

Di tengah pusaran krisis iklim global, transisi energi bersih bukan lagi pilihan, melainkan keharusan. Buku ini hadir sebagai panduan strategis dan reflektif yang menjelajahi peran hutan tidak hanya sebagai penyedia kayu dan HHBK, tetapi juga sebagai benteng karbon alami yang menopang stabilitas iklim bumi.

Dengan pendekatan multidisiplin, buku ini menyatukan sains, kebijakan, teknologi, dan dinamika sosial dalam satu narasi yang utuh. Mulai dari definisi bioenergi dan jasa karbon, potensi biomassa hutan Indonesia, konversi energi berbasis biomassa, hingga pengaruhnya terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan/Sustainable Development Goals (SDGs). Disertai studi kasus lapangan, strategi pengelolaan lanskap, dan refleksi mendalam tentang etika ekologis, buku ini mengajak pembaca memahami kompleksitas sekaligus peluang di balik pengembangan bioenergi dan jasa ekosistem karbon hutan yang berkelanjutan.

Disusun dari pengalaman lebih dari 15 tahun penulis dalam riset, pemberdayaan masyarakat, kerja sama lintas sektor, dan keterlibatan dalam proyek nasional dan internasional, buku ini bukan hanya produk akademik, tetapi juga cerminan perjalanan panjang memahami hutan sebagai mitra kehidupan.

Cocok dibaca oleh mahasiswa, dosen, peneliti, pembuat kebijakan, praktisi kehutanan, hingga pelaku bisnis energi terbarukan dan jasa ekosistem karbon hutan. Sebuah bacaan penting untuk siapa saja yang percaya bahwa masa depan energi harus tumbuh dari akar yang menghormati bumi.

Penerbit Mafy (PT MAFY MEDIA LITERASI INDONESIA)  
 Tanah Garam, Kota Solok, Sumatera Barat 27312  
 Anggota IKAPI 041/SBA/2023  
 ✉ penerbitmafya@gmail.com  
 🌐 penerbitmafya.com  
 📞 Penerbit Mafy  
 📄 Mafy Media Literasi



**BIOENERGI DAN KARBON HUTAN**  
 Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan

**MUHAMMAD DAUD**

# BIOENERGI DAN KARBON HUTAN

## Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan

**MUHAMMAD DAUD**

# **BIOENERGI *dan*** **KARBON HUTAN**

**Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan**

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

#### **Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta**

- (i) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (ii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (iii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (iv) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah)

# BIOENERGI *dan* KARBON HUTAN

Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan

----- MUHAMMAD DAUD -----  
-----



**BIOENERGI DAN KARBON HUTAN**  
**Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan**

Penulis:  
**Muhammad Daud**

Layouter:  
**Ara Caraka**

Desainer:  
**Tim Mafy**

Sumber Gambar Cover:  
**[www.freepik.com](http://www.freepik.com)**

Ukuran:  
**ix, 145 hlm., 15,5 cm x 23 cm**

ISBN: 978-634-220-952-3

Cetakan Pertama:  
**September 2025**

**Hak Cipta Dilindungi oleh Undang-undang. Dilarang menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.**

**PT MAFY MEDIA LITERASI INDONESIA**  
**ANGGOTA IKAPI 041/SBA/2023**  
Kota Solok, Sumatera Barat, Kode Pos 27312  
Kontak: 081374311814  
Website: [www.penerbitmafy.com](http://www.penerbitmafy.com)  
E-mail: [penerbitmafy@gmail.com](mailto:penerbitmafy@gmail.com)

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya, buku ini yang berjudul "Bioenergi dan Karbon Hutan: Potensi, Tantangan, dan Solusi Berkelanjutan" dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini lahir dari keprihatinan sekaligus harapan atas semakin mendesaknya kebutuhan global untuk bertransisi menuju sumber energi bersih, serta pentingnya menjaga peran hutan sebagai penyangga iklim dan penyedia jasa lingkungan.

Bioenergi berbasis hutan dan jasa karbon merupakan dua komponen penting dalam strategi mitigasi perubahan iklim dan pengembangan energi terbarukan. Di satu sisi, hutan menyimpan potensi besar sebagai sumber biomassa yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan; di sisi lain, hutan memainkan peran vital sebagai penyerap dan penyimpan karbon alami yang mendukung stabilitas iklim global. Pemanfaatan potensi ini sangat relevan dalam kerangka pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim), SDG 15 (Kehidupan di Darat), dan SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Namun demikian, realisasi tujuan-tujuan ini tidak terlepas dari tantangan serius seperti degradasi lingkungan, konflik tata guna lahan, serta isu keberlanjutan sosial dan ekonomi masyarakat sekitar hutan.

Penyusunan buku ini didasarkan pada pengalaman lebih dari 15 tahun penulis dalam bidang bioenergi dan jasa lingkungan karbon hutan, yang diperoleh melalui beragam kegiatan riset, pemberdayaan masyarakat, keterlibatan dalam program-program

pemerintah, proyek kerja sama nasional dan internasional, serta kontribusi sebagai konsultan dalam sektor kehutanan dan energi terbarukan. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang komprehensif, menyatukan sudut pandang ilmiah, teknis, kebijakan, dan sosial-ekologis dalam satu kesatuan pemahaman untuk mendukung pembangunan yang inklusif dan berkelanjutan.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan dan ruang untuk penyempurnaan. Oleh karena itu, saran dan masukan yang konstruktif sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi, pengambil kebijakan, serta semua pihak yang terlibat dalam pengelolaan hutan dan pengembangan energi terbarukan yang selaras dengan agenda global SDGs 2030.

Akhir kata, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara moral, teknis, maupun ilmiah, selama proses penulisan dan penyusunan buku ini.

Penulis  
September 2025

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Ibu tercinta, Marina, serta Ayah saya, (Almarhum) Hammasa, atas cinta dan doa yang senantiasa mengiringi setiap langkah dalam kehidupan dan perjalanan berkarya.

Ucapan terima kasih yang tulus juga saya haturkan kepada istri tercinta, Andi Ma'rifah Asmawi, S.Kep., yang selalu setia mendampingi dalam suka dan duka. Kepada anak-anak saya, Muhammad Al Fatih Hammasa dan Humaira Ulya Adiba Hammasa, terima kasih karena telah menjadi sumber semangat dan inspirasi dalam setiap proses dan karya.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada saudara-saudara saya: Jumari, S.Pd., Mahmud, dan Hasnawiah, S.Pd., S.Pd.SD, Gr., serta keponakan saya, Nurul Fathiniah Azizah, dan seluruh keluarga besar atas cinta, dukungan, dan doa yang tiada henti.

Ucapan terima kasih saya sampaikan pula kepada rekan-rekan Dosen Fakultas Pertanian, khususnya rekan-rekan Dosen Program Studi Kehutanan, Universitas Muhammadiyah Makassar. Dukungan, semangat, dan kebersamaan yang diberikan telah menjadi bagian penting dalam proses penyusunan buku ini.

Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Djamal Sanusi, Dr. Baharuddin, Prof. Wasrin Syafii, PhD, Prof. Khaswar Syamsu, PhD, Prof. Suminar Setiati Achmadi, PhD., Prof. Dr. Erliza Hambali, Prof. Dr. Rizaldi Boer, Prof. Dr. Yusran Jusuf, Prof. Dr. Hazairin Zubair, Prof. Dr. forest. Muhammad Alif KS, Prof. Dr. Eymal Bashar Demmallino, Dr. Lalu Mas'ud Kholah atas kesediaan dan ketulusan mereka dalam berbagi

ilmu, pandangan kritis, serta wawasan strategis yang sangat berharga dalam perjalanan panjang penyusunan buku ini. Diskusi-diskusi mendalam bersama para guru besar dan pakar tersebut telah memperkaya substansi dan memperluas cakrawala pemahaman penulis terhadap isu-isu bioenergi, karbon hutan, serta relevansinya dalam konteks keberlanjutan nasional maupun global. Kontribusi intelektual mereka menjadi bagian penting dari fondasi pemikiran yang membentuk arah dan kedalaman buku ini.

Semoga segala bentuk kebaikan dan dukungan yang telah diberikan menjadi amal jariyah yang terus mengalir dan membawa keberkahan bagi kita semua.

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>i</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>BAB SATU PERSPEKTIF GLOBAL TERHADAP BIOENERGI DAN KARBON HUTAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Definisi Bioenergi dan Karbon Hutan.....	1
1.2. Relevansi Isu Perubahan Iklim dan Dekarbonisasi .....	3
1.3. Peran Hutan dalam Siklus Karbon Global.....	4
1.4. Kontribusi Sektor Kehutanan dalam Energi Terbarukan.....	6
<b>BAB DUA DASAR-DASAR BIOENERGI DAN JASA KARBON HUTAN</b> .....	<b>8</b>
2.1. Pengertian Bioenergi dan Jenis-Jenisnya .....	8
2.2. Sumber Bioenergi dari Biomassa Hutan .....	10
2.3. Proses Konversi Energi Biomassa .....	13
2.4. Teknologi Bioenergi.....	16
2.5. Konsep Jasa Lingkungan Karbon .....	22
2.6. Jasa Oksigen Hutan.....	24
<b>BAB TIGA DINAMIKA KARBON DALAM EKOSISTEM HUTAN</b> .	<b>27</b>
3.1. Aliran Karbon.....	27
3.2. Simpanan Karbon .....	29
3.3. Teknik Pengukuran dan Pemantauan Cadangan Karbon.	33
3.4. Perubahan Penggunaan Lahan dan Dampaknya terhadap Stok Karbon.....	37
3.5. Perhitungan Karbon dalam Skema DRAM (Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi).....	39

<b>BAB EMPAT POTENSI BIOENERGI HUTAN DI INDONESIA DAN DUNIA.....</b>	<b>44</b>
4.1. Potensi Biomassa dari Hutan Alam dan Hutan Tanaman.....	44
4.2. Pemanfaatan Limbah Hasil Hutan (Serbuk Gergaji, Cabang, Ranting) .....	48
4.3. Studi Kasus: Potensi Bioenergi di Wilayah Tropis dan Boreal.....	51
4.4. Analisis Spasial Potensi Bioenergi .....	54
<b>BAB LIMA KEBIJAKAN DAN INSTRUMEN REGULASI BIOENERGI-KARBON.....</b>	<b>56</b>
5.1. Kebijakan Global dan Nasional.....	56
5.2. Skema, Mekanisme Perdagangan Karbon dan Bursa Karbon di Indonesia .....	58
5.3. Regulasi Energi Terbarukan dan Bioenergi.....	62
5.4. Regulasi Karbon di Indonesia.....	66
5.4. Insentif dan Mekanisme Pasar Karbon .....	69
5.5. Tantangan Implementasi Kebijakan di Negara Berkembang.....	71
<b>BAB ENAM BIOENERGI, KARBON, DAN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGs).....</b>	<b>74</b>
6.1. Keterkaitan Bioenergi dan Karbon Hutan dengan SDGs..	74
6.2. Peran Karbon Hutan dalam Agenda Global 2030 .....	77
6.3. Integrasi Bioenergi dalam Rencana Pembangunan Berkelanjutan Nasional.....	79
6.4. Indikator SDGs Terkait Kehutanan dan Energi .....	80
<b>BAB TUJUH ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN.....</b>	<b>84</b>
7.1. Dampak Eksploitasi Biomassa terhadap Keanekaragaman Hayati .....	84
7.2. Isu Keberlanjutan dan Konservasi.....	86
7.3. Konversi Hutan untuk Bioenergi vs. Ketahanan Pangan...	88
7.4. Aspek Sosial-Ekonomi dan Hak Masyarakat Adat .....	89

<b>BAB DELAPAN TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM BIOENERGI HUTAN.....</b>	<b>92</b>
8.1. Inovasi dalam Teknologi Pemrosesan Biomassa .....	92
8.2. Penggunaan AI dan Remote Sensing dalam Monitoring Karbon.....	95
8.3. Integrasi Bioenergi dengan Smart Forest Management... ..	97
8.4. Masa Depan Bioenergi Berbasis Hutan .....	99
<b>BAB SEMBILAN STUDI KASUS LAPANGAN DAN PEMBELAJARAN PRAKTIK.....</b>	<b>102</b>
9.1. Studi Kasus Sukses Pemanfaatan Bioenergi dari Hutan..	102
9.2. Proyek Karbon Hutan dan Dampaknya terhadap Masyarakat Lokal .....	104
9.3. Praktik Terbaik Pengelolaan Hutan untuk Bioenergi .....	106
9.4. Evaluasi Proyek CDM dan REDD+ .....	108
<b>BAB SEPULUH STRATEGI PENGELOLAAN LANSKAP UNTUK BIOENERGI DAN KARBON.....</b>	<b>111</b>
10.1. Silvikultur dan Pengelolaan Hutan Produksi .....	111
10.2. Model Agroforestri dan Energi Terbarukan.....	114
10.3. Strategi Konservasi Karbon dalam Lanskap Hutan .....	117
10.4. Perencanaan Penggunaan Lahan Multipihak.....	119
<b>BAB SEBELAS TRANSFORMASI MENUJU MASA DEPAN BERKELANJUTAN .....</b>	<b>121</b>
11.1. Ringkasan Temuan Utama .....	121
11.2. Tantangan Utama dan Peluang ke Depan .....	123
11.3. Rekomendasi Kebijakan dan Praktik Terbaik .....	124
11.4. Visi Jangka Panjang Pemanfaatan Bioenergi Hutan yang Berkelanjutan.....	126
<b>BAB DUA BELAS MENATA ULANG RELASI HUTAN, ENERGI, DAN MASA DEPAN .....</b>	<b>128</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>131</b>
<b>PROFIL PENULIS .....</b>	<b>143</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 1	Cadangan Karbon Beberapa Jenis Tegakan.....	32
Tabel 2	Perbandingan Potens Cadangan Biomassa Hutan Alam dan Hutan Tanaman.....	48
Tabel 3	Perbandingan Potensi Bioenergi Wilayah Tropis dan Boreal .....	53
Tabel 4	Perbedaan Perdagangan Emisi dan Offset Emisi GRK .....	61
Tabel 5	Keterkaitan Bioenergi dan Karbon Hutan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) .....	76
Tabel 6	Indikator SDGs Terkait Kehutanan dan Bioenergi.....	82

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Siklus Karbon dan Hubungannya dengan Bioenergi ...6
Gambar 2	Biobriket dari Limbah Kayu ..... 10
Gambar 3	Kayu Bakar Merupakan Sumber Energi Biomassa Tradisional ..... 12
Gambar 4	Agroforestry Tanaman Gamal dan Aren berpotensi sebagai Kebun Energi..... 13
Gambar 5	Pembuatan Arang dari Tempurung Kelapa Secara Tradisional ..... 17
Gambar 6	Pembuatan Arang Limbah Kayu dengan Produk Turunan berupa Asap Cair (Cuka Kayu)..... 18
Gambar 7	Asap Cair (Cuka Kayu) yang dihasilkan dari Proses Pengarangan Limbah Kayu ..... 18
Gambar 8	Perancangan Biogas Sistem Batch (a) dan Sistem Kontinyu dengan Produk Samping Berupa Pupuk Cair dan Pupuk Padat..... 19
Gambar 9	Arang Cangkang Kemiri ( <i>Aleurites moluccana</i> ) (a) dan Cangka Panggi ( <i>Pangium edule</i> ) (b)..... 20
Gambar 10	Briket Arang Cangkang Kemiri yang Telah Dicitak ...20
Gambar 11	Biopellet dari Tanaman Kaliandra..... 21
Gambar 12	Biopellet dari Limbah Kayu Berpotensi sebagai Energi Terbarukan Masa Depan ..... 51
Gambar 13	Konsep Hutan Tanaman Eenergi.....114
Gambar 14	Kaliandra sebagai Bahan Baku Bioenergi Juga Dijadikan Pakan Lebah.....115
Gambar 15	Tanaman Gamal Berpotensi Dikembangkan sebagai Kebun Energi Dengan Sistem Agroforestry.....117



SATU

## **PERSPEKTIF GLOBAL TERHADAP BIOENERGI DAN KARBON HUTAN**

### **1.1. Definisi Bioenergi dan Karbon Hutan**

Bioenergi adalah bentuk energi terbarukan yang diperoleh dari bahan organik (biomassa). Biomassa ini dapat berasal dari limbah pertanian, limbah industri, maupun hasil hutan serta limbah organik lainnya. Secara khusus, bioenergi hutan merujuk pada energi yang berasal dari biomassa hutan, termasuk kayu, ranting, daun, serbuk gergaji, kulit kayu, dan residu lainnya yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan panas, listrik, atau bahan bakar cair.

Bioenergi memainkan peran penting dalam diversifikasi sumber energi global karena sifatnya yang terbarukan dan berpotensi netral karbon, tergantung pada praktik pengelolaannya. Dalam konteks dekarbonisasi, bioenergi menjadi salah satu

alternatif strategis untuk menggantikan bahan bakar fosil yang tinggi emisi.

Sementara itu, istilah karbon hutan mengacu pada total simpanan karbon yang berada dalam komponen ekosistem hutan, meliputi:

- Karbon biomassa hidup (pohon, semak, dan vegetasi lainnya)
- Karbon biomassa mati (kayu mati, serasah)
- Karbon tanah (materi organik di dalam tanah)

Karbon ini terakumulasi melalui proses fotosintesis, di mana pohon menyerap karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa. Hutan yang dikelola dengan baik dapat menjadi penyerap dan penyimpan karbon bersih (*carbon sink*), sedangkan hutan yang rusak atau terbakar dapat menjadi sumber emisi karbon (*carbon source*).

Secara konseptual, bioenergi dan karbon hutan saling terkait secara erat. Pemanfaatan biomassa hutan untuk energi harus mempertimbangkan keseimbangan karbon, agar tidak menghasilkan emisi bersih yang melebihi kapasitas serapan hutan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika karbon dan tata kelola biomassa sangat krusial dalam memastikan keberlanjutan sistem bioenergi.

Dalam skala global, definisi dan kerangka kerja bioenergi dan karbon hutan kini juga terikat pada berbagai kebijakan dan instrumen internasional seperti REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), *Clean Development Mechanism* (CDM), dan komitmen negara-negara terhadap *Net Zero Emission*.

Dengan demikian, definisi bioenergi dan karbon hutan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga strategis, karena berada di persimpangan antara konservasi, energi, dan perubahan iklim.

## 1.2. Relevansi Isu Perubahan Iklim dan Dekarbonisasi

Perubahan iklim merupakan tantangan global terbesar pada abad ke-21. Kenaikan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer, terutama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), dan dinitrogen oksida (N<sub>2</sub>O), telah menyebabkan peningkatan suhu rata-rata global, perubahan pola cuaca ekstrem, naiknya permukaan laut, dan gangguan terhadap keseimbangan ekosistem. Emisi GRK tersebut sebagian besar berasal dari aktivitas manusia, termasuk pembakaran bahan bakar fosil, perubahan penggunaan lahan, dan deforestasi.

Dalam konteks ini, dekarbonisasi menjadi strategi utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Dekarbonisasi merujuk pada proses sistematis untuk mengurangi emisi karbon dari berbagai sektor ekonomi, terutama energi, industri, transportasi, dan pertanian. Tujuan utamanya adalah mencapai netralitas karbon (*carbon neutrality*) atau emisi nol bersih (*net zero emission*) dalam jangka panjang, sebagaimana dicita-citakan dalam Perjanjian Paris 2015 dan berbagai komitmen nasional (NDC, *Nationally Determined Contributions*).

Hutan memiliki peran kunci dalam agenda dekarbonisasi karena dua alasan utama. Pertama, sebagai penyerap dan penyimpan karbon alami (*carbon sink*), hutan menyerap CO<sub>2</sub> dari atmosfer melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa serta karbon tanah. Dalam kondisi sehat dan lestari, ekosistem hutan mampu menyeimbangkan bahkan mengimbangi emisi dari sektor lain. Kedua, hutan juga merupakan sumber bioenergi rendah emisi. Biomassa dari hutan, jika dikelola secara berkelanjutan, dapat digunakan sebagai bahan bakar terbarukan yang relatif netral karbon. Emisi dari pembakaran biomassa umumnya akan terserap kembali oleh pertumbuhan vegetasi baru, asalkan siklusnya tertutup dan praktik pengelolaan dilakukan secara bijak.

Namun demikian, tanpa tata kelola yang baik, pemanfaatan bioenergi justru bisa memperburuk krisis iklim, terutama jika dilakukan melalui konversi hutan alami, pembalakan liar, atau pembakaran terbuka yang menghasilkan emisi karbon tinggi dan merusak keanekaragaman hayati.

Oleh karena itu, urgensi isu perubahan iklim mendorong perlunya pendekatan terintegrasi antara pengelolaan hutan, pengembangan energi terbarukan, dan upaya dekarbonisasi. Bioenergi berbasis hutan, jika disertai prinsip keberlanjutan dan keadilan sosial, dapat menjadi solusi transisi energi yang ramah iklim sekaligus memperkuat ketahanan ekosistem.

Dalam konteks global dan nasional, bioenergi dan karbon hutan tidak lagi hanya isu lingkungan, tetapi juga menjadi bagian dari strategi pembangunan rendah karbon, keamanan energi, serta diplomasi iklim antarnegara.

### **1.3. Peran Hutan dalam Siklus Karbon Global**

Siklus karbon adalah proses alami yang menggambarkan pergerakan karbon di antara atmosfer, biosfer, litosfer, dan hidrosfer. Dalam sistem ini, hutan berperan sebagai komponen vital yang mengatur keseimbangan karbon, khususnya dalam pertukaran karbon antara atmosfer dan daratan. Melalui proses biologis dan ekologis, hutan dapat menyerap, menyimpan, dan melepaskan karbon, menjadikannya salah satu penentu utama dinamika karbon global.

Hutan menyerap karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari atmosfer melalui proses fotosintesis, di mana tumbuhan hijau mengubah CO<sub>2</sub> dan air menjadi glukosa dan oksigen dengan bantuan sinar matahari. Karbon yang diserap ini kemudian disimpan dalam jaringan tanaman sebagai biomassa, baik di bagian atas permukaan tanah (pohon, daun, ranting) maupun di bawah tanah (akar dan bahan organik tanah). Dalam kondisi ekosistem yang stabil, hutan

bertindak sebagai penyerap dan penyimpan karbon bersih (*net carbon sink*), yang membantu mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer.

Namun, hutan juga melepaskan karbon ke atmosfer melalui proses respirasi tanaman, dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme, serta gangguan ekosistem seperti kebakaran, penggundulan, dan pembalakan liar. Ketika laju pelepasan karbon melebihi laju penyerapan, hutan dapat berubah fungsi menjadi sumber emisi karbon (*carbon source*). Oleh karena itu, peran hutan dalam siklus karbon sangat tergantung pada kondisi ekologis dan praktik pengelolaan yang diterapkan.

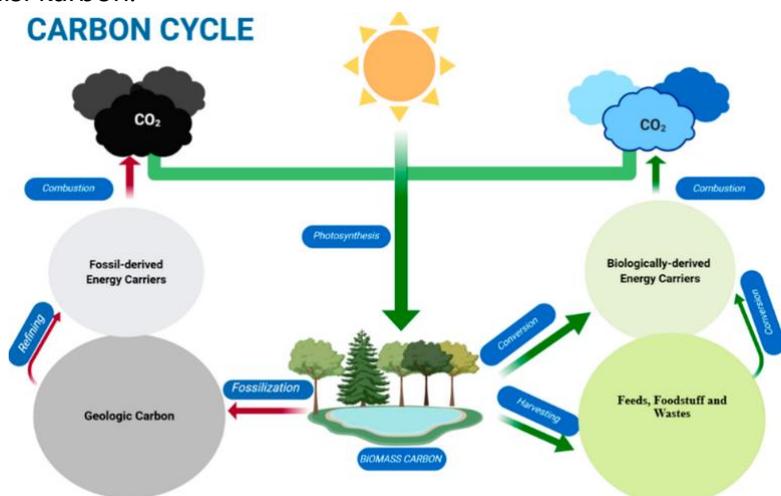
Secara global, hutan tropis, boreal, dan hutan beriklim sedang menyimpan lebih dari 80% karbon yang terdapat di atas permukaan tanah dalam bentuk biomassa. Selain itu, hutan juga menyimpan sekitar 40% karbon tanah dunia. Ini menjadikan kawasan hutan sebagai penyimpanan karbon jangka panjang yang strategis dalam mitigasi perubahan iklim.

Di banyak negara, khususnya di kawasan tropis seperti Indonesia, Brasil, dan Kongo, hutan alami menyumbang porsi signifikan dalam pengendalian karbon global. Namun, tekanan terhadap hutan akibat deforestasi, ekspansi pertanian, dan pembangunan infrastruktur dapat menyebabkan pelepasan karbon dalam jumlah besar ke atmosfer, memperparah krisis iklim.

Dengan demikian, pelestarian dan restorasi hutan bukan hanya isu konservasi keanekaragaman hayati, tetapi juga merupakan strategi penting dalam pengendalian emisi global. Peran hutan sebagai penyangga utama dalam siklus karbon harus diperkuat melalui kebijakan yang berpihak pada pengelolaan berkelanjutan dan pengakuan terhadap fungsi ekologis hutan dalam menjaga keseimbangan iklim bumi.

## 1.4. Kontribusi Sektor Kehutanan dalam Energi Terbarukan

Sektor kehutanan memiliki peran penting dalam pengembangan energi terbarukan, terutama melalui penyediaan biomassa sebagai bahan bakar bioenergi. Biomassa hutan, baik dari hutan alam maupun hutan tanaman, merupakan salah satu sumber energi yang dapat diperbaharui dan memiliki potensi besar untuk menggantikan sebagian penggunaan bahan bakar fosil yang tinggi emisi karbon.



Gambar 1 Siklus Karbon dan Hubungannya dengan Bioenergi  
(Sumber: Ahmed, et.al. 2021)

Kontribusi sektor kehutanan dalam energi terbarukan utamanya berasal dari pemanfaatan residu hasil hutan seperti kayu bakar, ranting, daun, serbuk gergaji, kulit kayu, dan limbah pengolahan kayu. Di banyak negara berkembang, terutama di kawasan tropis, biomassa kayu masih menjadi sumber energi utama bagi rumah tangga dan industri kecil, khususnya untuk keperluan memasak dan pengeringan. Di negara maju, teknologi yang lebih modern seperti pembangkit listrik tenaga biomassa, sistem *co-*

*firing*, dan pelet kayu juga semakin berkembang sebagai bagian dari bauran energi nasional.

Hutan tanaman energi juga mulai dikembangkan sebagai bagian dari strategi jangka panjang untuk mendukung ketahanan energi. Tanaman cepat tumbuh seperti akasia, sengon, kaliandra, dan eukaliptus banyak dimanfaatkan untuk produksi bahan baku energi karena siklus panennya yang pendek dan kemampuannya tumbuh di lahan marginal. Sistem agroforestri dan silvikultur intensif juga menjadi pendekatan untuk mengintegrasikan produksi energi dengan pelestarian fungsi ekologis hutan.

Kontribusi lain datang dari pengembangan teknologi bioenergi berbasis kehutanan yang semakin efisien dan ramah lingkungan. Teknologi seperti pirolisis, gasifikasi, dan biodigester memungkinkan konversi biomassa menjadi energi dengan tingkat emisi yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal ini membuka peluang bagi sektor kehutanan untuk tidak hanya berperan dalam penyediaan bahan baku, tetapi juga dalam pengembangan teknologi energi terbarukan.

Meskipun potensinya besar, kontribusi sektor kehutanan terhadap energi terbarukan perlu dijalankan secara hati-hati dan terukur. Pengambilan biomassa secara berlebihan, tanpa mempertimbangkan keseimbangan ekosistem, dapat mengakibatkan degradasi hutan dan hilangnya fungsi ekologis yang vital. Oleh karena itu, pemanfaatan energi dari sumber daya hutan harus didasarkan pada prinsip keberlanjutan, keadilan sosial, dan konservasi lingkungan.

Dalam konteks kebijakan energi nasional dan internasional, sektor kehutanan diakui sebagai bagian penting dari transisi energi bersih dan upaya mitigasi perubahan iklim. Dengan tata kelola yang baik, kehutanan dapat berkontribusi secara nyata terhadap pencapaian target energi terbarukan sekaligus menjaga integritas ekosistem dan kesejahteraan masyarakat sekitar hutan.



## DUA

# **DASAR-DASAR BIOENERGI DAN JASA KARBON HUTAN**

### **2.1. Pengertian Bioenergi dan Jenis-Jenisnya**

Bioenergi adalah bentuk energi yang berasal dari bahan organik (biomassa) yang dapat diperbaharui, yang terbuat dari bahan baku turunan biologi, baik yang berasal dari limbah pertanian, limbah kehutanan, limbah industri berbasis hayati, maupun hasil budidaya tanaman energi. Bioenergi memainkan peran penting dalam sistem energi terbarukan karena ketersediaannya yang luas, kemampuan untuk disimpan dan dikonversi dalam berbagai bentuk, serta potensinya untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam jangka panjang.

Dalam konteks kehutanan, bioenergi terutama dihasilkan dari biomassa hutan seperti kayu, ranting, daun, serbuk gergaji, dan limbah pengolahan kayu. Biomassa ini bisa berasal dari hutan alam, hutan tanaman industri, atau agroforestri, serta dari kegiatan

pengelolaan hutan yang menghasilkan residu biomassa dalam jumlah besar.

Secara umum, bioenergi dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk energi akhirnya dan metode konversinya, antara lain:

- Bioenergi padat  
Merupakan bentuk paling sederhana dan tradisional dari bioenergi, biasanya dalam bentuk kayu bakar, arang, pelet kayu, dan biobriket. Digunakan secara luas di daerah pedesaan untuk keperluan memasak dan pemanasan, serta dalam skala industri sebagai bahan bakar boiler dan tungku.
- Bioenergi cair  
Mengacu pada bahan bakar cair yang dihasilkan dari konversi biomassa, seperti bioetanol dan biodiesel. Bioetanol umumnya berasal dari fermentasi tanaman berpati atau bergula seperti jagung dan tebu, sedangkan biodiesel dibuat dari minyak nabati atau lemak hewani. Biofuel ini digunakan terutama sebagai bahan bakar transportasi.
- Bioenergi gas  
Biogas dihasilkan melalui proses anaerobik dari limbah organik seperti kotoran hewan, limbah pertanian, atau sampah organik rumah tangga. Biogas terdiri dari campuran metana dan karbon dioksida dan dapat digunakan untuk memasak, menghasilkan listrik, atau bahan bakar kendaraan. *Syngas* (gas sintetis) dihasilkan melalui gasifikasi biomassa dan dapat digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia.

Jenis-jenis bioenergi ini dapat digunakan secara langsung (misalnya pembakaran kayu untuk panas) atau dikonversi menjadi energi listrik, panas industri, dan bahan bakar transportasi melalui teknologi konversi tertentu. Pilihan jenis bioenergi sangat tergantung pada jenis biomassa yang tersedia, kebutuhan energi setempat, dan infrastruktur teknologi yang dimiliki.

Bioenergi memiliki keunggulan karena sifatnya yang terbarukan, dapat dimanfaatkan dari limbah atau hasil samping, dan jika dikelola dengan baik, berpotensi rendah karbon. Namun, untuk memastikan keberlanjutannya, produksi dan pemanfaatan bioenergi harus mempertimbangkan dampak terhadap lingkungan, sosial, dan keamanan pangan.



Gambar 2 Biobriket dari Limbah Kayu  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024)

## **2.2. Sumber Bioenergi dari Biomassa Hutan**

Biomassa hutan merupakan salah satu sumber utama bioenergi yang memiliki potensi besar dan dapat diperbarui, terutama di negara-negara yang memiliki wilayah hutan luas seperti Indonesia. Biomassa ini mencakup berbagai material organik yang dihasilkan dari aktivitas alami maupun kegiatan pengelolaan hutan,

baik yang berasal dari bagian tanaman hidup maupun residu pasca panen dan pengolahan kayu.

Sumber biomassa hutan yang dapat dimanfaatkan untuk bioenergi meliputi:

- Kayu bakar dan batang pohon  
Merupakan bentuk paling umum dari biomassa hutan yang digunakan sebagai bahan bakar. Kayu dari pohon yang ditebang, baik dari hutan tanaman maupun penjarangan hutan produksi, dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar padat atau dikonversi menjadi bentuk energi lain seperti arang, pelet kayu, atau bahan bakar cair dan gas.
- Limbah penebangan (*logging residues*)  
Sisa-sisa tebangan pohon seperti cabang, ranting, daun, potongan ujung batang, dan potongan akar sering kali ditinggalkan di lokasi tebangan. Material ini dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi, terutama untuk teknologi seperti pembakaran langsung, pirolisis, dan gasifikasi.
- Serbuk gergaji dan limbah pengolahan kayu  
Industri pengolahan kayu menghasilkan sejumlah besar limbah berupa serbuk gergaji, potongan kayu kecil, kulit kayu, dan sisa papan. Limbah ini dapat diolah menjadi pelet kayu, biobriket, atau digunakan sebagai bahan bakar langsung dalam pembangkit listrik biomassa.
- Hasil hutan bukan kayu (HHBK) dan biomassa non-kayu  
Selain kayu, beberapa jenis biomassa non-kayu dari hutan juga berpotensi digunakan sebagai sumber energi, seperti daun-daunan, biji-bijian tertentu, serta tanaman bawah yang cepat tumbuh. Beberapa spesies pohon juga menghasilkan minyak atau resin yang dapat dikembangkan menjadi biofuel.
- Tanaman energi hutan (*energy crops*)  
Hutan tanaman yang secara khusus dibudidayakan untuk keperluan energi, seperti kaliandra, gamal/gliciridia, sengon,

akasia, dan eukaliptus, merupakan sumber biomassa yang dapat dipanen secara berkelanjutan. Tanaman ini biasanya memiliki siklus tumbuh pendek dan produktivitas tinggi, sehingga cocok untuk sistem energi berbasis rotasi cepat.

- Biomassa dari kegiatan silvikultur dan rehabilitasi  
Kegiatan penjarangan, pemangkasan, dan pembersihan lahan pada program rehabilitasi dan reforestasi menghasilkan biomassa yang sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal. Padahal material ini dapat diolah menjadi energi jika dikelola secara sistematis.

Pemanfaatan biomassa hutan sebagai sumber bioenergi tidak hanya membantu diversifikasi sumber energi, tetapi juga membuka peluang untuk pengelolaan limbah hutan yang lebih efisien. Namun, penting untuk memastikan bahwa pengambilan biomassa tidak mengganggu keseimbangan ekosistem hutan, tidak menyebabkan degradasi tanah, serta tetap mempertahankan keanekaragaman hayati dan jasa lingkungan lainnya.



Gambar 3 Kayu Bakar Merupakan Sumber Energi Biomassa Tradisional

(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2018)

Pengelolaan sumber biomassa hutan yang berkelanjutan memerlukan perencanaan yang matang, pengawasan pemanenan, serta integrasi dengan kebijakan energi dan kehutanan nasional agar kontribusinya terhadap energi terbarukan tidak mengorbankan fungsi ekologis jangka panjang hutan.



Gambar 4 Agroforestry Tanaman Gamal dan Aren berpotensi sebagai Kebun Energi

(Sumber: Dokumentasi Kebun Pribadi, 2011)

### **2.3. Proses Konversi Energi Biomassa**

Biomassa sebagai bahan baku bioenergi tidak dapat digunakan secara langsung dalam semua aplikasi energi. Oleh karena itu, diperlukan proses konversi untuk mengubah biomassa menjadi bentuk energi yang lebih mudah digunakan, efisien, dan sesuai kebutuhan. Proses konversi ini dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok utama, yaitu termal, biokimia, dan mekanik.

▪ Konversi Termal

Konversi termal adalah proses pengubahan biomassa menjadi energi dengan menggunakan panas. Metode ini umum digunakan karena sederhana dan dapat diterapkan untuk berbagai jenis biomassa. Beberapa bentuk utama konversi termal meliputi:

- Pembakaran langsung (*combustion*): Biomassa dibakar secara langsung untuk menghasilkan panas, yang dapat digunakan untuk memasak, pemanasan, atau pembangkitan listrik dalam boiler uap. Ini adalah metode tertua dan paling umum digunakan, terutama di wilayah pedesaan.
- Pirolisis: Proses pemanasan biomassa dalam kondisi tanpa atau minim oksigen, menghasilkan produk berupa bio-oil (minyak pirolisis), gas, dan arang. Pirolisis dapat menghasilkan bahan bakar cair yang dapat disimpan dan diangkut dengan lebih mudah.
- Gasifikasi: Proses pengubahan biomassa padat menjadi gas sintesis (*syngas*) dengan bantuan udara atau uap dalam kondisi terbatas oksigen. Syngas dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, panas, atau sebagai bahan baku kimia.
- Pembakaran terkendali (*co-firing*): Penggunaan biomassa bersama-sama dengan batu bara dalam pembangkit listrik. Ini memungkinkan transisi bertahap dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan tanpa mengganti seluruh sistem pembangkit.

▪ Konversi Biokimia

Konversi biokimia menggunakan mikroorganisme atau enzim untuk menguraikan bahan organik menjadi bentuk energi. Metode ini cocok untuk biomassa dengan kandungan kelembaban tinggi seperti limbah organik dan bahan-bahan non-kayu. Dua proses utama adalah:

- Fermentasi: Mengubah gula dan pati dari biomassa menjadi etanol dengan bantuan mikroorganisme. Bioetanol ini digunakan sebagai bahan bakar cair untuk kendaraan atau sebagai campuran dalam bensin.
- Digestasi anaerob: Proses dekomposisi bahan organik oleh bakteri dalam kondisi tanpa oksigen, menghasilkan biogas yang mengandung metana dan karbon dioksida. Biogas dapat digunakan untuk memasak, penerangan, atau pembangkitan listrik skala kecil.
- Konversi Mekanik  
Proses ini melibatkan tekanan atau pemrosesan fisik untuk mengekstrak energi dari biomassa, biasanya dalam bentuk bahan bakar cair atau padat.
  - Ekstraksi minyak nabati: Minyak dari biji tanaman tertentu seperti jarak pagar, nyamplung, atau kelapa sawit dapat diperas secara mekanis dan digunakan sebagai bahan bakar nabati (biodiesel) setelah proses transesterifikasi.
  - Densifikasi (peletisasi dan briketisasi): Biomassa yang longgar seperti serbuk gergaji atau sekam padi dapat dikompres menjadi pelet atau briket untuk meningkatkan densitas energi, efisiensi transportasi, dan kemudahan pembakaran.

Masing-masing proses konversi memiliki kelebihan dan keterbatasan tergantung pada jenis biomassa, tujuan akhir pemanfaatan energi, skala produksi, dan ketersediaan teknologi. Pemilihan metode konversi harus mempertimbangkan faktor teknis, ekonomi, serta dampak lingkungan dan sosial.

Penerapan teknologi konversi yang tepat akan menentukan efisiensi sistem bioenergi secara keseluruhan, sekaligus memastikan bahwa penggunaan biomassa berjalan selaras dengan prinsip keberlanjutan.

## 2.4. Teknologi Bioenergi

Pemanfaatan bioenergi dari biomassa hutan sangat bergantung pada teknologi konversi yang digunakan. Teknologi ini menentukan bentuk energi akhir, efisiensi proses, serta dampaknya terhadap lingkungan. Dalam konteks kehutanan, berbagai teknologi telah dikembangkan dan diadopsi, mulai dari yang sederhana hingga yang berteknologi tinggi dan terintegrasi. Beberapa teknologi utama meliputi:

- **Pembakaran Langsung (Direct Combustion)**

Pembakaran langsung merupakan teknologi paling sederhana dan paling tua dalam pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi. Biomassa dibakar di udara terbuka atau di dalam tungku untuk menghasilkan panas. Teknologi ini umum digunakan untuk pemanas rumah tangga, pengeringan hasil pertanian, dan boiler uap di industri.

Meskipun murah dan mudah diterapkan, efisiensi termal dari pembakaran langsung biasanya rendah, dan dapat menghasilkan emisi partikulat tinggi jika tidak dilengkapi dengan sistem pengendali emisi yang memadai.

- **Pirolisis**

Pirolisis adalah proses termokimia yang menguraikan biomassa melalui pemanasan tanpa atau dengan sangat sedikit oksigen. Proses ini menghasilkan tiga produk utama: bio-oil (minyak pirolisis), biochar (arang padat), dan gas pirolitik.



Gambar 5 Pembuatan Arang dari Tempurung Kelapa Secara Tradisional

(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2016)

Bio-oil dapat digunakan sebagai bahan bakar cair atau diproses lebih lanjut menjadi bahan kimia industri. Biochar memiliki nilai tambah sebagai pembenah tanah karena dapat meningkatkan kapasitas simpan air dan karbon di dalam tanah, sementara gas pirolitik dapat digunakan langsung untuk pembakaran.



Gambar 6 Pembuatan Arang Limbah Kayu dengan Produk Turunan berupa Asap Cair (Cuka Kayu)  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2015)



Gambar 7 Asap Cair (Cuka Kayu) yang dihasilkan dari Proses Pengarangan Limbah Kayu  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2015)

- Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses pengubahan biomassa padat menjadi gas sintetik (*syngas*), yang terdiri dari hidrogen, karbon monoksida, metana, dan karbon dioksida. Proses ini terjadi dalam kondisi terbatas oksigen dan suhu tinggi.

Syngas dapat digunakan untuk pembangkitan listrik, bahan bakar turbin gas, atau sebagai bahan baku kimia. Teknologi ini lebih efisien dibanding pembakaran langsung dan menghasilkan emisi lebih rendah, namun memerlukan investasi awal dan pemeliharaan yang lebih kompleks.

- *Anaerobic Digestion*

Meski lebih umum digunakan untuk limbah basah seperti kotoran ternak atau limbah organik, teknologi ini juga dapat diterapkan untuk limbah hutan tertentu yang mengandung kadar air tinggi. Proses ini menghasilkan biogas, yang mengandung metana dan karbon dioksida, serta digestat yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik.



(a)

(b)

Gambar 8 Perancangan Biogas Sistem Batch (a) dan Sistem Kontinyu dengan Produk Samping Berupa Pupuk Cair dan Pupuk Padat

(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2015 dan 2024)

▪ Teknologi Peletisasi dan Briketisasi

Teknologi ini digunakan untuk meningkatkan densitas energi biomassa dengan mengompres bahan longgar seperti serbuk gergaji, sekam, atau limbah pertanian menjadi bentuk padat seperti pelet dan briket. Produk hasil densifikasi lebih mudah disimpan, ditransportasikan, dan dibakar dengan efisiensi tinggi, serta dapat digunakan dalam sistem pemanas skala rumah tangga maupun industri.



Gambar 9 Arang Cangkang Kemiri (*Aleurites moluccana*) (a) dan Cangka Pangi (*Pangium edule*) (b)  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2019)



Gambar 10 Briket Arang Cangkang Kemiri yang Telah Dicetak  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2019)

- Co-Firing

Co-firing adalah teknologi pencampuran biomassa dengan bahan bakar fosil seperti batu bara dalam sistem pembangkit listrik. Teknologi ini memungkinkan penurunan emisi karbon secara signifikan tanpa perlu mengganti seluruh sistem pembangkit. *Co-firing* menjadi strategi peralihan menuju pembangkitan energi yang lebih bersih, terutama di negara-negara dengan infrastruktur batu bara yang dominan.

- Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm)

Teknologi ini mengintegrasikan berbagai metode konversi untuk menghasilkan listrik dari biomassa. Di Indonesia, pembangkit listrik tenaga biomassa mulai dikembangkan di daerah pedesaan atau terpencil sebagai solusi elektrifikasi berbasis sumber daya lokal. Sistem ini umumnya menggunakan pembakaran atau gasifikasi biomassa, dilengkapi dengan generator untuk menghasilkan listrik secara berkelanjutan.



Gambar 11 Biopellet dari Tanaman Kaliandra  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2016)

Teknologi bioenergi terus berkembang, termasuk munculnya teknologi hibrida dan sistem energi terdistribusi berbasis biomassa. Pemilihan teknologi terbaik bergantung pada ketersediaan bahan baku, skala proyek, tujuan energi akhir (listrik, panas, bahan bakar cair/gas), serta pertimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Inovasi dalam teknologi konversi dan integrasi dengan sistem energi lainnya menjadi kunci untuk meningkatkan efisiensi, menurunkan emisi, serta memperkuat peran bioenergi hutan dalam transisi menuju energi rendah karbon.

## **2.5. Konsep Jasa Lingkungan Karbon**

Jasa lingkungan karbon merupakan salah satu komponen penting dari nilai ekologis hutan, terutama dalam konteks mitigasi perubahan iklim. Hutan menyediakan jasa lingkungan melalui dua mekanisme utama: penyerapan karbon (*carbon sequestration*) dan penyimpanan karbon (*carbon storage*). Keduanya berperan penting dalam mengatur keseimbangan karbon global dan mendukung upaya dekarbonisasi sektor energi, termasuk melalui integrasi dengan bioenergi berbasis hutan.

### ▪ Penyerapan Karbon (Carbon Sequestration)

Penyerapan karbon adalah proses biologis di mana tumbuhan, melalui fotosintesis, menyerap karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa dalam bentuk batang, daun, akar, dan jaringan tanaman lainnya. Proses ini menjadikan hutan sebagai penyerap dan penyimpan karbon alami (*carbon sink*).

Laju penyerapan karbon sangat dipengaruhi oleh jenis vegetasi, usia hutan, kondisi iklim, ketersediaan air dan nutrisi, serta praktik pengelolaan hutan. Hutan primer dan hutan tanaman muda yang tumbuh cepat biasanya memiliki tingkat penyerapan karbon

yang tinggi. Oleh karena itu, konservasi hutan alam dan reforestasi lahan terdegradasi merupakan strategi penting dalam memperkuat peran penyerapan karbon oleh ekosistem hutan.

▪ Penyimpanan Karbon (Carbon Storage)

Penyimpanan karbon mengacu pada akumulasi karbon yang telah diserap dalam berbagai kompartemen ekosistem hutan. Karbon tersimpan dalam bentuk biomassa hidup, bahan organik mati, dan senyawa karbon dalam tanah. Komponen utama penyimpanan karbon meliputi:

- Biomassa di atas permukaan tanah: mencakup batang, cabang, ranting, dan daun pohon serta vegetasi lainnya. Ini merupakan salah satu tempat penyimpanan karbon terbesar di hutan yang aktif mengalami pertumbuhan.
- Biomassa di bawah tanah: terdiri dari akar pohon dan jaringan tanaman lainnya yang tumbuh dalam tanah. Sistem akar tidak hanya menyimpan karbon tetapi juga membantu stabilisasi tanah dan siklus hara.
- *Litter* (serasah): berupa dedaunan, ranting kecil, kulit kayu, dan material organik lainnya yang jatuh ke permukaan lantai hutan. Serasah menjadi sumber karbon jangka pendek yang terus mengalami dekomposisi.
- Nekromassa: merupakan biomassa mati yang belum terdekomposisi sepenuhnya, seperti batang pohon tumbang, cabang besar mati, tunggul, dan akar mati. Nekromassa menyimpan karbon dalam periode menengah hingga panjang dan memainkan peran penting dalam dinamika karbon hutan, terutama di hutan tua dan alami. Selain sebagai tempat penyimpanan karbon, nekromassa juga berfungsi sebagai habitat bagi mikroorganisme dan mendukung keanekaragaman hayati.

- Tanah: menyimpan karbon organik dalam bentuk humus dan senyawa kompleks hasil pelapukan biomassa. Tanah hutan dapat mengandung karbon dalam jumlah besar dan memiliki masa tinggal (*residence time*) karbon yang sangat panjang.

Keberadaan nekromassa sering diabaikan dalam pengukuran cadangan karbon, padahal volumenya bisa signifikan, terutama di hutan tropis lembab dan boreal. Oleh karena itu, pengelolaan hutan berkelanjutan perlu mempertimbangkan nekromassa sebagai bagian dari stok karbon total

- Peran dalam Skema Karbon dan Bioenergi

Dalam konteks bioenergi hutan, penting untuk menjaga keseimbangan antara pemanfaatan biomassa dan konservasi stok karbon. Jika pemanenan biomassa dilakukan secara tidak berkelanjutan, maka jasa penyimpanan karbon dapat berkurang.

## 2.6 Jasa Oksigen Hutan

Hutan memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem global, salah satunya melalui jasa penyediaan oksigen. Oksigen ini dihasilkan melalui proses fotosintesis, yaitu proses biologis di mana tumbuhan menyerap karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari atmosfer dan air (H<sub>2</sub>O) dari tanah, lalu mengubahnya menjadi glukosa (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) dan oksigen (O<sub>2</sub>) dengan bantuan cahaya matahari. Reaksi kimia fotosintesis secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:



Melalui reaksi ini, tumbuhan melepaskan oksigen ke udara bebas yang kemudian dimanfaatkan oleh manusia dan makhluk hidup lainnya untuk bernapas. Semakin luas dan sehat vegetasi di hutan, semakin besar jumlah oksigen yang diproduksi dan dilepaskan ke atmosfer.

Namun demikian, produksi oksigen tidak hanya ditentukan oleh fotosintesis. Tumbuhan juga melakukan respirasi, yaitu proses penguraian glukosa untuk memperoleh energi, yang justru membutuhkan oksigen dan menghasilkan kembali karbon dioksida dan air. Reaksi respirasi secara umum dituliskan sebagai berikut:



Dengan demikian, jumlah oksigen bersih yang benar-benar disumbangkan oleh tumbuhan ke atmosfer adalah selisih antara oksigen yang dihasilkan saat fotosintesis dengan oksigen yang digunakan saat respirasi. Jika selama pertumbuhannya, tumbuhan menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskan melalui respirasi, maka terjadi akumulasi karbon bersih, yang juga berarti terjadi produksi oksigen bersih.

Produksi oksigen bersih (dalam satuan ton) dapat diperkirakan dari cadangan karbon bersih yang disimpan tumbuhan. Rumus konversinya sebagai berikut:

$$\text{Produksi oksigen bersih (ton)} = \text{Cadangan karbon bersih (ton)} \times 32/12$$

Produksi oksigen bersih tahunan yang dihasilkan tumbuhan (dalam satuan ton per tahun) dapat diperkirakan dari cadangan karbon bersih tahunan yang disimpan tumbuhan setiap tahun. Rumus konversinya sebagai berikut:

$$\text{Produksi oksigen bersih (ton/tahun)} = \text{Cadangan karbon bersih (ton/tahun)} \times 32/12$$

Rasio 32/12 berasal dari perbandingan massa molar gas oksigen ( $O_2 = 32 \text{ g/mol}$ ) terhadap massa molar karbon ( $C = 12 \text{ g/mol}$ ). Artinya, setiap 1 ton karbon yang disimpan dalam jaringan tumbuhan menghasilkan sekitar 2,67 kg oksigen bersih.

Selain sebagai penghasil oksigen, hutan juga berperan sebagai penyeimbang gas di atmosfer. Ia menyerap karbon dioksida dalam jumlah besar, yang merupakan salah satu gas rumah kaca utama penyebab pemanasan global. Hutan juga menyaring udara dari partikel dan polutan berbahaya, sehingga membantu menghasilkan udara yang lebih bersih dan layak dihirup. Dalam hal

ini, hutan berfungsi sebagai paru-paru dunia yang menjaga keseimbangan antara oksigen dan karbon dioksida di atmosfer.

Kontribusi hutan dalam sistem pernapasan global sangat besar. Walaupun lautan, melalui aktivitas fitoplankton, juga menghasilkan oksigen, hutan daratan, terutama hutan hujan tropis seperti yang ada di Indonesia, Amazon, dan Kongo, diperkirakan menyumbang sekitar 20–30% dari total oksigen atmosfer. Oksigen ini menopang kehidupan makhluk hidup di darat dan juga di berbagai ekosistem perairan.

Lebih jauh, jasa oksigen ini memungkinkan kehidupan dan keanekaragaman hayati tetap berlangsung. Keberadaan oksigen dalam jumlah yang cukup sangat penting bagi kehidupan berbagai spesies satwa dan tumbuhan. Keanekaragaman hayati di dalam hutan, pada gilirannya, menjaga kestabilan dan ketahanan ekosistem terhadap gangguan atau perubahan iklim yang ekstrem.

Secara ekonomi, jasa oksigen hutan juga memiliki nilai tidak langsung yang signifikan. Udara bersih mendukung kesehatan masyarakat dan mengurangi beban biaya kesehatan akibat penyakit pernapasan. Selain itu, oksigen sebagai bagian dari kualitas lingkungan menjadi nilai tambah dalam pengembangan ekowisata dan jasa lingkungan lainnya.

Namun, semua jasa penting ini kini terancam oleh aktivitas manusia. Deforestasi, perambahan hutan, dan kebakaran hutan yang masif menyebabkan penurunan luas hutan dan kerusakan vegetasi. Akibatnya, kapasitas hutan untuk menyerap karbon dan menghasilkan oksigen ikut menurun. Bahkan, hutan yang rusak bisa berubah dari penyerap karbon menjadi penyumbang karbon, yang memperburuk kondisi iklim global.

Oleh karena itu, menjaga kelestarian hutan adalah langkah krusial dalam menjaga ketersediaan oksigen bersih bagi kehidupan di Bumi. Upaya pelestarian dan rehabilitasi hutan secara berkelanjutan harus menjadi prioritas bersama demi masa depan seluruh makhluk hidup di planet ini.



TIGA

## **DINAMIKA KARBON DALAM EKOSISTEM HUTAN**

### **3.1. Aliran Karbon**

Karbon merupakan unsur dasar dalam siklus kehidupan dan pergerakannya di dalam ekosistem hutan dikenal sebagai siklus karbon. Aliran karbon menggambarkan proses masuk dan keluarnya karbon di berbagai kompartemen hutan, yang terjadi secara dinamis melalui tiga proses utama: fotosintesis, respirasi, dan dekomposisi. Pemahaman mengenai aliran ini sangat penting dalam mengukur kapasitas hutan sebagai penyerap dan penyimpan karbon, serta dalam mengevaluasi dampaknya terhadap perubahan iklim.

- **Fotosintesis**

Fotosintesis adalah proses biologis utama di mana tumbuhan hijau menyerap karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dari atmosfer dan mengubahnya menjadi senyawa organik (glukosa dan turunannya)

dengan bantuan energi matahari dan air. Proses ini tidak hanya menghasilkan bahan bangunan bagi pertumbuhan tumbuhan, tetapi juga melepaskan oksigen ke atmosfer sebagai produk sampingan.

Reaksi umum fotosintesis:



Fotosintesis menjadi pintu masuk utama karbon ke dalam ekosistem hutan, dan semakin tinggi produktivitas fotosintetik suatu hutan, semakin besar pula potensi penyerapan karbonnya.

#### ▪ Respirasi

Respirasi merupakan proses metabolik yang terjadi pada tumbuhan, hewan, mikroorganisme, dan bahkan pada jaringan mati dalam kondisi tertentu. Melalui respirasi, organisme menguraikan senyawa organik menjadi energi (ATP) dan melepaskan karbon kembali ke atmosfer dalam bentuk  $\text{CO}_2$ .

Respirasi terdiri dari dua jenis utama dalam ekosistem hutan:

- Respirasi autotrof: dilakukan oleh tumbuhan (akar, batang, daun) untuk memenuhi kebutuhan energi internalnya.
- Respirasi heterotrof: dilakukan oleh organisme yang memakan bahan organik seperti mikroba, jamur, dan fauna tanah.

Secara bersih, respirasi mengurangi jumlah karbon yang tersimpan, karena sebagian dari hasil fotosintesis digunakan kembali oleh organisme untuk bertahan hidup.

#### ▪ Dekomposisi

Dekomposisi adalah proses penguraian bahan organik mati oleh mikroorganisme dan makroorganisme tanah seperti bakteri, jamur, rayap, dan cacing. Proses ini sangat penting karena mengembalikan karbon dari nekromassa (pohon tumbang, daun gugur, serasah) ke atmosfer sebagai  $\text{CO}_2$ , sekaligus mendaur ulang nutrisi penting ke dalam tanah.

Laju dekomposisi dipengaruhi oleh:

- Suhu dan kelembaban tanah
- Komposisi kimia bahan organik
- Aktivitas biologis tanah

Dekomposisi yang cepat mempercepat pelepasan karbon, sementara kondisi lembab dan anaerob (seperti di lahan gambut) dapat memperlambat dekomposisi dan menyebabkan akumulasi karbon dalam tanah.

▪ Keseimbangan Aliran Karbon

Ketiga proses ini membentuk neraca karbon hutan. Jika laju fotosintesis lebih besar dari jumlah karbon yang dilepaskan melalui respirasi dan dekomposisi, maka hutan tersebut menjadi penyerap dan penyimpan karbon bersih (*net carbon sink*). Sebaliknya, jika respirasi dan dekomposisi mendominasi, hutan dapat berubah menjadi sumber karbon (*carbon source*), terutama dalam kondisi terganggu seperti kebakaran, deforestasi, atau degradasi lahan.

Pemahaman mendalam tentang aliran karbon menjadi dasar dalam pemantauan cadangan karbon hutan dan dalam merancang intervensi berbasis mitigasi iklim, seperti proyek REDD+ dan konservasi hutan. Dinamika ini juga menjadi kunci dalam penentuan strategi pengelolaan hutan yang berorientasi pada stabilisasi karbon jangka panjang

### **3.2. Simpanan Karbon**

Simpanan karbon dalam ekosistem hutan tersebar di berbagai kompartemen yang memiliki kapasitas dan karakteristik berbeda. Kompartemen utama tersebut meliputi biomassa atas tanah, biomassa bawah tanah, serasah, nekromassa, dan tanah. Setiap bagian memainkan peran penting dalam stabilisasi karbon jangka pendek hingga jangka panjang.

▪ Biomassa Atas Tanah

Biomassa atas tanah terdiri dari bagian tumbuhan yang berada di atas permukaan tanah, seperti batang, cabang, ranting, daun, dan organ vegetatif lainnya. Kompartemen ini menyimpan sebagian besar karbon dalam ekosistem hutan, terutama pada hutan primer, hutan hujan tropis, dan hutan tanaman berumur panjang.

Faktor yang memengaruhi jumlah karbon dalam biomassa atas tanah antara lain:

- Jenis spesies pohon
- Kepadatan dan umur tegakan
- Kondisi iklim dan tanah

Biomassa atas tanah merupakan penyerap karbon aktif melalui fotosintesis dan merupakan indikator penting dalam penilaian cadangan karbon hutan.

▪ Biomassa Bawah Tanah

Biomassa bawah tanah mencakup sistem akar dari pohon dan tumbuhan lainnya yang tumbuh di bawah permukaan tanah. Meskipun proporsinya lebih kecil dibandingkan biomassa atas tanah, bagian ini berperan penting dalam mendukung struktur tegakan, pengambilan nutrisi, dan interaksi biologis dengan mikroorganisme tanah.

Persentase karbon dalam biomassa bawah tanah biasanya diperkirakan dari biomassa atas tanah menggunakan faktor akar, tergantung pada jenis spesies dan ekosistemnya.

▪ Serasah

Serasah adalah lapisan bahan organik yang jatuh dan menumpuk di permukaan tanah, seperti daun kering, bunga, ranting kecil, dan buah. Serasah menyimpan karbon dalam jangka pendek dan berfungsi sebagai media transisi karbon dari biomassa ke tanah. Peran penting serasah:

- Menjadi sumber energi bagi mikroorganisme pengurai
- Menstabilkan suhu dan kelembaban tanah
- Menyumbang pada pembentukan karbon organik tanah setelah dekomposisi

Tingkat akumulasi dan dekomposisi serasah dipengaruhi oleh musim, iklim, jenis vegetasi, dan aktivitas fauna tanah.

#### ▪ Nekromassa

Nekromassa merupakan biomassa mati yang belum sepenuhnya terurai, seperti batang pohon tumbang, cabang besar mati, tunggul, dan akar mati. Meskipun tidak aktif secara fisiologis, nekromassa menyimpan karbon dalam jumlah signifikan dan mengalami dekomposisi perlahan.

Peran nekromassa dalam ekosistem hutan:

- Menyediakan cadangan karbon jangka menengah
- Menjadi habitat bagi jamur, serangga, dan mikroba
- Menyumbang karbon organik tanah saat proses pelapukan selesai

Nekromassa sering diabaikan dalam inventarisasi karbon padahal penting, terutama dalam hutan tua, hutan boreal, atau wilayah dengan gangguan alami seperti badai dan kebakaran.

#### ▪ Tanah

Tanah hutan mengandung karbon dalam bentuk karbon organik tanah (*soil organic carbon/SOC*) yang berasal dari bahan organik terdekomposisi, eksudat akar, dan aktivitas mikroba. Karbon tanah merupakan penyimpanan jangka panjang dan stabil, serta memainkan peran vital dalam menjaga produktivitas dan kesehatan ekosistem.

Faktor yang memengaruhi simpanan karbon tanah:

- Tekstur dan kandungan lempung
- Kandungan air dan tingkat keasaman
- Aktivitas biologis dan dekomposisi

- o Gangguan fisik (seperti erosi atau pembukaan lahan)

Pada ekosistem tertentu seperti hutan gambut tropis atau hutan boreal, tanah dapat menyimpan karbon dalam jumlah yang melebihi total biomassa hidup di atasnya.

Dengan mempertimbangkan kelima kompartemen ini dalam pengelolaan dan inventarisasi karbon, maka strategi mitigasi perubahan iklim berbasis hutan akan menjadi lebih akurat, komprehensif, dan efektif.

**Tabel 1 Cadangan Karbon Beberapa Jenis Tegakan**

Jenis	Cadangan karbon (ton/ha)	Referensi
Hutan Bambu Parring	31,45	Baharuddin, 2013
Hutan Bambu Betung	111,22	Baharuddin, et.al., 2014
Kebun Raya	104,5	Daud, et.al., 2014
Hutan Sekunder	164,05	Daud, et.al., 2015
Hutan Lahan Kering Primer	195,4	Kemenhut, 2010
Hutan Lahan Kering Sekunder	169,7	Kemenhut, 2010
Hutan Mangrove Primer	170,0	Kemenhut, 2010
Hutan Mangrove Sekunder	120,0	Kemenhut, 2010
Hutan Rawa Primer	196,0	Kemenhut, 2010
Hutan Rawa Sekunder	155,0	Kemenhut, 2010
Hutan Tanaman	100,0	Kemenhut, 2010
Belukar	15,0	Kemenhut, 2010
Belukar rawa	15,0	Kemenhut, 2010
Perkebunan	63,0	Kemenhut, 2010
Pemukiman	1,0	Kemenhut, 2010
Rumput	4,5	Kemenhut, 2010
Pertanian Lahan Kering	8,0	Kemenhut, 2010
Pertanian Lahan Kering Campur	10,0	Kemenhut, 2010
Sawah	5,0	Kemenhut, 2010

### 3.3. Teknik Pengukuran dan Pemantauan Cadangan Karbon

Pemantauan dan pengukuran cadangan karbon merupakan langkah penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim, pengelolaan hutan lestari, serta implementasi mekanisme pasar karbon seperti REDD+ dan CDM. Saat ini, skema perdagangan karbon di Indonesia mencakup dua jenis pasar, yaitu pasar karbon wajib (*mandatory*) dan pasar karbon sukarela (*voluntary*). Teknik yang digunakan mencakup pendekatan langsung (pengukuran lapangan) dan tidak langsung (penginderaan jauh dan pemodelan). Akurasi data sangat bergantung pada metode yang dipilih, ketersediaan sumber daya, dan kondisi ekosistem hutan yang diukur

#### ▪ Pengukuran Lapangan (Ground-based Measurement)

Metode ini melibatkan pengumpulan data biomassa secara langsung dari plot pengamatan tetap atau acak. Pengukuran dilakukan secara manual dan dapat mencakup parameter berikut:

- Diameter pohon pada tinggi dada (DBH): parameter utama yang digunakan untuk memperkirakan volume dan biomassa pohon.
- Kepadatan tegakan: jumlah pohon per hektar untuk menentukan distribusi dan kerapatan vegetasi.
- Pengambilan sampel serasah dan tanah: dilakukan untuk mengukur kandungan karbon organik di lapisan permukaan dan dalam tanah.
- Nekromassa: diukur melalui inventaris batang mati, tunggul, dan akar menggunakan pendekatan volume dan densitas kayu.

Perhitungan biomassa kemudian dikonversi ke cadangan karbon menggunakan faktor konversi (biasanya 0,47 untuk biomassa kering).

Untuk mengetahui seberapa besar karbon yang diserap oleh pohon atau vegetasi hutan, langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung biomassa tanaman tersebut. Biomassa adalah total massa kering dari seluruh bagian tanaman, seperti batang, cabang, daun, dan akar. Nilai ini biasanya diperoleh dari hasil pengukuran langsung di lapangan atau menggunakan model alometrik berdasarkan diameter pohon dan tinggi pohon. Biomassa kemudian dikonversi menjadi cadangan karbon menggunakan faktor konversi standar, yaitu 0,47. Artinya, sekitar 47% dari biomassa kering dianggap sebagai karbon yang tersimpan dalam jaringan tanaman. Sebagai ilustrasi, jika suatu pohon memiliki biomassa kering sebesar 1.000 kg, maka cadangan karbonnya dapat dihitung sebagai:

$$\text{Cadangan karbon} = 1.000 \text{ kg} \times 0,47 = 470 \text{ kg C}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa pohon tersebut menyimpan sebanyak 470 kilogram karbon dalam bentuk biomassa padat.

Langkah berikutnya adalah menghitung serapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) bersih dari atmosfer yang terjadi selama masa hidup tanaman. Karena setiap atom karbon dalam jaringan tanaman berasal dari molekul karbon dioksida yang diambil melalui proses fotosintesis, maka serapan karbon dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Serapan karbon (kg CO}_2\text{)} = \text{Cadangan karbon (kg C)} \times 44/12$$

Angka 44 mewakili massa molekul  $\text{CO}_2$  (12 untuk atom karbon dan 32 untuk dua atom oksigen), sedangkan angka 12 adalah massa atom karbon. Maka:

$$\text{Serapan karbon} = 470 \times 44/12 \approx 1.723 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Artinya, selama masa hidupnya, pohon tersebut telah menyerap sekitar 1.723 kilogram karbon dioksida dari atmosfer yang disimpan dalam bentuk cadangan karbon.

Agar lebih akurat dalam menilai peran tahunan pohon terhadap pengurangan emisi karbon, maka serapan karbon tahunan

dihitung dengan cara membagi total serapan karbon terhadap umur pohon. Misalnya, jika pohon tersebut berumur 20 tahun, maka:  
Serapan karbon tahunan =  $1.723 \text{ kg CO}_2\text{e} / 20 \text{ tahun} = 86,15 \text{ kg CO}_2\text{e per tahun}$

Nilai ini menunjukkan kontribusi rata-rata pohon tersebut dalam menyerap karbon dioksida setiap tahunnya sepanjang hidupnya. Perhitungan ini sangat berguna dalam analisis potensi penyerapan karbon suatu kawasan hutan atau dalam penilaian program restorasi dan reboisasi. Semakin tinggi tingkat pertumbuhan dan semakin panjang umur pohon, maka semakin besar pula total serapan karbonnya.

Dengan cara ini, hutan yang sehat dan tumbuh aktif tidak hanya berfungsi sebagai penyerap karbon, tetapi juga secara tidak langsung menjadi penghasil oksigen bersih, sekaligus berperan dalam mengendalikan emisi gas rumah kaca dan mendukung kestabilan iklim global

- Alometrik dan Model Empiris

Penggunaan persamaan alometrik memungkinkan estimasi biomassa berdasarkan variabel lapangan seperti DBH dan tinggi pohon tanpa harus menebang pohon. Persamaan ini dapat bersifat umum (global) atau spesifik lokasi dan spesies. Pemilihan model yang tepat sangat penting untuk menghindari over- atau underestimasi cadangan karbon.

- Penginderaan Jauh (Remote Sensing)

Teknologi penginderaan jauh menawarkan cakupan spasial yang luas dan efisiensi tinggi dalam pemantauan hutan. Beberapa teknologi yang digunakan:

- Citra satelit optik (Landsat, Sentinel-2): digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan, deteksi perubahan hutan, dan estimasi indeks vegetasi (NDVI, EVI).

- Radar aktif (SAR) dan LIDAR: digunakan untuk mengukur struktur tegakan, kerapatan kanopi, dan estimasi volume biomassa tiga dimensi secara lebih akurat.
- Drone (UAV): mendukung pemantauan berskala lokal dan detail tinggi untuk mendeteksi perubahan kecil dalam tutupan lahan atau kerusakan vegetasi.

Kombinasi citra satelit dan data lapangan diperlukan untuk menghasilkan peta cadangan karbon yang akurat secara spasial.

- Sistem Pemantauan Berkelanjutan

Beberapa pendekatan pemantauan jangka panjang telah dikembangkan, antara lain:

- Permanent Sample Plots (PSP): plot tetap yang diukur berkala (setiap 2–5 tahun) untuk memantau dinamika biomassa dan karbon.
- Sistem MRV (*Measurement, Reporting, and Verification*): digunakan dalam konteks proyek karbon untuk memastikan transparansi, kredibilitas, dan akuntabilitas data.
- Integrasi data spasial dan temporal: penggunaan data time-series dari satelit untuk melihat tren perubahan karbon dalam jangka panjang.

- Tantangan dan Kebutuhan Peningkatan Kapasitas

Beberapa tantangan dalam pengukuran dan pemantauan karbon antara lain:

- Keterbatasan sumber daya manusia dan teknologi, terutama di negara berkembang.
- Variasi lokal yang tinggi pada tipe hutan dan spesies yang membutuhkan pengembangan model spesifik.
- Kebutuhan akan integrasi sistem pemantauan nasional dan proyek internasional agar data lebih seragam dan dapat dipertanggungjawabkan.

Upaya peningkatan kapasitas teknis, pelatihan petugas lapangan, serta penguatan infrastruktur pemantauan berbasis satelit menjadi krusial dalam memperkuat sistem pelaporan karbon secara nasional dan global.

### **3.4. Perubahan Penggunaan Lahan dan Dampaknya terhadap Stok Karbon**

Perubahan penggunaan lahan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi dinamika karbon di ekosistem hutan. Konversi hutan menjadi lahan pertanian, perkebunan, pemukiman, atau infrastruktur menyebabkan hilangnya cadangan karbon dalam jumlah besar secara langsung maupun tidak langsung. Proses ini juga berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) secara global, terutama di negara-negara tropis.

- **Deforestasi dan Degradasi Hutan**

Deforestasi, yaitu penghilangan tutupan hutan secara permanen, menyebabkan pelepasan karbon secara besar-besaran dari biomassa hidup, serasah, nekromassa, dan tanah. Ketika pohon ditebang atau dibakar, karbon yang tersimpan di dalamnya langsung dilepaskan ke atmosfer sebagai CO<sub>2</sub>.

Degradasi hutan, walaupun tidak menghilangkan tutupan hutan sepenuhnya, tetap mengurangi cadangan karbon melalui penurunan kualitas dan kuantitas biomassa akibat kegiatan ilegal seperti pembalakan liar, kebakaran hutan, atau perambahan.

- **Konversi Hutan menjadi Lahan Pertanian dan Perkebunan**

Konversi hutan alam menjadi lahan pertanian intensif atau perkebunan monokultur (misalnya kelapa sawit dan karet) seringkali menurunkan secara drastis stok karbon. Meskipun tanaman budidaya tetap menyerap karbon, kapasitas penyimpanan karbonnya jauh lebih rendah dibandingkan hutan alami, terutama dalam hal nekromassa dan karbon tanah.

Konversi juga menyebabkan gangguan tanah, peningkatan laju dekomposisi bahan organik, serta penurunan kadar karbon organik tanah dalam jangka panjang.

▪ Fragmentasi Lanskap Hutan

Fragmentasi hutan, yaitu pemecahan hutan menjadi petak-petak kecil akibat pembangunan jalan, pertanian, atau permukiman, menyebabkan berkurangnya cadangan karbon akibat efek tepi (*edge effects*), seperti:

- Peningkatan paparan cahaya dan angin, yang mempercepat dekomposisi serasah dan nekromassa.
- Menurunnya kelembapan mikroklimat yang mempercepat pembusukan organik.
- Tingginya kerentanan terhadap kebakaran dan serangan hama.

Fragmentasi juga menghambat regenerasi alami, yang mengurangi potensi pemulihan cadangan karbon di masa depan.

▪ Konversi Lahan Gambut

Hutan gambut tropis menyimpan salah satu cadangan karbon tanah terbesar di dunia. Ketika dikeringkan untuk pertanian atau perkebunan, gambut teroksidasi dan melepaskan karbon dalam jumlah besar. Kebakaran di lahan gambut memperparah emisi ini karena membakar lapisan tanah organik yang kaya karbon.

Dampak konversi gambut bisa berlangsung puluhan hingga ratusan tahun karena karbon yang terkandung sangat dalam dan memerlukan waktu lama untuk terbentuk kembali.

▪ Reklamasi dan Reforestasi

Sebaliknya, perubahan penggunaan lahan juga bisa berdampak positif terhadap stok karbon jika dilakukan melalui:

- Reforestasi: penanaman kembali pohon di lahan terbuka atau terdegradasi.

- Aforestasi: penanaman hutan di lahan yang sebelumnya bukan hutan.
- Agroforestri: integrasi pohon dalam sistem pertanian yang dapat meningkatkan penyerapan karbon sekaligus memberikan manfaat ekonomi.

Namun demikian, peningkatan stok karbon melalui cara ini memerlukan waktu dan strategi manajemen yang tepat agar hasilnya optimal dan berkelanjutan.

Perubahan penggunaan lahan menjadi salah satu indikator penting dalam pengelolaan karbon hutan. Kebijakan perlindungan hutan dan restorasi ekosistem perlu dirancang secara holistik agar dapat menyeimbangkan kebutuhan pembangunan dengan upaya mitigasi perubahan iklim.

### **3.5. Perhitungan Karbon dalam Skema DRAM (Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi)**

Perhitungan karbon dalam skema DRAM (Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi) merupakan bagian penting dari upaya sistematis untuk mengukur, melaporkan, dan memverifikasi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) sebagai hasil dari aksi mitigasi di berbagai sektor. Skema ini dirancang agar setiap tindakan yang berkontribusi terhadap pengurangan emisi dapat dihitung secara transparan dan ilmiah, serta dapat diakui dalam sistem pelaporan emisi nasional maupun skema perdagangan karbon.

Langkah pertama dalam perhitungan ini adalah identifikasi sumber emisi, yaitu semua aktivitas yang menghasilkan gas rumah kaca, baik secara langsung maupun tidak langsung. Sumber emisi dapat berasal dari berbagai sektor seperti energi, transportasi, pertanian, kehutanan, limbah, dan industri. Misalnya, dalam sektor energi, emisi bisa berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti solar, bensin, batu bara, atau gas alam. Di sektor pertanian, sumber

emisi meliputi metana yang dilepaskan dari fermentasi enterik ternak, atau nitrous oxide dari penggunaan pupuk nitrogen. Identifikasi yang komprehensif menjadi dasar penting untuk memastikan tidak ada sumber emisi yang terlewat.

Setelah semua sumber emisi teridentifikasi, langkah selanjutnya adalah menghitung emisi aktual dari setiap sumber. Penghitungan ini mengacu pada rumus dasar:

$$\text{Emisi} = \text{Aktivitas} \times \text{Faktor Emisi}$$

Data aktivitas bisa berupa volume bahan bakar yang digunakan, jumlah produksi, atau unit aktivitas lainnya tergantung pada sektor yang dianalisis. Faktor emisi adalah nilai tetap yang menunjukkan jumlah gas rumah kaca yang dihasilkan per satuan aktivitas. Sebagai contoh, untuk bahan bakar solar, faktor emisinya adalah 2,68 kg CO<sub>2</sub>e per liter solar yang dibakar. Dengan mengalikan faktor ini dengan total konsumsi solar, kita memperoleh jumlah total emisi dari aktivitas tersebut.

Langkah penting berikutnya adalah menentukan baseline emisi, yaitu besarnya emisi yang diasumsikan akan terjadi jika tidak ada aksi mitigasi. Baseline ini berfungsi sebagai titik acuan untuk mengukur dampak pengurangan emisi yang dihasilkan oleh program atau teknologi baru yang diterapkan. Baseline dapat ditetapkan menggunakan data historis, tren pertumbuhan, atau skenario "*business as usual*" (BAU) tanpa intervensi. Penetapan baseline harus dilakukan secara konservatif dan dapat dipertanggungjawabkan, karena angka ini sangat menentukan besarnya pengurangan emisi yang diakui.

Dengan baseline dan emisi aktual yang sudah dihitung, maka dapat dilakukan penghitungan pengurangan emisi, yaitu dengan mengurangi emisi aktual dari baseline:

$$\text{Pengurangan Emisi} = \text{Baseline Emisi} - \text{Emisi Aktual}$$

Perbedaan inilah yang menunjukkan seberapa besar dampak dari aksi mitigasi terhadap penurunan emisi GRK.

Agar hasil perhitungan dapat diterima secara formal, maka perlu dilakukan proses validasi dan verifikasi. Validasi adalah pemeriksaan terhadap metodologi dan asumsi perhitungan, untuk memastikan bahwa pendekatan yang digunakan sudah sesuai dengan standar nasional atau internasional. Sementara itu, verifikasi adalah pemeriksaan terhadap data aktual dan dokumen pendukung yang digunakan dalam perhitungan. Keduanya biasanya dilakukan oleh lembaga independen untuk menjamin objektivitas dan keandalan hasil.

Setelah semua proses selesai, hasil perhitungan tersebut dituangkan ke dalam Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi (DRAM), yang berfungsi sebagai bukti pengurangan emisi yang telah dicapai. DRAM ini menjadi dasar dalam pelaporan kepada pemerintah, dan dapat digunakan dalam skema insentif, perdagangan karbon, atau kerangka kontribusi nasional terhadap pengurangan emisi (*Nationally Determined Contribution/NDC*).

### **Contoh Kasus: Sektor Energi**

Misalnya, sebuah perusahaan energi sebelumnya menggunakan 100.000 liter solar per tahun sebagai sumber energi, dengan faktor emisi 2,68 kg CO<sub>2</sub>e per liter. Setelah melakukan transisi ke energi terbarukan melalui pemasangan panel surya, konsumsi solar menurun drastis menjadi hanya 20.000 liter per tahun, sementara energi yang dihasilkan dari panel surya tidak menghasilkan emisi (0 kg CO<sub>2</sub>e/kWh). Maka, emisi baseline perusahaan adalah:

$$100.000 \text{ liter} \times 2,68 \text{ kg CO}_2\text{e/liter} = 268.000 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Setelah beralih ke panel surya, emisi aktual menjadi:

$$20.000 \text{ liter} \times 2,68 \text{ kg CO}_2\text{e/liter} = 53.600 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Dengan demikian, pengurangan emisi tahunan yang dihasilkan dari aksi mitigasi tersebut adalah:

$268.000 - 53.600 = 214.400$  kg CO<sub>2</sub>e atau 214,4 ton CO<sub>2</sub>e per tahun

Angka ini kemudian dicantumkan dalam DRAM sebagai bagian dari laporan mitigasi, dengan menyertakan metode, asumsi, dan bukti pendukung yang telah diverifikasi.

### **Contoh Kasus: Kegiatan Deforestasi dan Proyeksi Emisi (Sektor FOLU)**

Salah satu penyumbang emisi terbesar di sektor FOLU (*Forestry and Other Land Use*) adalah deforestasi, yaitu perubahan penggunaan lahan dari hutan menjadi non-hutan (seperti lahan pertanian, permukiman, atau industri). Deforestasi menyebabkan pelepasan cadangan karbon yang tersimpan dalam biomassa dan tanah ke atmosfer dalam bentuk CO<sub>2</sub>.

Misalnya, berdasarkan data historis dari tahun 2010 hingga 2020, rata-rata laju deforestasi di suatu kabupaten adalah 500 hektare per tahun. Rata-rata cadangan karbon untuk hutan di wilayah tersebut adalah 150 ton karbon per hektar. Jika tidak ada aksi mitigasi, proyeksi deforestasi selama 10 tahun ke depan (2021–2030) diperkirakan tetap pada laju yang sama, yaitu:

Proyeksi deforestasi (*baseline*):

$500 \text{ ha/tahun} \times 10 \text{ tahun} = 5.000 \text{ hektar}$

Emisi karbon dari deforestasi:

$5.000 \text{ ha} \times 150 \text{ ton C/ha} = 750.000 \text{ ton C}$

Emisi CO<sub>2</sub> ekuivalen:

$750.000 \text{ ton C} \times 44/12 = 2.750.000 \text{ ton CO}_2\text{e}$

Namun, pemerintah daerah bersama pemangku kepentingan lokal mengimplementasikan kebijakan moratorium pembukaan hutan primer dan mengembangkan program perhutanan sosial, sehingga laju deforestasi berhasil ditekan menjadi rata-rata 150 hektar per tahun.

Deforestasi aktual setelah mitigasi:

$150 \text{ ha/tahun} \times 10 \text{ tahun} = 1.500 \text{ hektar}$

Emisi aktual:

$$1.500 \text{ ha} \times 150 \text{ ton C/ha} = 225.000 \text{ ton C}$$

$$225.000 \times 44/12 = 825.000 \text{ ton CO}_2\text{e}$$

Pengurangan Emisi dari Aksi Mitigasi:

Baseline emisi: 2.750.000 ton CO<sub>2</sub>e

Emisi aktual: 825.000 ton CO<sub>2</sub>e

Pengurangan emisi: 2.750.000 – 825.000 = 1.925.000 ton CO<sub>2</sub>e

Dari kasus di atas, aksi mitigasi yang berhasil menurunkan laju deforestasi dari 500 hektare per tahun menjadi 150 hektare per tahun telah memberikan kontribusi pengurangan emisi sebesar 1.925.000 ton CO<sub>2</sub>e selama periode 10 tahun atau 192.500 ton CO<sub>2</sub>e/tahun. Pengurangan ini dapat diklaim dan dilaporkan dalam dokumen DRAM sebagai bagian dari kontribusi sektor kehutanan terhadap pengendalian perubahan iklim



EMPAT

## **POTENSI BIOENERGI HUTAN DI INDONESIA DAN DUNIA**

### **4.1. Potensi Biomassa dari Hutan Alam dan Hutan Tanaman**

Bioenergi merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia, karena sumber dayanya tersebar luas dan berasal dari berbagai aktivitas-mulai dari kehutanan, pertanian, perkebunan, peternakan, hingga limbah rumah tangga. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal EBTKE (2023), total potensi bioenergi nasional mencapai sekitar 57 GWe, yang terdiri atas:

- o Biomassa: 52,1 GWe
- o Palm Oil Mill Effluent (POME): 1,3 GWe
- o Sampah: 1,4 GWe
- o Biogas: 2,3 GWe

Provinsi Riau tercatat sebagai daerah dengan potensi biomassa terbesar, yaitu sekitar 10,4 GWe, yang sebagian besar bersumber dari limbah perkebunan kelapa sawit yang melimpah di wilayah tersebut. Sementara itu, Provinsi Jawa Barat menempati posisi tertinggi dalam potensi bioenergi dari sampah dan biogas, masing-masing sebesar 0,25 GWe dan 0,46 GWe. Hal ini sejalan dengan tingginya kepadatan penduduk serta aktivitas ekonomi dan domestik di kawasan perkotaan provinsi tersebut.

Meski bioenergi menawarkan alternatif energi yang ramah lingkungan dan dapat mendorong kemandirian energi lokal, pemanfaatannya di Indonesia masih tergolong terbatas. Beberapa tantangan utama dalam pengembangannya meliputi:

- Keterbatasan infrastruktur dan teknologi konversi energi di tingkat lokal,
- Minimnya insentif ekonomi bagi produsen energi berbasis bioenergi,
- Kurangnya integrasi rantai pasok antara penghasil limbah organik dan fasilitas pengolahan.

Dengan strategi pengembangan yang tepat, partisipatif, dan berbasis komunitas, bioenergi berpeluang menjadi sumber energi alternatif yang tidak hanya berkelanjutan, tetapi juga mendukung ketahanan energi nasional serta upaya pengurangan emisi gas rumah kaca

Biomassa hutan merupakan salah satu sumber daya energi terbarukan yang paling melimpah di dunia, terutama di negara-negara dengan tutupan hutan yang luas seperti Indonesia, Brasil, dan Republik Demokratik Kongo. Potensi biomassa ini berasal dari dua sumber utama: hutan alam dan hutan tanaman (*forest plantations*). Masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, dan tantangan yang berbeda dalam kontribusinya terhadap pengembangan bioenergi.

▪ Hutan Alam

Hutan alam adalah ekosistem hutan yang terbentuk secara alami tanpa campur tangan manusia dalam struktur dasarnya. Di Indonesia, hutan alam tersebar luas di wilayah Kalimantan, Papua, dan Sumatra, serta menyimpan cadangan biomassa yang sangat tinggi dalam bentuk pohon besar, vegetasi bawah, dan nekromassa. Ciri-ciri dan potensi:

- Kaya akan keanekaragaman spesies dan struktur tegakan kompleks.
- Cadangan biomassa per hektar cenderung tinggi karena umur tegakan yang panjang dan tingkat kanopi yang rapat.
- Kontribusi terhadap jasa ekosistem lain seperti perlindungan keanekaragaman hayati dan siklus hidrologi.

Tantangan:

- Eksploitasi biomassa dari hutan alam memiliki risiko tinggi terhadap degradasi ekologis.
- Penebangan komersial dapat mengganggu fungsi ekologis jangka panjang dan berdampak pada emisi karbon.
- Penggunaan hutan alam untuk bioenergi harus dibatasi pada limbah hasil tebangan, bukan pohon hidup.

▪ Hutan Tanaman (Forest Plantations)

Hutan tanaman adalah kawasan hutan yang dibangun dan dikelola secara intensif untuk tujuan produksi kayu, pulp, energi, dan produk lainnya. Di Indonesia, hutan tanaman industri (HTI) seperti akasia, sengon, dan eukaliptus banyak dikembangkan untuk memasok kebutuhan bahan baku bioenergi dan industri.

Ciri-ciri dan potensi:

- Siklus panen lebih pendek (5–10 tahun), memungkinkan pasokan biomassa yang lebih terjadwal dan terkontrol.
- Produksi biomassa per hektar relatif tinggi karena pemupukan, pemilihan klon unggul, dan perawatan intensif.

- Cocok untuk pembangkit bioenergi berbasis chip kayu, pelet, atau biomassa padat lainnya.

Keunggulan:

- Mengurangi tekanan terhadap hutan alam.
- Dapat dirancang sebagai sistem silvikultur berkelanjutan dan multifungsi.
- Mudah dihitung dan dipantau cadangan karbonnya.

Tantangan:

- Monokultur skala besar dapat menurunkan kualitas tanah dan keanekaragaman hayati jika tidak dikelola dengan baik.
- Penggunaan lahan bersaing dengan kebutuhan pangan dan permukiman, terutama di daerah padat penduduk.

▪ Perbandingan Potensi

Terdapat dua jenis hutan utama yang memiliki potensi cadangan biomassa, yaitu hutan alam dan hutan tanaman. Hutan alam memiliki cadangan biomassa yang cukup tinggi, yaitu berkisar antara 200 hingga 400 ton per hektar. Namun, pemanenan di hutan alam harus dilakukan secara terbatas dan berkelanjutan, serta idealnya hanya memanfaatkan limbah hasil pemanenan untuk menjaga kelestarian ekosistem dan keanekaragaman hayati.

Sementara itu, hutan tanaman memiliki cadangan biomassa yang lebih rendah, yaitu sekitar 50 hingga 150 ton per hektar, tetapi dengan siklus panen yang lebih pendek, yaitu setiap 5 hingga 10 tahun. Karakteristik ini menjadikan hutan tanaman sebagai sumber bahan baku yang potensial untuk pemanfaatan bioenergi karena lebih mudah dikelola secara berkelanjutan.

Dengan demikian, pemilihan jenis hutan sebagai sumber biomassa harus mempertimbangkan aspek cadangan biomassa, siklus panen, dan terutama keberlanjutan pemanfaatannya.

**Tabel 2 Perbandingan Potens Cadangan Biomassa Hutan Alam dan Hutan Tanaman**

Jenis Hutan	Cadangan Biomassa (ton/ha)	Siklus Panen	Keberlanjutan Pemanfaatan
Hutan Alam	200–400	Panen terbatas	Harus berbasis limbah
Hutan Tanaman	50–150	5–10 tahun	Potensial untuk bioenergi

Potensi biomassa dari kedua jenis hutan ini sangat besar jika dikelola dengan prinsip keberlanjutan. Pemanfaatan limbah hasil tebangan, pemangkasan, dan residu industri kayu dapat menjadi strategi utama dalam pengembangan bioenergi tanpa merusak integritas ekosistem hutan.

#### **4.2. Pemanfaatan Limbah Hasil Hutan (Serbuk Gergaji, Cabang, Ranting)**

Limbah hasil hutan merupakan salah satu sumber biomassa yang paling potensial namun sering kali kurang dimanfaatkan secara optimal. Limbah ini mencakup sisa-sisa dari kegiatan penebangan, pengolahan kayu, dan pemangkasan yang meliputi cabang, ranting, daun, kulit kayu, serbuk gergaji, potongan kayu sisa, hingga residu dari industri penggergajian dan pengolahan kayu lainnya.

- Jenis-jenis Limbah Hasil Hutan
  - Serbuk Gergaji (*Sawdust*)
 

Serbuk kayu yang dihasilkan dari proses pemotongan dan penggergajian merupakan limbah volume besar dengan kandungan energi yang cukup tinggi. Sangat cocok untuk

dijadikan bahan baku pelet kayu (wood pellets), briket, atau media gasifikasi.

- Cabang dan Ranting  
Biasanya tidak diambil dalam kegiatan penebangan komersial karena tidak memiliki nilai jual sebagai kayu pertukangan. Namun, bagian ini memiliki potensi energi yang signifikan jika dikumpulkan dan dikeringkan dengan baik.
- Limbah Kayu Industri  
Termasuk potongan kayu sisa produksi, veneer bekas, kulit kayu, dan partikel kecil yang bisa diproses lebih lanjut menjadi bahan bakar padat seperti briket atau dimanfaatkan untuk bahan bakar langsung pada tungku biomassa.
- Kulit Kayu dan Serasah Kering  
Kulit kayu sering kali terbuang sia-sia, padahal memiliki nilai kalor cukup tinggi. Serasah yang dikumpulkan dari lantai hutan juga bisa dijadikan bahan bakar dalam sistem skala kecil, seperti tungku rumah tangga atau boiler kecil.
- Keunggulan Pemanfaatan Limbah
  - Efisiensi Sumber Daya: Menggunakan limbah mengurangi kebutuhan menebang pohon baru dan memaksimalkan nilai ekonomi dari seluruh bagian pohon.
  - Ramah Lingkungan: Mengurangi akumulasi limbah di lokasi penebangan atau industri, yang dapat menjadi sumber emisi metana atau menyebabkan kebakaran hutan.
  - Mendukung Ekonomi Lokal: Memberikan peluang kerja dan usaha baru di sektor pengumpulan, pengolahan, dan distribusi bioenergi berbasis limbah.
- Teknologi Pemrosesan  
Limbah hasil hutan dapat dikonversi menjadi energi melalui berbagai teknologi, antara lain:

- Pengeringan dan Pembakaran Langsung: Cocok untuk cabang dan ranting yang dikeringkan alami, digunakan dalam tungku biomassa atau dapur tradisional.
- Briket dan Pelet Kayu: Serbuk gergaji dan potongan kecil dikompresi menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi dengan nilai kalor stabil dan emisi rendah.
- Gasifikasi dan Pirolisis: Limbah kayu dijadikan bahan baku reaktor untuk menghasilkan syngas atau biochar yang bisa dimanfaatkan sebagai energi atau pupuk karbon.
- Pembangkit Listrik Biomassa: Di lokasi industri, limbah kayu skala besar digunakan untuk pembangkit listrik dan panas (cogeneration) dalam skema energi terbarukan.
- Tantangan dalam Pemanfaatan
  - Pengumpulan dan Transportasi: Limbah tersebar dan sering kali berada di lokasi terpencil, sehingga memerlukan sistem logistik efisien.
  - Kadar Air: Limbah basah atau hijau membutuhkan pengeringan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran.
  - Skalabilitas: Pemanfaatan komersial memerlukan investasi awal untuk mesin pengolah dan infrastruktur penyimpanan.
  - Standar Kualitas: Diperlukan standar teknis dan kebijakan yang mendukung kualitas bahan bakar biomassa yang seragam.
- Strategi Pengelolaan Limbah Berbasis Bioenergi
  - Mendorong kemitraan antara industri kehutanan dan komunitas lokal untuk pengumpulan dan pengolahan limbah.
  - Mengembangkan sentra pengolahan limbah hutan skala kecil-menengah di dekat sumber bahan baku.
  - Integrasi dengan kebijakan energi terbarukan dan insentif karbon untuk mendorong investasi teknologi pemrosesan limbah.

Pemanfaatan limbah hasil hutan sebagai bahan baku bioenergi merupakan solusi strategis yang mendukung efisiensi sumber daya, pengurangan emisi karbon, dan pengembangan ekonomi sirkular di sektor kehutanan.



Gambar 12 Biopellet dari Limbah Kayu Berpotensi sebagai Energi Terbarukan Masa Depan  
(Sumber: Dokumentasi Penulis, 2016)

### **4.3. Studi Kasus: Potensi Bioenergi di Wilayah Tropis dan Boreal**

Wilayah tropis dan boreal mewakili dua zona ekologis utama di dunia yang memiliki potensi besar dalam pengembangan bioenergi berbasis hutan. Masing-masing memiliki karakteristik ekologis, jenis biomassa, serta tantangan pengelolaan yang berbeda. Studi kasus di berbagai negara memberikan gambaran tentang bagaimana potensi tersebut dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan.

- Wilayah Tropis: Indonesia dan Brasil

#### **Indonesia**

Sebagai negara tropis dengan luas hutan mencapai lebih dari 120 juta hektar, Indonesia memiliki potensi biomassa hutan

yang sangat besar, baik dari hutan alam maupun hutan tanaman. Studi di Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah dari hutan tanaman industri (HTI) seperti akasia dan sengon dapat menghasilkan biomassa lebih dari 20 ton/ha per rotasi, cukup untuk kebutuhan energi komunitas lokal dan industri kecil.

Pemanfaatan bioenergi di Indonesia juga mulai dikembangkan melalui:

- Proyek pembangkit listrik tenaga biomassa skala kecil berbasis kayu serpihan (*wood chips*) di Sumatra dan Papua.
- Produksi pelet kayu dari limbah industri penggergajian di Jawa Timur dan Kalimantan Selatan.
- Inisiatif agroforestri energi (*energy agroforestry*) di Sulawesi untuk penyediaan energi terbarukan desa.

### **Brasil**

Brasil memiliki pengalaman panjang dalam pemanfaatan biomassa untuk energi, terutama dari sektor kehutanan dan pertanian. Di wilayah Amazon dan Cerrado, limbah kayu dan residu dari penebangan legal dimanfaatkan untuk produksi arang (*charcoal*) dan listrik biomassa. Negara ini juga mengembangkan *forestry residues-to-energy* untuk mendukung pembangkit listrik dan pengganti bahan bakar fosil di sektor industri baja.

Keunggulan:

- Infrastruktur biomassa cukup maju.
  - Kebijakan energi terbarukan dan insentif pemerintah yang kuat.
  - Dukungan penelitian dari universitas dan lembaga riset nasional.
- Wilayah Boreal: Kanada dan Swedia

### **Kanada**

Hutan boreal Kanada mencakup hampir 60% dari total daratan negara tersebut, memberikan potensi besar dalam penyediaan biomassa dari residu penebangan, pohon kecil, dan

limbah industri kayu. Studi di provinsi British Columbia menunjukkan bahwa lebih dari 17 juta ton residu biomassa tersedia setiap tahun dari aktivitas pemanenan dan pengolahan kayu.

Pemanfaatan utama:

- Produksi pelet kayu untuk ekspor (ke Eropa dan Asia).
- Pembangkit listrik dan panas berbasis biomassa di komunitas pedesaan dan kawasan dingin.
- Program pemanfaatan residu kebakaran hutan dan serangan hama untuk energi.

### **Swedia**

Swedia merupakan contoh negara boreal dengan sistem bioenergi yang sangat terintegrasi. Lebih dari 30% konsumsi energi domestik berasal dari biomassa, terutama limbah kayu dan residu hutan. Negara ini juga menerapkan sistem pemanas distrik (district heating) berbasis pembakaran biomassa.

Faktor keberhasilan:

- Kebijakan nasional yang mendukung dekarbonisasi dan pemanfaatan energi lokal.
- Industri kehutanan yang efisien dalam meminimalkan limbah.
- Teknologi modern dalam konversi biomassa dan manajemen logistik.

**Tabel 3 Perbandingan Potensi Bioenergi Wilayah Tropis dan Boreal**

<b>Aspek</b>	<b>Wilayah Tropis</b>	<b>Wilayah Boreal</b>
Sumber Biomassa	Limbah hutan tanaman, residu kayu, serasah	Limbah tebang, pohon kecil, pelet kayu
Tantangan Utama	Infrastruktur, akses pasar, kelembaban tinggi	Jarak logistik, musim dingin ekstrim

Pendekatan Umum	Skala kecil-menengah, energi desa	Skala industri, ekspor energi biomassa
Contoh Negara	Indonesia, Brasil	Kanada, Swedia

Studi kasus dari wilayah tropis dan boreal menunjukkan bahwa pemanfaatan bioenergi dari hutan sangat tergantung pada kondisi ekologi, sosial, dan kebijakan nasional. Meskipun tantangan berbeda, terdapat satu kesamaan penting: keberhasilan bergantung pada pendekatan yang berkelanjutan, partisipatif, dan berbasis teknologi tepat guna.

#### 4.4. Analisis Spasial Potensi Bioenergi

Analisis spasial berperan penting dalam mengidentifikasi, memetakan, dan mengevaluasi potensi bioenergi berbasis hutan secara geografis. Dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh, sistem informasi geografis (SIG), serta data biomassa dan tutupan lahan, para peneliti dan pembuat kebijakan dapat menentukan wilayah prioritas pengembangan bioenergi yang efisien, berkelanjutan, dan rendah risiko.

- Tujuan Analisis Spasial
  - Mengidentifikasi wilayah dengan ketersediaan biomassa tinggi (biomassa produktif dan limbah hutan).
  - Menentukan aksesibilitas dan kedekatan dengan infrastruktur energi atau industri.
  - Menilai kesesuaian lahan berdasarkan faktor ekologis, sosial, dan kebijakan.
  - Mendeteksi risiko lingkungan, seperti kebakaran, erosi, atau konflik penggunaan lahan.
- Data dan Metode yang Digunakan
  - Data Citra Satelit: Citra resolusi menengah hingga tinggi (seperti Landsat, Sentinel, atau PlanetScope) digunakan untuk memantau tutupan lahan, perubahan vegetasi, dan estimasi biomassa.

- Inventarisasi Hutan Nasional: Digunakan sebagai referensi dalam menghitung cadangan karbon dan potensi bahan baku biomassa.
- SIG (*Sistem Informasi Geografis*): Memungkinkan analisis overlay dari berbagai lapisan data—topografi, jenis tanah, tutupan vegetasi, jaringan jalan, kawasan lindung, dan kepadatan penduduk.
- Modeling Potensi Bioenergi: Menggunakan algoritma spasial untuk menghitung ketersediaan dan biaya pengangkutan bahan baku (*cost-distance modeling*).
- Manfaat Strategis
  - Efisiensi Pengambilan Keputusan: Memberikan dasar ilmiah untuk memilih lokasi investasi, proyek energi desa, atau fasilitas pengolahan biomassa.
  - Mitigasi Risiko: Menghindari pembangunan proyek di kawasan lindung, lahan gambut, atau wilayah rawan bencana.
  - Pengelolaan Lanskap Terpadu: Mendorong integrasi bioenergi dalam perencanaan penggunaan lahan multipihak, termasuk kehutanan, pertanian, dan energi.
- Tantangan dan Kebutuhan Pengembangan
  - Keterbatasan data lokal dan kapasitas teknis untuk pengolahan citra satelit dan analisis spasial.
  - Kurangnya integrasi antara data spasial bioenergi dan rencana tata ruang.
  - Perlunya pembaruan berkala data biomassa dan pemantauan dampak lingkungan jangka panjang.

Analisis spasial merupakan alat penting dalam merancang strategi bioenergi hutan yang berbasis data dan lokasi. Dengan pendekatan ini, pemanfaatan bioenergi dapat diarahkan ke lokasi yang paling sesuai secara ekologis dan ekonomis, sekaligus mendukung pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan dan adil.



LIMA

## **KEBIJAKAN DAN INSTRUMEN REGULASI BIOENERGI-KARBON**

### **5.1. Kebijakan Global dan Nasional**

Perubahan iklim menjadi isu mendesak yang mendorong lahirnya berbagai kebijakan internasional untuk pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK). Di antara instrumen global yang signifikan adalah:

- REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus*)

Merupakan mekanisme global yang memberikan insentif kepada negara-negara berkembang untuk mengurangi deforestasi dan degradasi hutan, serta meningkatkan cadangan karbon melalui konservasi, pengelolaan hutan berkelanjutan, dan rehabilitasi hutan. Indonesia merupakan salah satu negara pelaksana utama REDD+ dan telah memiliki kerangka kebijakan nasional yang

mendukung implementasinya, seperti Strategi Nasional REDD+ dan sistem MRV (Measurement, Reporting, and Verification).

- CDM (*Clean Development Mechanism*)

CDM adalah mekanisme dalam Protokol Kyoto yang memungkinkan negara maju menjalankan proyek pengurangan emisi di negara berkembang sebagai bagian dari kewajiban pengurangan emisi mereka. Proyek-proyek CDM di Indonesia mencakup sektor energi terbarukan, pengelolaan limbah, dan efisiensi energi.

- Skema Karbon Sukarela dan Sertifikasi

Selain skema internasional yang mengikat, berkembang pula pasar karbon sukarela yang memungkinkan proyek berbasis masyarakat seperti reforestasi, bioenergi, atau agroforestri mendapatkan sertifikasi dan kredit karbon yang bisa diperdagangkan.

- FOLU Net Sink 2030

FOLU Net Sink 2030 (*Forestry and Other Land Use Net Sink 2030*) adalah program nasional Indonesia yang menargetkan pada tahun 2030 sektor kehutanan dan penggunaan lahan dapat menyerap emisi gas rumah kaca lebih besar dibandingkan jumlah yang dilepaskan. Program ini menjadi pilar utama pencapaian komitmen iklim Indonesia yang tertuang dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution* (NDC) 2022 serta *Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience* (LTS-LCCR) 2050, dengan kontribusi sektor FOLU diproyeksikan mencapai hampir 60 % dari total penurunan emisi domestik. Target yang ingin dicapai adalah penurunan emisi sebesar 31,89 % secara mandiri, atau hingga 43,2 % dengan dukungan internasional. Pemerintah melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) telah menyusun *Rencana Operasional FOLU Net Sink 2030*, yang meliputi pencegahan deforestasi, rehabilitasi dan restorasi lahan, pengelolaan hutan berkelanjutan, perbaikan tata kelola air di

lahan gambut, konservasi keanekaragaman hayati, serta pengelolaan ekosistem mangrove. Implementasi program ini diatur dalam Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon dan diperkuat melalui 12 rencana aksi strategis mitigasi yang ditetapkan oleh KLHK pada tahun 2022, dengan sasaran penurunan emisi sekitar 140 juta ton CO<sub>2</sub>e pada 2030. Meski demikian, sejumlah pihak mengkritisi rencana ini karena dinilai berpotensi mempertahankan deforestasi terencana, mengganti hutan alami dengan perkebunan monokultur sebagai kompensasi karbon, serta menimbulkan risiko konflik dengan masyarakat adat dan mengancam keanekaragaman hayati.

## **5.2. Skema, Mekanisme Perdagangan Karbon dan Bursa Karbon di Indonesia**

Indonesia telah mengembangkan kerangka pasar karbon domestik sebagai bagian dari upaya pencapaian target penurunan emisi dan transisi menuju ekonomi hijau.

### **Skema Perdagangan Karbon di Indonesia**

Skema perdagangan karbon di Indonesia terbagi menjadi dua jenis:

- **Pasar Karbon Wajib (*Mandatory Carbon Market*)**  
Merupakan sistem berbasis cap-and-trade yang mewajibkan sektor-sektor tertentu, seperti pembangkit listrik atau industri besar, untuk mematuhi batas emisi yang ditetapkan pemerintah.
  - Jika suatu perusahaan menghasilkan emisi di bawah batas, kelebihannya dapat dijual dalam bentuk unit karbon.
  - Skema ini berperan dalam pencapaian *Nationally Determined Contribution* (NDC) Indonesia dalam kerangka Perjanjian Paris.
  - Pengaturan dan pengawasan dilakukan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK).

- Pasar Karbon Sukarela (*Voluntary Carbon Market*)  
Berbasis inisiatif perusahaan, organisasi, atau individu untuk mengimbangi (*offset*) emisi mereka.
  - Kredit karbon diperoleh dari proyek-proyek mitigasi seperti:
    - Reforestasi dan konservasi hutan
    - Energi terbarukan (termasuk bioenergi hutan)
    - Pengelolaan limbah
    - Pertanian berkelanjutan
  - Kredit yang dihasilkan dapat dijual ke pasar domestik maupun internasional setelah melalui proses verifikasi oleh lembaga independen.

Pasar sukarela memberikan peluang besar bagi masyarakat adat, petani, dan pelaku usaha kehutanan skala kecil untuk mengakses pembiayaan berbasis karbon.

### **Mekanisme Perdagangan Karbon di Indonesia**

Perdagangan Karbon sektor Kehutanan dilakukan melalui mekanisme: Perdagangan Emisi dan Offset Emisi GRK.

- **Perdagangan Emisi**
  - Ini melibatkan jual-beli izin emisi (*emission trading*) di pasar karbon.
  - Pihak yang memiliki "jatah" emisi lebih sedikit dari batas (*cap*) dapat menjual kelebihan jatah tersebut kepada pihak lain yang membutuhkan.
  - Dalam kehutanan, ini bisa terjadi jika suatu pengelolaan hutan menghasilkan penyerapan karbon (misalnya lewat pengelolaan hutan lestari) yang dapat diperhitungkan sebagai "hak" atau kuota.

Prinsipnya:

- Ada batas (*cap*) jumlah emisi GRK yang boleh dikeluarkan oleh suatu pihak (perusahaan, industri, bahkan negara).

- Jika pihak tersebut berhasil menurunkan emisi hingga di bawah batas, sisa kuota itu dapat dijual kepada pihak lain yang kesulitan menurunkan emisinya.
- Mekanisme ini dikenal sebagai cap-and-trade.

Di sektor kehutanan:

- Hutan berperan sebagai penyerap dan penyimpan karbon (*carbon sink*).
- Pemilik atau pengelola hutan yang dapat menunjukkan bahwa hutannya menyerap karbon dalam jumlah tertentu (misalnya lewat pengukuran biomassa dan inventaris karbon) bisa memperoleh "kuota emisi" yang dapat diperdagangkan.
- Perdagangan dilakukan di pasar karbon (nasional atau internasional) yang diatur oleh regulasi pemerintah atau lembaga internasional.

Contoh:

- Sebuah perusahaan kehutanan di Kalimantan berhasil menjaga hutan alamnya tetap utuh sehingga menyerap 500.000 ton CO<sub>2</sub> per tahun. Angka ini dapat diperhitungkan sebagai hak jual kuota karbon ke perusahaan industri baja yang melebihi batas emisinya.
- **Offset Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)**
  - Offset adalah pengurangan emisi atau peningkatan penyerapan karbon di suatu lokasi yang digunakan untuk mengimbangi emisi di lokasi lain.
  - Di kehutanan, ini biasanya berbentuk proyek seperti REDD+, reforestasi, atau agroforestri, yang dihitung sebagai kredit karbon (*carbon credit*).
  - Kredit tersebut bisa dibeli perusahaan atau negara untuk memenuhi target penurunan emisi mereka.

Prinsipnya:

- Jika suatu pihak tidak dapat mengurangi semua emisinya secara langsung, ia dapat mengimbangi (*offset*) sebagian

emisi itu dengan mendanai kegiatan yang menurunkan atau menyerap karbon di tempat lain.

- o Offset bersifat sukarela atau sesuai kewajiban dalam perjanjian tertentu.

Di sektor kehutanan:

- o Proyek offset biasanya berupa:
  - REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*)
  - Reforestasi (penanaman kembali hutan)
  - Afforestasi (penanaman hutan di lahan non-hutan)
  - Agroforestri (menggabungkan pohon dan pertanian)
- o Hasil pengurangan atau penyerapan emisi dari proyek ini dihitung dalam bentuk kredit karbon (misalnya 1 kredit karbon = 1 ton CO<sub>2</sub> terserap atau dihindari).
- o Kredit ini dapat dibeli oleh perusahaan untuk mengimbangi emisi yang tidak dapat mereka kurangi sendiri.

Contoh:

- o Maskapai penerbangan membeli 100.000 kredit karbon dari proyek reforestasi di Papua untuk mengimbangi emisi dari penerbangan internasionalnya.

**Tabel 4 Perbedaan Perdagangan Emisi dan Offset Emisi GRK**

Aspek	Perdagangan Emisi	Offset Emisi GRK
Dasar	Batas emisi (cap) yang bisa diperdagangkan	Kegiatan penyerapan atau pengurangan emisi di luar lokasi penghasil emisi
Pasar	Biasanya diatur pemerintah (compliance market)	Bisa di pasar sukarela (voluntary market) atau compliance
Contoh di kehutanan	Penjualan kuota karbon dari pengelolaan hutan lestari	Kredit karbon dari proyek REDD+, reforestasi

## **Bursa Karbon Indonesia**

Untuk memfasilitasi perdagangan karbon yang lebih terstruktur, Indonesia telah membentuk Bursa Karbon Nasional.

- Sejak 26 September 2023, PT Bursa Efek Indonesia (BEI) ditetapkan sebagai Penyelenggara Bursa Karbon oleh Otoritas Jasa Keuangan (OJK).
- Bursa ini melayani perdagangan karbon dari dua pasar: wajib dan sukarela.
- Unit karbon yang diperdagangkan dikenal sebagai:
  - Sertifikat Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (SPE-GRK) atau
  - Kredit Karbon
- Pelaku pasar terdiri dari:
  - Badan usaha dan industri
  - Pemerintah daerah
  - Investor
  - Lembaga keuangan
  - Individu dan pelaku komunitas

## **Tujuan dan Manfaat**

Pengembangan sistem perdagangan karbon dan bursa karbon di Indonesia bertujuan untuk:

- Menurunkan emisi GRK secara efisien melalui mekanisme pasar
- Meningkatkan investasi di sektor-sektor rendah karbon dan energi terbarukan, termasuk bioenergi berbasis hutan
- Memberikan insentif ekonomi untuk pengelolaan hutan lestari dan konservasi karbon
- Mendukung pencapaian *Net Zero Emissions* pada tahun 2060 atau lebih cepat

## **5.3. Regulasi Energi Terbarukan dan Bioenergi**

Pemerintah Indonesia telah menetapkan berbagai regulasi strategis untuk mempercepat transisi menuju energi bersih, termasuk pengembangan bioenergi sebagai bagian dari energi

terbarukan. Regulasi ini mencakup kebijakan tingkat nasional, peraturan teknis sektoral, hingga insentif ekonomi yang mendorong investasi dan pengembangan teknologi energi bersih.

- Undang-Undang dan Kebijakan Nasional
  - Undang-Undang No. 30 Tahun 2007 tentang Energi  
Menyebutkan bahwa energi terbarukan, termasuk bioenergi, merupakan bagian dari bauran energi nasional dan harus dikembangkan secara berkelanjutan.
  - Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi  
Mengamanatkan peningkatan penyediaan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) oleh pemerintah pusat dan daerah.
  - Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan  
Berkaitan dengan pengaturan energi listrik, termasuk yang bersumber dari energi terbarukan.
  - Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah  
Memiliki kaitan dengan bioenergi, terutama yang berasal dari pengolahan sampah.
  - Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN)  
Menargetkan porsi energi terbarukan sebesar 23% dari bauran energi nasional pada tahun 2025, termasuk kontribusi dari bioenergi.
  - Peraturan Presiden Nomor 35 Tahun 2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan  
Mendukung pembangunan pembangkit listrik tenaga sampah.
  - Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik

Mengatur penyusunan RUPTL, percepatan pengakhiran PLTU, dan dukungan pemerintah dalam pengembangan energi terbarukan.

- Peraturan Teknis Sektor ESDM
  - Permen ESDM No. Nomor 4 Tahun 2025 tentang Pengusahaan dan Pemanfaatan Bahan Bakar Nabati  
Mengatur tentang ketentuan umum, pengusahaan bahan bakar nabati, pemanfaatan bahan bakar nabati, harga, penerapan kaidah keteknikan, keselamatan dan kesehatan kerja, dan pengelolaan lingkungan hidup, insentif, penerapan nilai ekonomi karbon
  - Peraturan Menteri ESDM 5 tahun 2025 tentang Pedoman Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik dari Pembangkit Tenaga Listrik yang Memanfaatkan Sumber Energi Terbarukan  
Memberikan pedoman dalam perjanjian jual beli listrik dari pembangkit energi terbarukan, termasuk yang berbasis sampah.
  - Peraturan Menteri ESDM No. 10 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Limbah Sawit untuk Pembangkit Listrik  
Mengatur pemanfaatan limbah sawit sebagai sumber energi.
  - Permen ESDM No. 50 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik  
Mengatur skema tarif (*feed-in tariff*), kontrak jual beli listrik, dan prioritas koneksi jaringan listrik untuk pembangkit listrik energi terbarukan, termasuk biomassa dan biogas.
  - Permen ESDM No. 12 Tahun 2015 tentang Pengembangan Pembangkit Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah  
Mendukung pemanfaatan bioenergi dari sumber lokal, seperti limbah pertanian dan kehutanan, khususnya di daerah terpencil.

- Insentif dan Instrumen Ekonomi
  - Skema *Feed-in Tariff* (FiT) dan *Power Purchase Agreement* (PPA)
  - Memberikan insentif bagi pengembang untuk menjual listrik dari bioenergi dengan tarif yang kompetitif dan jangka waktu kontrak yang pasti.
  - Dukungan Pembiayaan dari Lembaga Keuangan dan Lembaga Donor Internasional  
Bioenergi menjadi salah satu fokus dalam skema pendanaan hijau dan pembiayaan berkelanjutan melalui program hibah, pinjaman lunak, dan kerjasama teknis.
- Dukungan untuk Bioenergi Berbasis Hutan
  - Pemerintah mendorong pemanfaatan limbah biomassa hutan (seperti ranting, cabang, dan residu tebang) dan hutan tanaman energi sebagai sumber bahan bakar bioenergi.
  - Regulasi sektor kehutanan mulai membuka ruang untuk skema perizinan produksi energi dari kawasan hutan, termasuk melalui perhutanan sosial dan kemitraan konservasi.
- Tantangan Implementasi

Meskipun regulasi sudah tersedia, masih terdapat tantangan dalam hal:

  - Harmonisasi kebijakan antar sektor (energi, kehutanan, lingkungan)
  - Perizinan dan tata ruang yang tumpang tindih
  - Keterbatasan infrastruktur distribusi listrik dari bioenergi
  - Kepastian tarif dan akses pembiayaan

Dengan penyesuaian kebijakan yang progresif dan sinergi lintas sektor, regulasi ini berpotensi menjadi pendorong utama dalam memajukan bioenergi berkelanjutan di Indonesia.

## 5.4. Regulasi Karbon di Indonesia

### ▪ **Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1994**

Tentang: Pengesahan United Nations Framework Convention on Climate Change (Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim)

Pokok Aturan:

- Mengakui perlunya pengendalian emisi gas rumah kaca (GRK), termasuk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>).
- Menekankan kewajiban negara untuk membuat inventarisasi emisi GRK dan mengambil langkah mitigasi.
- Mengatur kerja sama internasional dalam pengendalian karbon, transfer teknologi, dan pendanaan untuk aksi iklim.

### ▪ **Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009**

Tentang: Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Pokok Aturan:

- Memasukkan pengendalian pencemaran udara sebagai bagian dari PPLH, yang mencakup pengurangan emisi karbon.
- Mendorong penggunaan instrumen ekonomi lingkungan hidup untuk menekan emisi, misalnya pajak karbon, insentif teknologi rendah emisi, atau perdagangan karbon.
- Memperkenalkan prinsip pencegahan dan kehati-hatian dalam pengelolaan sumber daya yang berpotensi menghasilkan GRK.
- Mengatur sanksi administratif, pidana, dan perdata terhadap kegiatan yang menghasilkan emisi berlebihan tanpa pengendalian.

### ▪ **Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016**

Tentang: Pengesahan Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim)

Pokok Aturan:

- Menetapkan komitmen Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia untuk mengurangi emisi GRK (terutama CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) sebesar 29% secara mandiri atau 41% dengan bantuan internasional pada 2030.
- Mengatur transisi menuju energi rendah karbon (*low carbon development*).
- Mendorong mekanisme pasar karbon internasional dan nasional.
- Mengatur pelaporan, pemantauan, dan verifikasi (*Measurement, Reporting, and Verification / MRV*) emisi.

▪ **Peraturan Pemerintah Nomor 46 Tahun 2017**

Tentang: Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup

Pokok Aturan:

- Memperkenalkan instrumen berbasis pasar untuk pengendalian emisi karbon, seperti: Perdagangan emisi (*Emission Trading System/ETS*), Sertifikat pengurangan emisi yang dapat diperjualbelikan dan Pajak karbon atau retribusi untuk kegiatan yang menghasilkan emisi.
- Memungkinkan pelaku usaha mendapatkan insentif jika berhasil menurunkan emisi karbon di bawah baku mutu.
- Mewajibkan penyusunan Neraca Karbon sebagai bagian dari instrumen perencanaan lingkungan.
- Menjadi dasar hukum penerapan perdagangan karbon domestik yang kemudian diperkuat oleh regulasi turunan seperti Perpres No. 98 Tahun 2021.

▪ **Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2021**

Tentang: Penyelenggaraan Kehutanan

Pokok Aturan:

- Mengatur pengelolaan hutan secara berkelanjutan, termasuk mekanisme rehabilitasi, konservasi, dan pemanfaatan hasil hutan.

- Menjadi landasan sektor kehutanan untuk kontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK).
- Menjadi pintu masuk penerapan carbon sequestration (penyerapan karbon) dari hutan.
- **Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021**  
Tentang: Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang ditetapkan secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional.  
Pokok Aturan:
  - Menetapkan kerangka hukum perdagangan karbon di Indonesia.
  - Memuat 4 instrumen NEK: perdagangan karbon, pembayaran berbasis kinerja, pungutan karbon, dan mekanisme lainnya.
  - Mengatur sektor-sektor penyumbang emisi, termasuk energi, industri, kehutanan, dan pertanian.
  - Menjadi payung hukum utama bagi regulasi turunan perdagangan karbon.
- **Peraturan Menteri LHK Nomor 21 Tahun 2022**  
Tentang: Tata Laksana Penerapan Nilai Ekonomi Karbon  
Pokok Aturan:
  - Menjabarkan pelaksanaan Perpres 98/2021.
  - Menentukan tahapan implementasi NEK: inventarisasi, perhitungan, pelaporan, verifikasi, dan pendaftaran.
  - Mengatur mekanisme *cap and trade*, *offset*, serta registrasi unit karbon.
  - Menetapkan peran Sistem Registri Nasional Pengendalian Perubahan Iklim (SRN PPI).
- **Peraturan Menteri LHK Nomor 7 Tahun 2023**  
Tentang: Tata Cara Perdagangan Karbon Sektor Kehutanan  
Pokok Aturan:

- Mengatur prosedur perdagangan karbon khusus untuk sektor kehutanan.
  - Menetapkan mekanisme verifikasi, pendaftaran proyek, sertifikasi, dan penerbitan unit karbon (Sertifikat Pengurangan Emisi/ SPE-GRK).
  - Memastikan perdagangan karbon kehutanan sesuai prinsip keberlanjutan dan konservasi.
- **Peraturan OJK Nomor 14 Tahun 2023**  
Tentang: Perdagangan Karbon Melalui Bursa Karbon  
Pokok Aturan:
- Mengatur tata cara perdagangan karbon di pasar bursa resmi.
  - Menetapkan ketentuan bagi penyelenggara bursa karbon dan peserta perdagangan.
  - Mengatur pencatatan, pelaporan, dan pengawasan transaksi karbon di bursa.
  - Menjadi kerangka keuangan yang menghubungkan instrumen karbon dengan pasar modal.

#### **5.4. Insentif dan Mekanisme Pasar Karbon**

Mekanisme pasar karbon merupakan pendekatan berbasis insentif yang memungkinkan entitas pemerintah, swasta, dan masyarakat memperoleh manfaat ekonomi dari upaya penurunan emisi gas rumah kaca (GRK). Melalui pasar karbon, kredit karbon, yang mewakili pengurangan atau penyerapan emisi, dapat diperjualbelikan untuk mendukung tujuan dekarbonisasi secara efisien dan berkelanjutan.

- Tujuan dan Fungsi  
Tujuan utama dari mekanisme pasar karbon adalah:
  - Mendorong penurunan emisi GRK dengan biaya yang lebih efisien.
  - Menggerakkan investasi sektor swasta dalam proyek-proyek rendah karbon, termasuk bioenergi dan konservasi hutan.

- Menjadi alat bantu dalam pencapaian target iklim nasional (NDC) dan global (*Paris Agreement*).
- Jenis Pasar Karbon
  - Pasar Karbon Wajib (*Mandatory Carbon Market*)

Sistem ini mewajibkan pelaku industri yang menghasilkan emisi untuk mematuhi batas emisi (cap). Jika emisi aktual melampaui batas, perusahaan diwajibkan membeli kredit karbon dari pihak lain yang memiliki kelebihan pengurangan.

    - Umumnya diterapkan melalui skema *cap-and-trade*.
    - Relevan untuk sektor pembangkit energi, industri berat, dan transportasi.
  - Pasar Karbon Sukarela (*Voluntary Carbon Market*)

Dalam pasar ini, perusahaan atau individu membeli kredit karbon secara sukarela untuk mengimbangi (*offset*) emisinya sebagai bagian dari komitmen lingkungan dan ESG.

    - Kredit karbon berasal dari proyek-proyek seperti:
      - Reforestasi dan restorasi hutan
      - Bioenergi dan energi terbarukan
      - Pengelolaan limbah dan pertanian regeneratif
- Bursa Karbon di Indonesia

Sejak 26 September 2023, PT Bursa Efek Indonesia (BEI) secara resmi ditunjuk sebagai Penyelenggara Bursa Karbon Nasional, berdasarkan izin dari Otoritas Jasa Keuangan (OJK). Bursa ini menjadi platform perdagangan resmi untuk unit karbon dari kedua jenis pasar di atas.

  - Unit yang diperdagangkan: Sertifikat Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (SPE-GRK) atau kredit karbon.
  - Peserta: perusahaan energi, industri, investor, pemerintah daerah, lembaga keuangan, dan perorangan.

- Bentuk Insentif
  - Insentif Finansial
    - Pendapatan dari penjualan kredit karbon.
    - Pembiayaan hijau dari lembaga donor dan investor berkelanjutan.
  - Insentif Fiskal dan Regulatif
    - Pengurangan pajak untuk proyek bioenergi dan konservasi karbon.
    - Kemudahan perizinan untuk proyek berbasis ekosistem.
  - Skema Non-Pasar
    - Dukungan teknis, pelatihan, dan pengakuan internasional.
    - Partisipasi dalam program seperti REDD+, FCPF, dan UN-REDD.
- Tantangan Implementasi
  - Masih terbatasnya kapasitas teknis di daerah dalam menyusun proyek karbon yang kredibel.
  - Kurangnya transparansi dalam pengukuran dan verifikasi (MRV).
  - Harga karbon yang belum mencerminkan nilai sosial-lingkungan secara penuh.
  - Kesenjangan akses antara komunitas lokal dan pelaku pasar besar.

Penguatan regulasi, harmonisasi standar karbon, serta keterlibatan multipihak, terutama masyarakat adat dan pelaku lokal, diperlukan agar mekanisme pasar karbon dapat berfungsi adil dan efektif dalam mendukung pengembangan bioenergi hutan secara berkelanjutan

## **5.5. Tantangan Implementasi Kebijakan di Negara Berkembang**

Negara-negara berkembang memiliki peran strategis dalam mitigasi perubahan iklim global melalui pengelolaan bioenergi dan

jasa lingkungan karbon hutan. Namun, implementasi kebijakan di sektor ini kerap menghadapi berbagai tantangan struktural, teknis, dan sosial-politik yang kompleks. Beberapa tantangan utama antara lain:

- **Keterbatasan Kapasitas Institusi dan SDM**  
Banyak negara berkembang mengalami keterbatasan dalam kapasitas kelembagaan dan sumber daya manusia untuk mengimplementasikan kebijakan terkait bioenergi dan pasar karbon secara efektif. Tantangan ini meliputi:
  - Kurangnya tenaga ahli di bidang teknis seperti MRV (*Measurement, Reporting, Verification*).
  - Terbatasnya pelatihan, pendampingan, dan infrastruktur pendukung di tingkat daerah.
  - Lemahnya koordinasi antarsektor (kehutanan, energi, lingkungan, keuangan).
- **Hambatan Finansial dan Akses Pembiayaan**  
Pengembangan bioenergi dan proyek karbon membutuhkan investasi awal yang besar. Di negara berkembang, akses terhadap pendanaan berkelanjutan masih terbatas karena:
  - Minimnya insentif fiskal dan kredit lunak untuk proyek-proyek rendah karbon.
  - Persyaratan yang kompleks untuk mengakses dana internasional (misalnya GCF, FCPF).
  - Ketergantungan pada bantuan luar negeri yang tidak selalu bersifat jangka panjang.
- **Ketidakpastian Regulasi dan Kepastian Hukum**  
Perubahan kebijakan yang tidak konsisten atau tumpang tindih antarinstansi dapat menimbulkan ketidakpastian bagi investor dan pelaku usaha. Masalah yang sering muncul:
  - Proses perizinan yang lambat dan birokratis.
  - Konflik antara kebijakan konservasi, energi, dan penggunaan lahan.

- Belum terintegrasinya skema karbon nasional dengan kebijakan pembangunan daerah.
- Tantangan Sosial dan Konflik Kepentingan  
Implementasi proyek bioenergi dan konservasi karbon dapat menimbulkan konflik sosial apabila tidak dikelola secara partisipatif dan inklusif:
  - Klaim lahan oleh masyarakat lokal atau adat seringkali berbenturan dengan konsesi industri.
  - Kurangnya konsultasi dan pembagian manfaat yang adil dalam proyek karbon.
  - Risiko pengabaian terhadap hak-hak tradisional dan keberlanjutan mata pencaharian lokal.
- Kesenjangan Teknologi dan Infrastruktur  
Teknologi konversi bioenergi dan pemantauan karbon memerlukan infrastruktur yang memadai, namun negara berkembang kerap menghadapi:
  - Terbatasnya akses terhadap teknologi canggih dan efisien.
  - Ketergantungan pada teknologi impor dengan biaya tinggi.
  - Ketiadaan sistem informasi spasial dan digitalisasi dalam pengelolaan bioenergi dan karbon.

Mengatasi tantangan-tantangan ini membutuhkan strategi lintas sektor, peningkatan kapasitas lokal, serta dukungan internasional yang berpihak pada keadilan iklim. Kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, masyarakat sipil, dan komunitas lokal sangat penting dalam menciptakan tata kelola karbon dan bioenergi yang adil, transparan, dan berkelanjutan



## ENAM

# **BIOENERGI, KARBON, DAN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGs)**

## **6.1. Keterkaitan Bioenergi dan Karbon Hutan dengan SDGs**

Pemanfaatan bioenergi dari sumber daya hutan tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung dengan berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*). Sebagai bagian dari transformasi menuju ekonomi rendah karbon, bioenergi mendukung pencapaian Agenda 2030 yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa.

Beberapa SDGs yang relevan dengan pengembangan bioenergi dan karbon hutan meliputi:  
SDG 7 – Energi bersih dan terjangkau

Bioenergi menyediakan sumber energi terbarukan yang dapat dikembangkan secara lokal, khususnya di wilayah pedesaan

dan terpencil. Melalui pemanfaatan biomassa dari limbah hutan atau tanaman energi, masyarakat memperoleh akses terhadap energi yang lebih bersih dan berkelanjutan dibandingkan bahan bakar fosil. Hal ini mendukung tujuan untuk memastikan akses terhadap energi yang terjangkau, andal, dan modern untuk semua.

SDG 13 – Penanganan perubahan iklim

Bioenergi berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim dengan menggantikan penggunaan bahan bakar fosil serta meningkatkan penyerapan karbon melalui pengelolaan hutan yang berkelanjutan. Sistem seperti rotasi pendek dan pemanfaatan limbah biomassa mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca, yang sejalan dengan tujuan untuk mengambil tindakan terhadap perubahan iklim dan dampaknya.

SDG 15 – Kehidupan di darat

Pemanfaatan hutan untuk bioenergi, jika dilakukan secara berkelanjutan, dapat mendukung perlindungan ekosistem, restorasi lahan terdegradasi, dan konservasi keanekaragaman hayati. Pengelolaan lanskap hutan yang mempertimbangkan fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi membantu pencapaian tujuan dalam menjaga kehidupan di darat.

SDG 1 dan SDG 8 – Pengentasan kemiskinan dan pekerjaan layak

Pengembangan bioenergi berbasis hutan menciptakan lapangan kerja di bidang budidaya tanaman energi, pengolahan biomassa, serta distribusi energi lokal. Hal ini memberikan peluang ekonomi bagi masyarakat desa dan kelompok rentan, sekaligus mendukung pertumbuhan ekonomi yang inklusif.

SDG 12 – Konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab

Praktik efisien dalam produksi dan penggunaan biomassa, termasuk pemanfaatan limbah hasil hutan, memperkuat pola konsumsi dan produksi berkelanjutan. Dengan pendekatan minim limbah dan optimalisasi rantai nilai biomassa, sektor bioenergi turut mendorong keberlanjutan sumber daya alam.

**Tabel 5 Keterkaitan Bioenergi dan Karbon Hutan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)**

No	SDG Terkait	Keterkaitan dengan Bioenergi dan Karbon Hutan
1	SDG 7 – Energi Bersih dan Terjangkau	Bioenergi menyediakan akses energi terbarukan yang lebih bersih dan dapat dikembangkan secara lokal di wilayah pedesaan dan terpencil.
2	SDG 13 – Penanganan Perubahan Iklim	Mengurangi emisi gas rumah kaca melalui penggantian bahan bakar fosil dan peningkatan simpanan karbon dari pengelolaan hutan berkelanjutan.
3	SDG 15 – Kehidupan di Darat	Mendukung konservasi keanekaragaman hayati dan restorasi lahan terdegradasi melalui praktik kehutanan berkelanjutan untuk produksi bioenergi.
4	SDG 1 – Tanpa Kemiskinan	Meningkatkan pendapatan masyarakat melalui penciptaan lapangan kerja di sektor energi berbasis hutan, terutama di komunitas pedesaan.
5	SDG 8 – Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi	Mendorong pertumbuhan ekonomi lokal melalui budidaya tanaman energi, pengolahan biomassa, dan distribusi energi terdesentralisasi.
6	SDG 12 – Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab	Mempromosikan efisiensi sumber daya dan pemanfaatan limbah biomassa untuk mengurangi pemborosan dalam rantai produksi energi.

Meskipun bioenergi memiliki potensi besar dalam mendukung berbagai SDGs, implementasi yang tidak terkontrol dapat menyebabkan konflik antar-tujuan, seperti alih fungsi hutan alam untuk tanaman energi yang dapat mengancam ketahanan pangan

atau keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan lanskap yang holistik, partisipatif, dan berbasis ilmu pengetahuan untuk memastikan kontribusi bioenergi terhadap pembangunan berkelanjutan secara menyeluruh dan seimbang

## **6.2. Peran Karbon Hutan dalam Agenda Global 2030**

Hutan memainkan peran kunci dalam mendukung Agenda Pembangunan Berkelanjutan 2030, khususnya dalam konteks mitigasi perubahan iklim dan konservasi ekosistem. Salah satu kontribusi paling signifikan adalah kemampuannya menyimpan dan menyerap karbon dalam jumlah besar melalui proses alami fotosintesis dan akumulasi biomassa. Karbon yang tersimpan dalam vegetasi dan tanah hutan dikenal sebagai karbon hutan (*forest carbon*), yang terbagi ke dalam beberapa bentuk utama: karbon di atas permukaan tanah (*aboveground carbon*), karbon di bawah permukaan tanah (*belowground carbon*), nekromassa, serasah dan tanah.

Peran karbon hutan tercermin dalam beberapa aspek kunci Agenda 2030:

### **Kontribusi terhadap pengendalian perubahan iklim**

Karbon hutan berfungsi sebagai penyerap dan penyimpan (*sink*) gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), yang merupakan penyebab utama pemanasan global. Dalam konteks ini, hutan berperan langsung dalam mendukung pencapaian SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Melalui kegiatan reforestasi, aforestasi, dan pengelolaan hutan lestari, karbon yang terserap dapat dikalkulasi, dipantau, dan bahkan diperdagangkan dalam kerangka mekanisme karbon internasional seperti REDD+ dan Pasal 6 Perjanjian Paris.

Dukungan terhadap SDG lainnya. Stok karbon yang tinggi biasanya sejalan dengan keanekaragaman hayati yang tinggi, kualitas tanah yang baik, dan ketersediaan air. Oleh karena itu,

perlindungan karbon hutan juga mendukung pencapaian SDG 15 (Kehidupan di Darat), SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi), dan SDG 2 (Tanpa Kelaparan) dalam konteks jasa lingkungan yang menunjang produksi pangan.

### **Integrasi dalam kebijakan Pembangunan**

Banyak negara telah memasukkan aspek karbon hutan ke dalam dokumen kontribusi nasional yang ditetapkan (*Nationally Determined Contributions/NDCs*) sebagai bagian dari komitmen terhadap Perjanjian Paris. Dalam konteks Indonesia, karbon hutan menjadi bagian penting dalam strategi mitigasi nasional dan telah dimasukkan dalam dokumen DRAM (Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi) di berbagai sektor, khususnya sektor FOLU (*Forestry and Other Land Use*).

### **Karbon sebagai aset ekonomi dan konservasi**

Melalui skema perdagangan karbon atau insentif berbasis hasil seperti REDD+, karbon hutan tidak hanya memiliki nilai ekologis tetapi juga nilai ekonomi. Hal ini membuka peluang bagi masyarakat adat dan lokal untuk memperoleh manfaat finansial dari kegiatan konservasi atau restorasi hutan, selama sistem yang diterapkan transparan, adil, dan inklusif.

Meskipun peran karbon hutan semakin diakui, tantangan seperti deforestasi, kebakaran hutan, dan konversi lahan masih menjadi ancaman utama terhadap cadangan karbon. Oleh karena itu, perlunya penguatan sistem pemantauan karbon berbasis teknologi (seperti citra satelit dan AI), mekanisme insentif yang adil, dan kerangka kebijakan yang mendukung implementasi pengelolaan karbon jangka panjang menjadi semakin penting dalam konteks Agenda 2030.

### **6.3. Integrasi Bioenergi dalam Rencana Pembangunan Berkelanjutan Nasional**

Pemerintah Indonesia telah menempatkan energi terbarukan, termasuk bioenergi, sebagai bagian penting dalam strategi transisi menuju ekonomi rendah karbon dan pembangunan berkelanjutan. Integrasi bioenergi dalam perencanaan nasional tidak hanya bertujuan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, tetapi juga untuk mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK), serta pemberdayaan ekonomi masyarakat lokal.

#### **Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN)**

RPJMN 2020–2024 menekankan pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) sebagai bagian dari upaya dekarbonisasi sektor energi. Dalam dokumen ini, bioenergi disebut secara eksplisit sebagai salah satu sumber EBT yang harus didorong, terutama untuk memenuhi kebutuhan energi di daerah 3T (terdepan, terpencil, dan tertinggal). Pembangunan pembangkit listrik tenaga biomassa skala kecil dan sedang menjadi prioritas di kawasan pedesaan.

#### **Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)**

RUEN menargetkan kontribusi energi baru dan terbarukan sebesar 23% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025. Bioenergi, yang mencakup biomassa padat, biogas, dan biofuel cair, memiliki peran penting untuk mencapai target ini. Pemerintah juga mendorong pemanfaatan limbah pertanian, kehutanan, dan perkebunan sebagai bahan baku bioenergi.

#### **Strategi Jangka Panjang Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim (LTS-LCCR 2050)**

Dokumen ini menyatakan bahwa sektor kehutanan dan energi berbasis biomassa harus dikembangkan secara sinergis untuk mencapai netralitas karbon pada pertengahan abad. Pendekatan lanskap terintegrasi, agroforestri energi, dan rotasi tanaman energi

jangka pendek menjadi bagian dari skenario pembangunan rendah emisi jangka panjang.

### **Kontribusi terhadap NDC (*Nationally Determined Contribution*)**

Dalam dokumen NDC Indonesia, pengembangan bioenergi menjadi bagian dari strategi mitigasi di sektor energi dan lahan. Pemanfaatan bioenergi dari hutan tanaman, limbah biomassa, dan sistem agroforestri diidentifikasi sebagai langkah strategis untuk menurunkan intensitas emisi serta menyediakan energi yang bersih dan terjangkau.

### **Peran pemerintah daerah dan Masyarakat**

Integrasi bioenergi dalam pembangunan nasional tidak hanya bersifat top-down, tetapi juga membutuhkan partisipasi aktif dari pemerintah daerah dan komunitas lokal. Program-program seperti Desa Mandiri Energi, pengembangan hutan energi rakyat, dan insentif berbasis hasil (result-based payment) perlu diperluas untuk memastikan manfaat ekonomi dan sosial dari bioenergi dapat dirasakan langsung oleh masyarakat.

### **Kebutuhan kebijakan lintas sektor**

Karena bioenergi menyentuh berbagai sektor, energi, kehutanan, pertanian, lingkungan, dan social, maka diperlukan sinergi kebijakan lintas kementerian/lembaga. Harmonisasi peraturan, insentif fiskal, jaminan pasar, dan dukungan riset-inovasi menjadi kunci agar integrasi bioenergi berjalan efektif dan berkelanjutan dalam kerangka pembangunan nasional.

## **6.4. Indikator SDGs Terkait Kehutanan dan Energi**

Untuk memantau kemajuan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), setiap tujuan memiliki indikator spesifik yang dapat diukur dan dilaporkan. Dalam konteks kehutanan dan energi, terdapat sejumlah indikator yang secara langsung atau tidak langsung berkaitan dengan pengembangan

bioenergi, pelestarian karbon hutan, dan pemanfaatan sumber daya alam secara berkelanjutan.

Berikut adalah indikator-indikator SDGs yang relevan dan dapat digunakan untuk mengevaluasi kontribusi sektor kehutanan dan bioenergi:

### **SDG 7 – Energi bersih dan terjangkau**

Indikator 7.1.1 – Proporsi populasi yang memiliki akses terhadap Listrik

Indikator 7.2.1 – Proporsi energi terbarukan dalam total konsumsi energi akhir

Indikator 7.b.1 – Investasi dalam infrastruktur dan teknologi energi terbarukan di negara berkembang

Relevansi: Bioenergi dari sumber hutan berperan dalam memperluas akses energi di wilayah pedesaan serta meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran nasional.

### **SDG 13 – Penanganan perubahan iklim**

Indikator 13.2.1 – Integrasi mitigasi perubahan iklim dalam kebijakan dan strategi nasional

Indikator 13.3.2 – Tingkat peningkatan kapasitas adaptasi dan mitigasi di komunitas lokal

Relevansi: Peningkatan cadangan karbon hutan, pemanfaatan limbah biomassa, serta pengembangan hutan energi berkontribusi langsung pada upaya mitigasi perubahan iklim.

### **SDG 15 – Kehidupan di darat**

Indikator 15.1.1 – Luas hutan sebagai persentase dari total wilayah daratan

Indikator 15.2.1 – Kemajuan menuju pengelolaan hutan berkelanjutan

Indikator 15.3.1 – Proporsi lahan terdegradasi terhadap total lahan

Relevansi: Pengelolaan hutan untuk bioenergi harus mempertimbangkan konservasi dan restorasi, menjaga tutupan hutan serta mencegah degradasi ekosistem.

### **SDG 12 – Konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab**

Indikator 12.2.1 – Konsumsi material domestik per kapita dan intensitas material

Indikator 12.a.1 – Dukungan terhadap riset dan pengembangan teknologi produksi dan konsumsi berkelanjutan

Relevansi: Sistem bioenergi yang efisien mendorong konsumsi material biomassa secara optimal, serta memanfaatkan limbah dan residu hutan dengan pendekatan sirkular.

### **SDG 8 – Pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi**

Indikator 8.4.1 – Produktivitas material dalam ekonomi nasional

Indikator 8.5.1 – Tingkat pekerjaan dan pendapatan rata-rata di sektor bioekonomi dan kehutanan

Relevansi: Sektor bioenergi menciptakan lapangan kerja baru, terutama di daerah rural, serta mendorong pertumbuhan ekonomi berbasis sumber daya terbarukan.

**Tabel 6 Indikator SDGs Terkait Kehutanan dan Bioenergi**

<b>SDG</b>	<b>Indikator SDG Relevan</b>	<b>Penjelasan Singkat</b>
7	7.2.1 – Energi terbarukan dalam konsumsi energi akhir	Mengukur kontribusi bioenergi terhadap bauran energi nasional
13	13.2.1 – Integrasi perubahan iklim dalam kebijakan nasional	Mencakup peran bioenergi dan karbon hutan dalam NDC

15	15.2.1 – Pengelolaan hutan berkelanjutan	Bioenergi dari hutan tanaman dan agroforestri mendukung pengelolaan berkelanjutan
12	12.2.1 – Konsumsi material per kapita	Efisiensi pemanfaatan limbah biomassa sebagai energi
8	8.5.1 – Tingkat pekerjaan	Kontribusi sektor bioenergi dalam penciptaan lapangan kerja di daerah pedesaan

Pemahaman dan penguatan indikator-indikator ini akan membantu pengambil kebijakan, pelaku usaha, dan masyarakat dalam merancang program bioenergi dan pengelolaan hutan yang sejalan dengan pencapaian SDGs secara komprehensif.



## TUJUH

# ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN

### 7.1. Dampak Eksploitasi Biomassa terhadap Keanekaragaman Hayati

Eksploitasi biomassa hutan untuk kebutuhan bioenergi, meskipun bertujuan mendukung transisi energi bersih, berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap keanekaragaman hayati apabila tidak dilakukan secara berkelanjutan. Keanekaragaman hayati, baik flora maupun fauna, sangat tergantung pada struktur dan fungsi ekosistem hutan yang kompleks. Ketika biomassa diambil secara intensif, keseimbangan ekologis dapat terganggu. Beberapa dampak yang dapat terjadi meliputi:

- Hilangnya Habitat Alami

Pengambilan biomassa seperti cabang, ranting, pohon mati, dan serasah dapat menghilangkan elemen-elemen penting yang menjadi habitat satwa liar, terutama spesies yang tergantung pada struktur hutan bawah dan lantai hutan. Pembukaan lahan

untuk tanaman energi atau akses jalan eksploitasi juga mempersempit ruang hidup spesies endemik.

- Penurunan Keanekaragaman Spesies

Intensifikasi pemanenan biomassa dapat mengurangi jumlah dan jenis spesies tanaman dan hewan. Spesies yang sensitif terhadap perubahan tutupan lahan dan struktur mikrohabitat akan lebih dulu terancam, diikuti oleh gangguan rantai trofik yang lebih luas.

- Fragmentasi Ekosistem

Kegiatan eksploitasi biomassa skala besar, terutama jika tidak terencana, dapat menyebabkan fragmentasi lanskap hutan. Hal ini menghambat pergerakan satwa liar, mengurangi konektivitas ekosistem, dan memperbesar kemungkinan spesies mengalami isolasi genetik.

- Gangguan terhadap Fungsi Ekosistem

Beberapa komponen biomassa yang dianggap "limbah" seperti kayu mati dan serasah, sebenarnya memiliki peran penting dalam siklus hara, kelembaban tanah, serta sebagai tempat hidup serangga dan mikroorganisme dekomposer. Pengambilannya dapat mengganggu fungsi ekosistem dan produktivitas jangka panjang.

- Invasi Spesies Asing dan Gangguan Regenerasi

Perubahan struktur tegakan akibat eksploitasi dapat memberi peluang masuknya spesies invasif yang merugikan. Selain itu, pengambilan biomassa secara berlebihan dapat mengganggu proses regenerasi alami pohon dan vegetasi asli, sehingga mempengaruhi dinamika hutan dalam jangka panjang.

Untuk meminimalkan dampak terhadap keanekaragaman hayati, pemanfaatan biomassa hutan perlu mengikuti prinsip kehati-hatian, seperti:

- Penetapan zona perlindungan dan zona produksi secara spasial.
- Penerapan silvikultur ramah lingkungan dan pemanenan selektif.
- Monitoring dampak ekologis secara berkala.
- Pelibatan masyarakat lokal dan pelaku konservasi dalam perencanaan.

Pendekatan berbasis lanskap dan integrasi antara kebutuhan energi dan konservasi menjadi kunci dalam memastikan bahwa pemanfaatan biomassa hutan untuk bioenergi tidak mengorbankan keanekaragaman hayati yang menjadi fondasi ketahanan ekosistem.

## **7.2. Isu Keberlanjutan dan Konservasi**

Pemanfaatan bioenergi berbasis hutan membawa tantangan besar terkait keberlanjutan sumber daya dan perlindungan keanekaragaman hayati. Meskipun bioenergi dipromosikan sebagai energi terbarukan, tidak semua bentuk penggunaannya otomatis berkelanjutan. Isu keberlanjutan dan konservasi muncul ketika eksploitasi biomassa melebihi kapasitas regeneratif hutan atau ketika tekanan terhadap fungsi ekologis meningkat.

### **▪ Ketidakseimbangan Antara Produksi dan Regenerasi**

Pengambilan biomassa yang terlalu intensif dapat melampaui kapasitas alami hutan untuk beregenerasi. Hal ini dapat menyebabkan degradasi lahan, penurunan stok karbon jangka panjang, dan hilangnya fungsi ekosistem penting seperti penyerapan air dan perlindungan tanah.

### **▪ Ketergantungan pada Hutan Alam**

Dalam beberapa kasus, tekanan terhadap hutan alam meningkat karena kebutuhan bioenergi, terutama ketika pasokan biomassa dari hutan tanaman belum memadai. Pemanfaatan hutan primer atau kawasan konservasi untuk bahan bakar bioenergi

menimbulkan konflik serius antara tujuan energi dan pelestarian keanekaragaman hayati.

- **Ketiadaan Standar Keberlanjutan yang Konsisten**  
Masih terdapat kesenjangan dalam regulasi dan standar keberlanjutan bioenergi, terutama di negara berkembang. Tanpa kerangka kerja yang jelas, proyek bioenergi dapat mengklaim keberlanjutan meskipun pada praktiknya menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan.
- **Dampak Jangka Panjang terhadap Stok Karbon**  
Jika pengambilan biomassa melebihi tingkat penyerapan karbon hutan, maka bioenergi justru dapat menjadi sumber emisi bersih. Konservasi stok karbon jangka panjang menjadi penting untuk memastikan bahwa bioenergi benar-benar berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim.
- **Perluasan Lahan untuk Tanaman Energi**  
Konversi lahan hutan atau lahan pertanian produktif menjadi lahan tanaman energi dapat menyebabkan alih fungsi lahan yang berdampak negatif terhadap keanekaragaman hayati dan ketahanan pangan. Tanpa perencanaan lanskap yang menyeluruh, ekspansi tanaman energi dapat menimbulkan tekanan terhadap kawasan lindung dan masyarakat lokal. Untuk memastikan keberlanjutan, perlu diterapkan pendekatan konservasi berbasis lanskap yang mencakup:
  - Zonasi kawasan konservasi dan kawasan produksi secara terpadu.
  - Pengembangan hutan tanaman energi di lahan terdegradasi, bukan pada hutan alam.
  - Sertifikasi keberlanjutan (misalnya melalui skema FSC, PEFC, atau RSPO untuk biomassa).
  - Monitoring dampak jangka panjang terhadap stok karbon dan keanekaragaman hayati.

Konservasi tidak dapat dipisahkan dari pengembangan bioenergi. Oleh karena itu, integrasi antara strategi konservasi dan kebijakan energi menjadi kunci menuju sistem bioenergi hutan yang berkelanjutan.

### **7.3. Konversi Hutan untuk Bioenergi vs. Ketahanan Pangan**

Peningkatan permintaan terhadap bioenergi, terutama dari biomassa berbasis tanaman energi (*energy crops*), telah menimbulkan kekhawatiran mengenai konflik lahan antara tujuan produksi energi, konservasi hutan, dan ketahanan pangan. Isu ini sangat relevan di negara berkembang yang menghadapi tekanan tinggi terhadap lahan produktif dan kebutuhan pangan yang meningkat.

- **Konversi Hutan menjadi Perkebunan Energi**  
Untuk memenuhi permintaan biomassa, sebagian wilayah hutan dikonversi menjadi lahan perkebunan energi seperti kaliandra, gamal, atau bahkan tanaman sawit untuk biodiesel. Konversi ini dapat mengakibatkan:
  - Hilangnya keanekaragaman hayati dan stok karbon hutan.
  - Degradasi ekosistem dan gangguan terhadap siklus hidrologi.
  - Peningkatan emisi karbon akibat deforestasi dan gangguan tanah.
- **Persaingan Lahan dengan Produksi Pangan**  
Tanaman energi seringkali dibudidayakan di lahan subur yang sebelumnya digunakan untuk pertanian pangan. Hal ini menyebabkan persaingan langsung antara bioenergi dan ketahanan pangan, dengan dampak antara lain:
  - Menurunnya produksi pangan lokal.
  - Kenaikan harga pangan akibat berkurangnya suplai.
  - Penggusuran masyarakat adat atau petani kecil dari lahan mereka.

- **Dampak Sosial dan Ketimpangan Akses**  
Proyek bioenergi skala besar berisiko memperparah ketimpangan akses terhadap tanah dan sumber daya alam. Masyarakat lokal dapat kehilangan hak atas lahan, mengalami penurunan pendapatan dari pertanian, atau dipaksa bergantung pada pekerjaan di industri bioenergi dengan upah rendah dan tanpa jaminan.
- **Risiko Ketahanan Pangan Nasional**  
Jika konversi lahan untuk bioenergi terjadi secara masif dan tidak terkendali, risiko terhadap ketahanan pangan nasional akan meningkat. Hal ini terutama berlaku di wilayah dengan cadangan pangan yang terbatas atau dengan pertumbuhan penduduk yang tinggi.  
Untuk menghindari konflik antara bioenergi dan ketahanan pangan, pendekatan berikut dapat diterapkan:
  - Pemanfaatan lahan marginal dan terdegradasi untuk tanaman energi, bukan lahan pertanian subur atau hutan alam.
  - Pengembangan model agroforestri yang menggabungkan tanaman energi dengan tanaman pangan.
  - Zonasi tata ruang yang mengatur secara ketat lokasi budidaya tanaman energi.
  - Kebijakan integratif yang mempertimbangkan aspek energi, pangan, dan lingkungan secara simultan.

Dengan perencanaan yang matang, bioenergi tidak harus menjadi ancaman bagi ketahanan pangan—melainkan dapat menjadi bagian dari solusi energi berkelanjutan yang mendukung pembangunan pedesaan dan konservasi hutan.

#### **7.4. Aspek Sosial-Ekonomi dan Hak Masyarakat Adat**

Pengembangan bioenergi hutan tidak hanya membawa dimensi lingkungan, tetapi juga berdampak besar terhadap aspek sosial dan ekonomi masyarakat di sekitar kawasan hutan, terutama

komunitas adat dan masyarakat lokal yang bergantung langsung pada sumber daya hutan. Pemanfaatan biomassa skala besar dapat menciptakan peluang ekonomi, namun juga menyimpan risiko marginalisasi jika tidak dikelola secara inklusif dan adil.

▪ Akses terhadap Lahan dan Sumber Daya

Proyek bioenergi seringkali memerlukan lahan yang luas, yang dalam banyak kasus merupakan wilayah adat atau lahan garapan masyarakat lokal. Ketika proses perizinan dilakukan tanpa partisipasi penuh masyarakat, potensi konflik agraria meningkat. Hal ini mencakup:

- Pengabaian hak ulayat dan klaim tanah adat.
- Relokasi paksa atau penghilangan akses terhadap sumber daya hutan tradisional.
- Ketimpangan kepemilikan dan kendali atas lahan produktif.

▪ Peran dan Partisipasi Masyarakat Lokal

Dalam banyak proyek, masyarakat lokal hanya terlibat sebagai tenaga kerja informal atau buruh kasar tanpa keterlibatan dalam pengambilan keputusan. Padahal, keberhasilan proyek bioenergi yang berkelanjutan sangat tergantung pada partisipasi aktif dan pemberdayaan komunitas setempat.

▪ Peluang Ekonomi dan Pemberdayaan

Jika dirancang dengan pendekatan inklusif, proyek bioenergi dapat menjadi peluang peningkatan ekonomi lokal melalui:

- Pembentukan koperasi petani energi.
- Skema kemitraan hutan tanaman rakyat atau kemitraan konservasi.
- Akses terhadap pelatihan teknologi dan pengolahan biomassa.
- Diversifikasi mata pencaharian yang berbasis pada jasa lingkungan dan hasil hutan bukan kayu.

Namun, manfaat ini tidak akan dirasakan secara adil tanpa mekanisme distribusi manfaat yang transparan dan pengakuan terhadap hak-hak lokal.

▪ Perlindungan terhadap Hak Masyarakat Adat

Instrumen hukum nasional dan internasional (seperti Undang-Undang Masyarakat Adat, Deklarasi PBB tentang Hak-Hak Masyarakat Adat—UNDRIP) menegaskan pentingnya prinsip *Free, Prior, and Informed Consent* (FPIC) sebelum proyek dilaksanakan. Prinsip ini harus dijadikan standar dalam pengembangan bioenergi untuk mencegah pelanggaran hak adat dan kultural.

▪ Gender dan Keadilan Sosial

Pengaruh proyek bioenergi juga bersifat gender-spesifik. Perempuan di komunitas adat dan rural sering memiliki peran penting dalam pengelolaan sumber daya hutan, namun akses mereka terhadap informasi, keputusan, dan manfaat sering terabaikan. Inklusivitas gender menjadi kunci dari keadilan sosial dalam skema bioenergi.

Agar proyek bioenergi hutan dapat diterima dan memberikan manfaat luas, perlu diterapkan:

- Pemetaan partisipatif dan pengakuan wilayah adat.
- Konsultasi dan persetujuan masyarakat sebelum proyek dijalankan (FPIC).
- Skema pembagian manfaat (*benefit-sharing*) yang adil.
- Pendekatan pembangunan berbasis komunitas (*community-based energy development*).

Dengan menjadikan masyarakat sebagai aktor utama, bukan sekadar objek, bioenergi hutan dapat bertransformasi menjadi instrumen pemberdayaan, bukan eksploitasi.



## DELAPAN

# TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM BIOENERGI HUTAN

## 8.1. Inovasi dalam Teknologi Pemrosesan Biomassa

Teknologi pemrosesan biomassa terus berkembang pesat untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi dampak lingkungan, dan memperluas skala penerapannya dalam konteks bioenergi. Inovasi ini mencakup pendekatan teknis baru maupun perbaikan terhadap proses konversi biomassa yang telah ada.

- Pengembangan Teknologi Konversi Efisien

Teknologi konversi biomassa menjadi energi dibagi ke dalam beberapa jalur utama, yaitu:

- Termokimia: seperti gasifikasi dan pirolisis, yang kini dikembangkan menjadi lebih efisien melalui penggunaan reaktor skala kecil-modular, pemurnian gas sintetik (*syngas*), dan rekayasa panas ulang (*heat recovery*).

- Biokimia: fermentasi dan digesti anaerob semakin dimaksimalkan melalui rekayasa mikroorganisme, biokatalis, serta penggunaan pre-treatment enzimatik untuk memecah lignoselulosa secara lebih efektif.
- Fisik-mekanik: seperti peletisasi atau briket biomassa, ditingkatkan dengan bahan perekat alami dan sistem pengeringan energi rendah.
- Teknologi Co-Firing dan Hybrid  
Inovasi lain adalah pemanfaatan *co-firing*, yaitu pencampuran biomassa dengan bahan bakar fosil (biasanya batu bara) dalam pembangkit listrik. Teknologi ini memungkinkan transisi energi lebih mulus dengan:
  - Meminimalkan investasi baru dalam infrastruktur pembangkit.
  - Mengurangi emisi karbon tanpa mengubah sistem yang sudah ada secara besar-besaran.
  - Mendorong demand terhadap limbah biomassa dari kehutanan atau pertanian.Beberapa pembangkit listrik di Indonesia telah mengadopsi sistem ini, terutama melalui campuran dengan pelet kayu (wood pellet) atau sekam padi.
- Bio-refinery (Kilang Bioenergi Terintegrasi)  
Konsep *bio-refinery* mengintegrasikan produksi energi dengan produk sampingan bernilai tinggi, seperti:
  - Biofuel (bioetanol, biodiesel, bio-oil)
  - Bioplastik
  - Bahan kimia berbasis biomassa
  - Pupuk organik dari sisa hasil fermentasi atau digestiPendekatan ini meningkatkan nilai ekonomi proyek biomassa dan mendukung prinsip zero waste.
- Penggunaan Limbah sebagai Bahan Baku  
Teknologi terbaru semakin memungkinkan pemanfaatan biomassa berkualitas rendah, termasuk:

- Serbuk gergaji, cabang dan ranting
  - Sekam, tongkol jagung, dan limbah agroindustri lainnya
  - Lumpur organik dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL)
- Teknologi densifikasi dan pengolahan termal modern memungkinkan limbah tersebut diproses menjadi pelet atau karbon aktif.

■ Teknologi Desentralisasi dan Off-Grid

Dalam konteks pedesaan atau hutan terpencil, inovasi berupa teknologi desentralisasi sangat penting. Contohnya:

- Mini gasifier berbasis biomassa untuk penerangan desa
- Pembangkit biogas rumah tangga dari limbah ternak dan pertanian
- Kompur biomassa efisien yang menggantikan kayu bakar secara langsung

Teknologi ini tidak hanya mendukung ketahanan energi lokal, tetapi juga mengurangi tekanan terhadap hutan sebagai sumber energi tradisional.

■ Efisiensi Energi dan Otomatisasi

Kemajuan dalam sensor, sistem kendali otomatis, dan teknologi pemantauan real-time kini memungkinkan:

- Optimasi proses produksi energi biomassa
- Penurunan biaya operasional
- Integrasi dengan jaringan listrik pintar (smart grid)

Inovasi dalam teknologi pemrosesan biomassa adalah kunci dalam mendorong transisi energi yang adil, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Dengan terus mengembangkan teknologi yang adaptif terhadap kondisi lokal dan mendukung ekonomi sirkular, bioenergi dari hutan dapat menjadi bagian penting dari solusi krisis iklim dan energi global.

## 8.2. Penggunaan AI dan Remote Sensing dalam Monitoring Karbon

Pemantauan karbon hutan secara akurat dan efisien menjadi krusial dalam era mitigasi perubahan iklim, perdagangan karbon, dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Kombinasi antara kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) telah merevolusi cara kita mengukur dan menganalisis cadangan karbon serta dinamika hutan dalam skala luas dan waktu nyata.

### ▪ Remote Sensing: Sumber Data Spasial Karbon

Teknologi penginderaan jauh menggunakan sensor satelit dan drone untuk memperoleh data spasial vegetasi, struktur kanopi, tutupan lahan, serta perubahan penggunaan lahan. Beberapa sistem utama yang digunakan:

- Satelit optik: seperti Landsat, Sentinel-2, MODIS, digunakan untuk memantau tutupan lahan dan perubahan vegetasi dari waktu ke waktu.
- Radar (SAR): seperti Sentinel-1 dan ALOS-PALSAR, efektif dalam mendeteksi struktur biomassa dan dapat menembus awan, cocok untuk wilayah tropis seperti Indonesia.
- LIDAR (*Light Detection and Ranging*): teknologi berbasis laser yang mampu memberikan informasi 3D detail tentang tinggi pohon, volume kanopi, dan estimasi biomassa di atas tanah.

Teknologi ini sangat berguna untuk mengestimasi cadangan karbon, terutama karbon di atas permukaan tanah (aboveground biomass), dan mendeteksi deforestasi maupun degradasi hutan.

### ▪ Kecerdasan Buatan (AI) dalam Analisis Data Karbon

AI, termasuk *machine learning* dan *deep learning*, digunakan untuk:

- Klasifikasi lahan otomatis: memetakan jenis tutupan lahan dan perubahan vegetasi secara akurat dan cepat.

- Prediksi stok karbon: melalui pelatihan model dengan data lapangan dan citra satelit, AI mampu mengestimasi kandungan karbon dengan tingkat akurasi tinggi.
- Deteksi anomali: mengidentifikasi aktivitas ilegal seperti pembalakan liar atau kebakaran hutan secara dini.
- Integrasi multi-data: menggabungkan data spasial, iklim, tanah, dan historis dalam satu sistem model prediktif karbon hutan.

Contoh aplikasi termasuk algoritma *Random Forest*, *Convolutional Neural Network* (CNN), dan *Google Earth Engine* berbasis AI.

#### ■ Integrasi Sistem Monitoring Karbon Nasional

Banyak negara, termasuk Indonesia, kini mengembangkan Sistem Informasi Monitoring, Pelaporan, dan Verifikasi (MRV) berbasis teknologi digital dan AI. Sistem ini penting dalam mendukung:

- Proyek REDD+ dan karbon sukarela
- Penilaian cadangan karbon dalam skema perdagangan karbon nasional
- Evaluasi efektivitas kebijakan dekarbonisasi di sektor kehutanan

Penggunaan AI + *Remote Sensing* menjadikan sistem MRV lebih efisien, transparan, dan dapat diaudit oleh pihak ketiga.

#### ■ Tantangan dan Arah Pengembangan

Meski teknologinya menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan:

- Keterbatasan data lapangan untuk pelatihan model AI
- Biaya tinggi untuk pengadaan data resolusi tinggi (misalnya LIDAR)
- Kesenjangan kapasitas teknis lokal dalam pemrosesan dan interpretasi data

Namun demikian, kolaborasi antara pemerintah, lembaga riset, startup teknologi lingkungan, dan lembaga internasional terus mendorong akses dan penerapan teknologi ini di berbagai wilayah hutan tropis.

Kombinasi kecerdasan buatan dan penginderaan jauh telah menjadi pilar penting dalam sistem monitoring karbon modern. Pemanfaatan teknologi ini tidak hanya meningkatkan akurasi estimasi karbon, tetapi juga memperkuat transparansi dan kredibilitas proyek-proyek kehutanan dalam kerangka mitigasi perubahan iklim dan perdagangan karbon global.

### **8.3. Integrasi Bioenergi dengan Smart Forest Management**

*Smart Forest Management* (SFM) atau pengelolaan hutan cerdas adalah pendekatan berbasis data, teknologi digital, dan prinsip keberlanjutan untuk mengoptimalkan fungsi hutan baik dari sisi ekologi, sosial, maupun ekonomi. Dalam konteks bioenergi, integrasi SFM memungkinkan pengelolaan biomassa hutan secara efisien, lestari, dan terukur, sekaligus mendukung target dekarbonisasi nasional dan global.

- Konsep Smart Forest Management

SFM mencakup penerapan teknologi dan sistem informasi untuk:

- Perencanaan dan pemantauan tutupan hutan secara real-time
- Estimasi volume biomassa dan cadangan karbon
- Penilaian risiko degradasi dan kebakaran
- Optimalisasi produksi hasil hutan non-kayu dan bioenergi

Teknologi utama dalam SFM antara lain: remote sensing, sensor tanah dan kelembaban, drone, GPS monitoring, sistem informasi geografis (SIG), dan analitik berbasis AI.

- Potensi Integrasi dengan Produksi Bioenergi

Produksi bioenergi dari hutan—baik dari limbah kayu, serasah, maupun hasil hutan tanaman energi—dapat diintegrasikan ke

dalam sistem SFM untuk menjamin keberlanjutan, antara lain melalui:

- Penjadwalan panen rotasional biomassa berbasis data pertumbuhan dan volume tegakan
- Zonasi lahan untuk produksi energi vs konservasi karbon
- Pemanfaatan limbah secara terencana untuk menghindari eksploitasi berlebih dan mempertahankan siklus nutrisi tanah
- Pemantauan real-time terhadap dampak lingkungan, termasuk keanekaragaman hayati dan erosi

SFM memungkinkan pengambilan keputusan yang berbasis bukti (*evidence-based forestry*), mengurangi ketergantungan pada eksploitasi intensif, dan meningkatkan efisiensi produksi bioenergi.

▪ Contoh Praktik di Lapangan

Beberapa negara telah menerapkan konsep ini, seperti:

- Finlandia dan Swedia, yang mengintegrasikan pengelolaan hutan tanaman industri dengan bioenergi menggunakan sistem digitalisasi penuh
- Indonesia, mulai mengembangkan peta hutan tanaman energi (HTE) berbasis spasial, termasuk peran Perhutani dan swasta untuk produksi biopellet dan biooil dari limbah hutan
- Proyek agroforestri berbasis energi terbarukan yang memanfaatkan tanaman cepat tumbuh seperti kaliandra dan gamal dalam rotasi pendek

▪ Manfaat Integrasi untuk Keberlanjutan

- Peningkatan efisiensi dan produktivitas biomassa
- Penurunan emisi karbon melalui perencanaan berbasis stok karbon dan jejak karbon
- Transparansi pengelolaan yang mendukung sertifikasi (FSC, *bioenergy sustainability standards*)
- Peningkatan nilai tambah ekonomi lokal, terutama di daerah pedesaan dan wilayah adat

▪ Tantangan Implementasi

Beberapa hambatan yang perlu diatasi:

- Keterbatasan kapasitas teknis dan akses terhadap teknologi di daerah
- Biaya awal sistem digitalisasi dan sensor monitoring
- Kebutuhan akan regulasi dan kelembagaan yang mendukung integrasi lintas sektor

Integrasi bioenergi ke dalam sistem Smart Forest Management bukan hanya memungkinkan efisiensi dan keberlanjutan produksi energi dari hutan, tetapi juga memperkuat pengelolaan lanskap hutan secara holistik. Strategi ini mendukung visi jangka panjang hutan sebagai sumber energi bersih sekaligus penjaga karbon dan ekosistem.

#### **8.4. Masa Depan Bioenergi Berbasis Hutan**

Bioenergi berbasis hutan memainkan peran strategis dalam transisi global menuju sistem energi rendah karbon dan berkelanjutan. Di tengah meningkatnya kebutuhan energi dan tekanan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, hutan sebagai sumber biomassa terbarukan memberikan peluang besar, terutama bagi negara-negara dengan potensi lahan dan sumber daya kehutanan yang luas seperti Indonesia.

▪ Arah Perkembangan Global

Beberapa tren global menunjukkan bahwa bioenergi hutan akan tetap relevan dan bahkan tumbuh secara signifikan:

- Kebutuhan energi terbarukan meningkat seiring dengan komitmen negara-negara terhadap *Net Zero Emissions*.
- Teknologi bioenergi makin efisien dan ramah lingkungan, seperti *co-firing* biomassa dengan batubara, biopelet berkualitas tinggi, dan biofuel generasi kedua.

- Kebijakan dekarbonisasi sektor industri dan transportasi mendorong permintaan terhadap bahan bakar bioenergi dari biomassa kayu.
- Peningkatan pasar karbon global dan regional memberikan insentif ekonomi terhadap proyek bioenergi berbasis hutan yang berkelanjutan.
- Peluang untuk Indonesia dan Negara Berkembang  
Indonesia memiliki berbagai faktor pendukung:
  - Luasnya hutan tanaman energi dan limbah biomassa dari sektor kehutanan dan pertanian.
  - Potensi integrasi dengan program restorasi lahan dan pengembangan desa mandiri energi.
  - Dukungan kebijakan seperti Perpres Energi Terbarukan dan target bauran energi nasional.
  - Pasar karbon dan perdagangan kredit karbon yang mulai terbentuk, memberikan nilai tambahan dari sisi lingkungan.Dengan pendekatan lanskap dan kolaborasi multipihak, bioenergi hutan dapat menjadi pilar penting dalam pembangunan ekonomi rendah emisi.
- Tantangan Strategis  
Namun, masa depan bioenergi hutan juga menghadapi sejumlah tantangan serius:
  - Persaingan lahan dengan kebutuhan pangan, konservasi, dan pemukiman
  - Kekhawatiran atas keberlanjutan ekologis, terutama jika pengelolaan biomassa tidak memperhatikan siklus karbon dan keanekaragaman hayati
  - Kurangnya infrastruktur dan investasi, terutama di daerah terpencil
  - Kesenjangan kapasitas dan teknologi, khususnya dalam skala komunitas

Oleh karena itu, penting untuk membangun sistem bioenergi hutan yang:

- Berbasis data dan teknologi (*smart forestry*)
  - Transparan dan terverifikasi melalui sertifikasi keberlanjutan
  - Memberdayakan masyarakat lokal dan menghargai hak adat
  - Terintegrasi dalam kebijakan energi, kehutanan, dan iklim nasional
- Visi Transformasional
- Masa depan bioenergi berbasis hutan terletak pada transformasi dari eksploitasi sumber daya menjadi pengelolaan lanskap produktif yang multi-fungsi: menghasilkan energi, menyimpan karbon, menyediakan jasa ekosistem, dan mendukung penghidupan masyarakat.

Melalui pendekatan yang adaptif, kolaboratif, dan berbasis ilmu pengetahuan, bioenergi hutan dapat menjadi kekuatan utama dalam agenda global untuk pembangunan berkelanjutan, ketahanan energi, dan mitigasi perubahan iklim.



SEMBILAN

## STUDI KASUS LAPANGAN DAN PEMBELAJARAN PRAKTIK

### 9.1. Studi Kasus Sukses Pemanfaatan Bioenergi dari Hutan

Pemanfaatan bioenergi berbasis hutan telah menunjukkan keberhasilan di berbagai belahan dunia, baik melalui proyek skala besar berbasis industri maupun inisiatif skala komunitas yang memberdayakan masyarakat lokal. Studi kasus ini memberikan gambaran nyata bagaimana bioenergi dapat dikelola secara berkelanjutan, ekonomis, dan berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon.

- Skema Co-Firing Biomassa di Indonesia

Lokasi: Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia

Inisiator: PLN bersama Kementerian ESDM dan mitra swasta

Deskripsi:

*Co-firing* merupakan teknologi pencampuran biomassa

(misalnya pelet kayu, sekam padi, atau serbuk gergaji) dengan batu bara untuk menghasilkan listrik. Proyek ini bertujuan menurunkan intensitas emisi karbon tanpa harus membangun pembangkit baru.

Hasil:

- Mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 5–10% per unit listrik.
- Mendorong permintaan terhadap limbah biomassa dari sektor kehutanan dan pertanian.
- Memperkuat ekosistem industri pelet kayu lokal.
- Hutan Energi Rakyat di Vietnam

Lokasi: Provinsi Quang Tri, Vietnam

Inisiator: Pemerintah daerah dan mitra internasional

Deskripsi:

Petani lokal dilibatkan dalam program penanaman pohon cepat tumbuh (*Acacia* spp.) untuk produksi biomassa energi. Lahan-lahan marginal yang sebelumnya tidak produktif dimanfaatkan untuk hutan energi.

Hasil:

- Peningkatan pendapatan petani melalui penjualan kayu energi.
- Mengurangi tekanan terhadap hutan alam.
- Proyek memperoleh kredit karbon melalui skema sukarela.
- Biogas Komunitas dari Limbah Hutan di Nepal

Lokasi: Dataran tinggi Nepal Tengah

Deskripsi:

Komunitas memanfaatkan limbah hutan dan pertanian untuk produksi biogas melalui teknologi biodigester skala kecil. Energi digunakan untuk memasak dan penerangan rumah tangga.

Hasil:

- Mengurangi ketergantungan terhadap kayu bakar dan penggundulan hutan.
- Memperbaiki kualitas udara dalam ruangan.

- Meningkatkan peran perempuan dalam pengelolaan energi rumah tangga.
- Pemanfaatan Biopellet di Swedia  
Lokasi: Uppsala, Swedia  
Deskripsi:  
Swedia adalah salah satu negara yang berhasil memanfaatkan limbah hasil hutan menjadi biopellet berkualitas tinggi untuk pemanas distrik (*district heating*). Biopellet berasal dari serbuk gergaji dan limbah pemrosesan kayu.  
Hasil:
  - Menurunkan konsumsi energi fosil secara signifikan.
  - Menjadi model sistem bioenergi tertutup dan efisien.
  - Mengintegrasikan pengelolaan hutan lestari dengan sistem energi nasional.Pembelajaran Utama:
  - Keberhasilan pemanfaatan bioenergi hutan sangat bergantung pada dukungan kebijakan, teknologi yang tepat guna, dan pemberdayaan masyarakat lokal.
  - Perlu pendekatan lanskap untuk menghindari konflik lahan dan memastikan kesinambungan pasokan biomassa.
  - Bioenergi dapat menjadi solusi iklim yang adil jika dipadukan dengan manfaat ekonomi lokal dan perlindungan sosial.

## **9.2. Proyek Karbon Hutan dan Dampaknya terhadap Masyarakat Lokal**

Proyek karbon hutan, baik melalui mekanisme REDD+, skema sukarela, maupun program konservasi berbasis Masyarakat, telah memberikan kontribusi penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Namun, keberhasilannya tidak hanya diukur dari besarnya pengurangan emisi karbon, tetapi juga dari sejauh mana proyek tersebut memberikan manfaat nyata bagi masyarakat lokal yang tinggal di sekitar kawasan hutan.

▪ Proyek REDD+ di Kalimantan

Deskripsi:

Proyek ini melindungi lebih dari 150.000 hektar hutan rawa gambut tropis, yang berfungsi sebagai salah satu penyimpan karbon terbesar di dunia. Proyek REDD+ ini menghasilkan kredit karbon yang dipasarkan secara internasional.

Dampak terhadap masyarakat lokal:

- Menyediakan pendapatan tambahan melalui program kehutanan sosial dan pertanian berkelanjutan.
- Akses pelatihan dan pendidikan lingkungan.
- Meningkatkan partisipasi masyarakat adat dalam pengambilan keputusan konservasi.

▪ Program Karbon Komunitas di Amazon (Brasil)

Deskripsi:

Melibatkan masyarakat adat dalam pemantauan dan perlindungan hutan sebagai bagian dari proyek karbon hutan berbasis komunitas.

Dampak terhadap masyarakat lokal:

- Mendorong pengakuan legal atas wilayah adat.
- Peningkatan kapasitas dalam teknologi pemantauan hutan (GIS, drone).
- Penguatan ekonomi lokal melalui insentif berbasis konservasi.

▪ Proyek Konservasi dan Restorasi Mangrove di Pantai Utara Jawa

Deskripsi:

Restorasi mangrove yang dikelola bersama oleh LSM, perguruan tinggi, dan kelompok masyarakat pesisir untuk menyerap karbon dan melindungi kawasan pesisir dari abrasi.

Dampak terhadap masyarakat lokal:

- Sumber penghidupan baru dari ekowisata dan produk olahan mangrove.
- Peningkatan ketahanan komunitas terhadap bencana iklim (banjir, abrasi).

- Kontribusi terhadap pengurangan emisi karbon biru (*blue carbon*).
- Proyek Agroforestri Karbon di Uganda  
Deskripsi:  
Petani kecil dilibatkan dalam penanaman pohon di lahan pertanian untuk menyerap karbon dan meningkatkan produktivitas tanah.  
Dampak terhadap masyarakat lokal:
  - Peningkatan hasil panen melalui perbaikan kesuburan tanah.
  - Pendapatan tambahan dari penjualan hasil hutan bukan kayu (HHBK).
  - Akses ke pasar karbon sukarela secara langsung.Refleksi dan Pembelajaran:
  - Keberhasilan proyek karbon hutan sangat terkait dengan kejelasan hak tenurial dan partisipasi aktif masyarakat.
  - Proyek yang memadukan konservasi, peningkatan kesejahteraan, dan penghormatan terhadap hak masyarakat adat cenderung lebih berkelanjutan.
  - Skema insentif harus didesain agar adil, transparan, dan tidak menciptakan ketimpangan antar kelompok lokal

### **9.3. Praktik Terbaik Pengelolaan Hutan untuk Bioenergi**

Pengelolaan hutan untuk bioenergi harus memastikan keseimbangan antara produksi energi, pelestarian lingkungan, dan keberlanjutan sosial-ekonomi. Sejumlah praktik terbaik telah diidentifikasi dari berbagai proyek dan studi lapangan di berbagai belahan dunia. Praktik-praktik ini menjadi acuan penting dalam mengembangkan sistem bioenergi berbasis hutan yang berkelanjutan.

- **Pemanfaatan Limbah Hutan Secara Efisien**
  - Praktik: Menggunakan limbah biomassa seperti ranting, daun, serbuk gergaji, dan kulit kayu dari aktivitas tebang pilih atau pengolahan kayu.
  - Manfaat: Mengurangi pemborosan sumber daya dan mencegah degradasi tanah akibat pembakaran terbuka.
  - Contoh: Pengumpulan limbah biomassa untuk bahan bakar briket atau pelet kayu di Sumatera Selatan.
- **Pengelolaan Hutan Tanaman Energi**
  - Praktik: Penanaman spesies cepat tumbuh (seperti kaliandra, gamal, sengon, akasia, eucalyptus) pada lahan marginal atau bekas tambang.
  - Manfaat: Menyediakan sumber bahan baku energi yang berkelanjutan tanpa mengganggu hutan alam.
  - Contoh: Program Hutan Tanaman Energi (HTE) oleh Perhutani dan perusahaan swasta untuk suplai biomassa PLTBm (Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa).
- **Silvikultur Intensif dan Terencana**
  - Praktik: Pengelolaan daur pohon yang disesuaikan untuk kebutuhan bioenergi, termasuk pemangkasan dan rotasi cepat.
  - Manfaat: Meningkatkan produktivitas dan efisiensi pemanenan biomassa.
  - Contoh: Sistem tebang tanam berkelanjutan di hutan rakyat Jawa yang diarahkan untuk kebutuhan energi lokal.
- **Integrasi Agroforestri Energi**
  - Praktik: Penggabungan tanaman energi dengan tanaman pangan dan komoditas bernilai ekonomi lain dalam satu lahan.
  - Manfaat: Diversifikasi pendapatan petani, ketahanan pangan, dan konservasi tanah.

- Contoh: Sistem agroforestri di Sulawesi Selatan dengan kombinasi jagung, kakao, dan pohon energi.
- Restorasi Lahan Kritis dengan Spesies Bioenergi
  - Praktik: Mengubah lahan terdegradasi menjadi hutan produktif energi.
  - Manfaat: Rehabilitasi lingkungan sekaligus penyediaan sumber energi alternatif.
  - Contoh: Program restorasi lahan kritis dengan pohon kaliandra di Flores dan Timor.
- Pelibatan Masyarakat dalam Rantai Nilai Bioenergi
  - Praktik: Keterlibatan komunitas lokal dalam kegiatan budidaya, pengolahan, hingga distribusi produk bioenergi.
  - Manfaat: Meningkatkan kepemilikan lokal, menciptakan lapangan kerja, dan mendorong ekonomi desa.
  - Contoh: Koperasi petani biomassa di Kalimantan Barat yang menyuplai bahan baku ke pabrik pelet kayu.

Praktik-praktik terbaik di atas menunjukkan bahwa pengelolaan bioenergi berbasis hutan tidak hanya tentang produksi energi, tetapi juga tentang pengelolaan sumber daya alam yang adaptif, inklusif, dan berorientasi jangka panjang. Penguatan kelembagaan lokal, kepastian hukum, dan insentif ekonomi menjadi kunci sukses implementasinya

#### **9.4. Evaluasi Proyek CDM dan REDD+**

Proyek *Clean Development Mechanism* (CDM) dan *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* (REDD+) merupakan dua skema internasional yang dirancang untuk membantu negara berkembang mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) melalui perlindungan hutan, konservasi karbon, dan pemanfaatan energi rendah karbon. Keduanya memberikan insentif berupa kredit karbon yang dapat diperjualbelikan di pasar karbon internasional maupun domestik.

- Evaluasi Proyek CDM (Clean Development Mechanism)  
CDM merupakan bagian dari Protokol Kyoto, yang memungkinkan negara maju melaksanakan proyek pengurangan emisi di negara berkembang, sebagai kompensasi atas emisi mereka sendiri.

Kekuatan:

- Menyediakan mekanisme transfer teknologi dan pendanaan ke negara berkembang.
- Mendorong proyek-proyek energi terbarukan termasuk bioenergi dari limbah pertanian dan kehutanan.
- Memiliki prosedur validasi dan verifikasi ketat melalui lembaga independen (DOE).

Kelemahan:

- Proses administratif yang rumit dan biaya transaksi yang tinggi, sehingga sulit dijangkau oleh proyek-proyek skala kecil.
- Terbatasnya manfaat langsung bagi masyarakat lokal apabila tidak dirancang secara partisipatif.
- Sejak berakhirnya masa berlaku Protokol Kyoto, minat terhadap CDM menurun tajam.

Contoh di Indonesia:

- Kerja sama antara PT Gikoko Kogyo (Belanda) dan Pemerintah Kota Pontianak bertujuan untuk mengelola gas metana yang dihasilkan dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Batu Layang.
- Evaluasi Proyek REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation)

REDD+ merupakan skema di bawah UNFCCC yang memberikan insentif kepada negara-negara berkembang untuk menjaga hutan mereka tetap berdiri sebagai upaya pengurangan emisi.

Kekuatan:

- Berfokus pada konservasi hutan dan peningkatan stok karbon hutan.

- Mengintegrasikan aspek pembangunan berkelanjutan, hak masyarakat adat, dan konservasi keanekaragaman hayati.
- Dapat diterapkan secara nasional maupun subnasional (jurisdiksi provinsi/kabupaten).

Kelemahan:

- Kesulitan dalam pengukuran dan pelaporan stok karbon secara akurat di lapangan.
- Risiko kebocoran (leakage), di mana deforestasi hanya berpindah lokasi.
- Ketidakjelasan pembagian manfaat bagi masyarakat lokal.
- Ketergantungan tinggi pada pendanaan internasional yang belum selalu konsisten.

*Contoh* di Indonesia:

- Program REDD+ Kalimantan Tengah.
  - Kemitraan antara pemerintah Indonesia dengan lembaga donor (seperti Norwegia) melalui skema *Result-Based Payment* (RBP).
- Pembelajaran dan Rekomendasi

Pembelajaran utama:

- Proyek berbasis karbon harus melibatkan masyarakat lokal sejak perencanaan.
- Kejelasan hak atas lahan dan hutan sangat penting untuk kelangsungan proyek.
- Transparansi dan akuntabilitas data karbon mutlak diperlukan agar proyek dapat dipercaya dan mendapat pembiayaan berkelanjutan.

Rekomendasi:

- Integrasi CDM dan REDD+ ke dalam kebijakan nasional dan strategi pembangunan rendah karbon.
- Peningkatan kapasitas teknis dan kelembagaan di tingkat daerah.
- Dukungan terhadap proyek-proyek skala kecil yang berbasis komunitas agar lebih banyak pelaku lokal yang terlibat dalam pasar karbon.



## SEPULUH

# STRATEGI PENGELOLAAN LANSKAP UNTUK BIOENERGI DAN KARBON

### 10.1. Silvikultur dan Pengelolaan Hutan Produksi

Silvikultur merupakan dasar dalam pengelolaan hutan produksi yang berkelanjutan. Dalam konteks bioenergi dan jasa lingkungan karbon, penerapan sistem silvikultur yang tepat menjadi kunci dalam menjamin ketersediaan biomassa sekaligus menjaga atau meningkatkan stok karbon hutan.

- Tujuan Silvikultur untuk Bioenergi dan Karbon
  - Menjamin pasokan bahan baku biomassa untuk bioenergi secara lestari.
  - Meningkatkan laju penyerapan karbon melalui pertumbuhan tegakan yang optimal.
  - Menjaga produktivitas lahan dan kesehatan ekosistem hutan produksi.

- Sistem Silvikultur yang Relevan
  - Tebang Habis dan Tanam Kembali (*Clear Cutting with Replanting*)

Umum diterapkan pada hutan tanaman energi seperti *Acacia mangium*, *Eucalyptus*, dan *Calliandra calothyrsus*. Sistem ini cocok untuk rotasi pendek dan produksi biomassa tinggi.
  - Tebang Pilih dan Pemeliharaan (*Selective Logging and Maintenance*)

Cocok untuk hutan alam produksi yang ingin mempertahankan keanekaragaman spesies dan stok karbon jangka panjang. Limbah kayu hasil tebang pilih dapat dimanfaatkan sebagai bioenergi.
  - Agroforestri Berbasis Energi (*Energy-based Agroforestry*)

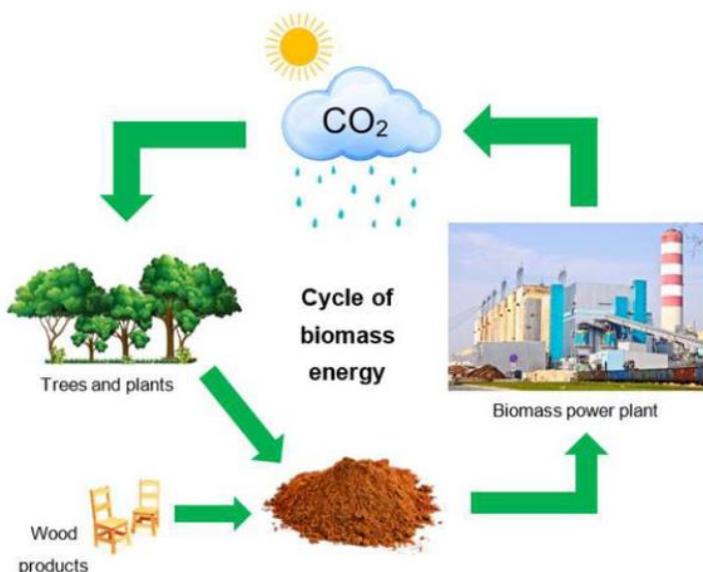
Mengombinasikan pohon penghasil biomassa dengan tanaman pangan, atau non-kayu lainnya. Sistem ini mendukung ketahanan pangan, energi, dan pendapatan masyarakat secara bersamaan.
  - Rotasi Pendek dan Intensif (*Short-Rotation Intensive Culture*)

Merancang siklus tanam 3–7 tahun dengan pemupukan dan pemeliharaan intensif untuk produksi energi. Jenis yang digunakan biasanya adalah spesies cepat tumbuh.
  - Sistem Trubusan (*Coppice System*)

Sistem ini memanfaatkan kemampuan alami pohon untuk tumbuh kembali dari tunggul (*stump*) setelah dipotong. Digunakan terutama untuk spesies pohon cepat tumbuh yang memiliki kemampuan regenerasi vegetatif tinggi. Setelah panen, pohon tidak ditebang sampai akar, tetapi hanya batangnya. Tunggul yang tersisa akan menghasilkan tunas baru yang kemudian tumbuh menjadi batang baru, memungkinkan panen berulang tanpa penanaman ulang. Spesies yang cocok: *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Eucalyptus* spp., dan *Albizia*. Siklus

rotasi pendek (2–5 tahun), tergantung pada spesies dan kondisi tumbuh.

- **Komponen Pengelolaan Hutan Produksi**
  - Pemilihan jenis pohon dengan pertumbuhan cepat, toleran terhadap kondisi marjinal, dan nilai kalor tinggi.
  - Penjarangan selektif untuk mempercepat pertumbuhan batang utama serta menghasilkan residu biomassa tambahan.
  - Pemeliharaan tapak, termasuk pengendalian gulma, pemupukan, dan perlindungan dari kebakaran hutan.
  - Rehabilitasi areal rusak dengan tanaman energi untuk meningkatkan produktivitas lahan dan penyerapan karbon.
- **Tantangan**
  - Ketergantungan terhadap satu atau dua jenis pohon dalam hutan tanaman dapat menurunkan ketahanan ekosistem.
  - Konflik lahan antara kebutuhan bioenergi dan konservasi atau pertanian pangan.
  - Keterbatasan kapasitas teknis dan kelembagaan di tingkat tapak.
- **Peluang**
  - Sertifikasi hutan energi berkelanjutan sebagai nilai tambah ekonomi dan ekologi.
  - Dukungan kebijakan pemerintah dan program dekarbonisasi untuk pengembangan hutan energi.
  - Integrasi dengan pasar karbon, di mana hutan produksi berkontribusi terhadap penurunan emisi



Gambar 13 Konsep Hutan Tanaman Energi  
(Sumber; Kalak, 2023)

## 10.2. Model Agroforestri dan Energi Terbarukan

Agroforestri adalah sistem penggunaan lahan yang mengintegrasikan pohon dan tanaman pertanian atau ternak pada suatu lahan yang sama secara berkelanjutan. Dalam konteks bioenergi dan jasa karbon, model agroforestri tidak hanya menyediakan bahan baku energi dari biomassa, tetapi juga mendukung konservasi karbon, ketahanan pangan, dan penghidupan masyarakat.

- Konsep Agroforestri Energi

Agroforestri energi menggabungkan:

- Tanaman pohon energi: seperti *Calliandra*, *Gliricidia*, *Jatropha*, atau *Eucalyptus* untuk kayu bakar atau biofuel.
- Tanaman pangan atau hortikultura: untuk mendukung ketahanan pangan lokal.
- Tanaman penutup tanah atau pakan ternak: yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dan diversifikasi produksi.

- Manfaat Agroforestri untuk Bioenergi dan Karbon
  - Pasokan biomassa: melalui sistem rotasi pendek dan panen berkelanjutan.
  - Peningkatan simpanan karbon: baik di biomassa hidup maupun dalam tanah.
  - Pengendalian erosi dan konservasi air: sistem akar pohon meningkatkan struktur tanah.
  - Diversifikasi ekonomi: meningkatkan pendapatan petani dari berbagai komoditas.
  - Perlindungan keanekaragaman hayati: melalui lanskap mosaik yang ramah lingkungan.
- Contoh Model Agroforestri Energi
  - Model Tumpangsari Energi-Pangan-Budidaya Lebah
    - Kombinasi *Calliandra* atau *Gliricidia* dengan jagung, kedelai, atau sayuran. Bunga tanaman untuk pakan lebah
    - Pohon dipangkas berkala untuk bahan bakar, daun sebagai pupuk hijau atau pakan.



Gambar 14 Kaliandra sebagai Bahan Baku Bioenergi Juga Dijadikan Pakan Lebah

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2014)

- Agrosilvopastura Energi
  - Pohon energi + tanaman rumput pakan + ternak.
  - Limbah ternak dapat dimanfaatkan untuk biogas; pohon menyediakan kayu bakar.
- Agroforestri Pinggir Hutan (*Buffer Zone*)
  - Penanaman tanaman energi oleh masyarakat di sekitar kawasan konservasi.
  - Mengurangi tekanan terhadap hutan primer dan mendukung energi lokal.
- Sistem *Alley Cropping* Bioenergi
  - Tanaman energi ditanam dalam barisan (*alley*), di sela-sela tanaman pangan musiman.
  - Akses terhadap cahaya, air, dan nutrisi diatur agar saling mendukung.
- Tantangan
  - Kesesuaian spesies dan desain agroforestri dengan kondisi iklim dan sosial-ekonomi lokal.
  - Keterbatasan lahan produktif dan persaingan ruang antara energi dan pangan.
  - Kurangnya pelatihan teknis dan insentif finansial bagi petani.
- Dukungan dan Peluang
  - Program rehabilitasi lahan kritis dan pengembangan energi desa terbarukan.
  - Insentif karbon melalui proyek agroforestri berbasis karbon.
  - Peluang kerjasama dengan sektor swasta dan lembaga donor dalam skema ESG.



Gambar 15 Tanaman Gamal Berpotensi Dikembangkan sebagai Kebun Energi Dengan Sistem Agroforestry  
(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2016)

### 10.3. Strategi Konservasi Karbon dalam Lanskap Hutan

Konservasi karbon dalam lanskap hutan adalah pendekatan terpadu untuk menjaga dan meningkatkan stok karbon melalui perlindungan ekosistem alami, pemulihan hutan, dan pengelolaan lanskap secara berkelanjutan. Strategi ini penting untuk mendukung tujuan dekarbonisasi dan ketahanan iklim, terutama dalam konteks perubahan penggunaan lahan dan degradasi hutan.

- Perlindungan Hutan Alam dan Ekosistem Karbon Tinggi
  - Menjaga hutan primer, hutan gambut, dan mangrove yang memiliki cadangan karbon tinggi.
  - Penetapan kawasan konservasi berbasis karbon melalui zonasi lanskap (*high carbon stock areas*).
  - Penguatan pengawasan dan penegakan hukum terhadap deforestasi ilegal.

- Restorasi dan Rehabilitasi Hutan
  - Reforestasi dan aforestasi menggunakan spesies asli dan adaptif untuk meningkatkan stok karbon.
  - Rehabilitasi lahan terdegradasi melalui pendekatan berbasis masyarakat.
  - Penggunaan biochar dan teknik agroekologi untuk meningkatkan karbon tanah.
- Pendekatan Lanskap Terpadu (Integrated Landscape Approach)
  - Menggabungkan fungsi konservasi, produksi, dan jasa ekosistem dalam satu sistem pengelolaan ruang.
  - Mendorong kolaborasi multipihak: pemerintah, masyarakat, sektor swasta, dan LSM.
  - Mengembangkan rencana tata guna lahan yang mempertimbangkan nilai karbon dan biodiversitas.
- Pemantauan dan Verifikasi Karbon Berbasis Lanskap
  - Menggunakan teknologi seperti citra satelit, LiDAR, dan drone untuk pemantauan tutupan lahan dan stok karbon.
  - Integrasi data spasial dengan sistem informasi geografi (SIG) untuk perencanaan konservasi.
  - Pelaporan berbasis standar internasional (IPCC, VCS, Plan Vivo) untuk proyek karbon.
- Integrasi dengan Skema Pembiayaan Karbon
  - Strategi konservasi dapat terhubung dengan skema REDD+, mekanisme offset karbon, dan pendanaan iklim (Green Climate Fund, BioCarbon Fund).
  - Menyediakan insentif finansial kepada pemangku kepentingan lokal yang menjaga tutupan hutan.
  - Menyusun kerangka pembagian manfaat yang adil dan transparan.
- Peran Masyarakat Lokal dan Kearifan Tradisional
  - Melibatkan masyarakat adat dalam perlindungan wilayah adat dan kawasan bernilai konservasi tinggi.

- Mendorong adopsi praktik tradisional yang selaras dengan konservasi karbon, seperti larangan tebang pohon di kawasan sakral.
- Pemberdayaan ekonomi berbasis jasa lingkungan, seperti ekowisata dan hasil hutan bukan kayu.

#### **10.4. Perencanaan Penggunaan Lahan Multipihak**

Perencanaan penggunaan lahan multipihak adalah pendekatan kolaboratif dalam mengelola ruang dan sumber daya alam secara inklusif, berkelanjutan, dan adaptif. Tujuannya adalah menciptakan keseimbangan antara konservasi, produksi, dan kepentingan sosial-ekonomi dalam suatu lanskap, termasuk untuk pengembangan bioenergi dan konservasi karbon.

- Pendekatan Partisipatif dan Kolaboratif
  - Melibatkan berbagai pemangku kepentingan: pemerintah, masyarakat adat, pelaku usaha, akademisi, dan LSM sejak tahap perencanaan awal.
  - Menyusun rencana tata guna lahan melalui musyawarah, pemetaan partisipatif, dan forum multipihak.
  - Mendorong keadilan spasial dan sosial dalam alokasi serta akses terhadap lahan.
- Integrasi Tujuan Konservasi dan Produksi
  - Menggabungkan kebutuhan produksi bioenergi dengan perlindungan stok karbon, keanekaragaman hayati, dan jasa ekosistem.
  - Penetapan zona produksi, konservasi, dan penggunaan lain berdasarkan fungsi ekologis dan kapasitas daya dukung.
  - Mendorong integrasi antara kawasan hutan, pertanian, dan pemukiman dalam satu sistem lanskap.

- Dukungan Data Spasial dan Teknologi
  - Penggunaan sistem informasi geospasial (SIG), citra satelit, dan teknologi *remote sensing* untuk pemetaan tutupan lahan, potensi bioenergi, dan nilai karbon.
  - Pengembangan sistem pemantauan berbasis lanskap yang mendukung transparansi dan evaluasi kebijakan.
  - Integrasi data nasional dan lokal melalui platform terpadu (contoh: *One Map Policy* Indonesia).
- Penyesuaian terhadap Konteks Lokal dan Regulasi
  - Memperhatikan hak-hak tenurial masyarakat adat dan lokal dalam perencanaan wilayah.
  - Menyesuaikan dengan kebijakan tata ruang nasional dan daerah, serta peraturan sektoral (kehutanan, energi, lingkungan).
  - Penguatan lembaga tata kelola lokal untuk pelaksanaan rencana yang efektif.
- Mekanisme Resolusi Konflik Lahan
  - Menyediakan platform mediasi dan fasilitasi untuk menyelesaikan konflik kepemilikan atau klaim atas lahan.
  - Menetapkan skema perlindungan lahan kritis dan kawasan bernilai konservasi tinggi.
  - Mendorong perjanjian penggunaan lahan jangka panjang berbasis konsensus.
- Monitoring, Evaluasi, dan Penyesuaian
  - Menetapkan indikator kinerja lingkungan dan sosial-ekonomi dalam implementasi rencana penggunaan lahan.
  - Melakukan evaluasi berkala untuk mengakomodasi perubahan kondisi dan kebutuhan.
  - Menyesuaikan strategi pengelolaan bioenergi dan konservasi karbon berdasarkan hasil pemantauan.



SEBELAS

## **TRANSFORMASI MENUJU MASA DEPAN BERKELANJUTAN**

### **11.1. Ringkasan Temuan Utama**

Setelah menelaah berbagai aspek dalam pengelolaan bioenergi dan jasa lingkungan karbon hutan, terdapat sejumlah temuan penting yang menjadi landasan strategis untuk pengembangan selanjutnya:

- Peran Strategis Hutan dalam Mitigasi Iklim
  - Hutan merupakan penyerap karbon yang sangat penting dalam siklus global, baik melalui penyerapan CO<sub>2</sub> oleh vegetasi hidup maupun penyimpanan karbon dalam tanah, nekromassa, dan serasah.
  - Perubahan tata guna lahan, deforestasi, dan degradasi lahan masih menjadi tantangan besar yang mengurangi kapasitas penyerapan karbon.

- Potensi Besar Bioenergi Berbasis Hutan
  - Indonesia dan negara-negara tropis memiliki potensi besar dalam pemanfaatan biomassa hutan untuk bioenergi, baik dari limbah hasil hutan (seperti ranting, serbuk gergaji, dan cabang) maupun dari sistem agroforestri dan hutan tanaman.
  - Teknologi pemrosesan bioenergi (seperti gasifikasi, pirolisis, dan pembakaran langsung) terus berkembang dan memungkinkan efisiensi energi yang lebih tinggi.
- Skema Karbon dan Regulasi Semakin Terstruktur
  - Pasar karbon, baik wajib maupun sukarela, mulai tumbuh di Indonesia, didukung oleh kebijakan nasional seperti NDC, REDD+, FOLU Net Sink, dan pendirian Bursa Karbon oleh BEI.
  - Namun, implementasi kebijakan masih menghadapi tantangan seperti ketimpangan data, kapasitas lokal, serta koordinasi antarsektor.
- Dampak Sosial dan Lingkungan Perlu Diperhatikan
  - Ekspansi bioenergi tanpa tata kelola yang baik berpotensi menimbulkan konflik lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, serta terganggunya ketahanan pangan.
  - Peran masyarakat adat dan lokal sangat krusial dalam keberhasilan program, terutama dalam menjaga kesinambungan konservasi dan produksi.
- Kebutuhan Inovasi dan Pendekatan Lanskap
  - Pemanfaatan teknologi seperti AI, *remote sensing*, dan sistem informasi geospasial (SIG) penting untuk monitoring karbon dan efisiensi tata guna lahan.
  - Pendekatan multipihak dalam perencanaan lanskap menjadi kunci untuk mengintegrasikan produksi bioenergi, konservasi karbon, dan kesejahteraan masyarakat.

## 11.2. Tantangan Utama dan Peluang ke Depan

Dalam pengembangan bioenergi hutan dan jasa lingkungan karbon, terdapat sejumlah tantangan mendasar yang harus diatasi, namun juga terbuka berbagai peluang yang dapat dimanfaatkan untuk menciptakan solusi yang berkelanjutan dan inklusif.

### Tantangan Utama

- Ketidakpastian Kebijakan dan Regulasi
  - Inkonsistensi dalam regulasi kehutanan, energi terbarukan, dan perdagangan karbon dapat menghambat investasi jangka panjang.
  - Koordinasi antarkementerian/lembaga masih lemah, terutama dalam implementasi program lintas sektor.
- Kapasitas Teknis dan Kelembagaan
  - Keterbatasan sumber daya manusia, infrastruktur pemantauan karbon, serta kapasitas institusi lokal menjadi hambatan dalam pelaksanaan proyek bioenergi dan karbon.
- Konflik Lahan dan Hak Tenurial
  - Persoalan kepemilikan lahan, pengakuan hak masyarakat adat, dan tumpang tindih izin konsesi dapat memicu konflik sosial dan menghambat pengembangan proyek.
- Risiko terhadap Lingkungan dan Keanekaragaman Hayati
  - Jika tidak dikelola secara berkelanjutan, pemanfaatan biomassa skala besar dapat menyebabkan degradasi hutan, konversi ekosistem alami, dan hilangnya spesies penting.
- Pasar Karbon yang Belum Stabil
  - Mekanisme pasar karbon di Indonesia masih dalam tahap awal dengan fluktuasi harga, keterbatasan partisipan, dan minimnya transparansi.

### Peluang ke Depan

- Transformasi Energi dan Komitmen Global

- Dorongan global menuju Net Zero Emissions membuka peluang besar bagi negara-negara tropis untuk menjadi penyedia jasa karbon dan energi hijau dunia.
- Penguatan Pasar Karbon Nasional
  - Pengembangan Bursa Karbon Indonesia, jika didukung transparansi dan akuntabilitas, dapat menjadi instrumen utama dalam mendorong investasi hijau.
- Inovasi Teknologi dan Digitalisasi
  - Pemanfaatan kecerdasan buatan (AI), sensor jarak jauh, dan big data dalam pemantauan karbon dan pengelolaan hutan meningkatkan efisiensi dan akurasi pengambilan keputusan.
- Pendekatan Lanskap dan Keterlibatan Masyarakat
  - Integrasi konservasi, produksi, dan kesejahteraan masyarakat dalam satu pendekatan lanskap menjadi kunci keberhasilan jangka panjang.
- Kolaborasi Internasional dan Pembiayaan Hijau
  - Dukungan dari skema pendanaan internasional seperti *Green Climate Fund* (GCF), *Forest Carbon Partnership Facility* (FCPF), dan inisiatif swasta membuka peluang pembiayaan inovatif.

### **11.3. Rekomendasi Kebijakan dan Praktik Terbaik**

Untuk mewujudkan pemanfaatan bioenergi hutan dan jasa karbon secara berkelanjutan, inklusif, dan efektif, dibutuhkan pendekatan kebijakan dan praktik lapangan yang terintegrasi, partisipatif, serta berbasis ilmu pengetahuan. Berikut beberapa rekomendasi strategis:

#### **Rekomendasi Kebijakan**

- Integrasi Kebijakan Multi-sektor
  - Sinkronisasi antara kebijakan kehutanan, energi, lingkungan hidup, dan tata ruang diperlukan untuk menghindari tumpang tindih dan konflik kepentingan.

- Penetapan kawasan prioritas bioenergi dan karbon melalui pendekatan lanskap.
- Penguatan Regulasi dan Insentif
  - Mendorong penyempurnaan regulasi pasar karbon, standar MRV (Monitoring, Reporting, and Verification), serta mekanisme insentif fiskal dan non-fiskal untuk proyek karbon dan bioenergi.
  - Memberikan perlindungan hukum terhadap hak masyarakat adat dan lokal atas lahan dan sumber daya.
- Peningkatan Kapasitas dan Kelembagaan
  - Pelatihan teknis untuk petugas lapangan, pemerintah daerah, dan masyarakat lokal dalam manajemen bioenergi dan jasa karbon.
  - Pembentukan unit kerja lintas sektor untuk mendukung implementasi di tingkat tapak.
- Transparansi dan Akuntabilitas Pasar Karbon
  - Pengembangan sistem pelaporan terbuka dan terverifikasi untuk semua unit kredit karbon yang diperdagangkan di bursa nasional dan internasional.
- Perluasan Dukungan Pendanaan Hijau
  - Memfasilitasi akses proyek-proyek lokal terhadap dana internasional seperti Green Climate Fund (GCF), LEAF Coalition, dan Climate Investment Funds (CIF).

### **Praktik Terbaik Lapangan**

- Pemanfaatan Limbah Hutan
  - Mendorong pemanfaatan limbah biomassa seperti ranting, serbuk gergaji, dan cabang sebagai sumber energi, tanpa merusak ekosistem utama.
- Model Agroforestri Energi
  - Mengembangkan kombinasi tanaman energi (misalnya Kaliandra, Jarak, Gamal) dengan tanaman pangan atau kehutanan sebagai solusi multiproduktif.
- Keterlibatan Komunitas Lokal

- Memberdayakan masyarakat sebagai pelaku utama dalam pemantauan karbon, pengelolaan bioenergi, dan pemanfaatan hasil hutan bukan kayu (HHBK).
- Pemanfaatan Teknologi Digital
  - Mengintegrasikan drone, citra satelit, dan platform berbasis AI untuk pemetaan biomassa, deteksi degradasi hutan, dan pelaporan karbon secara real-time.
- Penerapan Prinsip FPIC (Free, Prior and Informed Consent)
  - Setiap proyek karbon dan bioenergi harus melalui konsultasi yang transparan dan partisipatif dengan masyarakat yang terdampak langsung

#### **11.4. Visi Jangka Panjang Pemanfaatan Bioenergi Hutan yang Berkelanjutan**

Pemanfaatan bioenergi hutan ke depan tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan energi alternatif dan mendukung dekarbonisasi, tetapi juga menjadi bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan, konservasi keanekaragaman hayati, dan peningkatan kesejahteraan masyarakat.

Visi jangka panjang tersebut mencakup beberapa aspek berikut:

- Transisi Energi yang Inklusif dan Berkeadilan  
Bioenergi hutan harus menjadi bagian dari bauran energi nasional yang mendukung transisi energi bersih. Pemanfaatannya perlu menjamin:
  - Keadilan akses bagi masyarakat pedesaan dan daerah tertinggal.
  - Pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil secara bertahap.
  - Penurunan emisi gas rumah kaca secara signifikan pada sektor energi dan lahan.
- Restorasi Lanskap dan Ketahanan Ekosistem  
Pemanfaatan bioenergi berbasis hutan harus bersifat regeneratif:
  - Mendukung program rehabilitasi hutan dan lahan terdegradasi.

- Menjaga integritas ekologis dengan pendekatan lanskap berkelanjutan.
- Menyediakan manfaat iklim ganda: mitigasi dan adaptasi.
- Pusat Inovasi Hijau Berbasis Hutan  
Hutan Indonesia harus menjadi pusat pengembangan teknologi hijau:
  - Penguatan litbang dan inkubasi inovasi bioenergi, dari skala komunitas hingga industri.
  - Kolaborasi antara akademisi, pelaku usaha, pemerintah, dan masyarakat adat.
  - Pemanfaatan teknologi cerdas seperti *Internet of Things* (IoT), *remote sensing*, dan AI untuk monitoring dan efisiensi produksi energi.
- Integrasi Kehutanan Sosial dan Bioekonomi  
Pemanfaatan bioenergi menjadi bagian dari sistem bioekonomi yang inklusif:
  - Integrasi program kehutanan sosial dalam rantai pasok bioenergi.
  - Penciptaan lapangan kerja hijau dan usaha berbasis desa.
  - Penguatan peran masyarakat adat dalam pengelolaan dan perlindungan hutan.
- Konektivitas Global untuk Iklim  
Bioenergi dan jasa karbon hutan Indonesia harus terhubung secara aktif dengan pasar dan inisiatif global:
  - Partisipasi dalam perdagangan karbon internasional yang kredibel.
  - Kontribusi nyata terhadap target iklim global, termasuk Perjanjian Paris dan *Sustainable Development Goals* (SDGs).
  - Posisi Indonesia sebagai pemimpin di sektor energi terbarukan hutan tropis.

Visi ini membutuhkan kepemimpinan politik yang kuat, dukungan lintas sektor, serta partisipasi aktif masyarakat dan dunia usaha. Dengan strategi yang tepat, hutan Indonesia dapat menjadi tulang punggung solusi energi dan iklim dunia.



DUA BELAS

## **MENATA ULANG RELASI HUTAN, ENERGI, DAN MASA DEPAN**

Di tengah krisis iklim yang kian mendesak, pertumbuhan populasi yang terus meningkat, dan kebutuhan energi yang tak kunjung surut, buku ini mengajak kita untuk berhenti sejenak dan merenungkan: ke mana arah kita membawa hutan sebagai sumber kehidupan dan energi?

Bioenergi dan jasa lingkungan karbon bukan sekadar konsep teknis atau instrumen ekonomi. Lebih dari itu, keduanya mencerminkan cara pandang kita terhadap alam, apakah kita melihatnya sebagai sekadar objek eksploitasi, atau sebagai mitra dalam menjaga keseimbangan bumi. Hutan bukan hanya penyedia biomassa, melainkan penopang keseimbangan karbon global, rumah bagi keanekaragaman hayati, serta ruang hidup dan spiritual bagi banyak komunitas adat.

Refleksi ini menegaskan bahwa masa depan energi tidak hanya berbicara tentang efisiensi dan teknologi, tetapi juga menyangkut etika ekologis, keadilan sosial, dan keberlanjutan jangka panjang. Kita perlu bertransformasi dari paradigma eksploitasi menuju paradigma regeneratif, dari hanya mengambil, menjadi merawat dan mengembalikan.

Buku ini merupakan hasil dari pengalaman lebih dari 15 tahun di lapangan, berakar dari riset ilmiah, pemberdayaan masyarakat, kolaborasi dengan para ahli, institusi pemerintah, keterlibatan dalam proyek strategis nasional dan proyek internasional, hingga peran sebagai konsultan sektor swasta baik PMDN dan PMA dalam investasi di sektor bioenergi dan jasa lingkungan karbon. Dari situ lahir kesadaran bahwa transisi energi hijau tidak bisa berjalan sendiri; ia harus tumbuh dari akar pengetahuan lokal, terhubung dengan kebijakan nasional, dan bergerak bersama irama perubahan global.

Pada akhirnya, kita dihadapkan pada sebuah pilihan mendasar: terus memperlakukan hutan sebagai sumber daya yang habis pakai, atau mulai membangunnya sebagai mitra sejati dalam merawat bumi. Masa depan planet ini bergantung pada cara kita mendefinisikan relasi manusia dan hutan, agar tetap lestari, adil, dan layak huni bagi kita dan generasi mendatang.

*Butuh waktu lima belas tahun, bukan karena langkah kami lambat, melainkan karena setiap akar yang kami tanam harus menjangkau dalam,*

*mencari air hikmah di kedalaman tanah pengalaman.*

*Butuh waktu lima belas musim hujan dan kemarau,*

*karena pengetahuan bukan benih instan,*

*ia tumbuh perlahan, mengeras batangnya lewat cuaca yang tak selalu ramah.*

*Kami tidak sedang menulis di atas kertas,*

*kami menulis di atas jejak-jejak langkah,*

*di punggung bukit yang sunyi,  
di percakapan panjang dengan petani hutan dan deru mesin  
penebang,  
di lembar-lembar laporan yang tak terbaca publik,  
dan di ruang rapat tempat kebijakan lahir dan kadang patah.  
Butuh waktu lima belas tahun,  
karena untuk menyatukan ilmu, nurani, dan kebijakan,  
harus ada jeda agar semuanya bisa saling mendengar.  
Dan mungkin, seperti halnya hutan yang memerlukan waktu  
untuk menjelma rimba yang utuh,  
kami pun butuh waktu untuk tumbuh,  
hingga tulisan ini tak lagi sekedar kata,  
melainkan gema dari perjalanan yang sungguh-sungguh dijalani.*

Dan ketika suatu hari nanti, anak-cucu kita bertanya:

*"Apa yang kau lakukan saat bumi mulai lelah?"*

Kita ingin bisa menjawab dengan tenang:

*"Kami menanam, merawat, dan mengembalikan napas bumi,  
dengan api yang tak membakar, dengan energi yang tak melukai,  
dan dengan cinta yang tidak mengambil lebih dari yang  
dibutuhkan."*

Karena hutan bukan warisan, tapi titipan. Dan bumi bukan sekedar sumber daya, tapi rumah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar, L., Granat, M., & Owren, C. (2020). *Roots for the future: The landscape and way forward on gender and climate change*. IUCN Global Gender Office. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.03.en>
- Agustin, T., Chaerul, M., Anggraini, F. J., Mohamad, E., Amanda, Z., Maharsi, Retno, Daud, M., Mustaqim, A., & Koedoes, Y. A. (2025). *Pencemaran Udara: Sumber, Dampak, dan Mitigasi*. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Almugirah, A., M Daud, Hikmah, S. Samrin. 2024. Strategi Pengelolaan Ruang Terbuka Hijau (RTH) Taman Rekreasi Lamalaka Kecamatan Bantaeng Kabupaten Bantaeng. *Journal of Forest Services* 2 (1) : 33-40
- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2020). Blue carbon ecosystems under threat: Mangrove deforestation and degradation. *Sustainability Science*, 15(1), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00749-z>
- Alongi, D. M. (2020). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 12, 195–215. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010516>
- Anwar, K., Anwar, A., Husain, I., Yamin, M., Lensari, D., Karim, F. F., Rumondang, J., Dinanty, F., Gusriani, Ika, Alfajrin, Achmad Chalid Afif, Handayani, R., Daud, M., & Afiyanti, M. (2025).

- Bioteknologi dalam Kehutanan. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Anwar, K., Anwar, A., Husain, I., Yamin, M., Lensari, D., Karim, F. F., Rumondang, J., Dinanty, F., Gusriani, Ika, Alfajrin, Achmad Chalid Afif, Handayani, R., Daud, M., & Afiyanti, M. (2025). Bioteknologi dalam Kehutanan. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Baharudddin and Daud, M. (2013). Allometric Equations for Estimating The Total Biomass and Carbon Stock in Parring Bamboo (*Gigantochloa atter*) from Community Forests. The Fifth International Symposium Indonesian Wood Research Society (IWoRS). Balikpapan, 7-9 November 2013
- Baharudddin and M. Daud. (2019). The Comparison Of Some Equation Model Estimators Of Biomass In The Bamboo Betung Stand (*Dendrocalamus asper*) From Community Forest In Tana Toraja Regency, South Sulawesi Province, Indonesia. Ist ASEAN Bamboo Congress for Climate Change Adaptation Towards Environmental Sustainability and Economic Resilence. Iloilo City, Philippine, 13 th Day of August 2019
- Baharudddin dan M. Daud. (2018). Model Dinamik Simulasi Pola Pemanenan Optimal Dalam Pengelolaan Bambu Rakyat Berkelanjutan Di Kecamatan Tanralili, Kabupaten Maros. *Jurnal Matoa*. 6 (12): 85-99.
- Baharudddin, & Daud, M. (2013). Allometric equations for estimating the total biomass and carbon stock in Parring bamboo (*Gigantochloa atter*) from community forests. In The Fifth International Symposium Indonesian Wood Research Society (IWoRS): Utilization of Renewable Natural Resources towards Welfare and Environmental Sustainability, Balikpapan, 7–9 November 2013.
- Baharudddin, & Daud, M. (2018). Model Dinamik Simulasi Pola Pemanenan Optimal Dalam Pengelolaan Bambu Rakyat Berkelanjutan Di Kecamatan Tanralili, Kabupaten Maros. *Jurnal Matoa*, 6(1), 85–99.

- Baharuddin, & Daud, M. (2019). The comparison of some equation model estimators of biomass in the bamboo Betung stand (*Dendrocalamus asper*) from community forest in Tana Toraja Regency, South Sulawesi Province, Indonesia. In 1st ASEAN Bamboo Congress for Climate Change Adaptation Towards Environmental Sustainability and Economic Resilience. Iloilo Convention Center, Iloilo City, Philippines, 13 August 2019.
- Baharuddin, & Daud, M. (2025). Hutan Bambu: Pilar dalam Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim. Solok: PT Mafy Media Literasi Indonesia.
- Baharuddin, Daud, M., Sanusi, D., & Mangalla, A. (2014). Model penduga biomassa dan cadangan karbon pada tegakan bambu betung (*Dendrocalamus asper*) pada hutan bambu rakyat di Kabupaten Tana Toraja. *Jurnal Matoa*, 2(3), 34–45.
- Baharuddin, Sanusi, D., Daud, M., & Ferial. (2014). Potensi biomassa, cadangan karbon dan serapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) Serta Persamaan Allometrik Penduga Biomassa pada Tegakan Bambu Betung (*Dendrocalamus asper*) pada Hutan Bambu Rakyat di Kabupaten Tana Toraja. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian HHBK*, 1(1), 415–428.
- Baharuddin, Sanusi, D., Putranto, B., & Daud, M. (2015). Analisis pendapatan petani hutan bambu rakyat di Kecamatan Tanralili, Kabupaten Maros. *Jurnal Matoa*, 3(4), 1–15.
- Baharuddin, Sanusi, D., Putranto, B., & Daud, M. (2015). Analisis sosial ekonomi dan pola pengelolaan hutan bambu rakyat di Kecamatan Tanralili, Kabupaten Maros. In *Seminar Nasional Sewindu BPTHHBK Mataram*. Mataram, 1 Oktober 2015.
- Baharuddin. (2013). Analisis Potensi Tegakan Bambu Parring (*Gigantochloa atter*) sebagai Penyerap dan Penyimpan Karbon (Studi Kasus Pengelolaan Hutan Bambu Rakyat di Tanralili Kabupaten Maros (Disertasi). Universitas Hasanuddin.

- BAPPENAS. (2021). *Low Carbon Development: A Paradigm Shift Towards a Green Economy in Indonesia*. Ministry of National Development Planning (BAPPENAS).
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, *42*(1), 1–20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., & Shea, D. M. (2006). Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, *19*(1). <https://doi.org/10.1029/2004GB002299>
- Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A., & Weber, T. (2019). Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, *568*(7752), 327–335. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2>
- Burkholder, J. M., Tomasko, D. A., & Touchette, B. W. (2007). Seagrasses and eutrophication. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *350*(1–2), 46–72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.024>
- Claustre, H., Johnson, K. S., & Takeshita, Y. (2020). Observing the global ocean with biogeochemical-Argo. *Annual Review of Marine Science*, *12*, 23–48. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010956>
- Das, S., & Vincent, J. R. (2009). Mangroves protected villages and reduced death toll during Indian super cyclone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(18), 7357–7360. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810440106>
- Daud, M. (2010) Produksi Bioetanol Dari Beberapa Jenis Kayu Tropis Melalui Proses Sakarifikasi dan Fermentasi Secara Simultan. Institut Pertanian Bogor.
- Daud, M. (2014) Bioenergi dari Bahan Non Pangan: Memanen Bensin dari Hutan untuk Ketahanan Energi Indonesia. 1st edn. Makassar: Philosophia Press.

- Daud, M. H. Latifah, H. Basalamah dan Sarman. (2014) 'Potensi Biomassa, Cadangan Karbon dan Serapan Karbon Dioksida Pada Kebun Raya Massenrempulu Enrekang', *Jurnal Matoa*, 2(3), pp. 54–63.
- Daud, M., & Daties, D. J. (2023). The distribution and dynamics of carbon in community forests in Kahu District, Bone Regency based on dynamic system modeling. In 1st International Conference on Sustainable Tropical Forest Management. Bogor, 3–5 November 2023.
- Daud, M., Baharuddin, Hikmah, & S. Samrin. (2025). *Bioenergi: Energi Hijau dari Alam*. Bone: Alinea Indonesia.
- Daud, M., Baharuddin, Hikmah, & Samsul Samrin. (2025). *Bioenergi: Energi Hijau dari Alam*. Bone: Alinea Indonesia.
- Daud, M., Hikmah and Imran, J. (2015) 'Potensi Cadangan Dan Serapan Karbon Dioksida Di Hutan Pendidikan Universitas Muhammadiyah Makassar Desa Bissoloro Kabupaten Gowa', *Jurnal Matoa*, 3(5), pp. 1–11.
- Daud, M., Hikmah, & Azis, A. (2022). Potensi Pemanfaatan Bambu Tali (*Gigantochloa Apus*) Pada Hutan Rakyat Di Desa Leu Kecamatan Bolo Kabupaten Bima. *JOPFE Journal*, 2(1), 1–7.
- Daud, M., Hikmah, & Fiprianto, L. (2018). Kontribusi bioenergi dari hutan rakyat untuk pemenuhan kebutuhan energi masyarakat dalam mitigasi perubahan iklim di Kecamatan Baraka, Kabupaten Enrekang. *Prosiding Workshop Nasional Ahli Perubahan Iklim Indonesia*. Makassar, 4 Juli 2018. Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim.
- Daud, M., Hikmah, H., Astuti, S., Samri, S., & Baharuddin, B. (2023). Productivity and Yield of Patchouli (*Pogostemon cablin* Benth) in Community Forest using Agroforestry Patterns in Tommo District, Mamuju Regency, West Sulawesi Province. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1379(2024), 012038.
- Daud, M., Hikmah, Haerana, Baharuddin. (2018) 'Potensi Produksi Oksigen Pada Tegakan Bambu Parring (*Gigantochloa atter*)

- Di Hutan Rakyat Kecamatan Tompobulu Kabupaten Maros', *Jurnal Matoa*, 6(12), pp. 27–39.
- Daud, M., Hikmah, Lutfi Fiprianto B. (2018) 'Kontribusi Bioenergi dari Hutan Rakyat untuk Pemenuhan Kebutuhan Energi Masyarakat dalam Mitigasi Perubahan Iklim di Kecamatan Baraka, Kabupaten Enrekang', *Workshop Ahli Perubahan Iklim Regional Sulawesi*, 1(1), pp. 189–196.
- Daud, M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2012). Bioethanol production from several tropical wood species using simultaneous saccharification and fermentation processes. *Wood Research Journal*, 3(2), 106–116.
- Daud, M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2012). Biokonversi bahan berlignoselulosa menjadi bioetanol menggunakan *Aspergillus niger* dan *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Perennial*, 8(1), 43–51.
- Daud, M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2013). Pemanfaatan batang kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) menjadi bioetanol dengan perlakuan pendahuluan menggunakan proses kraft. *Jurnal Matoa*, 1(2), 17–27.
- Daud, M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2014). Produktivitas bioetanol dari kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*) dengan perlakuan enzimatis. *Jurnal Matoa*, 2(3), 11–24
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Duarte, C. M. (2002). The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation*, 29(2), 192–206. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000127>

- Erftemeijer, P. L. A., & Lewis, R. R. R. (2006). Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12), 1553–1572. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.09.006>
- Falkowski, P. G., & Raven, J. A. (2007). *Aquatic photosynthesis* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V. (2008). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200–206. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>
- Fauzi, A., & Rahman, H. (2021). Integrasi pendekatan ekosistem dalam tata kelola wilayah pesisir: Studi kasus di Kabupaten Demak. *Jurnal Ilmu Kelautan Indonesia*, 26(1), 45–56. <https://doi.org/10.14710/jurnalilmukelautan.26.1.45-56>
- Fonseca, M. S., Kenworthy, W. J., & Thayer, G. W. (1998). Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters. *NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No. 12*. NOAA Coastal Ocean Office.
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., ... & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Friess, D. A., Thompson, B. S., Brown, B., Amir, A. A., Cameron, C., Koldewey, H. J., & Sasmito, S. D. (2020). Policy challenges and approaches for the conservation of mangrove forests in Southeast Asia. *Conservation Biology*, 34(2), 259–269. <https://doi.org/10.1111/cobi.13321>
- Gattuso, J. P., Magnan, A. K., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., ... & Turley, C. (2018). Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 5, 337. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>

- Guidi, L., Jackson, G. A., Stemmann, L., Miquel, J. C., Picheral, M., & Gorsky, G. (2015). Relationship between particle size distribution and flux in the mesopelagic zone. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 104, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.06.005>
- Hasanuddin, I. Sribianti, M. Daud and Saharuddin. 2021. The Level of Damage and Estimation of Rehabilitation Value in The Lantebung Mangrove Ecotourism, Makassar City. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 886 (2021) 012106: 1-6. doi:10.1088/1755-1315/886/1/012106
- Herr, D., Landis, E., & Himes-Cornell, A. (2017). *Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon*. Gland, Switzerland: IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.13.en>
- Herr, D., von Unger, M., & Laffoley, D. (2017). Blue carbon policy framework 2.0: Leveraging blue carbon for climate and coastal resilience. *IUCN and Conservation International*.
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., ... Pidgeon, E. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- IOCCG (International Ocean Colour Coordinating Group). (2014). *Phytoplankton functional types from space*. In S. Sathyendranath (Ed.), *Reports of IOCCG*, No. 15. <http://www.ioccg.org>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, ed.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Kemenhut. 2010. Penentuan Tingkat Referensi Emisi (Defining Reference Emission Level). Jakarta: Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan, Kementerian Kehutanan

- Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Holmer, M., Marbà, N., & Middelburg, J. J. (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4). <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>
- Kuhn, C. E., Costa, D. P., Goetz, K. T., & Heerah, K. (2021). Advances in biologging science: Tag design, deployment, and data analysis. *Animal Biotelemetry*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40317-021-00243-0>
- Locatelli, B., Pavageau, C., Pramova, E., & Di Gregorio, M. (2014). Integrating climate change mitigation and adaptation in agriculture and forestry: Opportunities and trade-offs. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(6), 585–598. <https://doi.org/10.1002/wcc.357>
- Lutz, M. J., Caldeira, K., Dunbar, R. B., & Behrenfeld, M. J. (2007). Seasonal rhythms of net primary production and particulate organic carbon flux to depth describe the efficiency of biological pump in the global ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C10). <https://doi.org/10.1029/2006JC003706>
- Mcleod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., ... & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Ministry of Environment and Forestry (MoEF). (2021). *Updated Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia*. Jakarta: Republic of Indonesia. Retrieved from [https://www.unfccc.int/sites/default/files/NDC/2021-07/Updated\\_NDC\\_Indonesia.pdf](https://www.unfccc.int/sites/default/files/NDC/2021-07/Updated_NDC_Indonesia.pdf)
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). Wiley.
- Murdiyarmo, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., ... & Manuri, S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate

- change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089–1092. <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Nadiarti, R., Susetiawan, Y., & Sari, A. D. (2017). Distribusi dan tutupan lamun di kawasan pesisir Bali dan tekanan antropogenik yang mempengaruhi. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(2), 445–456. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v9i2.20014>
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (Eds.). (2009). *Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon*. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7589/-Blue%20Carbon\\_%20The%20Role%20of%20Healthy%20Oceans%20in%20Binding%20Carbon-2009820.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7589/-Blue%20Carbon_%20The%20Role%20of%20Healthy%20Oceans%20in%20Binding%20Carbon-2009820.pdf)
- Polovina, J. J., Howell, E. A., & Abecassis, M. (2008). Ocean's least productive waters are expanding. *Geophysical Research Letters*, 35(3). <https://doi.org/10.1029/2007GL031745>
- Purba, B., Waris, Milawaty, Hasibuan, A., Wardhana, A. S. J., Ansya, Y. A., Tidar, F. P. P., Rais, M., Rauf, R., Bachtiar, E., Berlianti, Umam, K., Mahyuddin, Koedoes, Y. A., Marimpan, Lusiana Sulo, Hasnawi, M., Rela, Iskandar Zainuddin, Susilawaty, A., Lubis, M., Winardi, R. R., ... Fajri, R. (2025). *Teknologi Hijau dan Energi Terbarukan Untuk Masa Depan*. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Purba, B., Waris, Milawaty, Hasibuan, A., Wardhana, A. S. J., Ansya, Y. A., Tidar, F. P. P., Rais, M., Rauf, R., Bachtiar, E., Berlianti, Umam, K., Mahyuddin, Koedoes, Y. A., Marimpan, Lusiana Sulo, Hasnawi, M., Rela, Iskandar Zainuddin, Susilawaty, A., Lubis, M., Winardi, R. R., Giyanto, Prasetyo, H.A., Daud, M., Fajri, R. (2025). *Teknologi Hijau dan Energi Terbarukan Untuk Masa Depan*. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Rahayu, S., Yulianda, F., & Kartawijaya, T. (2020). Integrasi data karbon biru dalam perencanaan konservasi wilayah pesisir: Studi kasus di Kalimantan Barat. *Jurnal Pengelolaan*

- Sumberdaya Pesisir dan Lautan Indonesia*, 10(2), 135–148.  
<https://doi.org/10.15578/jpspli.10.2.2020.135-148>
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: Science and applications*. CRC Press.
- SCF. 2016. Laporan Studi Kelayakan (Detail Feasibility Study/DFS) Integrasi Pembangunan Kebun Energi dan Industri Wood Pellet di Kecamatan Kalukku, Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat. SCF, Makassar
- Setyawan, E., Sulistya, W., & Budi, S. (2020). Lahan basah pesisir Indonesia dan perubahan penggunaan lahan: Tantangan dan peluang konservasi. *Jurnal Ekosistem Pesisir*, 15(2), 115–128.
- Siikamäki, J., Sanchirico, J. N., Jardine, S. L., McLaughlin, D., & Morris, D. F. (2012). Blue carbon: Coastal ecosystems, their carbon storage, and potential for reducing emissions. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 54(6), 14–29. <https://doi.org/10.1080/00139157.2012.726127>
- Sribianti, I., Daud, M., Muthmainnah, M, T., Abdullah, A. A., & Anggreini, W. (2020). Estimasi Potensi Biomassa, Cadangan Karbon Dan Serapan Co2 Pada Beberapa Kerapatan Tegakan Mangrove Sebagai Upaya Mitigasi Perubahan Iklim. 129–136.
- Sutrisno, E., Mastuti, R., Ansya, Y. A., Daud, M., Thaariq, J., Yanti, O., Tahnur, M., Mulyati, Y., Mardhotillah, B., Iswahyudi, & Komalasari, L. (2025). Lingkungan dan Ekonomi Baru: Konsep dan Aplikasi Ekonomi Sirkular. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Sutrisno, E., Mastuti, R., Ansya, Y. A., Daud, M., Thaariq, J., Yanti, O., Tahnur, M., Mulyati, Y., Mardhotillah, B., Iswahyudi, & Komalasari, L. (2025). Lingkungan dan Ekonomi Baru: Konsep dan Aplikasi Ekonomi Sirkular. Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- UNESCO. (2021). *Education for sustainable development: A roadmap*. United Nations Educational, Scientific and Cultural

Organization.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374802>

- Unsworth, R. K. F., Hinder, S. L., Bodger, O. G., Cullen-Unsworth, L. C., & Lilley, R. J. (2019). Seagrass restoration: A critical global review. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 728. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00728>
- Volk, T., & Hoffert, M. I. (1985). Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO<sub>2</sub> changes. In E. T. Sundquist & W. S. Broecker (Eds.), *The carbon cycle and atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural variations Archean to present* (Vol. 32, pp. 99–110). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM032p0099>
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., ... & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(30), 12377–12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- Wylie, L., Sutton-Grier, A. E., & Moore, A. (2016). Keys to successful blue carbon projects: Lessons learned from global case studies. *Marine Policy*, *65*, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.12.020>

## PROFIL PENULIS



**Ir. M. Daud, S.Hut., M.Si., IPM, C.EIA, CSOPA, CETP**, lahir di Bisang, Enrekang, Sulawesi Selatan pada tanggal 29 November 1985. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar hingga menengah atas di Enrekang dan melanjutkan studi tinggi di Program Studi Kehutanan Universitas Hasanuddin (UNHAS),

lulus sarjana (S1) tahun 2007. Gelar magister (S2) diraih di Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2010. Pada tahun 2020, penulis menyelesaikan program profesi insinyur bidang Teknik Kehutanan di IPB. Saat ini, penulis menjabat sebagai Kepala Laboratorium Pemanfaatan Hasil Hutan dan Wakil Direktur Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Hutan Pendidikan Universitas Muhammadiyah Makassar. Selain itu, penulis juga merupakan Editor-in-Chief *Forest Services Journal*. Bidang keahlian penulis meliputi hasil hutan bukan kayu (HHBK), bioenergi, biomassa dan dinamika karbon hutan, mitigasi perubahan iklim, serta analisis dampak lingkungan pada pengolahan hasil hutan. Sebagai akademisi dan peneliti aktif, penulis telah mempublikasikan 83 artikel ilmiah dalam jurnal dan prosiding nasional maupun internasional, serta telah menerbitkan 15 buku referensi, 7 buku ajar dan 7 modul praktikum. Dalam bidang riset, penulis menerima hibah dari RisetMu, DIKTI, BRIN, lembaga swasta serta hibah riset internasional (Jepang, Jerman, USA, Australia dan Finlandia).

Pengalaman organisasi cukup luas, dimulai dari organisasi kepemudaan dan kemahasiswaan seperti Sylva Indonesia, HMI, KMKM, BKBK, HPMM, RIMPALA, MAKES AI-Markaz, PEMC, HEC, Tree Climber Organization (TCO). Di tingkat organisasi dan pengabdian

masyarakat, penulis aktif sebagai anggota pimpinan Lembaga Resiliensi Bencana Pimpinan Wilayah Muhammadiyah Sulawesi Selatan dan terlibat dalam berbagai organisasi profesi seperti Persatuan Insinyur Indonesia (PII), Persatuan Tenaga Ahli Lingkungan Hidup Indonesia (PERTALINDO), *Indonesian Life Cycle Assessment Network* (ILCAN), *International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO), *International Bamboo and Rattan Organization* (INBAR), Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia (MAPEKI), Komunitas Manajemen Hutan Indonesia (KOMHINDO), Masyarakat Konservasi Tanah dan Air (MKTI), serta *Climate Reality Project*.

Penulis memiliki pengalaman keterlibatan dalam berbagai kegiatan riset yang dilakukan bersama sejumlah institusi dan laboratorium terkemuka di Indonesia, antara lain *Thematic Research Group (TRG) Non-Timber Forest Product Diversification* UNHAS, Pusat Inovasi HHBK UNHAS, Puslitbang Lingkungan Hidup UNHAS, Laboratorium Sifat Dasar dan Teknologi Pengolahan Kayu UNHAS, Laboratorium Kimia Hasil Hutan, Laboratorium Rekayasa Bioproses, Laboratorium Biomolekuler dan Seluler, serta Laboratorium Mikrobiologi Pangan, Pusat Penelitian Sumberdaya Hayati dan Bioteknologi, *Surfactant and Bioenergy Research Center* (SBRC), yang seluruhnya berada di bawah naungan IPB. Selain itu, penulis juga pernah terlibat dalam riset di Laboratorium Afiliasi Departemen Kimia FMIPA Universitas Indonesia, serta Laboratorium Instrumen dan Proksimat Terpadu, Puslitbang Kementerian Kehutanan, Pusat Penelitian Biomaterial LIPI, Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional (BAKOSURTANAL), dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak, Batubara dan Gas Bumi (PPPTMGB) LEMIGAS.

Penulis juga memegang berbagai sertifikasi profesional antara lain: Dosen Profesional, Auditor SVLK, Insinyur Profesional Madya (IPM), Auditor Lingkungan, Ketua Tim Penyusun AMDAL (KTPA), Ahli K3 Umum, Analis SOP, Trainer Profesional, Auditor ISO, dan Climate Leader, serta Pendamping Proses Produk Halal. Selain sebagai akademisi, penulis aktif menjadi narasumber pada forum nasional dan internasional, serta menjadi konsultan ahli di bidang

kehutanan dan lingkungan, khususnya studi AMDAL, studi kelayakan, audit lingkungan, LCA-PROPER, dan pemberdayaan masyarakat sekitar hutan serta pendidikan perubahan iklim.

Penulis telah mengikuti 77 kursus/pelatihan (2 internasional), 102 seminar (19 internasional), terlibat 59 proyek kolaborasi penelitian, 38 proyek pengabdian masyarakat serta telah menyusun 254 AMDAL/ Dokumen Lingkungan di Indonesia, dan 65 diantaranya sebagai ketua tim termasuk kegiatan pada sektor kehutanan dan energi terbarukan. Penulis berpengalaman mendampingi puluhan perusahaan di Indonesia, khususnya pada PBPH, dalam pengembangan dan produksi bioenergi, termasuk bioetanol, biodiesel, biobriket, biogas, serta energi terbarukan lainnya, sekaligus mengelola jasa lingkungan karbon secara berkelanjutan untuk menciptakan nilai tambah bagi bisnis.

Penulis juga merupakan penjamin LPJP AMDAL General Konsultan dan Dewan Pembina Yayasan Sabuk Hijau Indonesia (*Indonesian Green Belt Initiative*) dan Yayasan Masyarakat Ekologi dan Reaksi Konservasi (MAERO Indonesia). Berbagai penghargaan telah diraih, antara lain sebagai lulusan terbaik di jenjang SD, SLTP, SMA, dan perguruan tinggi (baik fakultas maupun universitas). Penulis juga mendapat penghargaan sebagai Mahasiswa Pascasarjana Berprestasi IPB, serta penghargaan sebagai Pelopor Insinyur Teregistrasi Bidang Kehutanan dari Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, dan Climate Leader dari *The Climate Reality Project, USA*.

Penulis dapat dihubungi melalui email:

[muhdaud@unismuh.ac.id](mailto:muhdaud@unismuh.ac.id)

[mduaudhammasa@gmail.com](mailto:mduaudhammasa@gmail.com)