayu kuat pertukangan dan tidak bernilai ekonomi yang dapat digunakan sebagai bahan baku biomassa energi. Jenis tanaman untuk pasokan bahan baku bioenergi idealnya jenis spesies cepat tumbuh dan memiliki nilai kalor yang tinggi (Hudaedi et al., 2018). Saat ini jenis tanaman yang banyak dipilih adalah jenis gamal (*Gliricidia sepium*) dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) karena memiliki produktivitas biomassa yang tinggi dan umur panen yang cepat. Pellet kayu yang diperoleh juga memiliki kualitas bakar yang tinggi mencapai 4.300 kkal/kg (Hermawan et al., 2024).

Kegiatan budidaya tanaman energi sebagai pasokan bahan baku produksi akan menambah biaya investasi dan operasional usaha. Namun disisi lain, budidaya tanaman gamal dan kaliandra memberikan keuntungan lain seperti daun gamal yang dapat dimanfaatkan sebagai hijauan pakan ternak ruminansia sapi dan kambing. Sementara itu kaliandra dapat menjadi sumber pakan budidaya lebah. Penerapan Multiusaha dalam budidaya kehutanan dapat meningkatkan pendapatan dan kelayakan investasi (Bunjamin & Purnomo, 2020). Analisis kelayakan ekonomi terhadap budidaya amal dan kaliandra sebagai sumber bahan baku produksi biopellet menjadi penting untuk

menilai apakah skema tersebut tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga menguntungkan secara finansial.

Dalam literatur bioenergi, hubungan antara ketersediaan sumber daya biofisik, sistem produksi biomassa, dan kelayakan ekonomi sering diperlakukan sebagai tahapan yang berdiri sendiri. Penelitian (Simangunsong et al., 2017) misalnya yang hanya mengkaji studi kelayakan usaha produksi biopellet dan menetapkan ukuran skala usaha produksi biopellet yang layak tanpa mengestimasi pasokan bahan bakunya. Disisi lain penelitian (Zoma & Sawadogo, 2023) juga mengkaji terkait potensi pasokan bahan baku biomassa yang bersumber dari limbah saja, menggunakan *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) yaitu Analisis Hierarki Proses (AHP) dan TOPSIS, namun belum mengkaji terkait kelayakan usaha dan teknis produksi dari bahan baku tersebut. Penelitian Hudaedi et al., 2020 dan Hermawan et al., 2024 sama-sama mengkaji studi kelayakan terakit usaha produksi biopellet yang bersumber dari biomassa limbah kehutanan sehingga usaha budidaya tanaman tidk diperhitungkan. Belum banyak kajian yang mengintegrasikan ketiga komponen usaha biomassa energi tersebut secara komprehensif.

Padahal secara konseptual ketiga aspek yaitu pengadaan saling berkaitan: potensi biofisik menentukan kapasitas produksi, kapasitas produksi memengaruhi struktur biaya, dan struktur biaya menentukan kelayakan finansial. Tanpa integrasi ketiganya, perencanaan pengembangan biomassa energi berisiko menghasilkan estimasi yang tidak realistis atau tidak berkelanjutan. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan kerangka analisis terintegrasi yang menghubungkan hasil evaluasi kesesuaian lahan dan potensi produksi biomassa dengan perhitungan kelayakan ekonomi budidaya tanaman energi sebagai sumber bahan baku biopellet.

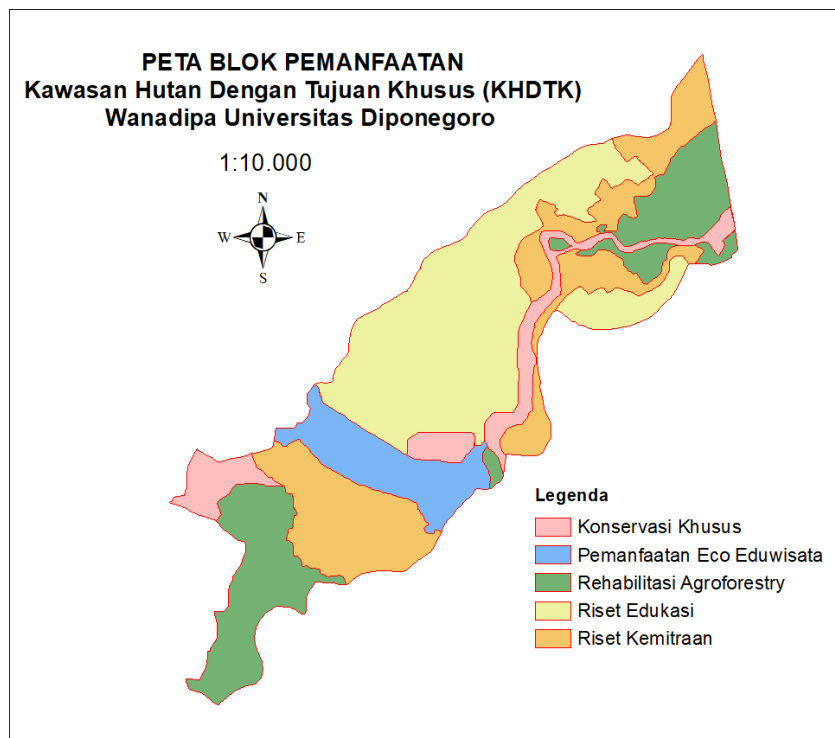
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan pengembangan biomassa energi berbasis budidaya tanaman di KHDTK Wanadipa melalui

pendekatan terintegrasi biofisik dan ekonomi. Secara khusus, penelitian ini: (1) menilai tingkat kesesuaian lahan menggunakan Indeks Kesesuaian Lahan (IKL); (2) mengestimasi potensi produksi biomassa gamal dan kaliandra berbasis model alometrik; serta (3) menganalisis kelayakan finansial tiga skenario usaha produksi biopellet menggunakan indikator NPV, IRR, BCR, dan PBP untuk menentukan alternatif pengembangan yang paling optimal. Dengan mengaitkan hasil evaluasi biofisik lahan secara langsung dengan estimasi produksi aktual dan analisis kelayakan finansial pada berbagai skenario usaha, penelitian ini tidak hanya mengukur potensi, tetapi juga menguji viabilitas ekonomi sistem pasokan biomassa berbasis budidaya.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai Januari hingga Agustus Juli 2025, berlokasi Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Wanadipa Universitas Diponegoro yang memiliki luas 99,65 hektare yang termasuk dalam fungsi kawasan hutan produksi. Hutan produksi di Indonesia diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu hutan produksi tetap, hutan produksi terbatas, dan hutan produksi yang dapat dikonversi. Sebelum dikelola oleh Universitas Diponegoro, kawasan ini merupakan bagian dari wilayah Perhutani dengan fungsi hutan produksi terbatas. Namun, sesuai dengan ketentuan PP No. 23 Tahun 2021, kawasan tersebut kemudian dialih statuskan menjadi KHDTK melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. SK.339/MENLHK/SETJEN/PLA.2/8/2020 menjadi Kawasan Dengan Tujuan Khusus yaitu laboratorium lapang yang dikelola langsung oleh Universitas Diponegoro, yang beralamat di Desa Mluweh, Kaligawe, Susukan, Kecamatan Ungaran Timur Kabupaten Semarang Jawa Tengah. Gambar 1 menunjukan area pembagian blok pemanfaatan di KHDTK Wanadipa UNDIP.



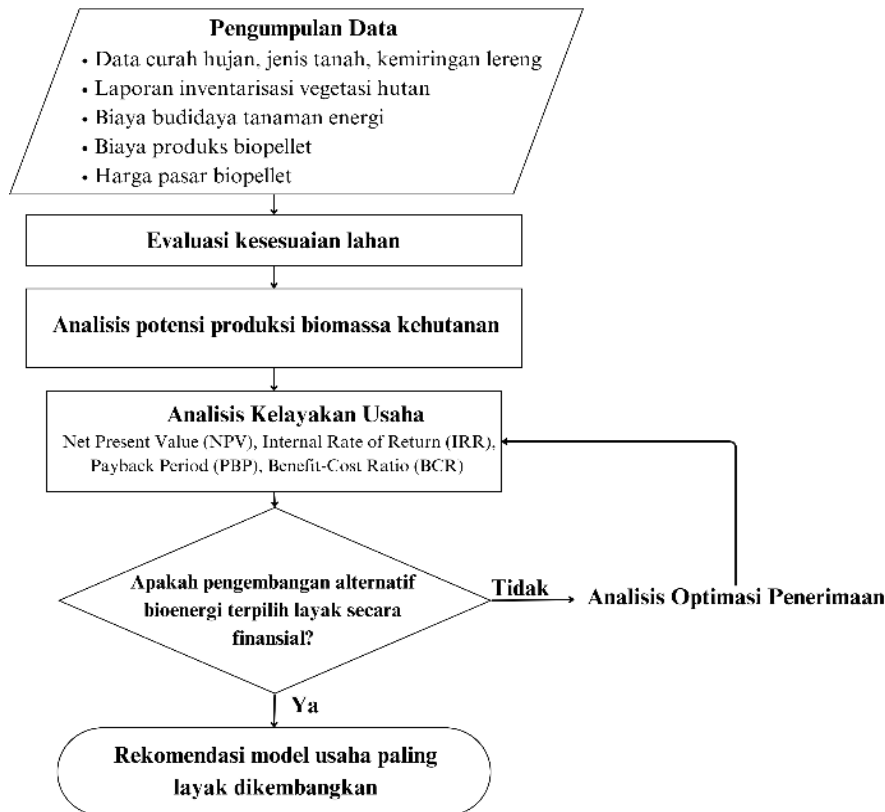
Gambar 1. Lokasi penelitian di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Wanadipa UNDIP, Ungaran Timur, Kabupaten Semarang

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mengacu pada alur prosedur penelitian sebagaimana disajikan pada Gambar 2.

Tahap awal penelitian dimulai dengan pengumpulan data primer dan data sekunder yang digunakan sebagai dasar analisis. Data primer meliputi informasi biaya budidaya tanaman energi dan biaya produksi bioenergi (biopellet) yang

diperoleh melalui wawancara terstruktur dengan staf pengelola KHDTK Wanadipa Universitas Diponegoro. Data sekunder mencakup data curah hujan, jenis tanah, kemiringan lereng, serta data inventarisasi vegetasi hutan yang diperoleh dari laporan instansi terkait dan studi literatur penelitian terdahulu yang relevan. Selanjutnya, data biofisik tersebut dianalisis untuk mengevaluasi kesesuaian lahan sebagai dasar penentuan potensi pengembangan biomassa kehutanan.



Gambar 2. Alur Prosedur Penelitian

Berdasarkan hasil evaluasi kesesuaian lahan, dilakukan analisis potensi produksi biomassa kehutanan yang kemudian menjadi input utama dalam analisis kelayakan usaha. Analisis kelayakan dilakukan menggunakan indikator finansial berupa Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP), dan Benefit-Cost Ratio (BCR). Hasil analisis kelayakan selanjutnya digunakan untuk menilai apakah alternatif pengembangan bioenergi layak secara finansial. Apabila hasil analisis menunjukkan ketidaklayakan, maka dilakukan analisis optimasi penerimaan untuk meningkatkan kinerja finansial usaha. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan rekomendasi model usaha bioenergi kehutanan yang paling layak untuk dikembangkan berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomi.

Analisis Data

Analisis kesesuaian lahan budidaya.

Penilaian kesesuaian biofisik lahan dilakukan untuk memastikan bahwa blok pemanfaatan yang disusun di KHDTK Wanadipa sesuai dengan penilaian indeks kesesuaian lahannya. Analisis dilakukan terhadap tiga variabel utama, yaitu kemiringan lereng, jenis tanah, dan intensitas curah hujan, yang menjadi dasar klasifikasi kawasan hutan berdasarkan SK Mentan No. 837/Kpts/Um/11/1980. Data setiap variabel diolah menggunakan analisis spasial dan statistik deskriptif untuk mengidentifikasi kondisi biofisik serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap pembagian blok kawasan hutan yang berlaku. Penilaian skor kesesuaian lahan dilakukan mengacu ada sistem skoring, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Skoring Penetapan Index Kesesuaian Lahan

Variabel	Kategori	Deskripsi	Skor	Bobot
Kemiringan Lereng (Slope)	0–8%	Datar	1	20
	8–15%	Landai	2	
	15–25%	Agak curam	3	
	25–40%	Curam	4	
	>40%	Sangat curam	5	
Jenis Tanah (Soil Type)	Alluvial, Gley, Planosol, Groundwater Laterite	Tidak peka terhadap erosi	1	15
	Latosol	Sedikit peka terhadap erosi	2	
	Brown Forest Soil, Non-calcic Brown, Mediterranean	Cukup peka terhadap erosi	3	
	Andosol, Laterite, Grumusol, Podzol, Podzolik	Peka terhadap erosi	4	
	Regosol, Litosol, Organosol, Rendzina	Sangat peka terhadap erosi	5	
	< 13,6 mm/bulan	Sangat rendah	1	
	13,6–20,7 mm/bulan	Rendah	2	
Curah Hujan (Rainfall)	20,7–27,7 mm/bulan	Sedang	3	10
	27,7–34,8 mm/bulan	Tinggi	4	
	> 34,8 mm/bulan	Sangat tinggi	5	

Sumber: SK Mentan No. 837/Kpts/Um/11/1980; PP no 23 Tahun 2021

Mengacu pada PP No. 23/2021, penentuan Indeks Kesesuaian Lahan (IKL) dilakukan melalui persamaan 1:

$$IKL = (20 \times S) + (15 \times L) + (10 \times R) \quad (1)$$

Dengan:

S = skor kemiringan lereng

L = skor jenis tanah

R = skor curah hujan

Penetapan penilaian indeks kesesuaian lahan akan memberikan hasil kategori fungsi kawasan hutan, dimana total IKL nilai 0–124 ditetapkan sebagai hutan produksi yang dapat dikonversi, nilai 125–174 sebagai hutan produksi tetap, dan nilai ≥ 175 ditetapkan sebagai hutan lindung.

Potensi produksi bahan baku biomassa.

Dalam penelitian ini akan dianalisis estimasi produksi bahan baku biomassa dari budidaya tanaman gamal (*Gliricidia sepium*) dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). Estimasi ini tidak dilakukan secara destruktif, namun menggunakan persamaan alometrik (Ketterings et al., 2001) khusus untuk jenis pohon bercabang yaitu pada Persamaan 2:

$$B = 0,11 \times \rho \times D^{2+0,62} \quad (2)$$

Dengan:

B= berat biomassa kering (kg)

ρ = massa jenis kayu (g/cm^3 atau ton/m^3)

D= diameter batang setinggi dada (DBH)

Masa jenis kayu gamal dan kaliandra diperoleh dari hasil studi literatur yaitu masing-masing sedangkan

untuk Diameter (D) batang diperoleh dari perhitungan rata-rata diameter tanaman gamal dan kaliandra pada tingkat pertumbuhan sapihan yang ditemukan di lokasi studi sesuai dengan data hasil analisis vegetasi tahun 2021. Nilai masa jenis dan DBH gamal dan kaliandra disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data masa jenis dan diameter

No	Jenis	D(cm)	Masa Jenis (gr/cm^3)
1	Gamal	6,74	0,66
2	Kaliandra	5,00	0,78

Sumber: (Pati et al., 2022); (Siarudin & Indrajaya, 2020)

Analisis kelayakan usaha.

Analisis kelayakan usaha dilakukan terhadap potensi usaha dari 3 skenario usaha yaitu:

- Skenario 1: Budidaya Gamal + produksi biopellet
- Skenario 2: Budidaya Kaliandra + produksi biopellet
- Skenario 3: Budidaya Kaliandra + produksi biopellet + budidaya lebah madu

Indikator kelayakan usaha yang dianalisis dalam kajian kelayakan finansial yaitu nilai Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP), dan Benefit-Cost Ratio (BCR). Asumsi teknis yang diterapkan disajikan dalam Tabel 3. Sedangkan asumsi finansial disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 3. Asumsi teknis

No	Keterangan	Satuan	Nilai
A.	Teknis Budidaya Gamal		
	Jarak tanam	M	2 x 2
	Populasi tanaman	pokok/ha	2.500
	Luas areal penanaman	Ha	46
	Luas efektif penanaman	%	90%
	Frekuensi panen	kali/tahun	1
	Umur produktif tanaman	tahun	15
B.	Budidaya Kaliandra		
	Jarak tanam	m	2 x 2
	Populasi tanaman	pokok/ha	2.500
	Luas areal penanaman	ha	46
	Luas efektif penanaman	%	90
	Frekuensi panen	kali/tahun	2
	Umur produktif	tahun	15
C	Budidaya Madu Kelulut		
	Jumlah Stup	buah	50
	Produktifitas	Liter/tahun	480
D	Teknis Pengolahan Biopellet		
	Kapasitas mesin pellet	ton/jam	0,5
	Daya mesin	kWh	22
	Hari kerja	hari/tahun	240
	Shift	shift/hari	1
	Jam kerja	jam/hari	8
	Rendemen dari biomassa kering	%	80

Sumber: (Simangunsong et al., 2017); (Siarudin & Indrajaya, 2020); (Risnawati et al., 2022)

Tabel 4. Asumsi finansial

Keterangan	Satuan	Nilai
Budidaya Kaliandra dan Gamal		
Upah harian	Rp/HOK	130
Tenaga Kerja Penanaman	HOK/ha	10
Tenaga Kerja Pemeliharaan	HOK/ha	2
Tenaga Kerja Pemanenan	HOK/ha	10
Pengolahan lahan	Rp/ha	4.500.000
Stek batang gamal	Rp/pokok	2
Kompos	Rp/kg	2.5
Harga chainsaw	Rp/pcs	2.500.000
Harga BBM	Rp/liter	10
Budidaya Lebah Madu		
Rumah dan Lahan	Rp/tahun	8.400.000
Pembuatan Kotak Lebah	Rp/tahun	1.900.000
Alat Pembuatan Kotak Lebah	Rp/tahun	2.370.000
Bibit Lebah	Rp/tahun	20.000.000
Pakan Lebah	Rp/tahun	7.242.000
Alat Pemanenan	Rp/tahun	6.256.000
Tenaga Kerja pemeliharaan	Rp/tahun	19.200.000
Pemanenan dan perawatan	Rp/tahun	9,600,000
Biaya Produksi	Rp/tahun	8,078,000
Biaya Pemasaran	Rp/tahun	3,264,000

Pabrik Pengolahan pellet		
Mesin pellet kayu	Rp	1.082.900.000
Tenaga Kerja Pabrik	HOK/ton	3
Biaya Pemeliharaan	Rp/tahun	21.658.000
Harga listrik	Rp/kwh	1.115
Harga jual pellet ke PLN	Rp/ton	826.781
Nilai kalori pellet gamal	kcal/kg	4.3
Kurs	Rp	16.66
Diskonto	%	10

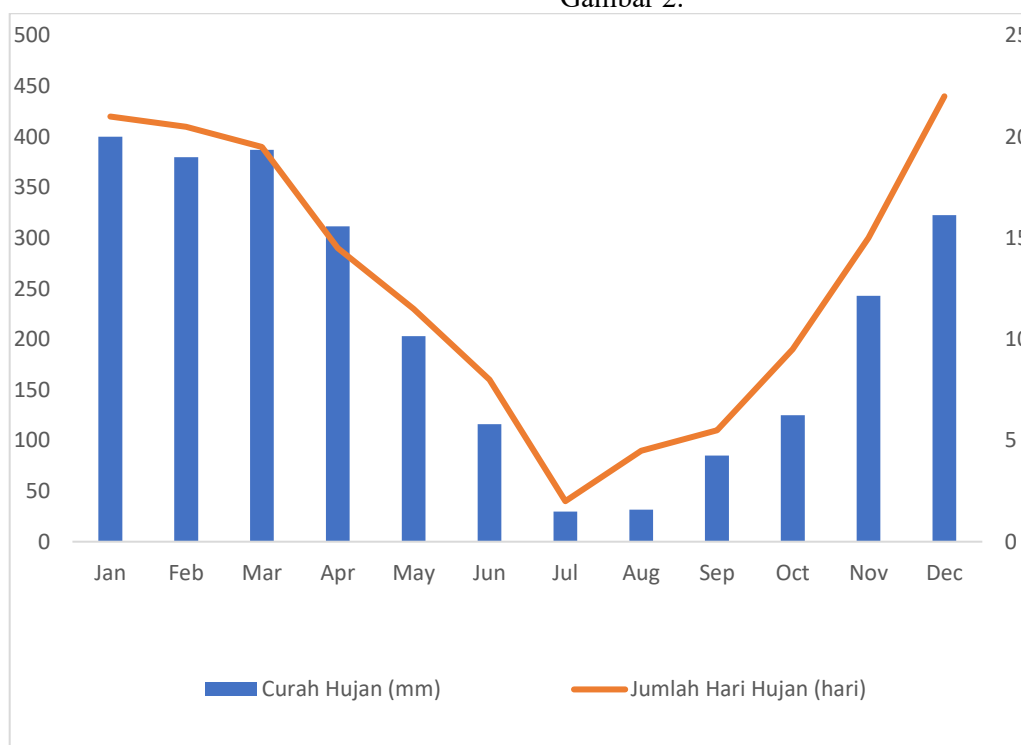
Sumber: (BPS, 2025); (Risnawati et al., 2022); (CN Pellet, 2022); (Katherine & Swastika, 2025); (Hermawan et al., 2024)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Kesesuaian Lahan.

Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Wanadipa Universitas Diponegoro memiliki luas 99,65 hektare dan terletak secara administratif di wilayah Kecamatan Ungaran Timur, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. Secara astronomis, lokasi ini berada antara 7°06'19.49" hingga 7°07'21.29" Lintang Selatan dan 110°25'43.42" hingga 110°26'35.14" Bujur Timur. Berdasarkan data topografi dari peta Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS), elevasi kawasan berkisar antara 110 hingga 240 meter di atas permukaan laut (mdpl).

Berdasarkan data lima tahun terakhir (2020–2024) yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik Kabupaten Semarang (2025), kawasan KHDTK Wanadipa tercatat memiliki curah hujan tahunan antara 1.703 mm hingga 3.115 mm per tahun. Area KHDTK Wanadipa dikategorikan ke dalam Kelas kerentanan Curah Hujan 5 (Sangat Tinggi), ditandai dengan rata-rata curah hujan bulanan sebesar 219 mm. Kemampuan hujan dalam menyebabkan erosi tanah disebut sebagai erosivitas hujan yang menyebabkan pencucian unsur hara dan menurunkan kualitas tanah (Kurniawati, 2023). Grafik rata-rata curah hujan dan jumlah hari hujan selama periode 2020–2024 disajikan pada Gambar 1, sedangkan visualisasi peta disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 3. Rata-rata curah hujan bulanan dan jumlah hari hujan (2020-2024)

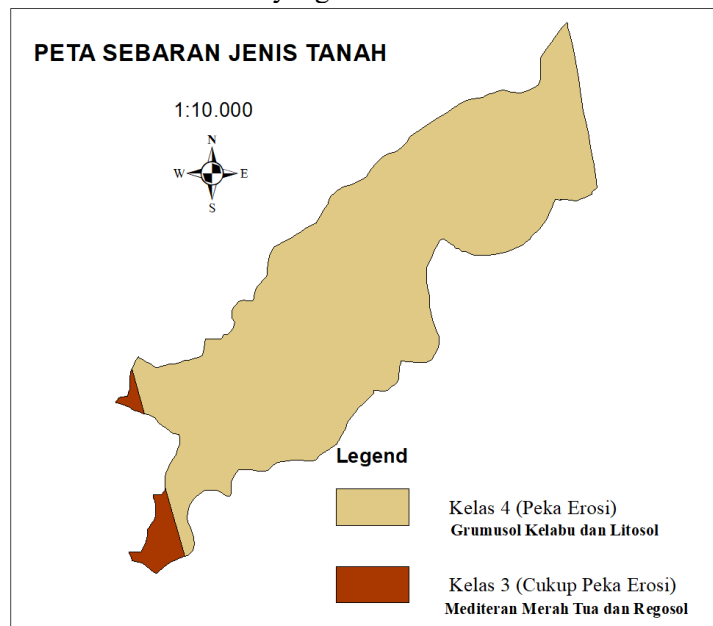


Gambar 4. Peta sebaran curah hujan

Analisis spasial terhadap peta jenis tanah yang bersumber dari Informasi Tanah Longsor Kabupaten Semarang (Joko Prasetyo, 2021) mengindikasikan bahwa hampir seluruh kawasan KHDTK Wanadipa didominasi oleh jenis tanah Kompleks Grumusol Kelabu dan Litosol, yang mencakup sekitar 96,96% dari total luas kawasan. Sisanya, sebesar 3,04%, terdiri atas tanah Mediteran Merah Tua dan Regosol. Tanah jenis Grumusol dan Litosol bertekstur liat, sedangkan Mediteran Merah Tua dan Regosol memiliki tekstur berpasir.

Menurut Phogat et al., (2015) tanah liat memiliki kapasitas menahan air dan hara yang

tinggi, tetapi aerasi dan drainase yang buruk, serta mudah mengalami pemadatan dan retak pada saat kering. Sifat ini menjadikan tanah liat rentan terhadap erosi. Keberadaan vegetasi sangat berperan penting dalam menjaga stabilitas tanah. Hasil analisis jenis tanah dalam perhitungan kesesuaian lahan menunjukkan bahwa tanah Grumusol dan Litosol dikategorikan dalam Kelas 4 (peka terhadap erosi), sementara tanah Mediteran Merah Tua dan Regosol dikategorikan sebagai Kelas 3 (cukup peka terhadap erosi). Visualisasi peta distribusi jenis tanah di area studi disajikan dalam Gambar 5.



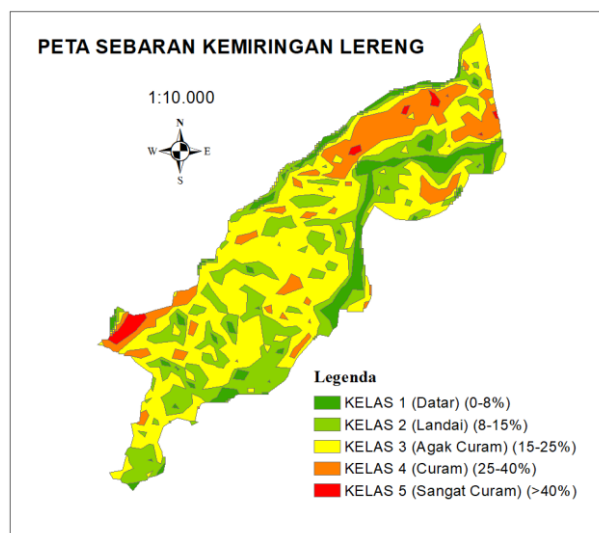
Gambar 5. Peta sebaran jenis tanah

Kemiringan lereng menjadi variabel paling menentukan dalam penilaian indeks kesesuaian lahan. Hasil analisis sebaran luas kemiringan lereng

disajikan dalam Tabel 5. Sedangkan visualisasi petanya disajikan dalam Gambar 6.

Tabel 5. Luas sebaran kemiringan lereng

Kelas	Kemiringan Lereng	Luas	
		Ha	%
1	0–8%	8,00	8%
2	8–15%	29,49	30%
3	15–25%	46,56	47%
4	25–40%	15,01	15%
5	>40%	0,59	1%
Total		99,65	100%



Gambar 6. Peta sebaran kemiringan lereng

Distribusi ini menunjukkan bahwa 77% dari luas kawasan KHDTK Wanadipa berada pada kelas kemiringan lereng landai hingga agak curam. Kondisi ini secara umum masih tergolong sesuai untuk aktivitas budidaya kehutanan maupun konservasi lahan, karena pada kelas lereng di bawah 25% masih dimungkinkan pengelolaan dengan praktik konservasi vegetatif dan mekanik sederhana tanpa menimbulkan risiko erosi berat (Arsyad, 2010).

Tabel 6. Sebaran fungsi kawasan

Fungsi Kawasan	Luas	
	Ha	%
Hutan Lindung	15,62	15,68
Hutan Produksi Dikonversi	0,15	0,15
Hutan Produksi Tetap	83,88	84,17
Total	99,65	100

Meskipun kawasan KHDTK Wanadipa menunjukkan karakteristik biofisik curah hujan dan jenis tanah yang tergolong rawan erosi, namun

Indeks Kesesuaian Lahan

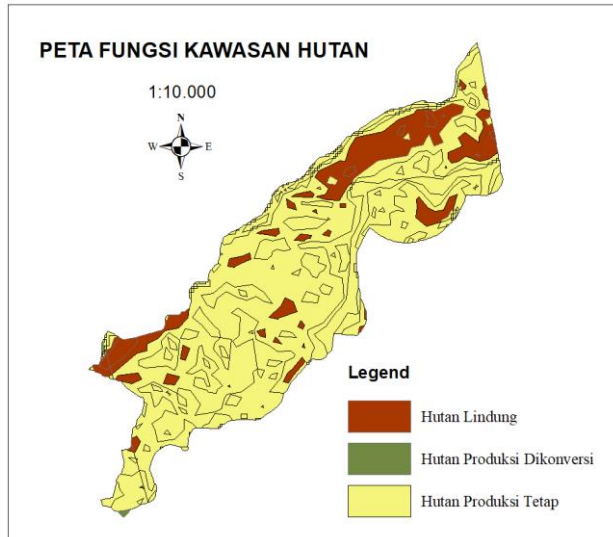
Peta curah hujan, jenis tanah, dan kemiringan lereng dioverlay untuk dianalisis kesesuaian lahannya. Hasil *overlay* dari ketiga parameter tersebut diperoleh distribusi fungsi kawasan hutan di KHDTK Wanadipa, yang meliputi zona hutan lindung, hutan produksi terbatas, dan hutan produksi. Distribusi luas fungsi kawasan disajikan pada Tabel 6.

tingkat kemiringan lereng yang landai hingga agak curam (sekitar 77% dari total luas kawasan) masih memberikan peluang untuk kegiatan budidaya

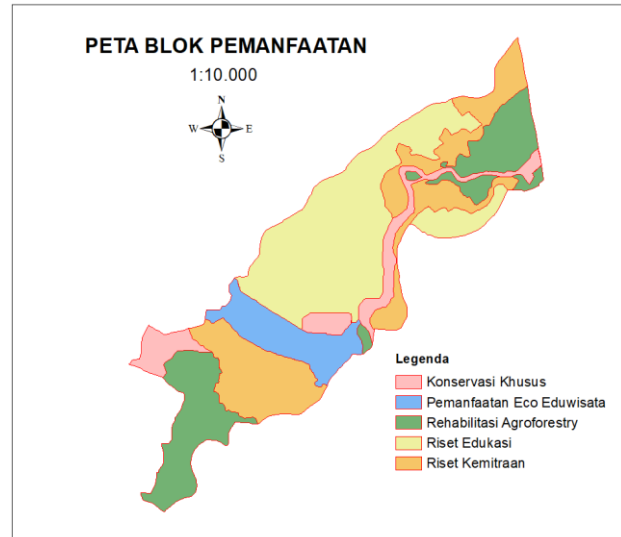
tanaman kehutanan lestari. Hal ini terlihat dari dominasi kesesuaian lahan yang tergolong fungsi kawasan berupa Hutan Produksi Tetap (84,9%), indikasi bahwa sebagian besar area dapat diarahkan untuk kegiatan produksi atau budidaya tanaman.

Jika dibandingkan dengan pembagian blok pemanfaatan yang telah ditetapkan di KHDTK Wanadipa pada tahun 2020, terdiri atas lima blok utama yaitu Konservasi Khusus, Eco-Eduwisata,

Rehabilitasi Agroforestry, Riset Edukasi, dan Riset Kemitraan, hasil *overlay* parameter biofisik menunjukkan adanya tingkat keselarasan secara fungsional yang cukup tinggi. Untuk visualisasi disajikan peta sebaran fungsi kawasan pada Gambar 7 disandingkan dengan peta blok pemanfaatan aktual di KHDTK Wanadipa Undip pada Gambar 8. Tabel distribusi blok pemanfaatan terhadap fungsi kawasan selengkapny disajikan pada Tabel 7.



Gambar 7. Peta sebaran fungsi kawasan hutan



Gambar 8. Peta blok pemanfaatan aktual

Tabel 7. Distribusi luas blok pemanfaatan terhadap fungsi kawasan

Blok	Hutan Lindung		Hutan Produksi Tetap		Hutan Produksi Dikonversi		Total
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha
Konservasi Khusus	2,08	13	7,03	8	0,05	35	9,16
Pemanfaatan Eco Eduwisata	0,73	5	8,45	10	0,00	0	9,18
Rehabilitasi Agroforestry	2,69	17	17,90	21	0,10	65	20,68
Riset Edukasi	6,60	42	28,72	34	0,00	0	35,32
Riset Kemitraan	3,53	23	21,78	26	0,00	0	25,31
Total	15,62	100	83,88	100	0,15	100	99,65

Kawasan Hutan Produksi Tetap memiliki fungsi pokok memproduksi hasil hutan yang dipertahankan keberadaannya sebagai Hutan Tetap (PP No 23, 2021). Berdasarkan hasil analisis, sebagian besar area Hutan Produksi Tetap tersebut dimanfaatkan dalam blok Rehabilitasi Agroforestry (21%), Riset Edukasi (34%), dan Riset Kemitraan (26%). Kawasan Hutan Lindung memiliki fungsi utama sebagai sistem penyangga kehidupan, yang berperan dalam mengatur tata air, mencegah banjir, mengendalikan erosi, mencegah intrusi air laut, serta memelihara kesuburan tanah (PP No 23, 2021). Secara prinsip, fungsi kawasan lindung di KHDTK Wanadipa UNDIP selaras dengan blok pemanfaatan Konservasi Khusus yang memiliki fungsi menjaga fungsi ekosistem kritis,

seperti kawasan perlindungan setempat (KPS) di sekitar mata air, tepi sungai, dan lahan dengan kemiringan sangat curam (KHDTK Wanadipa Undip, 2021).

Hasil *overlay* parameter biofisik menunjukkan adanya perbedaan luas antara fungsi kawasan Hutan Lindung dan blok Konservasi Khusus, di mana hanya sekitar 13% dari total area Hutan Lindung yang secara spasial beririsan dengan blok Konservasi Khusus. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan zonasi fungsi kawasan hutan dengan pembagian blok pemanfaatan yang telah ditetapkan sejak tahun 2020. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh dua faktor utama. Pertama, terdapat perbedaan parameter penunjukan kawasan, di mana analisis fungsi kawasan Hutan Lindung

tidak menggunakan parameter keberadaan sungai dan mata air seperti yang diterapkan pada penunjukan blok Konservasi Khusus di KHDTK Wanadipa UNDIP.

Kedua, secara aktual terjadi perubahan data parameter biofisik, khususnya peningkatan volume curah hujan tahunan dalam lima tahun terakhir yang meningkatkan indeks kerentanan lahan terhadap erosi dan limpasan permukaan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Supriyono et al., (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan intensitas dan variabilitas curah hujan di wilayah tropis Indonesia secara signifikan meningkatkan erosivitas hujan dan potensi erosi pada daerah curam, sehingga memperluas area yang tergolong fungsi kawasan lindung. Dalam konteks analisis kelayakan budidaya bahan baku biomassa energi, area yang digunakan sebagai asumsi perhitungan produksi dan

potensi budidaya adalah blok Rehabilitasi Agroforestry seluas 20,68 ha dan blok Riset Kemitraan seluas 25,31 ha. Kedua blok tersebut dipilih karena secara fungsional merupakan kawasan dengan kombinasi karakter biofisik dan tata guna lahan yang paling ideal untuk budidaya.

Potensi produksi bahan baku biomassa kayu

Perhitungan produktivitas didasarkan pada parameter kepadatan pohon per hektar, diameter batang (D) tanaman yang ditemukan di KHDTK pada umur sapihan, dan densitas kayu masing-masing jenis, baik dalam kondisi aktual maupun dengan estimasi budidaya monokultur (jarak tanam 2×2 meter). Hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Potensi produksi biomassa kayu

No	Nama	Ind/Ha	Biomasa (kg/ind)	Potensi (kg/ha)	
				Aktual	Budidaya 2×2 m
1	Gamal	12,75	10,78	137,44	26.959,74
2	Kaliandra	1	6,45	5,82	16.119,67

Tabel 8 menunjukkan perbedaan hasil estimasi potensi produksi biomassa antar spesies. Produksi bahan baku biomassa dipengaruhi oleh jumlah kepadatan individu spesies yang ditemukan per hektar. Spesies gamal (*Gliricidia sepium*) menunjukkan potensi biomassa tertinggi secara aktual, yaitu sebesar 137,44 kg/ha, karena ditemukan dalam jumlah individu per hektar yang lebih dominan. Sebaliknya, jenis kaliandra (*Calliandra calothyrsus*), yang hanya ditemukan dalam jumlah terbatas, sehingga produktivitas biomasnya rendah. Pada kondisi budidaya monokultur dengan populasi seragam sebanyak 2.500 pohon per hektar (jarak tanam 2×2 meter), faktor dominan yang memengaruhi produksi biomassa adalah densitas atau kerapatan kayu. Spesies dengan densitas kayu tinggi akan menghasilkan bahan baku biomassa kayu lebih besar per satuan luasnya (Pati et al., 2022).

Analisis Kelayakan Usaha

Analisis perbandingan kelayakan usaha dibangun dalam tiga skenario yaitu:

Skenario 1: usaha budidaya tanaman gamal dan produksi pellet kayu

Skenario 2: usaha budidaya tanaman kaliandra dan produksi pellet kayu

Skenario 3: usaha budidaya tanaman kaliandra dan produksi pellet kayu, serta budidaya madu kelulut

Analisis kelayakan usaha dilakukan untuk menilai potensi ekonomi dari usaha budidaya tanaman gamal (*Gliricidia sepium*) dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) sebagai bahan baku biomassa untuk produksi biopellet, serta integrasinya dengan budidaya lebah madu kelulut. Tanaman gamal dan kaliandra dapat dibudidayakan monokultur, dengan umur pertanaman 15 tahun dipanen rutin satu hingga dua tahun sekali tanpa penanaman ulang. Asumsi ini muncul karena kemampuan tanaman gamal dan kaliandra yang mampu melakukan peremajaan alami dengan trubusan atau *copicing* (Hermawan et al., 2024), sehingga tidak perlu penanaman ulang selama waktu tersebut. Berdasarkan asumsi yang sudah disusun, hasil analisis finansial dari ketiga skenario usaha ini disajikan dalam Tabel 9.

Tabel 9. Analisis Finansial

No.	Keterangan	unit	Nilai	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
A.	Investasi					
	Budidaya gamal	Rp	1.690.411.183			
	Budidaya Kaliandra	Rp	1.975.998.305	5.208.480.447	5.494.067.569	6.872.687.569

No.	Keterangan	unit	Nilai	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
	<i>Pabrik pellet</i>	<i>Rp</i>	3.518.069.264			
	<i>Budidaya madu</i>	<i>Rp</i>	1.378.620.000			
B.	<i>Penerimaan</i>					
	Pellet kayu gamal	<i>Rp</i>	10.621.195.481			
	Pellet kayu					
	Kaliandra	<i>Rp</i>	12.405.796.820	10.621.195.481	12.405.796.820	14.709.796.820
	Madu	<i>Rp</i>	2.304.000.000			
	Margin bruto (B-A)			5.412.715.034	6.911.729.250	7.837.109.250
C	Lainnya					
	Pajak	%	1	54.127.150	69.117.293	78.371.093
	Penyusutan					
	pertanaman	<i>Rp</i>	740.170.590	1.823.070.590	1.823.070.590	1.898.070.590
	Penyusutan pabrik	<i>Rp</i>	1.082.900.000			
	Penyusutan lebah					
	kelulut	<i>Rp</i>	75.000.000			
	Laba bersih (margin bruto - C)			3.535.517.293	5.019.541.367	5.860.667.567

Modal investasi budidaya gamal dan kaliandra pada kerapatan tanam yang sama yaitu 2.500 pohon/ha pada prinsipnya memiliki struktur biaya yang sama. Namun, kaliandra memiliki pertumbuhan yang lebih cepat sehingga dapat dipanen dua kali dalam setahun (Siarudin & Indrajaya, 2020). Frekuensi panen yang lebih tinggi ini meningkatkan kebutuhan tenaga kerja pemanenan, sehingga total biaya investasi pada skenario 2 budidaya kaliandra menjadi lebih besar dibandingkan Skenario 1 budidaya gamal. Meskipun demikian, pemanenan dua kali setahun pada kaliandra menghasilkan pasokan bahan baku yang lebih besar sehingga volume produksi biopellet meningkat. Dampaknya, penerimaan usaha biopellet berbasis kaliandra lebih tinggi dibandingkan dengan penerimaan dari biopellet berbahan baku gamal. Kemudian pada skenario 3 budidaya kaliandra yang diintegrasikan dengan budidaya madu juga memberikan dampak yang positif pada total penerimaan, meskipun modal investasi awal harus bertambah. Detail nilai indikator kelayakan investasi dari ketiga skenario usaha disajikan dalam Tabel 10.

Pada Skenario 1, yaitu budidaya gamal untuk bahan baku biopellet, kegiatan usaha telah menunjukkan kelayakan ekonomi dengan nilai NPV manfaat yang positif dan IRR sebesar 17,8%.

Namun, periode pengembalian modal yang masih berada di atas lima tahun dan nilai BCR di bawah satu mengindikasikan bahwa tingkat profitabilitas dan efisiensi investasi belum optimal. Artinya, walaupun usaha dapat berjalan, potensi peningkatan penerimaan masih terbuka lebar. Penerapan Skenario 2 melalui substitusi spesies ke kaliandra menghasilkan peningkatan signifikan terhadap kinerja usaha. Frekuensi panen dua kali per tahun meningkatkan pasokan bahan baku sehingga mendorong pertumbuhan penerimaan yang berdampak pada tingkat kelayakan usaha. Hal ini tercermin dari percepatan pengembalian modal menjadi 4,46 tahun dan kenaikan IRR menjadi 21%. Pemilihan spesies biomassa yang lebih produktif terbukti meningkatkan kelayakan usaha. Skenario 3 memberikan hasil paling optimal melalui integrasi produksi biopellet berbasis kaliandra dengan budidaya madu kelulut sebagai pendapatan tambahan. Model usaha terpadu ini menghasilkan laba bersih tertinggi dan IRR mencapai 24%, sekaligus mempercepat *Payback Period* hingga di bawah empat tahun. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Bunyamin & Purnomo, 2020), yang menyatakan bahwa integrasi budidaya madu kelulut pada tanaman kaliandra dapat meningkatkan pendapatan usaha dan kelayakan usaha.

Tabel 10. Indikator kelayakan usaha

Indikator	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
PBP	5,14	4,46	3,98
NPV Manfaat	Rp2.589.414.700	Rp3.438.132.178	Rp3.852.741.483
NPV Modal	Rp3.522.917.523	Rp3.808.504.645	Rp4.488.056.276
IRR	17,8%	21%	24%
BCR	0,74	0,90	0,86

KESIMPULAN

Area KHDTK Wanadipa Undip seluas 99,65 ha memiliki kondisi biofisik berupa curah hujan yang sangat tinggi (Kelas 5), jenis tanah yang peka terhadap erosi (Kelas 3 dan 4), dengan kemiringan lereng yang dominan landai hingga agak curam (Kelas 2 dan 3). Kondisi biofisik area KHDTK Wanadipa Undip sesuai dengan fungsi kawasan hutan produksi tetap, yang sebagian besar area produksi tetap ini sekarang dimanfaatkan sebagai Blok Rehabilitasi dan agroforestri, Riset Kemitraan dan Riset Edukasi.

Dalam satuan luas produktivitas biomassa gamal lebih tinggi dibandingkan kaliandra. Namun, karena kaliandra dapat dipanen dua kali per tahun, sehingga total biomassa per tahun kaliandra lebih besar. Selain itu, budidaya kaliandra dapat dikombinasikan dengan budidaya lebah madu yang sebagai diversifikasi usaha.

Analisis kelayakan finansial menunjukkan bahwa produksi biopellet dari budidaya biomassa gamal layak secara ekonomi dengan nilai NPV positif dan IRR 18,02%, meskipun nilai BCR kurang dari satu yang mengindikasikan penerimaan belum optimal. Optimalisasi dengan mengganti spesies ke kaliandra meningkatkan kelayakan finansial dengan IRR mencapai 21%. Jika diintegrasikan dengan usaha budidaya madu kelulut sebagai diversifikasi usaha. Kelayakan usaha meningkatkan secara signifikan dengan IRR 24% dan mempercepat *payback periode* modal menjadi 3,98 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad. (2010). *Konservasi Tanah dan Air* (Edisi Kedua). IPB Press. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/42667>
- Bunayamin, A., & Purnomo, D. (2020). Potential impact of beekeeping activity on bioenergy supply in West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 460(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/460/1/012023>
- CN Pellet. (2022, November 25). *Biaya untuk membangun pabrik pembuat pellet kayu kecil 500kg/jam*. RICHI. https://www.cn-pellet.com/id/faq/cost-to-build-small-500kg-wood-pellet-plant.html?srsltid=AfmBOoquq_y0k63QaL9zExXyol-q_SMpMCcZqBOPFpNipMy9-TcjpYaG
- Hermawan, E., Adiarso, A., Wijono, R. A., Sudjadi, U., & Setiawan, H. (2024). Evaluasi Keekonomian Residue Hutan Tanaman Industri Untuk Pemenuhan Energi di Ibu Kota Negara. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 12(1), 35–56. <https://doi.org/10.19028/jtep.012.1.35-56>
- Hudaedi, D., Hariyadi, & Anwar, S. (2018). Potensi Gamal (*Gliricidia sepium*) sebagai Bahan Baku Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa, Studi Kasus: Kabupaten Manggarai Timur (NTT). *Journal of Environmental Engineering & Waste Management*, 3, 13–20. <https://doi.org/10.33021/jenv.v3i1.397>
- Joko Prasetyo. (2021, March 4). *Jenis Tanah Kabupaten Semarang*. BPBD (Badan Penanggulangan Bencana Daerah)-Informasi Tanah Longsor Kabupaten Semarang. <https://sitangkas-ugm-gis.hub.arcgis.com/datasets/jenis-tanah-kabupaten-semarang-2/explore>
- Katherine, H., & Swastika, A. B. (2025). *Co-firing biomassa di Indonesia: Memperpanjang, bukan menyelesaikan masalah batubara*. <https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2025/05/ID-IDN-Biomass-co-firing-in-Indonesia.pdf>
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1), 199–209. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)
- KHDTK Wanadipa Undip. (2021). *Pembagian Blok*. <https://khdtk.undip.ac.id/pembagian-blok/>
- Kurniawati, D. (2023). Penaksiran Indeks Erosivitas Hujan Dengan Metode Lenvain di Kecamatan Dau Kabupaten Malang. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu Dan Pendidikan Geografi*, 7(1), 33–42. <https://doi.org/10.29408/geodika.v7i1.6563>
- Pati, P. K., Kaushik, P., Khan, M. L., & Khare, P. K. (2022). Allometric equations for biomass and carbon stock estimation of small diameter woody species from tropical dry deciduous forests: Support to REDD+. *Trees, Forests and People*, 9, 100289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100289>
- Phogat, V., Tomar, V., & Dahiya, R. (2015). *Soil Physical Properties*. https://www.researchgate.net/publication/297737054_Soil_Physical_Properties

- PP No 23. (2021). *Tentang Penyelenggaraan Kehutanan* (23). LN.2021/No.33, TLN No.6635, jdih.setkab.go.id: 177 hlm. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161853/pp-no-23-tahun-2021>
- Rafique, R., Jat, M., Hakeem-Ur-Rehman, & Chudhery, M. A. Z. (2021). Bioenergy supply chain optimization for addressing energy deficiency: A dynamic model for large-scale network designs. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128495>
- Risnawati, R., Agustina Rezekiah, A., & Helmi, M. (2022). Analisis Biaya Madu Kelulut (Trigona Itama) Pada Usaha Madu Zahra Di Kecamatan Pengaron Kabupaten Banjar. *Jurnal Sylva Scientiae*, 5, 784. <https://doi.org/10.20527/jss.v5i5.6700>
- Siarudin, M., & Indrajaya, Y. (2020). Adaptation and productivity of kaliandra for biomass energy source. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 415(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/415/1/012016>
- Simangunsong, B. C. H., Wilma, K. A., Manurung, E. G. T., Sitanggang, V. J., & Tambunan, A. H. (2017). Analisis Biaya Produksi Pelet Kayu (Cost Analysis of Wood Pellet Production). *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kayu Tropis*, 15(1), 48–57. <https://ejournalmapeki.org/index.php/JITKT/article/view/401>
- Supriyono, S., Utaya, S., Taryana, D., & Handoyo, B. (2021). Spatial-Temporal Trend Analysis of Rainfall Erosivity and Erosivity Density of Tropical Area in Air Bengkulu Watershed, Indonesia. *Quaestiones Geographicae*, 40, 000010247820210028. <https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0028>
- Williams, C. L., Dahiya, A., & Porter, P. (2015). Chapter 1 - Introduction to Bioenergy. In A. Dahiya (Ed.), *Bioenergy* (pp. 5–36). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00001-8>
- Zoma, F., & Sawadogo, M. (2023). A multicriteria approach for biomass availability assessment and selection for energy production in Burkina Faso: A hybrid AHP-TOPSIS approach. *Heliyon*, 9(10), e20999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20999>