

BAB II

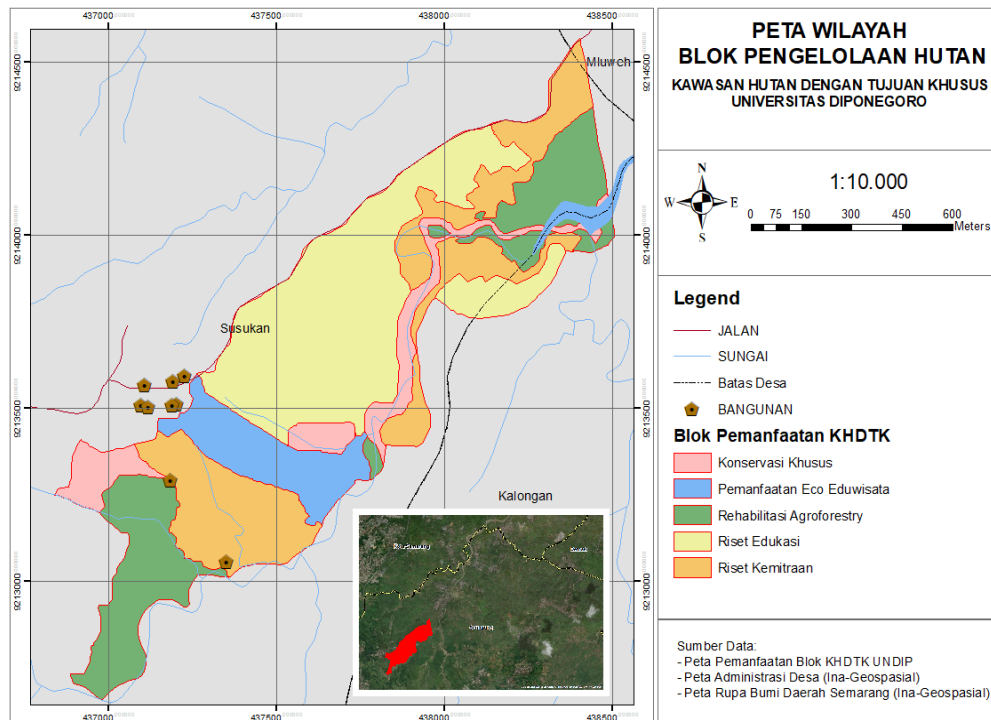
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK)

Hutan merupakan suatu kesatuan ekosistem berupa hamparan lahan yang didominasi oleh pepohonan dan berperan penting dalam menopang keseimbangan lingkungan. Keberadaan hutan tidak dapat dipisahkan dari komponen biotik maupun abiotik yang saling berinteraksi di dalamnya. Menurut Muhdin et al., (2019) , hutan adalah sumber daya alam hayati yang membentuk suatu ekosistem alami yang saling bergantung antara satu unsur dengan unsur lainnya. Secara nasional, luas area hutan Indonesia pada tahun 2021 tercatat sebesar 915.276,63 km² atau sekitar 48,3% dari total luas daratan Indonesia (World Bank, 2021). Sedangkan, kawasan hutan merupakan wilayah tertentu yang telah ditetapkan oleh pemerintah untuk dipertahankan keberadaannya sebagai hutan tetap. Berdasarkan fungsi utamanya, kawasan hutan diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu hutan konservasi, hutan lindung, dan hutan produksi (Syahadat & Subarudi, 2012)

Selain tiga fungsi pokok kawasan hutan tersebut, pemerintah juga menetapkan sebagian kawasan hutan sebagai Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK). Penetapan ini ditujukan untuk kepentingan penelitian dan pengembangan, pendidikan dan pelatihan, serta kegiatan religi dan budaya, sebagaimana diatur dalam Pasal 8 Undang-Undang Nomor 41 Tahun 1999 tentang Kehutanan. Penetapan tersebut dilakukan dengan syarat tidak mengubah fungsi pokok kawasan hutan. Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2021, memperkuat dasar hukum pengelolaan kawasan hutan dengan tujuan khusus sebagai bagian dari sistem pengelolaan hutan berkelanjutan.

Salah satu contoh penerapan kebijakan tersebut adalah Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus Universitas Diponegoro (KHDTK UNDIP) yang terletak di Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. Kawasan ini ditetapkan melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor SK.339/MENLHK/SETJEN/PLA.2/8/2020 dengan luas sekitar 99,65 hektar. Kawasan ini terbagi 6 blok pemanfaatan, disajikan detail dalam Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Peta Pembagian Blok Pemanfaatan di KHD TK Wanadipa UNDIP (KHD TK Wanadipa Undip, 2021)

2.2 Kesesuaian Lahan dan Fungsi Kawasan Hutan

Penetapan fungsi kawasan hutan ditentukan oleh tiga parameter utama yaitu kemiringan lereng, jenis tanah, dan intensitas curah hujan. Ketiga parameter ini digunakan untuk menilai tingkat kerentanan lahan terhadap erosi serta potensi daya dukungnya terhadap fungsi hutan. Berdasarkan Surat Keputusan Menteri Pertanian No. 837/Kpts/Um/11/1980, penilaian kesesuaian lahan dilakukan melalui sistem skoring, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.1. Secara matematis fungsi kawasan hutan dapat ditentukan berdasarkan nilai indeks kesesuaian lahan yang dihitung menggunakan Persamaan 1 :

$$\text{Indeks Kesesuaian Lahan (IKL)} = (20 \times S) + (15 \times L) + (10 \times R) \quad (1)$$

Dengan S adalah skor kemiringan lereng, L skor jenis tanah, dan R adalah skor curah hujan. Pada kebijakan sebelumnya, fungsi hutan produksi dibedakan menjadi hutan produksi terbatas, hutan produksi tetap, dan hutan produksi yang dapat dikonversi. Namun, berdasarkan PP No. 23 2021, klasifikasi hutan produksi terbatas telah dihapus. Penetapan fungsi kawasan hutan kini mengacu pada hasil perhitungan IKL dimana total nilai 0–124 ditetapkan sebagai hutan produksi yang

dapat dikonversi, nilai 125–174 sebagai hutan produksi tetap, dan nilai ≥ 175 ditetapkan sebagai hutan lindung.

Tabel 2. 1 Sistem 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	
Curah Hujan (Rainfall)	< 13,6 mm/bulan	Sangat rendah	1	10
	13,6–20,7 mm/bulan	Rendah	2	
	20,7–27,7 mm/bulan	Sedang	3	
	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

Perubahan regulasi ini berdampak pada status kawasan KHDTK Wanadipa Universitas Diponegoro. Kawasan yang sebelumnya ditetapkan sebagai Hutan Produksi Terbatas kemudian berubah status menjadi Hutan Produksi Tetap sesuai ketentuan PP No. 23 Tahun 2021, dan selanjutnya ditetapkan sebagai Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) melalui SK Menteri LHK untuk mendukung pelaksanaan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Penelitian ini akan melakukan penilaian kesesuaian lahan KHDTK Wanadipa UNDIP dengan standar penetapan fungsi hutan yang berlaku, untuk memeriksa kembali kesesuaian pembagian blok fungsi yang telah diterapkan.

2.3 Potensi Pasokan Bahan Baku Biomassa Kehutanan

Bioenergi kehutanan merupakan energi yang dihasilkan dari bahan-bahan organik yang berasal dari hutan. Bahan baku biomassa dari kehutanan dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu biomassa kayu (*woody biomass*) yang diperoleh dari batang dan ranting pohon, serta biomassa nonkayu (*non-woody biomass*) yang berasal dari bagian tanaman lain seperti buah, bunga, biji, dan daun. Sumber biomassa kayu sebaiknya tidak berasal dari vegetasi penghasil kayu pertukangan yang memiliki nilai jual kayu log lebih tinggi dan periode panen yang panjang (15–30 tahun) (Williams et al., 2015). Bahan baku biomassa kehutanan sebaiknya diperoleh dari jenis-jenis tanaman cepat tumbuh (*fast-growing species*) yang memiliki rotasi panen pendek dan produktivitas tinggi, dengan budidaya metode trubusan (*coppicing*), yakni pemangkasan batang bagian bawah yang memicu pertumbuhan kembali tanpa penanaman ulang (Hinchee et al., 2009).

Sesuai prinsip biofuel generasi kedua, biomassa non-kayu yang dapat dikonsumsi seperti buah, daun, atau biji pangan tidak diperhitungkan sebagai bahan baku energi. Pendekatan ini bertujuan memastikan bahwa pemanfaatan biomassa kehutanan mendukung ketahanan energi tanpa mengorbankan ketahanan pangan (El-Araby, 2024).

Secara teori estimasi produksi biomassa kayu per individu tanaman dapat dilakukan menggunakan persamaan alometrik sebagaimana dikembangkan oleh Ketterings et al., (2001), yang digunakan untuk memperkirakan massa biomassa tanaman di atas permukaan tanah untuk pohon bercabang, dinyatakan pada Persamaan 2.

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

Dengan B_k adalah biomassa kayu (kg), ρ adalah masa jenis kayu (g/cm^3 atau ton/m^3), D adalah diameter pohon pada tinggi dada (DBH, cm). Untuk biomassa non-kayu, estimasi potensi pasokan bahan baku dilakukan berdasarkan kemampuan produksi biomassa bagian tanaman seperti buah, biji, daun, atau bunga per hektare, serta dikalikan dengan kandungan kimia utama yang relevan (lipid, gula atau pati), dinyatakan pada Persamaan 3.

$$B_{nk} = Y_{nk} \times C_{nk} \quad (3)$$

Dengan B_{nk} adalah Biomassa non kayu (kg), Y_{nk} adalah Produksi biomassa non-kayu (kg biomassa/pohon), C_{nk} adalah kandungan lipid/gula (% per kg biomassa).

2.4 Analisis Hierarki Proses (AHP)

AHP adalah suatu metode analisis yang digunakan untuk menentukan urutan prioritas suatu rencana (Chamdra et al., 2015). AHP merupakan suatu bentuk dari model yang komprehensif dalam pengambilan keputusan baik secara kualitatif maupun secara kuantitatif. Stein, (2013) menyatakan bahwa pemilihan alternatif dalam pengembangan energi terbarukan bergantung pada empat kelompok kriteria utama, yaitu aspek finansial, teknis, lingkungan, dan sosial–ekonomi–kebijakan. Penelitian Zoma & Sawadogo, (2023), juga menerapkan metode AHP untuk menilai potensi biomassa di Burkina Faso dengan mempertimbangkan ketersediaan dan aksesibilitas biomassa, potensi persaingan pemanfaatan, dampak lingkungan, nilai ekonomi, kandungan energi biomassa, serta kecocokan teknologi yang tersedia. Mengadaptasi kedua studi tersebut, penelitian akan menggunakan enam parameter aspek penentu penilaian potensi pengembangan biomassa. Enam parameter tersebut disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Parameter Penentu Pemilihan Alternatif Bioenergi

Parameter Kriteria Utama	Aspek Kriteria	Lambang
Teknis	Ketersediaan bahan baku (ton/ha)	BB
	Level teknologi (tinggi/rendah)	LT
Finansial	Biaya produksi (USD/unit)	BP
	Harga pasar (USD/unit)	HP
Lingkungan	Dampak lingkungan (ha)	DL
Sosial–Ekonomi–Kebijakan	Dukungan regulasi (ya/tidak)	DR

Dalam AHP penentuan bobot setiap kriteria dilakukan melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*). Tahap ini digunakan untuk menilai tingkat kepentingan relatif antar aspek secara sistematis. Penentuan nilai skala dilakukan berdasarkan hasil wawancara dan masukan dari para ahli serta *stakeholder* yang relevan. Saaty & Ozdemir, (2015) menegaskan bahwa akurasi penilaian dalam AHP sangat bergantung pada kompetensi dan relevansi keahlian responden, bukan hanya

kuantitas sampel. Oleh karena itu, penelitian ini akan melibatkan ahli dengan fokus pada keahlian dalam manajemen hutan, energi terbarukan, dan lokasi studi.

Setiap aspek kriteria dibandingkan satu per satu terhadap aspek kriteria lainnya menggunakan skala fundamental Saaty 1–9. Skala ini merepresentasikan tingkat preferensi suatu aspek terhadap aspek lainnya, disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Skala dasar dalam perbandingan berpasangan

Nilai	Definisi	Penjelasan
1	Sama pentingnya	Kedua aktivitas memberikan kontribusi yang sama terhadap tujuan.
3	Agak lebih penting	Pengalaman dan penilaian sedikit menyukai satu aktivitas dibandingkan yang lain.
5	Sangat penting	Pengalaman dan penilaian sangat menyukai satu aktivitas dibandingkan yang lain.
7	Sangat penting dan terbukti	Aktivitas sangat disukai dan dominasinya telah terbukti dalam praktik.
9	Mutlak Sangat penting sekali	Bukti yang mendukung satu aktivitas dibandingkan yang lain adalah pada tingkat tertinggi yang mungkin.
2,4,6,8	Nilai antara	Ketika diperlukan kompromi antara dua penilaian yang berdekatan.
Timbal balik	Jika i diberi salah satu angka di atas, dibandingkan dengan j, maka j memiliki nilai sebaliknya	Jika kita memberikan nilai tertentu pada s A saat dibandingkan dengan as B, maka nilai pada aktivitas B saat dibandingkan aktivitas A adalah kebalikannya.

Untuk mengetahui kontribusi relatif setiap aspek terhadap keputusan, nilai perbandingan dari seluruh responden diolah ke dalam vektor eigen. Vektor eigen menggambarkan bobot prioritas setiap kriteria dan dihitung menggunakan pendekatan normalisasi matriks (Brito et al., 2024). Nilai vektor Eigen dihitung

dengan Persamaan 4. Vektor eigen selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai eigen maksimum (λ_{max}) menggunakan Persamaan 5.

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n (\lambda_j \cdot Total\ j)}{n} \quad (5)$$

Dengan λ adalah eigen vector, λ_{max} adalah eigen number, n adalah jumlah total elemen/aspek yang sedang dianalisis, a_{ij} adalah nilai perbandingan aspek ke- i (kolom i) dan elemen ke- j (baris j), dan $\lambda_j \cdot Total\ j$ adalah hasil kali nilai eigen j dengan total nilai kolom j normalisasi.

Konsistensi dari setiap pendapat pribadi perlu dipertimbangkan dalam penentuan bobot akhir untuk setiap aspek dan parameter penentu keputusan. Perhitungan indeks konsistensi (CI) dalam penentuan bobot dilakukan melalui Persamaan 6. Kemudian membandingkan nilai indeks konsistensi (CI) dengan random index (RI), sehingga diperoleh nilai Rasio konsistensi (CR) untuk mengevaluasi validasi hasil pembobotan setiap aspek (Persamaan 7). Indeks Acak (RI) berasal dari sampel 500 matriks timbal balik yang dihasilkan secara acak (Zoma & Sawadogo, 2023), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4. Nilai CR harus kurang dari 0,10 atau 10% jika lebih dari itu maka skala penilaian bobot dianggap tidak konsisten atau tidak valid (Islam *et al.*, 2024).

$$\text{Consistency Index (CI)} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$\text{Consistency Ratio (CR)} = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Tabel 2. 4 Nilai indeks random (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,88	1,11	1,25	1,34	1,40	1,45	1,48
			5	2	0	0	1	4	1	6

Bobot setiap aspek kriteria yang telah diperoleh dari hasil sintesis pendapat para ahli dan telah dinyatakan konsisten melalui uji rasio konsistensi yang digunakan dalam perhitungan nilai akhir alternatif bioenergi. Sementara itu, nilai skoring untuk setiap alternatif diperoleh berdasarkan evaluasi terhadap kondisi tiap aspek kriteria. Bobot dan skor masing-masing parameter kemudian digabungkan

untuk memperoleh nilai preferensi total menggunakan Persamaan 8. Hasil akhir penjumlahan nilai tersebut digunakan untuk menentukan peringkat alternatif, di mana alternatif dengan nilai total tertinggi ditetapkan sebagai jenis bioenergi paling layak dikembangkan.

$$\begin{aligned} \text{Bioenergy} = & (Score_{PC} \times Weight_{PC}) + (Score_{MP} \times Weight_{MP}) + (Score_{FS} \times \\ & Weight_{FS}) + (Score_{LT} \times Weight_{LT}) + (Score_{EI} \times Weight_{EI}) + \\ & (Score_{RS} \times Weight_{RS}) \end{aligned} \quad (8)$$

2.1 Kelayakan Usaha

Analisis kelayakan usaha pengembangan potensi bioenergi merupakan langkah untuk mengevaluasi prospek bisnis melalui pertimbangan berbagai aspek seperti teknis, finansial, lingkungan, dan sosial–ekonomi–kebijakan.

a. Kelayakan teknis

Kelayakan teknis menilai apakah suatu produk bioenergi dapat dikembangkan secara operasional berdasarkan kesiapan teknologi, kesesuaian karakteristik bahan baku, efisiensi proses konversi, kapasitas produksi, hingga ketersediaan infrastruktur pendukung. Menurut Williams et al. (2015), biomassa dapat dikonversi menjadi bioenergi melalui empat proses konversi, yaitu proses fisik, termokimia, biokimia, dan kimiawi, yang masing-masing menghasilkan bentuk produk akhir bioenergi dan kebutuhan teknis serta dampak lingkungan yang juga berbeda-beda.

Proses konversi fisik seperti densifikasi menghasilkan bioenergi berupa bahan bakar padat berenergi tinggi, namun emisi polutannya relatif tinggi saat digunakan. Proses termokimia (pirolisis dan gasifikasi) memiliki efisiensi konversi yang tinggi dan fleksibel untuk berbagai jenis bahan baku biomassa, tetapi membutuhkan energi input untuk menaikkan temperatur. Jalur biokimia, misalnya fermentasi dan digesti anaerob, bekerja pada kondisi operasi yang lebih ringan, namun membutuhkan waktu retensi yang lebih panjang. Sementara itu, proses kimiawi seperti transesterifikasi mampu menghasilkan biodiesel dengan kualitas tinggi, tetapi hanya sesuai untuk biomassa dengan kandungan lipid. Tabel 2.5 menjelaskan keuntungan dan kekurangan setiap proses konversi biomassa energi.

Tabel 2. 5 Jenis Teknologi Konversi Bioenergi Beserta Kelebihan, Kekurangan, dan Produk Akhirnya

Proses	Teknologi		Output	Kegunaan Produk	Sumber
	Kelebihan	Kekurangan			
Densifikasi	Menghasilkan bahan bakar padat dengan densitas energi lebih tinggi dan mudah ditangani	Pelet biomassa menghasilkan asap dan kurang ramah lingkungan ketika dibakar	Bio-pelet	Memasak, pemanas ruangan, <i>co-firing</i> di PLTU batubara	(Baidoo et al., 2025)
Briket (Densifikasi)	Menghasilkan bahan bakar padat dengan pembakaran yang lebih stabil	Membutuhkan input energi tinggi untuk proses pengebriketan	Bio-briket	Memasak, pemanas ruangan, <i>co-firing</i> di PLTU batubara	(Gobel et al., 2021)
Torrefikasi	Meningkatkan nilai kalor dan densitas energi; mempermudah penyimpanan dan transportasi	Membutuhkan energi awal untuk pemanasan	Bio-coal	Co-firing di PLTU, pembawa energi	(Martin et al., 2023)
Pirolisis	Efisiensi konversi tinggi; menghasilkan banyak produk;	Membutuhkan energi tinggi untuk mencapai suhu tinggi; produksi bio-oil membutuhkan biaya tambahan	Bio-hidrogen	Bahan bakar bersih	(Baidoo et al., 2025)
			Bio-oil	Bahan bakar cair	
			Bio-char	Bahan bakar padat, pupuk tanah	
Fermentasi	Proses sederhana, ramah lingkungan, membutuhkan energi rendah;	Membutuhkan pra-perlakuan hidrolisis untuk biomassa lignoselulosa,	Bio-etanol	Bahan bakar kendaraan, alkohol industri dan kimia, aditif bahan bakar	(El-Araby, 2024)
Pencernaan Anaerob	Proses sederhana; menghasilkan digestat yang dapat digunakan sebagai pupuk	Waktu retensi lama; biomassa dengan lignin tinggi memperlambat proses	Biogas	Memasak, pemanas <i>co-firing</i> di PLTU, industri, bahan baku biomethan	(Sharma et al., 2025)
Transesterifikasi	Proses produksi cepat dan sederhana; emisi GRK rendah	Membutuhkan teknologi konversi kimia dan input alkohol	Bio-diesel	Bahan bakar mesin diesel di industri, transportasi, dan rumah tangga	(Wirawan et al., 2024)

b. Kelayakan finansial

Analisis teknis memberikan dasar untuk menilai kelayakan finansial, terutama terkait besarnya kebutuhan investasi, biaya operasional, potensi pendapatan, serta risiko teknis yang dapat mempengaruhi biaya produksi. Kelayakan finansial menjadi elemen penting karena pengembangan bioenergi sangat dipengaruhi oleh nilai pasar produk akhir, biaya konversi, dan dinamika permintaan global. Tabel 2.6 menyajikan biaya produksi dan kisaran harga pasar internasional untuk berbagai produk bioenergi, mulai dari pellet kayu, bio-briquette, biochar, bio-oil, hingga biodiesel.

Tabel 2. 6 Biaya Produksi dan Harga Jual Internasional Produk Bioenergi

Produk	Biaya Produksi	Harga Pasar Expor	Sumber
Wood Pellets	USD 103 / ton	USD 135 / ton	(Simangunsong et al., 2017)
Bio-briket	USD 161 – 258/ton	USD 960/ton	(Gobel et al., 2021)
Bio-coal	USD 190.60 / ton	USD 200 / ton	(Mugoronji et al., 2022)
Bio-hidrogen	USD 5,587 /ton	USD 3,865 - 3,865/ton	(Kotowicz et al., 2024)
Biochar	USD 600/ton	USD 500–1000/ ton	(Huang et al., 2021)
Bio-oil	USD 0.60–1.00/ L	USD 0.44 – 0.54/L	(El-Araby, 2024)
Bioetanol	USD 0.54 /L	USD 0.781/ L	(Srinophakun et al., 2020)
Biomethane	USD 15 – 21 / GJ	USD 12 – 28 / GJ	(IEA, 2025)
Biodiesel	USD 0.70–0.90/ L	USD 0.94 / L	(Wirawan et al., 2024)

Analisis finansial bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan dari aspek ekonomi suatu usaha bioenergi yang direkomendasikan. 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) (Nashrulloh *et al.*, 2020). Suatu usaha dapat dikatakan layak jika jumlah seluruh manfaat yang diterimanya melebihi biaya yang dikeluarkan. Jika nilai NPV lebih besar dari 0 ($NPV > 0$) maka artinya usaha tersebut menguntungkan atau memberikan manfaat. Sedangkan, IRR merupakan tingkat *discount rate* (DR) yang menghasilkan NPV sama dengan 0 yang dituliskan dalam satuan persentase (%). Sebuah usaha dikatakan layak apabila IRR lebih besar dari *opportunity cost of capital* (DR) (Rifansyah and Hakam, 2024). Secara matematis nilai NPV dan IRR dapat dicari dengan rumus dalam Persamaan 6 dan 7.

$$\text{Net Present Value (NPV)} = \sum_{t=0}^n \frac{Bt - Ct}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Dengan Bt adalah benefit atau penerimaan usaha pada tahun t, Ct adalah Cost/ biaya pada tahun t, t adalah tahun kegiatan usaha (0, 1, 2, 3, ...n) tahun awal dari tahun 0, dan i adalah tingkat suku bunga yang berlaku (%).

$$\text{Internal Rate of Return (IRR)} = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} - (i_2 - i_1) \quad (10)$$

Dengan i_1 adalah discount rate yang menghasilkan NPV positif, i_2 adalah discount rate yang menghasilkan NPV Negatif, NPV_1 adalah NPV positif, dan NPV_2 adalah NPV negatif.

PBP merupakan metode yang digunakan untuk menentukan berapa lama waktu yang diperlukan untuk mengembalikan biaya investasi awal melalui arus kas yang dihasilkan. PBP dianggap layak jika waktu pengembaliannya lebih cepat dari masa proyek (Nashrulloh *et al.*, 2020). BCR adalah rasio yang membandingkan manfaat yang diperoleh dari sebuah usaha dengan total biaya yang dikeluarkan untuk menjalankannya. Jika nilai $BCR \geq 1$, usaha dianggap menguntungkan dan layak untuk dilaksanakan, namun jika nilai $BCR < 1$, usaha tersebut dianggap tidak menguntungkan (Rifansyah & Hakam, 2024). Nilai PBP dan BCR secara berturut-turut dihitung menggunakan Persamaan 8 dan 9.

$$\text{Payback Period (PBP)} = \frac{Cf}{A} \quad (11)$$

Dengan Cf adalah Biaya Investasi Awal, dan A adalah Arus kas pertahun.

$$\text{Benefit-Cost Ratio (BCR)} = \frac{\text{Present Value Benefits}}{\text{Present Value Cost}} \quad (12)$$

Dengan *Present Value Benefits* adalah pendapatan per tahun, dan *Present Value Cost* adalah pengeluaran per tahun.

c. Kelayakan lingkungan

Proses budidaya melibatkan kegiatan seperti persiapan lahan, penyediaan bibit, penanaman, pemeliharaan, dan pemanenan. Meskipun tanaman energi mampu menyerap emisi CO₂ melalui fotosintesis, seluruh rangkaian aktivitas tersebut tetap menimbulkan tekanan terhadap tanah, air, dan habitat satwa. Iswanto *et al.*, (2021) mencatat bahwa tahap paling merusak terjadi pada saat pembersihan lahan yang umumnya dilakukan dengan pembakaran, serta penggunaan pupuk kimia pada fase pemeliharaan.

Tahap pemanenan juga berpotensi menimbulkan dampak negatif, terutama jika dilakukan dengan metode tebang habis. Praktik ini membuka tutupan vegetasi, menyebabkan gangguan habitat, meningkatkan risiko erosi, dan mempercepat hilangnya unsur hara tanah. Pada dasarnya kegiatan pembukaan lahan akan menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem. Oleh karena itu pemanenan biomassa dari Hasil Hutan Bukan Kayu (HHBK) atau biomassa non-kayu cenderung lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan pembukaan lahan atau penebangan pohon. Ruwanda & Shackleton, (2017) menunjukkan bahwa eksploitasi biomassa kayu dalam jumlah besar mengurangi kandungan nutrisi tanah secara signifikan, sedangkan pengambilan HHBK seperti buah dan rumput dalam jumlah terbatas tidak menyebabkan perubahan yang berarti terhadap kualitas tanah.

d. Dukungan regulasi

Pemerintah Indonesia telah menetapkan target pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil dengan mempercepat pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), sebagaimana diamanatkan dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN). Target awal bauran EBT ditetapkan sebesar 23% pada tahun 2025. Namun hingga September 2025, capaian bauran energi baru dan terbarukan baru mencapai 14,68%, sehingga target tersebut dinyatakan tidak tercapai.

Merespons kegagalan capaian target tersebut, pemerintah kini menerbitkan PP Nomor 40 Tahun 2025 sebagai revisi terhadap KEN. Regulasi ini menetapkan penyesuaian target bauran energi terbarukan menjadi 19–23% pada tahun 2030, yang secara bertahap meningkat hingga 70–72% pada tahun 2060. Biomassa ditetapkan sebagai salah satu sumber energi potensial, dengan target kontribusi sebesar 7,2–9% pada 2030 dan tetap stabil di kisaran 7% hingga 2060. Hal ini menempatkan biomassa sebagai penyumbang terbesar ketiga dalam bauran energi nasional setelah energi surya dan nuklir (PP No. 40, 2025). Detail target kontribusi masing-masing sumber energi terbarukan disajikan pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Target Kontribusi Energi Terbarukan menurut Sumber Energi

Jenis EBT	2030		2040		2050		2060	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Hidro (%)	1,8	2,3	3,6	3,8	4,6	4,9	4,9	5,1
Surya (%)	1,3	1,6	13,1	16	23,3	25,3	29,8	32
Angin (%)	0,3	0,5	0,9	1,1	1	1,2	1,2	1,3
Biomassa (%)	7,2	9	6,5	6,7	7,4	7,6	12,2	13,4
Panas Bumi (%)	3,4	4	3,8	4,4	4,8	5,1	4,9	5,2
Biogas (%)	0,013	0,014	0,019	0,02	0,027	0,028	0,043	0,049
BBN (%)	5,1	5,2	4,2	4,7	3,1	3,2	2,1	2,6
Nuklir (%)	0	0	2,8	3,4	6,8	7	11,7	12,1
EBT Lain (%)	0,1	0,2	0,5	0,6	1,2	1,5	1,5	1,6
Bauran EBT pada Total Energi Primer (%)	19	23	36	40	53	55	70	72

Sumber: Kebijakan Energi Nasional (KEN); PP No 40 Tahun 2025

