

**PERAN AGROFORESTRI DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN
IKLIM DI KPH BATU TEGI PROVINSI LAMPUNG**

(Skripsi)

Oleh

**M. Pahlevi Fadhlurrazzaq
2114151007**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PERAN AGROFORESTRI DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM DI KPH BATU TEGI PROVINSI LAMPUNG

Oleh

M. PAHLEVI FADHLURRAZZAQ

Peran agroforestri dalam upaya mitigasi perubahan iklim menjadi sangat penting, karena perubahan iklim merupakan isu global yang mendesak dan memerlukan penanganan serius. Penelitian ini dilakukan di dua lokasi yang berbeda, yaitu Pekon Sirna Galih, Kecamatan Ulubelu dan Pekon Sinar Jawa, Kecamatan Air Nainingan, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Jenis data yang digunakan yaitu, data primer mencakup, jenis tanaman, diameter, dan keliling pada setiap fase pertumbuhan yang ada pada tiga tipe tutupan lahan dan data sekunder (literatur dari berbagai sumber yang terpercaya) yang berhubungan dengan fokus penelitian. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan teknik jalur berpetak dengan jumlah petak ukur sebanyak 36 plot. Adapun variabel yang diukur yaitu, perhitungan analisis vegetasi, indeks keanekaragaman jenis, biomassa atas permukaan, biomassa bawah permukaan, perhitungan cadangan karbon per hektar pada tiap plot, dan uji ketidakpastian cadangan karbon. Semua indikator tersebut masing-masing diukur menggunakan rumus INP, Shannon-wiener, persamaan alometrik dari berbagai sumber ilmiah, dan diuji secara statistik. Kemudian hasil dari penelitian disajikan dengan menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Berdasarkan hasil penelitian nilai estimasi karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan diperoleh nilai estimasi karbon tersimpan/biomassa yang paling besar ada pada tanaman cemara (*Casuarina equisetifolia*) dengan nilai 49.929,24 tC dan total stok karbon akar diperoleh nilai sebesar 498,80 tC pada tanaman kopi (*Coffea canephora*). Karbon tersimpan di tiga tipe tutupan lahan berbeda-beda, pada lahan agroforestri memiliki nilai 104,65 ton karbon/hektar (tC/ha), lahan hutan sebesar 129,13 tC/ha, dan lahan monokultur sebesar 49,68 tC/ha. Artinya, lahan agroforestri berpotensi dalam strategi mitigasi perubahan iklim. Hal ini dikarenakan nilai rata-rata jumlah karbon tersimpan di lahan agroforestri memiliki nilai yang selisihnya tidak jauh dengan lahan hutan yaitu sebesar 104,65 tC/ha.

Kata kunci: Stok karbon, agroforestri, mitigasi perubahan iklim.

ABSTRACT

THE ROLE OF AGROFORESTRY IN CLIMATE CHANGE MITIGATION EFFORTS IN KPH BATU TEGI, LAMPUNG PROVINCE

By

M. PAHLEVI FADHLURRAZZAQ

*The role of agroforestry in climate change mitigation efforts is very important, because climate change is an urgent global issue and requires serious handling. This study was conducted in two different locations, namely Pekon Sirna Galih, Ulubelu District and Pekon Sinar Jawa, Air Naningan District, Tanggamus Regency, Lampung Province. The types of data used are primary data including plant types, diameters, and circumferences at each growth phase in three types of land cover and secondary data (literature from various reliable sources) related to the focus of the study. Sampling was carried out using a gridded path technique with a total of 36 plots. The variable measured are, calculation of vegetation analysis, species diversity index, aboveground biomass, belowground biomass, calculation of carbon stocks per hectare in each plot, and carbon stock uncertainty test. All of these indicators are measured using the INP formula, Shannon-wiener, allometric equations from various scientific sources, and tested statistically. Then the results of the study are presented using quantitative descriptive methods. Based on the results of the study of the estimated value of stored carbon/biomass in three types of land cover, the largest estimated value of stored carbon/biomass was obtained in the cemara plant (*Casuarina equisetifolia*) with a value of 49.929.24 tC and the total root carbon stock obtained a value of 498.80 tC in the coffee plant (*Coffea canephora*). The carbon stored in the three types of land cover is different, in agroforestry land it has a value of 104.65 ton carbon/hectare (tC/ha), forest land of 129.13 tC/ha, and monoculture land of 49.68 tC/ha. This means that agroforestry land has the potential in climate change mitigation strategies. This is because the average value of the amount of carbon stored in agroforestry land has a value that is not much different from forest land, which is 104.65 tC/ha.*

Keywords: Carbon stock, agroforestry, climate change mitigation.

**PERAN AGROFORESTRI DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN
IKLIM DI KPH BATU TEGI PROVINSI LAMPUNG**

Oleh

**M. PAHLEVI FADHLURRAZZAQ
2114151007**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapat Gelar
SARJANA KEHUTANAN**

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **PERAN AGROFORESTRI DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM DI KPH BATU TEGI**

Nama : **M. Pahlevi Fadhlurrazaq**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2114151007

Jurusan : Kehutanan

Fakultas : Pertanian



1. **Komisi Pembimbing**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Arief', with a long horizontal line extending to the right.

Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc.
NIP. 197907012008011009

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Christine', with a long horizontal line extending to the right.

Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P.
NIP. 196412261993032001

2. **Ketua Jurusan Kehutanan**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Baihah Sari Dewi', with a long horizontal line extending to the right.

Dr. Baihah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.
NIP. 197310121999032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc.

Sekretaris : Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P.

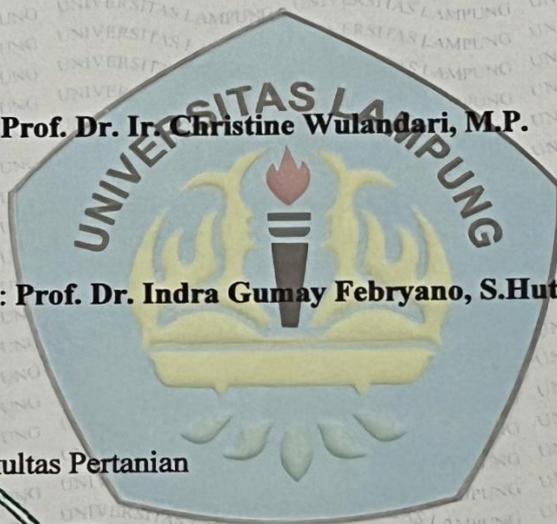
Anggota : Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.

2. Dekan Fakultas Pertanian

Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 2 Juli 2025



PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Pahlevi Fadhlurrazaq

NPM : 2114151007

Jurusan : Kehutanan

Alamat : Bandar Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sungguh-sungguh, bahwa skripsi saya yang berjudul:

“PERAN AGROFORESTRI DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM DI KPH BATU TEGI”

Adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Selanjutnya, saya juga tidak keberatan apabila sebagian atau seluruh data pada skripsi ini digunakan oleh dosen dan/atau program studi untuk kepentingan publikasi. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 2 Juli 2025
Yang menyatakan



M. Pahlevi Fadhlurrazaq
NPM 2114151007

RIWAYAT HIDUP



M. Pahlevi Fadhlurrazzaq (Penulis) atau yang kerap disapa Levi, lahir di Bandar Lampung, 13 Juli 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak M. Imam Heruwahyono dan Ibu Sri Puji Triani. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri 1 Segala Mider pada tahun 2010-2016, SMP Negeri 25 Bandar Lampung tahun 2016-2019, dan SMA Negeri 9 Bandar Lampung tahun 2019-2021. Tahun 2021 penulis melanjutkan pendidikan dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) Komisariat Pertanian Universitas Lampung sebagai Wakil Bidang Penelitian, Pengembangan Anggota dan Pembinaan Anggota (PPPA) pada tahun 2024-2025 dan menjadi Wakil Menteri Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Universitas Lampung periode 2023-2024. Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti oleh penulis yaitu mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Kampung Bengkulu Tengah, Kecamatan Gunung Labuhan, Provinsi Lampung pada bulan Januari-Februari 2024. Penulis juga melaksanakan kegiatan Praktik Umum (PU) di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM) yaitu Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Getas dan KHDTK Wanagama.

قُلْ إِنَّ صَلَاتِي وَنُسُكِي وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ ﴿١٦٢﴾

Katakanlah, “Sesungguhnya Shalatku, Ibadahku, Hidupku, dan Matiku hanya untuk Allah, Tuhan Semesta Alam”.

SANWACANA

Puji syukur penulis tujukan atas kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunianya penulis mampu menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul **“Peran Agroforestri Dalam Upaya Mitigasi Perubahan Iklim di KPH Batutegi Provinsi Lampung”**. Penulisan skripsi merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan di Universitas Lampung, harapannya skripsi ini dapat memberi manfaat kepada banyak orang ke depannya. Di dalam proses pembuatan skripsi ini, penulis mengalami berbagai hambatan, baik dari luar maupun dari dalam diri penulis sendiri. Penulisan skripsi ini pun tidak lepas dari bimbingan, bantuan serta petunjuk dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN. Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing I yang telah memberikan arahan, bantuan serta motivasi dalam proses penyusunan hingga penyelesaian skripsi ini.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Christine Wulandari, M.P. selaku pembimbing II yang telah memberikan nasihat serta motivasi dalam proses penyusunan hingga penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku pembahas yang telah memberikan arahan dan evaluasi mengenai skripsi ini.

7. Bapak Dian Iswandaru selaku Pembimbing Akademik selama perkuliahan yang selalu memberi masukan dan motivasi.
8. Kedua orang tua saya Bapak M. Imam Heruwahyono dan Ibu Sri Puji Triani. Terima kasih telah memberikan nasihat, teguran, semangat, kasih sayang dan doa. Sehingga membuat saya tidak pernah patah semangat dan selalu berpikir positif.
9. Saudara dan saudari saya M. Panji Fadhlurrahman, Pranita Dewi Vanli, dan M. Puja Fadhlurrahim. Serta keponakan saya Saka Bares Pangarep dan Sena Barata Permana.
10. Terima kasih kepada teman seumur hidup dan setelah kehidupan penulis, Kaifa Uma yang telah memberikan seluruh cinta yang ada di dunia ini.
11. Pihak PT Nestle Indonesia yang telah memberikan bantuan dana dan kesempatan untuk melakukan penelitian ini dan seluruh Bapak Ibu Dosen yang tergabung dalam proyek Nestle (Bapak Indra Gumay Febryano, Bapak Dian Iswandaru, Bapak Hari Kaskoyo, Ibu Christine Wulandari, Ibu Novriyanti, Ibu Yulia Rahma Fitriana, dan Bapak Arief Darmawan, Ibu Susni Herwanti, Bapak Rahmat Safe'i).
12. Pihak KPH Batutege yang telah memberikan izin untuk melakukan penelitian.
13. Segenap anggota dan pengurus Gapoktan Wana Jaya dan Gapoktan Sidodadi yang telah membantu dalam pengumpulan data penelitian.
14. Teman-teman Angkatan 2021 yang telah menemani selama masa perkuliahan.
15. Terima kasih kepada saudara Dimas Aulia Miftakhul Husna, Saudara M. Agung Permana, dan Saudara Fiko Arta Satriatama.
16. Teman-teman Bebek Generation yang selalu mendoakan saya.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi masih terdapat kekurangan. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi pembaca.

Bandar Lampung, 2025
Penulis,

M. Pahlevi Fadhlurrazaq

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Kerangka Pemikiran	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian	4
2.2. Agroforestri	5
2.3. Mitigasi Perubahan Iklim	7
2.4. Agroforestri dalam Mitigasi Perubahan Iklim.....	9
2.5. Sistem Informasi Geografis (SIG).....	13
2.6. Perhitungan Karbon.....	16
III. METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	19
3.2. Alat dan Objek Penelitian.....	20
3.3. Jenis Data Penelitian.....	20
3.4. Pengambilan Data Penelitian.....	21
3.4.1. Desain Sampling	21
3.4.2. Metode Sampling.....	22
3.5. Analisis Data	24
3.5.1. Perhitungan Analisis Vegetasi.....	24
3.5.2. Perhitungan Keanekaragaman Hayati (Tumbuhan).....	25
3.5.2.1. Indeks Keanekaragaman Jenis (<i>Shannon-Wiener</i>)	25
3.5.3. Biomassa Atas Permukaan	26
3.5.4. Biomassa Bawah Permukaan	27
3.5.5. Perhitungan Estimasi Karbon	27
3.5.6. Perhitungan Cadangan Karbon per Hektar pada Tiap Plot .	27
3.5.7. Analisis Statistik Ketidakpastian dari Faktor Cadangan Karbon	28
3.5.8. Potensi Agroforestri sebagai Strategi Mitigasi Perubahan Iklim	28

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1. Indeks Nilai Penting (INP) di Tiga Tutupan Lahan	29
4.2. Indeks Keanekaragaman Hayati (H')	30
4.2.1. <i>Shannon-Wiener</i>	30
4.3. Biomassa Atas Permukaan	31
4.4. Biomassa Bawah Permukaan	33
4.5. Estimasi Karbon Tersimpan	35
4.6. Cadangan Karbon Per Hektar pada Tiap Plot.....	36
4.7. Uji Ketidakpastian dari Faktor Cadangan Karbon	39
4.8. Peran Agroforestri dalam Mitigasi Perubahan Iklim	41
4.9. Peran Agroforestri dalam Mendukung Target FoLU Net Sink 2030	45
V. KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1. Kesimpulan.....	47
5.2. Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	61

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Target penurunan emisi sektor dalam NDC	9
2. Persamaan alometrik yang digunakan untuk menduga biomassa pohon	26
3. Analisis statistik nilai ketidakpastian dari faktor cadangan karbon.....	28
4. Indeks nilai penting di areal penelitian	29
5. Indeks keanekaragaman hayati di areal penelitian.....	30
6. Nilai biomassa atas permukaan di tiga tutupan lahan	32
7. Nilai biomassa bawah permukaan di tiga tutupan lahan	33
8. Nilai estimasi karbon tersimpan di tiga tutupan lahan	35
9. Nilai Cadangan karbon per hektar pada tiap plot.....	36
10. Nilai ketidakpastian dari faktor cadangan karbon.....	40
11. Karakteristik Tegakan hutan dan simpanan karbon pada berbagai lahan agroforestri.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Kerangka berpikir.....	3
Gambar 2. Peta wilayah studi penelitian	19
Gambar 3. Desain Sampling.....	21
Gambar 4. Plot Pengambilan Sampel.....	23
Gambar 5. Hubungan antara kerapatan bidang dasar dengan stok karbon per hektar ..	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Lahan monokultur Wanajaya	62
2. Lahan hutan Wanajaya.....	63
3. Lahan agroforestri Wanajaya	64
4. Lahan monokultur Sidodadi.....	65
5. Lahan hutan Sidodadi.....	66
6. Lahan agroforestri Sidodadi.....	67
7. Tim penelitian Nestle 2024	68
8. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Hutan Fase Pohon	69
9. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Hutan Fase Tiang	69
10. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Hutan Fase Pancang	70
11. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Agroforestri Fase Pohon	70
12. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Agroforestri Fase Tiang	71
13. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Agroforestri Fase Pancang	72
14. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Monokultur Fase Pohon.....	72
15. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Monokultur Fase Tiang.....	73
16. Hasil INP (%) Tertinggi Tipe Lahan Monokultur Fase Pancang.....	73
17. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Hutan Fase Pohon.....	74
18. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Hutan Fase Tiang.....	74
19. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Hutan Fase Pancang.....	75
20. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Agroforestri Fase Pohon.....	75
21. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Agroforestri Fase Tiang.....	76
22. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Agroforestri Fase Pancang.....	76
23. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Monokultur Fase Pohon.....	77
24. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Monokultur Fase Tiang	77

25. Indeks <i>Shannon Wiener</i> Tipe Lahan Monokultur Fase Pancang	78
26. Rata-Rata Biomassa dan Rata-Rata Diameter di Tiap Petak Ukur	79

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Menurut Budiastuti (2020) perubahan iklim adalah salah satu permasalahan utama dan menjadi tantangan paling signifikan yang dihadapi masyarakat global. Perubahan iklim sebagian besar disebabkan oleh peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer. Faktor buruk yang terjadi karena perubahan iklim ini dapat menimbulkan emisi gas rumah kaca, peningkatan suhu, peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂), penipisan pada lapisan ozon dan penggundulan hutan, yang semuanya dapat meningkatkan tekanan pada tanaman dan juga lingkungan (Antarissubhi *et al.*, 2024). Peningkatan CO₂ merupakan potensi terjadinya efek gas rumah kaca yang berkaitan erat dengan perubahan iklim (Oliveira *et al.*, 2020). Efek rumah kaca dapat mengakibatkan peningkatan suhu global atau pemanasan global, dengan dampak seperti perubahan iklim ekstrem, kenaikan permukaan laut, dan gangguan ekosistem (Irma *et al.*, 2024).

Sejak tahun 1981-2024, suhu udara rata-rata di Indonesia telah meningkat dengan laju sekitar 0,02 °C setiap tahunnya, yang secara akumulatif mencapai sekitar 1,0 °C dalam 44 tahun terakhir. Indonesia sedang mengalami tren peningkatan suhu yang berada di angka yang cukup tinggi. Tren ini sejalan dengan laporan global yang menyatakan bahwa gas rumah kaca terus meningkat dari tahun ke tahun (World Meteorological Organization, 2024). Konsentrasi gas rumah kaca yang meningkat dapat menjadi indikasi adanya perubahan signifikan dalam pola emisi global dan lokal (IPCC, 2001). Oleh karena itu, perlu upaya yang dilakukan untuk memahami dampaknya terhadap lingkungan dan iklim.

Salah satu upaya yang dilakukan oleh Pemerintah Indonesia untuk memitigasi dan beradaptasi pada perubahan iklim ini adalah dengan mengupayakan penurunan tingkat emisi gas rumah kaca (GRK) secara berkesinambungan. Menurut Budiastuti

(2020) agroforestri terbukti efektif dalam mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, salah satunya melalui penyerapan karbon oleh pohon yang ditanam, sehingga menjadi solusi mitigasi perubahan iklim yang signifikan. Menurut Maipauw *et al.* (2020) Istilah "agroforestri" baru digunakan pada tahun 1970, tetapi sudah lama digunakan oleh masyarakat dengan berbagai tujuan yang dianggap penting. Kontribusi agroforestri pada pengurangan gas rumah kaca di atmosfer cukup signifikan lewat besarnya jumlah karbon yang tersimpan. Insusanty *et al.*, (2017) merekomendasikan salah satu model penggunaan lahan yang memberikan kontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim dan gas rumah kaca (GRK) adalah agroforestri. Menurut Wulandari (2021) Di Batutegi, praktik pertanian intensif menyebabkan degradasi lahan dan penurunan tutupan pohon hingga 95%. Mengembalikan fungsi agroforestri adalah jalan tengah yang memungkinkan masyarakat tetap memperoleh penghasilan (dari komoditas kopi, kakao, atau produk hutan non kayu), sambil tetap memelihara fungsi ekologis hutan serta memitigasi risiko perubahan iklim

Berdasarkan hal tersebut kajian mengenai peran agroforestri dalam upaya mitigasi perubahan iklim menjadi penting, karena merupakan isu yang sangat penting dan berpengaruh. Keberadaan penelitian ini dapat menambah informasi tentang jumlah simpanan karbon pada sistem pengelolaan agroforestri, sehingga dapat digunakan secara efektif dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah yang didapatkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa estimasi jumlah karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan (Agroforestri, Monokultur dan Hutan) di KPH Batu Tegi?
2. Berapa perbandingan nilai karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan (Agroforestri, Monokultur dan Hutan) di KPH Batu Tegi?
3. Apakah agroforestri memiliki potensi sebagai strategi mitigasi perubahan iklim di KPH Batu Tegi?

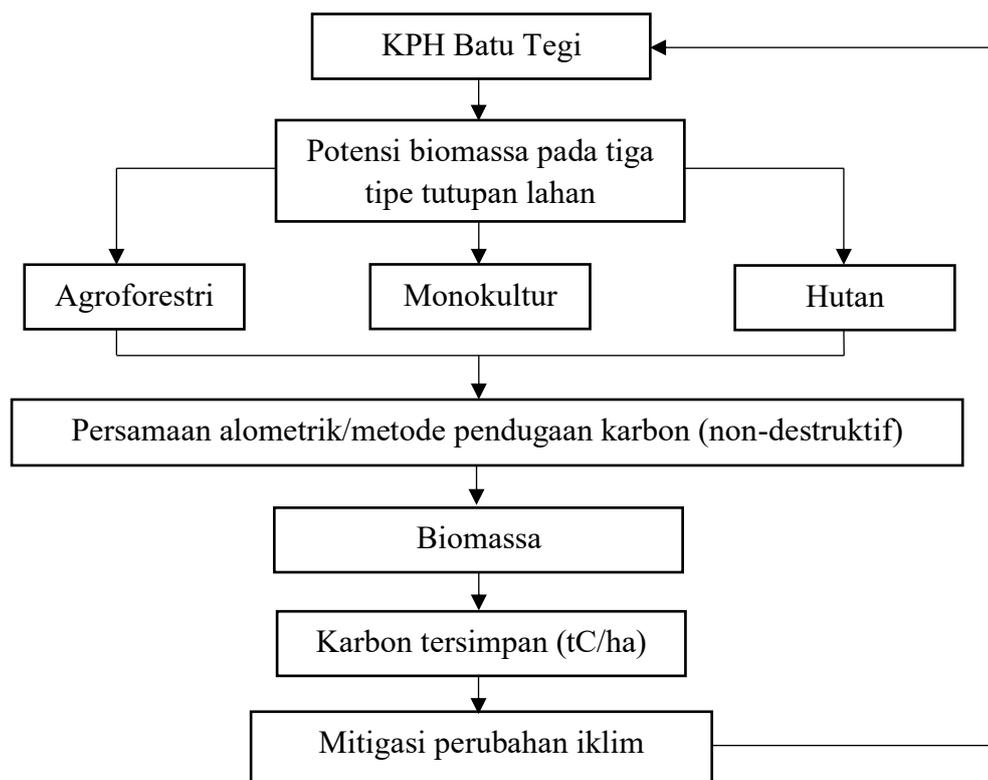
1.2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang sudah dipaparkan penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis estimasi karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan (agroforestri, monokultur dan hutan) di KPH Batu Tegi.
2. Membandingkan nilai karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan (agroforestri, monokultur dan hutan) di KPH Batu Tegi.
3. Mengevaluasi potensi agroforestri sebagai strategi mitigasi perubahan iklim di KPH Batu Tegi

1.3. Kerangka Pemikiran

Upaya menjawab tantangan saat ini terkait mitigasi perubahan iklim melalui agroforestri, memegang prinsip bahwa agroforestri adalah keseimbangan lingkungan, ekonomi dan sosial (Santoso *et al.*, 2024). Apabila dilihat dari latar belakang di atas perubahan iklim model agroforestri dapat memitigasi dan mengadaptasi perubahan iklim (IPCC, 2001). Penelitian ini akan menilai sebesar apa kontribusi agroforestri dalam konteks menyimpan cadangan karbon. Berikut disajikan kerangka pikir penelitian pada gambar berikut ini.



Gambar 1. Kerangka berpikir

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di KPH Batu Tegi, yang terletak di Kecamatan Ulu Belu, Kabupaten Tanggamus. Geografisnya, KPH Batu Tegi terletak pada $104^{\circ}27'$ - $104^{\circ}54'$ BT dan $5^{\circ}5'$ - $5^{\circ}22'$ LS. KPH ini meliputi sebagian Hutan Lindung Register 39 Kota Agung Utara, sebagian Hutan Lindung Register 22 Way Waya, dan sebagian Hutan Lindung Register 32 Bukit Rindingan. KPH Batu Tegi terletak di DAS Sekampung, yang terdiri dari tiga sungai utama: Way Sekampung mengalir dari gunung di sebelah barat, Way Sangharus mengalir dari Gunung Rindingan, dan Way Rilau mengalir dari gunung di sebelah utara. Areal KPH Batu Tegi seluas 58.174 ha, menurut SK Menhut Nomor: SK.68/Menhut-II/2010 tanggal 28 Januari 2010 (Muhammad, 2023).

Menurut Rahmadanty *et al* (2021) KPH adalah area pengelolaan hutan berdasarkan fungsi utama dan penggunaannya yang dapat dikelola dengan efisien dan berkelanjutan, meliputi hutan konservasi, hutan terlindungi, dan hutan produksi. Dibentuk berdasarkan UU No. 41 tahun 1999 serta (PP) Peraturan Pemerintah No. 6 tahun 2007. Berdasarkan kedua kebijakan itu, perancangan KPH dan aktivitas penanaman di KPH Provinsi Lampung dilakukan melalui surat Gubernur Lampung No. 522/4577/III.16/2009. Keputusan Menteri Kehutanan (Kepmenhut) No. 68/ Menhut-II/2010 menjadi acuan untuk penetapan wilayah KPH di Provinsi Lampung, yang terdiri dari sembilan unit Kesatuan Pengelolaan Hutan Lindung (KPHL) dan tujuh unit Kesatuan Pengelolaan Hutan Produksi (KPHP). KPH Batu Tegi adalah KPH provinsi seluas 58.174 ha, di mana 95% wilayahnya telah beralih fungsi menjadi lahan pertanian kering/kebun campuran/semak-semak.

2.2. Agroforestri

Menurut Fikry *et al.* (2024) hilangnya tutupan lahan hutan karena konversi hutan untuk pemukiman, perkebunan, pertanian dan kebutuhan untuk pembangunan di sektor lain, telah menyebabkan perubahan pola cuaca/iklim di berbagai tempat. Perubahan iklim dapat diantisipasi dengan mitigasi dan adaptasi. Mitigasi berarti usaha-usaha pencegahan yang perlu dilakukan, sedangkan adaptasi merupakan kegiatan-kegiatan penyesuaian yang perlu dilakukan untuk dapat hidup dan bertahan dan meningkatkan ketahanan, kelenturan dan mengarah ke migrasi karena kondisi iklim yang berbeda. Menurut Damanik *et al.* (2021) agroforestri dapat memitigasi dan mengadaptasi perubahan iklim dengan alasan-alasan sebagai berikut:

- a) Pencampuran jenis pohon penghasil kayu, buah dan lain-lain, karena campuran jenis lebih baik dari tanaman murni;
- b) Pencampuran jenis yang didasarkan pada sifat toleransi (dan), sehingga akan memanfaatkan seluruh cahaya untuk fotosintesis;
- c) Pencampuran perbedaan umur;
- d) Pencampuran berdasarkan perbedaan waktu pemanenan;
- e) Penggabungan nilai ekonomi, sosial dan budaya sehingga perubahan vegetasi dapat berjalan seiring dengan perubahan sosial dan budaya secara berangsur yang dapat disesuaikan dengan perubahan iklim; dan
- f) Dapat digunakan sebagai model untuk memfasilitasi perubahan kelompok vegetasi menjadi kelompok yang baru (adaptasi), seperti teori perubahan vegetasi melalui perladangan berpindah-pindah yang teratur.

Menurut Pontoh *et al.* (2024) pemanfaatan lahan ini bertujuan untuk menjaga atau meningkatkan hasil secara berkelanjutan dengan menggabungkan tanaman berkayu (pohon) bersama tanaman pangan atau tanaman pakan ternak pada satu area yang sama, baik dilakukan secara bersamaan maupun bergantian. Metode ini menerapkan praktik pengelolaan yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan, ekonomi, sosial, dan budaya di wilayah tersebut. Beragam jenis pohon dan tanaman bawah dengan umur yang bervariasi menyusun sistem ini, sehingga sistem ini lebih aman dari risiko gagal panen dan lebih stabil menghadapi guncangan pasar maupun perubahan iklim (Gupta *et al.*, 2023). Ketika pendapatan dan kondisi lingkungan

menguntungkan, masyarakat akan memiliki peluang yang lebih kecil untuk berpindah lahan garapan. Oleh karena itu, kemampuan sistem ini dalam meredam perubahan biofisik, ekonomi, dan sosial menjadi syarat utama agar agroforestri dapat beradaptasi dengan perubahan iklim (Afifah *et al.*, 2021).

Menurut Suryanto (2024) secara fisik, agroforestri membentuk susunan kanopi tajuk yang berjenjang (kompleks) dengan karakteristik serta kedalaman perakaran yang beragam. Oleh karena itu, agroforestri menawarkan teknik adaptasi yang efektif karena mampu menyangga (*buffer*) dampak perubahan iklim, seperti mengendalikan iklim mikro, mengurangi risiko longsor, limpasan permukaan, dan erosi, menekan kehilangan hara akibat pencucian, serta mempertahankan biodiversitas flora dan fauna tanah.

Berdasarkan komponen penyusunnya, sistem agroforestri dapat digolongkan menjadi beberapa tipe utama.

1. Agrisilvikultur, yaitu kombinasi antara tanaman kayu dengan tanaman pertanian. Contoh populer dari sistem ini adalah tumpang sari (*alley cropping*), di mana tanaman pangan ditanam di antara barisan pohon, dan sistem penangung untuk komoditas seperti kopi, kakao, atau teh.
2. Silvopastura, yang mengintegrasikan komponen kayu dengan peternakan. Ini bisa berupa penyebaran pohon di padang penggembalaan untuk pakan dan naungan ternak, atau praktik menggembalakan ternak di bawah tegakan hutan atau perkebunan.
3. Agrosilvopastura, sistem paling terpadu yang menggabungkan pohon, tanaman pertanian, dan ternak sekaligus dalam satu unit pengelolaan, seperti yang tercermin dalam sistem pekarangan di Jawa yang kaya akan jenis tanaman dan seringkali juga melibatkan ternak unggas atau ikan.

Contoh praktiknya sangat beragam, mulai dari sistem tumpang sari sederhana seperti penanaman jagung atau kacang-kacangan di antara barisan pohon jati, hingga sistem kebun campuran kompleks seperti agroforestri kopi atau kakao di bawah naungan pohon-pohon hutan. Sistem ini tidak hanya mengoptimalkan penggunaan ruang vertikal dan horizontal, tetapi juga meniru struktur berlapis dari hutan alami (De Foresta *et al.*, 2000).

2.3. Mitigasi Perubahan Iklim

Iklim adalah kondisi rata-rata cuaca dalam jangka waktu panjang untuk suatu lokasi. Sebagai suatu sistem kompleks, iklim terdiri dari berbagai unsur yang saling mempengaruhi, termasuk radiasi matahari, suhu, tekanan udara, angin, kelembaban, dan presipitasi. Perubahan iklim global terjadi akibat radiasi matahari, letusan gunung berapi, dan aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, yang menghasilkan gas rumah kaca. Di Indonesia, iklim tropis dipengaruhi oleh posisi geografis negara di sekitar ekuator. Perubahan iklim, ditandai dengan peningkatan suhu global dan perubahan pola cuaca, yang disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi yang meningkatkan emisi gas rumah kaca. Dampaknya termasuk kenaikan permukaan laut, cuaca ekstrem, dan ancaman terhadap keanekaragaman hayati. Di Indonesia, perubahan iklim mempengaruhi sektor pertanian melalui pergeseran musim hujan dan kemarau, yang berdampak pada pola tanam dan produktivitas. Di Bali, perubahan iklim menyebabkan penurunan luas lahan yang sesuai untuk padi sebesar 20% antara tahun 1990-2009 (Sudarma, 2018).

Perubahan iklim merupakan perubahan jangka panjang dalam pola cuaca global, ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata dan fenomena cuaca ekstrem (Gulo *et al.*, 2024). Penyebab utamanya adalah aktivitas manusia yang meningkatkan emisi gas rumah kaca, terutama CO₂, melalui pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan industrialisasi. Dampak perubahan iklim meliputi kenaikan permukaan laut, perubahan pola hujan, dan ancaman terhadap keanekaragaman hayati (Gulo *et al.*, 2024). Di Indonesia, perubahan iklim mempengaruhi sektor pertanian dengan perubahan awal dan durasi musim hujan, meningkatkan risiko banjir dan kekeringan (Arsyad *et al.*, 2025)

Hutan tropis Indonesia memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon (Ningsih, 2024). Hutan hujan tropis dan mangrove memiliki kapasitas penyerapan karbon yang tinggi, dengan mangrove menyerap hingga lima kali lebih banyak dibandingkan hutan terestrial (Imburi *et al.*, 2024). Selain itu, hutan juga menyediakan jasa ekosistem penting seperti perlindungan pesisir dan konservasi keanekaragaman hayati. Namun, deforestasi dan degradasi hutan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (Anto

et al., 2024). Untuk mengatasi hal ini, inovasi manajemen kehutanan seperti pengelolaan hutan yang baik, manajemen karbon, dan agroforestri dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim. Implementasi strategi REDD+ di Indonesia menunjukkan potensi dalam mengurangi laju deforestasi melalui insentif ekonomi dan peningkatan kapasitas lokal (Anto *et al.*, 2024). Oleh karena itu, kebijakan yang mendukung perlindungan dan restorasi hutan tropis menjadi langkah strategis dalam upaya mitigasi perubahan iklim (Ningsih, 2024).

Pertemuan Negara Pihak Konvensi Perubahan Iklim di Paris tahun 2015 (Conference of Parties, COP 21 UNFCCC) menyepakati Persetujuan Paris (*Paris Agreement*) dengan tujuan yang tercantum pada Pasal 2 ayat (a) menahan kenaikan suhu global dari tingkat suhu era pre-industrialisasi di bawah 2°C dan terus berupaya untuk membatasi kenaikan suhu sampai 1,5°C. Indonesia telah melakukan ratifikasi Persetujuan Paris melalui 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).

Pada Tahun 2021 telah ditetapkan 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. Dalam Pasal 3 ayat (4) disebutkan bahwa pengurangan emisi GRK sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dan ayat (3), didukung utamanya oleh pengendalian emisi GRK sektor kehutanan untuk menjadi penyimpan/penguatan karbon pada tahun 2030 dengan pendekatan karbon net sink sektor kehutanan dan penggunaan lahan lainnya pada tahun 2030 (*Indonesia's Forestry and Other Land Use Net Sink 2030*).

Sebagai salah satu negara yang meratifikasi Kesepakatan Paris, Indonesia telah menyampaikan dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang pertama pada tahun 2016 dan dokumen pembaruan NDC pada tahun 2021. *Nationally Determined Contribution* merupakan komitmen nasional bagi penanganan perubahan iklim global dalam rangka mencapai tujuan Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim. Dalam komitmen NDC, Indonesia menyampaikan target

penurunan emisinya dalam skenario tanpa syarat yang dilakukan dengan upaya sendiri (*unconditional*; CM1) sebesar 29% dan target bersyarat yang membutuhkan dukungan internasional (*conditional*; CM2) sebesar 41% dibandingkan dengan *business as usual* (BAU) pada tahun 2030 (Tabel 1).

Pemerintah Indonesia telah menetapkan peta jalan mitigasi sebagai acuan pelaksanaan NDC. Dokumen Peta Jalan (*Road Map*) merupakan pedoman bagi para pemangku kepentingan baik pemerintah, pemerintah daerah, dunia usaha maupun masyarakat dalam upaya pencapaian target NDC melalui penyediaan informasi tentang perencanaan, tata waktu dan penetapan target penurunan emisi GRK secara rinci per sub sektor serta identifikasi seluruh aspek yang mendukung pencapaian target (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019).

Tabel 1. Target penurunan emisi sektor dalam NDC

No	Sektor	Emisi 2010 (Juta ton CO ₂)	Tingkat emisi 2030 (Juta ton CO ₂)			Penurunan Emisi 2030			
			BaU	CM1	CM2	Juta ton CO ₂		% dari BaU	
						CM1	CM2	CM1	CM2
1.	Energi	453,2	1.669	1.355	1.223	314	446	11	15,50
2.	Limbah	88	296	285	256	11	40	0,38	1,4
3.	Industri	36	70	67	66	3	3,25	0,10	0,11
4.	Pertanian	111	120	110	116	9	4	0,32	0,13
5.	Lahan dan Kehutanan	647	714	217	22	497	692	17,2	24,1
	Total	1.344	2.869	2.034	1.683	834	1.185	29,00	41

Dapat dilihat pada Tabel 1 sektor kehutanan dan lahan berkontribusi terhadap 17% dari 29% target penurunan emisi seluruh sektor dalam skenario CM1, atau 24% dari 41% target penurunan emisi seluruh sektor dalam skenario CM2. Berdasarkan hal tersebut strategi yang digunakan oleh pemerintah Indonesia adalah memitigasi perubahan iklim dengan memfokuskan pada sektor kehutanan dan lahan/*Forestry and Other Land Use* (FOLU).

2.4. Agroforestri dalam Mitigasi Perubahan Iklim

Mitigasi perubahan iklim adalah serangkaian upaya sistematis yang bertujuan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca atau meningkatkan kemampuan alam

dalam menyerap karbon, terutama melalui perubahan pada sektor energi, penggunaan lahan, pertanian, dan limbah (Riogilang *et al.*, 2022). Dalam lima tahun terakhir, strategi mitigasi di Indonesia difokuskan pada pengembangan energi terbarukan, efisiensi energi, perlindungan hutan dan lahan gambut, serta restorasi ekosistem seperti mangrove, yang juga didukung melalui program seperti *Nationally Determined Contribution* (NDC) demi penurunan emisi hingga 41% pada 2030 dengan bantuan internasional (Rahman, 2024). Langkah mitigasi ini meliputi penggunaan energi terbarukan (*geothermal*, surya, angin), penurunan deforestasi, penghijauan, pengelolaan limbah, serta pengembangan transportasi dan industri beremisi rendah (Savitri *et al.*, 2024).

Menurut Mustikaningrum *et al.* (2021) pemerintah melakukan salah satu upaya menurunkan emisi gas rumah kaca dengan mengintegrasikan lahan pertanian dan lahan kehutanan. Agroforestri berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim dengan meningkatkan stok karbon melalui pengelolaan lahan yang mengintegrasikan pohon dan tanaman pertanian secara berkelanjutan (Febryano *et al.*, 2024). Dasar hukumnya termaktub dalam Pasal 99 Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 9 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Perhutanan Sosial, yang mengatur perpanjangan Persetujuan Pengelolaan Perhutanan Sosial dengan evaluasi kepatuhan terhadap kewajiban dan larangan, termasuk pengelolaan hutan lestari melalui sistem agroforestri. Melalui pengelolaan perhutanan sosial, masyarakat dapat menyerap dan menyimpan karbon secara efektif dalam biomassa pohon dan tanah, sehingga membantu menurunkan emisi gas rumah kaca (KLHK, 2021). Dengan pemberian akses legal dan pembinaan pengelolaan hutan berbasis agroforestri, regulasi ini memberikan payung hukum yang jelas bagi pelaksanaan mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan kapasitas stok karbon di lahan kehutanan yang dikelola masyarakat secara lestari (Leuser *et al.*, 2022).

Agroforestri adalah suatu cara penggunaan lahan yang menggabungkan pohon, tanaman pangan, dan hewan ternak, sehingga memberikan keuntungan ekonomi dan ekologi yang penting bagi para petani. Simamora (2024) menemukan bahwa agroforestri memberikan kontribusi sebesar 88,31% terhadap pendapatan petani di Sukoharjo, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti umur dan luas lahan.

Triwanto, (2024) menekankan peran agroforestri dalam pengelolaan sumber daya alam berkelanjutan, meningkatkan kesuburan tanah dan keanekaragaman hayati sekaligus meningkatkan ketahanan pangan. Latue *et al.*, (2019) melaporkan bahwa di Negeri Riring, praktik agroforestri menghasilkan pendapatan yang bervariasi dan memperkuat ikatan sosial, dengan kontribusi sebesar 97,55% terhadap pendapatan petani. Selain itu, Ayuniza *et al.*, (2020) menyoroti bahwa komposisi tanaman tertentu dalam agroforestri dapat menghasilkan pendapatan yang substansial, dengan pendapatan tertinggi yang dilaporkan sebesar Rp 25.550.000 per hektar per tahun.

Agroforestri secara mendasar adalah sistem penggunaan lahan yang berkelanjutan, di mana tanaman berkayu (seperti pohon atau perdu) sengaja ditanam dan dikelola bersama dengan tanaman pertanian non-kayu dan/atau ternak dalam satu bidang lahan yang sama. Konsep ini melampaui sekadar menanam pohon di lahan pertanian; ia merupakan sebuah ilmu dan praktik pengelolaan sumber daya alam yang fokus pada optimalisasi interaksi positif antara berbagai komponen tersebut. Prinsip utamanya adalah menciptakan sinergi ekologis dan ekonomis. Secara ekologis, tujuannya adalah memaksimalkan pemanfaatan sumber daya (cahaya, air, nutrisi) dan meningkatkan kesehatan ekosistem. Secara ekonomis, tujuannya adalah mendiversifikasi dan meningkatkan produktivitas lahan untuk menjamin kesejahteraan petani secara berkelanjutan (Wattie *et al.*, 2023).

Peran agroforestri dalam menjaga kelestarian lingkungan sangatlah banyak. Struktur tajuk pohon yang berlapis berfungsi sebagai perisai alami yang memecah butiran air hujan, sehingga secara drastis mengurangi laju erosi tanah. Sistem perakarannya yang dalam dan menyebar membantu mengikat partikel tanah serta meningkatkan infiltrasi air, yang berperan penting dalam konservasi air dan pencegahan banjir serta kekeringan. Lebih dari itu, melalui jatuhnya serasah daun yang terdekomposisi menjadi humus, agroforestri secara aktif meningkatkan kesuburan tanah dan mengembalikan siklus hara, sehingga mengurangi ketergantungan pada pupuk anorganik. Lingkungan yang tercipta juga menjadi habitat ideal bagi berbagai satwa, mulai dari serangga penyerbuk hingga burung, yang pada akhirnya meningkatkan keanekaragaman hayati secara keseluruhan.

Dari sudut pandang ekonomi, agroforestri menawarkan jaring pengaman finansial yang kokoh bagi para petani. Dengan adanya beragam produk yang bisa dipanen pada waktu yang berbeda mulai dari hasil tanaman pangan jangka pendek, buah-buahan musiman, hingga kayu jangka panjang pendapatan petani menjadi lebih terdiversifikasi dan stabil. Ketergantungan pada satu produk tertentu yang sensitif terhadap perubahan harga pasar atau kegagalan panen dapat diminimalkan. Sistem ini juga berkontribusi langsung pada ketahanan pangan dan gizi keluarga, karena menyediakan akses langsung terhadap berbagai sumber karbohidrat, vitamin, dan protein. Pengurangan biaya input untuk pupuk dan pestisida, berkat kesehatan ekosistem yang terjaga, semakin memperkuat profitabilitas usaha tani.

Di luar manfaat ekologis dan ekonomis, agroforestri memiliki nilai sosial dan budaya yang mendalam, terutama di Indonesia. Berbagai praktik agroforestri tradisional seperti pekarangan (Jawa), repong damar (Lampung), dan tembawang (Kalimantan) merupakan warisan kearifan lokal yang telah terbukti mampu menyelaraskan kebutuhan manusia dengan kelestarian alam selama berabad-abad. Saat ini, agroforestri menjadi tulang punggung program strategis nasional seperti Perhutanan Sosial, yang memberikan akses legal bagi masyarakat untuk mengelola kawasan hutan secara berkelanjutan. Dengan demikian, agroforestri tidak hanya berfungsi sebagai sistem pertanian, tetapi juga sebagai alat untuk resolusi konflik lahan, pemberdayaan masyarakat, dan pelestarian budaya (Yeny *et al.*, 2020).

Agroforestri diakui secara global sebagai strategi pertanian yang cerdas untuk mengatasi tantangan iklim dan ketahanan pangan. Agroforestri adalah penanaman tanaman tahunan bersama dengan tanaman keras. Ini adalah strategi pengelolaan lahan yang menghubungkan antara pertanian dan kehutanan (Tefera *et al.*, 2019). Agroforestri digambarkan sebagai salah satu bentuk pertanian multifungsi yang menggabungkan pepohonan dengan spesies pertanian di lahan yang sama. Agroforestri ramah lingkungan dan mampu memenuhi kebutuhan sosial ekonomi masyarakat. Terbukti secara ilmiah bahwa praktik wanatani berpotensi meningkatkan hasil panen dengan margin yang lebih besar (Duffy *et al.*, 2021). Peningkatan hasil panen ini dipengaruhi oleh berbagai jasa ekosistem yang disediakan oleh pepohonan, termasuk pengaturan pasokan air, pengurangan erosi tanah, dan peningkatan unsur hara tanah.

Menurut Mapegau *et al.* (2025) wanatani merupakan cara yang paling dapat diandalkan dan hemat biaya untuk memerangi perubahan iklim di berbagai belahan dunia. Agroforestri dinilai sebagai pilihan yang lebih baik untuk mitigasi perubahan iklim, dibandingkan dengan opsi laut dan daratan karena manfaat lingkungan sekundernya. Manfaat lingkungan tersebut meliputi penyediaan ketahanan pangan, peningkatan pendapatan dan restorasi pertanian, dan pemeliharaan keanekaragaman hayati di bawah tanah dan di atas tanah, serta potensinya untuk konservasi tanah. Agroforestri memiliki posisi strategis untuk membantu negara dalam memenuhi kebijakan pembangunan nasional yang penting, termasuk pengentasan kemiskinan, ketahanan pangan, dan keberlanjutan lingkungan. Selain manfaat lingkungan, wanatani juga mampu memenuhi kebutuhan kayu bakar dan pakan ternak, serta mengurangi emisi karbon dioksida ke atmosfer (Ibrahim *et al.*, 2019).

Terdapat minat global yang tinggi dalam pengurangan konsentrasi gas rumah kaca yang berlebihan, khususnya emisi CO₂ melalui peningkatan dalam penciptaan penyerap karbon. Salah satu cara yang paling jelas dan cerdas untuk mencapai kebutuhan ini adalah melalui praktik aforestasi, reboisasi, dan wanatani. Penyerapan karbon didefinisikan sebagai proses penyerapan karbon dari atmosfer dan penyimpanannya di dalam *reservoir*. Proses ini melibatkan transmisi karbon dioksida di atmosfer untuk penyimpanan yang aman di kolam yang berumur panjang. Ini adalah cara penting untuk mengoptimalkan tingkat CO₂ di atmosfer yang mengarah pada mitigasi perubahan iklim. Cara yang paling dapat diandalkan untuk menyerap CO₂ di atmosfer adalah melalui wanatani (Kumar *et al.*, 2019).

2.5. Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu sistem yang menekankan pada unsur informasi geografi. Istilah “geografis” merupakan bagian dari spasial (keruangan). Kedua istilah ini sering digunakan secara bergantian atau tertukar hingga timbul istilah yang ketiga, geospasial. Ketiga istilah ini mengandung pengertian yang sama di dalam konteks Sistem Informasi Geografis (SIG). Penggunaan kata “geografis” mengandung pengertian suatu persoalan mengenai bumi permukaan dua atau tiga dimensi. Istilah “informasi geografis” mengandung

pengertian informasi mengenai tempat-tempat yang terletak di permukaan bumi, pengetahuan mengenai posisi dimana suatu objek terletak di permukaan bumi, dan informasi mengenai keterangan-keterangan (atribut) yang terdapat di permukaan bumi yang posisinya diberikan atau diketahui (Susanto, 2021).

Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah sistem berbasis komputer yang menggabungkan data spasial dengan informasi atribut untuk mengolah, menganalisis, dan menampilkan data geografis. Sistem ini digunakan untuk memasukkan, menyimpan, mengelola, dan mengaktifkan kembali data bereferensi keruangan untuk berbagai tujuan, termasuk pemetaan dan perencanaan. Komponen utama SIG meliputi *hardware*, *software*, data geospasial, dan tenaga kerja yang berkolaborasi dengan efektif. Implementasi SIG dapat menggunakan berbagai perangkat lunak seperti ArcGIS untuk membuat peta dan *framework* CI untuk tampilan web (Suhendi *et al.*, 2020).

Sebuah sistem SIG yang fungsional tersusun atas lima komponen utama yang saling bekerja sama. Komponen pertama adalah perangkat keras (*hardware*), yang mencakup komputer, server, pemindai (*scanner*), dan perangkat GPS yang digunakan untuk menjalankan *software* dan mengumpulkan data. Kedua adalah perangkat lunak (*software*), yang menyediakan fungsi dan alat untuk memasukkan, mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data geografis. Ketiga, dan yang paling fundamental, adalah data, baik data spasial (vektor dan raster) maupun data atribut. Keempat adalah manusia (*people/brainware*), yaitu para pengguna, analis, dan teknisi yang merancang, mengimplementasikan, dan menggunakan sistem. Terakhir adalah metode (*methods*), yang merujuk pada rencana, aturan, dan prosedur operasional yang spesifik untuk setiap aplikasi SIG (Longley *et al.*, 2015).

Data dalam SIG secara umum terbagi menjadi dua format utama: vektor dan raster. Data vektor merepresentasikan fitur-fitur geografis dunia nyata sebagai objek diskrit menggunakan titik (*points*), garis (*lines*), dan poligon (*polygons*). Titik digunakan untuk menandai lokasi spesifik seperti alamat rumah sakit atau menara BTS, garis digunakan untuk merepresentasikan fitur linear seperti jalan dan sungai, sedangkan poligon digunakan untuk menggambarkan area seperti batas administrasi, danau, atau zona tata guna lahan. Sebaliknya, data raster terdiri dari matriks sel atau piksel yang tersusun dalam grid, di mana setiap sel memiliki nilai

yang merepresentasikan suatu kondisi, seperti citra satelit, data elevasi (ketinggian), atau curah hujan (Heywood *et al.*, 2011).

Biomassa hutan memiliki kandungan karbon yang cukup potensial. Hampir 50% dari biomassa vegetasi hutan tersusun atas unsur karbon. Informasi besarnya biomassa pohon di atas dan di dalam tanah sangat diperlukan untuk mempelajari cadangan karbon dan unsur hara lainnya dalam suatu ekosistem serta pengaruhnya terhadap siklus biogeokimia. Berdasarkan hal tersebut Penggunaan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan teknik penginderaan digunakan sebagai metode inventarisasi hutan dan pemantauan sumberdaya lainnya (Allen *et al.*, 2025).

Estimasi kandungan biomassa dan karbon dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh melalui analisis regresi dapat dikorelasikan dengan biomassa hutan aktual. Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah menunjukkan bahwa pengurangan deforestasi dapat digambarkan dengan nyata, permanen dan pengurangan emisi dapat diverifikasi dengan pengukuran yang dapat dipercaya. Hubungan antara penginderaan jauh dengan biomassa yaitu penginderaan jauh merupakan salah satu pendekatan terbaik untuk estimasi biomassa di tingkat regional ketika data tegakan hutan di lapangan sulit diperoleh. Pada dasarnya perhitungan biomassa untuk menginventarisasi, memantau dan mengelola hutan dapat dilakukan dengan pengukuran lapangan menggunakan plot sampel yaitu diameter pohon setinggi dada (DBH). Kelemahan menggunakan pengukuran secara terestris dianggap kurang efektif karena memerlukan waktu dan biaya relatif besar sehingga perkembangan pemanfaatan teknologi penginderaan jauh semakin berkembang (Simarmata *et al.*, 2019).

Peran SIG sangat krusial dalam bidang perencanaan wilayah dan pengelolaan lingkungan. Para perencana kota menggunakan SIG untuk menganalisis pola tata guna lahan, menentukan lokasi terbaik untuk fasilitas umum baru, dan memodelkan dampak dari pembangunan. Dalam pengelolaan sumber daya alam, SIG digunakan untuk memetakan kawasan hutan, memantau deforestasi, dan mengidentifikasi area yang rentan terhadap erosi atau longsor. Selain itu, dalam mitigasi bencana, SIG menjadi alat yang tak ternilai untuk memetakan zona rawan bencana seperti banjir atau gempa, merencanakan jalur evakuasi, dan mengelola respons darurat secara

efektif dengan mengalokasikan sumber daya ke lokasi yang paling membutuhkan (Supriyono *et al.*, 2018).

Menurut Wajdi *et al.* (2021) Sistem Informasi Geografis (SIG) sangat membantu dalam memetakan areal yang perlu diteliti dengan cara mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data spasial dan non-spasial secara digital. Dengan SIG, lokasi-lokasi spesifik yang menjadi fokus penelitian dapat divisualisasikan dalam bentuk peta digital yang akurat dan interaktif, sehingga memudahkan para peneliti untuk mengidentifikasi area prioritas, mengukur luas wilayah, serta memahami karakteristik lahan secara detail. Pemetaan ini juga dapat mengintegrasikan berbagai lapisan data seperti jenis tanah, penggunaan lahan, dan kondisi lingkungan yang relevan untuk menentukan lokasi penelitian yang tepat dan strategis (Barreto *et al.*, 2025).

2.6. Perhitungan Karbon

Perhitungan stok karbon hutan adalah suatu proses kuantifikasi untuk menaksir jumlah total karbon yang tersimpan dalam sebuah ekosistem hutan pada waktu tertentu. Ini bukan sekadar menghitung pohon, melainkan mengukur biomassa dari berbagai komponen ekosistem dan mengkonversinya menjadi nilai massa karbon. Mengingat hutan berperan sebagai "paru-paru dunia" yang menyerap karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa, perhitungan ini menjadi fundamental untuk memahami peran hutan dalam siklus karbon global dan sebagai dasar bagi upaya mitigasi perubahan iklim (Arsalan *et al.*, 2020).

Menurut Sihotang (2025) ada beberapa metode perhitungan karbon yang dikeluarkan oleh Sistem Registri Nasional (SRN) yang pertama adalah kerangka metodologi perhitungan pengurangan emisi/peningkatan serapan gas rumah kaca sektor kehutanan dan penggunaan lahan lainnya (*Forestry And Other Land Use*) dengan nomor ketetapan KMSAH-001, lalu yang kedua adalah Pengurangan Deforestasi dengan nomor ketetapan MSAH-001, lalu yang ketiga adalah Pengurangan Degradasi Hutan dengan nomor ketetapan MSAH-002, dan yang terakhir adalah Perhitungan Emisi Dekomposisi Gambut Dari Pencegahan Deforestasi Dan Degradasi Hutan dengan nomor ketetapan MSAH-003.

Secara metodologis, stok karbon hutan tidak dihitung sebagai satu kesatuan, melainkan dipilah menjadi lima komponen utama yang disebut "lambung karbon" (*carbon pools*) (Darmawan *et al.*, 2022). Kelima lambung ini adalah: 1) Biomassa Atas Permukaan Tanah (*Above-Ground Biomass/AGB*), yang mencakup semua materi hidup di atas tanah seperti batang, cabang, ranting, dan daun; 2) Biomassa Bawah Permukaan Tanah (*Below-Ground Biomass/BGB*), yaitu sistem perakaran pohon; 3) Kayu Mati (*Dead Wood*), termasuk pohon mati yang masih berdiri, tunggul, dan kayu tumbang; 4) Serasah (*Litter*), yaitu lapisan materi organik yang belum terdekomposisi di lantai hutan seperti daun dan ranting gugur; dan 5) Karbon Organik Tanah (*Soil Organic Carbon/SOC*), yakni karbon yang tersimpan di dalam tanah. Mengukur kelima lambung ini secara komprehensif akan memberikan gambaran total stok karbon hutan yang akurat (KLHK., 2019).

Peran utama dari perhitungan stok karbon adalah sebagai landasan ilmiah dan teknis untuk program mitigasi perubahan iklim, terutama skema REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*). Untuk dapat mengklaim insentif dari penurunan emisi, sebuah negara atau wilayah harus terlebih dahulu menetapkan tingkat emisi rujukan (*Forest Reference Emission Level/FREL*), yang didasarkan pada data historis deforestasi dan data stok karbon hutan. Dengan kata lain, tanpa kemampuan untuk mengukur karbon secara akurat, tidak mungkin untuk membuktikan bahwa suatu intervensi telah berhasil mengurangi emisi. Oleh karena itu, perhitungan karbon adalah tulang punggung dari sistem pembayaran berbasis kinerja (*performance-based payment*) dalam REDD+ (Kennedy, 2024).

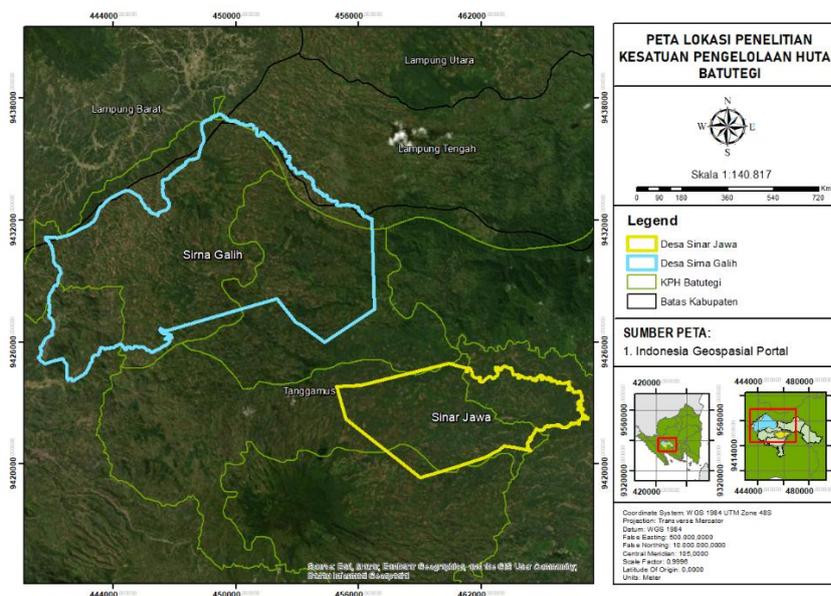
Perhitungan karbon menggunakan persamaan alometrik merupakan metode non destruktif yang umum digunakan untuk menduga stok karbon dalam biomassa pohon tanpa harus menebang pohon tersebut. Menurut Asigbaase *et al.* (2023) Persamaan alometrik menghubungkan parameter pohon yang mudah diukur di lapangan, seperti diameter batang pada ketinggian 1,3 meter (DBH), tinggi pohon, dan berat jenis kayu, dengan biomassa total pohon. Biomassa ini kemudian dikonversi menjadi kandungan karbon menggunakan faktor konversi, biasanya sekitar 50% dari biomassa kering. Model persamaan alometrik, yang biasanya berbentuk fungsi pangkat seperti $Y = a \times (DBH)^b$, memungkinkan estimasi biomassa atas permukaan (batang, cabang, daun) dan biomassa bawah permukaan

(akar) dengan akurasi yang tinggi, sehingga mendukung pendugaan stok karbon secara efisien dan ramah lingkungan (Dutta Roy *et al.*, 2023). Pendekatan ini sangat penting untuk inventarisasi karbon hutan, monitoring perubahan stok karbon, dan mendukung program mitigasi perubahan iklim tanpa merusak sumber daya hutan

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober-November 2024 di dua lokasi yang berbeda, yaitu Pekon Sirna Galih, Kecamatan Ulubelu, dan Pekon Sinar Jawa, Kecamatan Air Naningan, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Penentuan kedua desa tersebut dilakukan secara sengaja (*purposive*) karena area ini merupakan bagian dari KPH Batu Tegi yang memiliki tiga jenis tutupan lahan: monokultur, agroforestri, dan hutan dalam lahan perhutanan sosial. Area ini juga aktif berkolaborasi dengan PT. Nestle Indonesia Tbk, sebuah perusahaan yang berupaya mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari proses produksinya, bersama dengan kehutanan Unila untuk mengkaji kontribusi agroforestri dalam mitigasi perubahan iklim di Kecamatan Ulubelu, Kabupaten Tanggamus. Berikut merupakan peta lokasi penelitian yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta wilayah studi penelitian

3.2. Alat dan Objek Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam studi ini adalah pita ukur, *Tallysheet*, ATK (Alat tulis kantor), tali rafia, *software ArcGIS*, laptop atau *personal computer*, GPS, *handphone* sebagai kamera digital dan *software* pendukung lainnya seperti *Microsoft Office* serta *Microsoft excel*. Objek pada penelitian ini merupakan tiga tutupan lahan, yaitu pada lahan hutan, agroforestri, dan monokultur di KPH Batu Tegi.

3.3. Jenis Data Penelitian

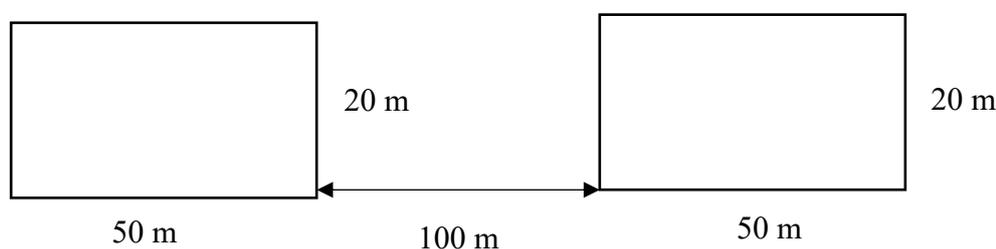
Penelitian ini menggunakan dua jenis data yaitu data primer dan data sekunder yang berhubungan dengan fokus penelitian. Menurut indrayatie (2021) data primer merupakan data yang didapatkan dari lapangan atau sumber data yang dikumpulkan dari inventarisasi hutan pada tiga tipe tutupan lahan. Pengambilan data primer dilakukan dengan membuat plot sampel pada setiap jenis tutupan lahan yang akan diteliti. Data primer yang dibutuhkan berupa dokumentasi kegiatan yang dilakukan dan jenis tanaman, diameter, dan keliling pada setiap fase pertumbuhan yang ada pada tiga tipe tutupan lahan dengan satu plot terdiri dari tiga petak ukur, yaitu 20x50 (pohon dengan DBH >20 cm); 10x10 (tiang dengan DBH 10-20 cm); dan 5x5 (pancang dengan DBH 1,5-10 cm).

Data sekunder merupakan data yang digunakan sebagai pendukung atau penunjang dari data primer dan untuk memperkuat data primer (Putri *et al.*, 2021). Sumber dari data pendukung ini didapatkan dari sumber yang valid. Data sekunder yang dibutuhkan berupa gambaran umum lokasi penelitian, dokumen program pemerintah berkaitan dengan aksi nasional dalam mitigasi perubahan iklim, diperoleh melalui penelusuran data di instansi-instansi terkait serta data pendukung lainnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi literatur yang bisa berasal dari jurnal, buku, dan data publikasi mengenai estimasi cadangan karbon, serta data pendukung lainnya. Data sekunder dapat dikumpulkan dengan mencari referensi melalui internet ataupun perpustakaan (Syahroni, 2021).

3.4. Pengambilan Data Penelitian

3.4.1. Desain Sampling

Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan teknik jalur berpetak, dengan masing-masing petak ukur memiliki luas sebesar 20 m x 50 m untuk petak ukur utama (Cinda *et al.*, 2019). Setiap tipe lahan (agroforestri, hutan dan monokultur) memiliki 6 petak ukur dengan jarak masing-masing petak ukur sebesar 100 m. Luasan petak yang cukup besar memungkinkan peneliti menangkap variasi struktur dan komposisi vegetasi secara menyeluruh dalam tiap tipe lahan, sehingga estimasi parameter seperti biomassa atau cadangan karbon bisa lebih akurat. Selain itu, jarak antar petak yang cukup jauh (100 m) dirancang agar tiap sampel relatif independen dan tidak saling tumpang tindih, menghindari autokorelasi spasial yang dapat mengaburkan hasil analisis statistik.



Gambar 3. Desain Sampling

Rumus Cochran adalah formula yang digunakan untuk menghitung jumlah sampel minimal yang diperlukan dalam suatu penelitian, khususnya ketika populasi sangat besar atau tidak diketahui secara pasti (Masita *et al.*, 2024). Rumus ini membantu menentukan ukuran sampel yang tepat agar hasil penelitian memiliki tingkat kepercayaan dan margin kesalahan yang dapat diterima. *Margin of error* (d) yang digunakan sebesar 16,5% dengan luas lokasi yang diteliti yaitu 6.615,2 ha. Pada penelitian ini, peneliti menggunakan rumus Cochran untuk menentukan jumlah sampel minimal. Rumus Cochran yaitu sebagai berikut.

$$n = \frac{\frac{t^2 x p x q}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\left(\frac{t^2 x p x q}{d^2} \right) - 1 \right)}$$

Keterangan:

n = Jumlah sampel yang diperlukan

N = Jumlah Populasi (luas hutan (ha) dibagi luas plot sampel (ha))

t = tingkat kepercayaan (digunakan 0,95 sehingga nilai $t = 1,96$)

d = taraf kekeliruan (*Margin of error*, digunakan 16,5% (0,165))

p = proporsi dari karakteristik tertentu (golongan) sebesar 50% (0,5)

q = $1 - p$

1 = Bilangan Konstan

Perhitungan untuk menentukan jumlah sampel minimal yang diperlukan untuk pengambilan data menggunakan rumus Cochran, yaitu:

$$\frac{\frac{t^2 \times p \times q}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\left(\frac{t^2 \times p \times q}{d^2} \right) - 1 \right)}$$

$$n = \frac{\frac{1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}{0,165^2}}{1 + \frac{1}{66.152} \left(\left(\frac{1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}{0,165^2} \right) - 1 \right)}$$

$$n = \frac{35,2764}{1 + 0,00001511 \times 34,2764}$$

$$n = \frac{35,2764}{1,0005179}$$

$$n = 35,2581$$

Berdasarkan perhitungan sampel tersebut, maka didapatkan jumlah plot sampel minimal yang dibutuhkan sebanyak 35,2581, dan dibulatkan menjadi 36 plot sampel dari luasan areal penelitian 6.615,2 ha dengan *margin of error* sebesar 16,5%.

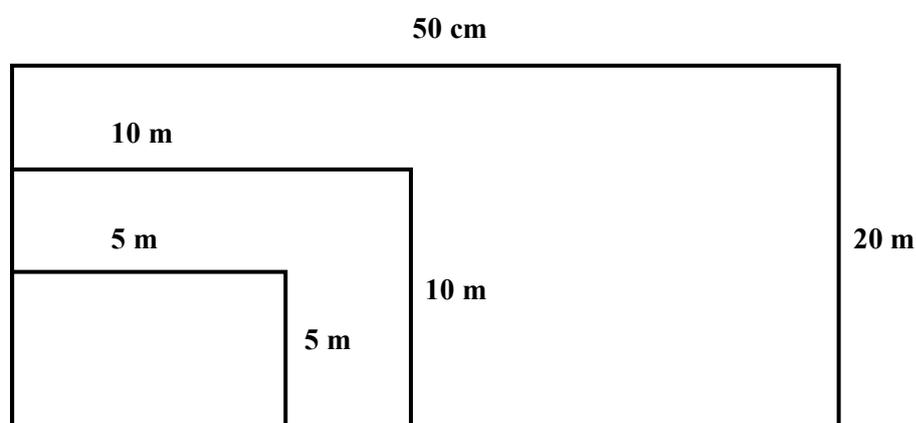
3.4.2. Metode Sampling

Penentuan metode purposive sampling menggunakan plot persegi panjang dan persegi sebagai plot sampel untuk memberikan informasi data yang berbeda-beda pada tiap tutupan lahan. Penelitian ini menggunakan plot dengan bentuk persegi panjang digunakan untuk fase pohon (20 m x 50 m) digunakan untuk fase

pohon karena area yang lebih luas dan memanjang memungkinkan pengukuran yang lebih menyeluruh pada pohon dewasa yang memiliki dimensi besar dan distribusi yang lebih tersebar. Plot berbentuk persegi digunakan untuk fase tiang (10 m x 10 m) dan fase pancang (5 m x 5 m) menyesuaikan dengan ukuran dan kepadatan vegetasi pada fase pertumbuhan lebih muda yang umumnya memiliki dimensi dan jarak antar individu yang lebih kecil sehingga pengukuran dapat dilakukan lebih detail dan akurat (Ali *et al.*, 2016).

Pendekatan ini menggunakan prinsip nested sampling, di mana plot yang lebih besar mengandung sub-plot yang lebih kecil sebagai unit pengukuran bertingkat, sehingga memungkinkan pengamatan bertahap sesuai ukuran dan fase tumbuhan. Hal ini membantu dalam memperoleh informasi yang komprehensif mengenai struktur komposisi vegetasi di tiap tipe tutupan lahan secara efisien dan sistematis (Pertiwi *et al.*, 2024). Selain itu, jumlah plot sebanyak 36 dengan penempatan berdasarkan purposive sampling juga memastikan bahwa titik-titik sampel dipilih secara sengaja untuk mencakup variasi kondisi tutupan lahan yang berbeda, memberikan gambaran yang akurat tentang keanekaragaman dan distribusi vegetasi pada area studi. Dengan desain plot seperti ini, data yang diperoleh menjadi lebih representatif dan mudah dianalisis untuk tujuan inventarisasi, estimasi biomassa, atau cadangan karbon.

Bentuk plot untuk pengambilan sampel pada masing-masing tipe tutupan lahan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Plot Pengambilan Sampel

Keterangan:

5 m x 5 m : sub plot untuk pancang

10 m x 10 m : sub plot untuk tiang

20 mx 50 m : sub plot untuk pohon

3.5. Analisis Data

3.5.1. Perhitungan Analisis Vegetasi

Analisis yang dilakukan berdasarkan besarnya INP yaitu dari penjumlahan nilai kerapatan relatif, frekuensi relatif, dan dominansi relatif yang dapat dihitung dengan persamaan yang dikemukakan oleh Indriyanto (2006), yaitu sebagai berikut.

1. Kerapatan

Kerapatan yaitu jumlah individu per unit yang ditemukan di dalam luas petak contoh. Kerapatan untuk masing-masing jenis tumbuhan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$K = \frac{\text{Jumlah individu suatu jenis}}{\text{Luas seluruh petak contoh}}$$

$$KR = \frac{\text{Kerapatan suatu jenis}}{\text{Frekuensi seluruh jenis}} \times 100\%$$

2. Frekuensi

Frekuensi yaitu jumlah persebaran dari suatu jenis yang dalam pengamatan berada pada suatu ekosistem. Perhitungan penyebaran setiap populasi tumbuhan menggunakan rumus perhitungan frekuensi sebagai berikut.

$$F = \frac{\text{Jumlah petak ditemukannya suatu jenis}}{\text{Jumlah seluruh petak contoh}}$$

$$FR = \frac{\text{Frekuensi suatu jenis}}{\text{Frekuensi seluruh jenis}} \times 100\%$$

3. Dominansi

Dominansi yaitu suatu jenis yang berada pada suatu vegetasi terhadap jenis yang lain. Perhitungan jenis tanaman yang mendominasi pada populasi tumbuhan menggunakan rumus perhitungan dominansi sebagai berikut.

$$D = \frac{\text{Jumlah luas bidang dasar suatu jenis}}{\text{Luas seluruh petak contoh}}$$

$$DR = \frac{\text{Dominansi suatu jenis}}{\text{Dominansi seluruh jenis}} \times 100\%$$

4. Indeks Nilai Penting (INP)

INP yaitu parameter yang dapat dipakai untuk menyatakan tingkat dominansi spesies pada suatu komunitas tumbuhan. Berdasarkan persamaan kerapatan, frekuensi, dan dominansi tersebut, maka untuk menghitung besar INP suatu spesies pada fase pohon, tiang, dan pancang sebagai berikut.

$$INP = KR + FR + DR$$

Pada fase semai menggunakan perhitungan sebagai berikut.

$$INP = KR + FR$$

Keterangan:

INP = Indeks Nilai Penting

KR = Kerapatan Relatif

FR = Frekuensi Relatif

DR = Dominansi Relatif

3.5.2. Perhitungan Keanekaragaman Hayati (Tumbuhan)

3.5.2.1. Indeks Keanekaragaman Jenis (*Shannon-Wiener*)

Menurut Budi *et al.*, (2023) Indeks keanekaragaman jenis menggambarkan bagaimana keadaan populasi secara matematis untuk mempermudah saat menganalisis mengenai jumlah individu masing-masing jenis pada suatu komunitas. Kemudian untuk menentukan atau mengetahui Tingkat keanekaragaman jenis maka diperlukan rumus Shannon-Wiener. Menurut (Odum, 1996; Indriyanto, 2006), Perhitungan indeks keanekaragaman jenis dengan menggunakan rumus Shannon-Wiener adalah sebagai berikut.

$$H' = - \sum_{i=1}^s pi \ln pi$$

$$Pi = \frac{Ni}{N}$$

Keterangan:

H' = Indeks keanekaragaman jenis *Shannon Wiener*

- N_i = Jumlah individu jenis ke-i
 N = Jumlah individu seluruh jenis
 P_i = Proporsi individu jenis ke-i

Kategori indeks keanekaragaman jenis dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

- $H' < 1$ = Keanekaragaman rendah
 $1 < H' < 3$ = Keanekaragaman sedang
 $H' > 3$ = Keanekaragaman tinggi

3.5.3. Biomassa Atas Permukaan

Pengambilan data untuk biomassa pohon dilakukan dengan menggunakan metode *non destruktive* yaitu dengan tidak menebang pohon pada setiap pohon yang berada di dalam plot. Hasil pengukuran akan dianalisis menggunakan rumus persamaan alometrik untuk menghitung biomassa berdasarkan spesies pohon dengan menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut.

$$AGB = \alpha D^b$$

Keterangan:

- AGB = Kandungan biomassa atas permukaan (kg)
 D = Diameter pohon setinggi dada (cm)
 α, b = Konstanta

Tabel 2. Persamaan alometrik yang digunakan untuk menduga biomassa pohon

Jenis Pohon	Persamaan Alometrik	Sumber
Campuran	$B = 0,206 (D^{2,56}) (\rho^{0,889})$	Manuri <i>et al</i> (2017)
Kopi pangkas	$B = 0,281 (D)^{2,06}$	Arifin (2001); Van Noordwijk <i>et al.</i> (2002)
Jati Putih	$B = 0,128 (D)^{2,35}$	Rifai (2024)
Jati	$B = 0,0944 (D)^{2,4578}$	Siregar (2012)
Mahoni Daun Lebar	$B = 0,048 (D)^{2,68}$	Adinugroho <i>et al</i> (2006)
Jabon Merah	$B = 0,014 (D)^{2,958}$	Siregar (2007)
Kakao	$B = 0,1208 (D)^{1,98}$	Hairiah <i>et al</i> (2007)
Meranti	$B = 0,067 (D)^{2,859}$	Yunita (2016)
Payung (Afrika)	$B = 0,0559 (D)^{2,464}$	Sukiman <i>et al</i> (2016)
Sengon	$B = 0,623 (D)^{1,471}$	Ohorella <i>et al</i> (2022)

Keterangan: B = Biomassa (kg/pohon), ρ = Berat jenis kayu (g/cm^{-3}), D = Diameter pohon setinggi dada (cm)

3.5.4. Biomassa Bawah Permukaan

Perhitungan biomassa bawah permukaan pada akar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang disusun oleh Cairns *et al.*, 1997; Sutaryo, 2009 sebagai berikut.

$$\text{BGB} = \exp(-1,0587 + 0,8836 \times \ln \text{AGB})$$

Keterangan:

BGB = Biomassa bawah permukaan (kg)

AGB = Nilai biomassa atas permukaan (kg)

3.5.5. Perhitungan Estimasi Karbon

Potensi karbon dapat diperkirakan dengan mengkonversi 0,47 dari biomassa atas permukaan, biomassa bawah permukaan (akar), dan nekromassa (SNI, 2011). Rumus yang digunakan dalam memperkirakan potensi karbon adalah sebagai berikut:

$$C = B \times 0,47$$

$$C = N \times 0,47$$

Keterangan:

C = Karbon (kg)

B = Biomassa (kg)

N = Nekromassa (kg)

0,47 = stdr. internasional penduga karbon

3.5.6. Perhitungan Cadangan Karbon Per Hektar pada Tiap Plot

Semua nilai karbon yang diperoleh dalam satu petak dijumlahkan untuk mendapatkan nilai karbon rata-rata per petak dan kemudian diakumulasikan dalam luasan per hektar. Rumus yang digunakan (SNI, 2011) adalah:

$$C_n = C_x / 1000 \times 10000 / (L \text{ plot})$$

Keterangan:

C_n = Kandungan karbon per hektar pada masing-masing *carbon pool* pada tiap plot (ton/ha)

C_x = Kandungan karbon pada masing-masing *carbon pool* pada tiap plot (kg)

L plot = Luas plot pada masing-masing *pool* (m²)

3.5.7. Analisis Statistik Ketidakpastian dari Faktor Cadangan Karbon

Analisis ketidakpastian diperlukan untuk mengukur ketidakpastian estimasi cadangan karbon yang menggunakan simulasi *Mote Carlo* (Budiharto *et al.*, 2022). Perhitungan analisis statistik ketidakpastian dari faktor cadangan karbon dapat dihitung dengan rumus yang disajikan dalam bentuk Tabel sebagai berikut.

Tabel 3. Analisis Statistik Nilai Ketidakpastian dari Faktor Cadangan Karbon

Analisis Statistik								
Tipe tanaman	Mean (Mj)	Standard Deviation (SD)	Sampel Count (n)	t-stat at 95% (t)	Confidence Interval (CI)	Lower Bound	Upper Bound	Uncertainty (%)
Tipe tanaman ke-j	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M$	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i + M_j)^2}$			$\frac{SD \times t}{\sqrt{n}}$	$M_j - CI$	$M_j + CI$	$\frac{CI}{M_j} \times 100\%$

Mi adalah jumlah stok karbon (dalam MgC/ha/tahun) dari plot-i di tipe tanaman ke-j, n adalah jumlah plot di tiap tanaman ke-j.

(Sumber: KLHK Direktorat Konservasi Tanah dan Air Forest Programme II)

3.5.8. Potensi Agroforestri Sebagai Strategi Mitigasi Perubahan Iklim

Agroforestri mencakup berbagai sistem penggunaan lahan (SPL) yang tingkat kekompleksannya berada di antara “hutan” dan “lahan pertanian terbuka”. Dampak agroforestri terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) ditentukan oleh besarnya biomassa pohon, ketebalan seresah yang menutup permukaan tanah, tingkat kepadatan tanah yang mempengaruhi pertukaran gas di udara dengan tingkat aerasi dalam tanah, dan neraca N dalam sistem (Critchley *et al.*, 2023). Oleh karena itu dalam penelitian ini penulis ingin melihat apakah nilai cadangan karbon yang didapat di wilayah studi dapat menjadi strategi mitigasi perubahan iklim. Variabel ini menggunakan metode deskriptif, guna menggambarkan kondisi iklim dengan nilai estimasi karbon tersimpan yang ada di wilayah studi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Nilai estimasi karbon tersimpan/biomassa di tiga tipe tutupan lahan (agroforestri, monokultur dan hutan) di KPH Batu Tegi dengan 31 jenis tanaman yang berbeda-beda diperoleh nilai estimasi karbon tersimpan/biomassa yang paling besar ada pada tanaman Cemara (*Casuarina equisetifolia*) dengan nilai 49.929,24 tC dan total stok karbon akar diperoleh nilai sebesar 498,80 tC pada tanaman Kopi (*Coffea canephora*). Hal ini dikarenakan pohon Cemara (*Casuarina equisetifolia*) berjumlah 75 individu dan memiliki diameter besar sehingga mampu menyimpan cadangan karbon besar.
2. Nilai karbon tersimpan di tiga tipe tutupan lahan berbeda-beda, pada lahan agroforestri memiliki nilai 104,65 ton karbon/hektar (tC/ha), lahan hutan sebesar 129,13 tC/Ha, dan lahan monokultur sebesar 49,68 tC/ha. Nilai karbon tersimpan tertinggi ada pada lahan hutan, hal ini dikarenakan lahan hutan memiliki nilai kerapatan yang tinggi, jumlah pohon yang banyak dengan diameter yang besar. Karbon tersimpan yang dimiliki sangat tinggi dibandingkan dengan lahan agroforestri dan lahan monokultur.
3. Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, lahan agroforestri berpotensi dalam strategi mitigasi perubahan iklim. Hal ini dikarenakan nilai rata-rata jumlah karbon tersimpan di lahan agroforestri memiliki nilai yang tidak berselisih jauh dengan lahan hutan yaitu sebesar 104,65 tC/Ha. Sehingga lahan agroforestri merupakan salah satu strategi dalam menurunkan konsentrasi CO₂ dibandingkan dengan lahan monokultur dan lahan pertanian terbuka.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya perlu diperbanyak jumlah sampel petak ukurnya. Pada penelitian ini sampel berjumlah sebanyak 12 petak ukur di 3 tipe tutupan lahan. Kesalahan pada saat melaksanakan pengambilan data (*sampling error*) terbilang cukup besar. Saran penulis ketika melaksanakan pengambilan data, sampel yang diambil lebih baik diperbanyak sehingga data akan beraneka ragam dan itu akan memberi keakuratan dalam menganalisisnya. Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah menggunakan persamaan alometrik yang terbaru, agar mendapatkan hasil yang diinginkan. Kemudian saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya agar lebih banyak membaca mengenai karbon dan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, J. Z. 2024. Penguatan petani kecil dalam mendukung ketahanan pangan nasional. *Journal of Sustainability, Society, and Eco-Welfare*. 1(2).
- Adelina, M., Harianto, S. P., & Nurcahyani, N. 2016. Keanekaragaman jenis burung di hutan rakyat Pekon Kelungu Kecamatan Kotaagung Kabupaten Tanggamus. *Jurnal Sylva Lestari*. 4(2): 51-60
- Adinugroho, W. C., dan Sidiyasa, K. 2006. Model pendugaan biomassa pohon mahoni (*Swietenia macrophylla* King) di atas permukaan tanah. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*. 3(1): 103-117.
- Afifah, F. A. N., Febryano, I. G., Santoso, T., & Darmawan, A. 2021. Identifikasi perubahan penggunaan lahan agroforestri di Pulau Pahawang. *Journal of Tropical Marine Science*. 4(1): 1-8.
- Ali, M. A., Hikmat, A., & Santosa, Y. 2016. Penentuan bentuk dan ukuran plot contoh optimal pengukuran keanekaragaman spesies tumbuhan di hutan pegunungan bawah. *Media Konservasi*. 21(1): 42-47.
- Allen, R. V., & Syahfitra, M. 2025. Pemanfaatan Data Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Pemantauan Penggunaan Lahan di Kabupaten Limapuluhkota. *Atech-i*. 2(2): 40-48.
- Al-Reza, D. D., Hermawan, R., & Prasetyo, L. B. 2017. Potensi cadangan karbon di atas permukaan tanah di Taman Hutan Raya Pancoran Mas Depok. *Media Konservasi*. 22(1). 71-78.
- Andi, A., Hio, Y. K. P., & Monsoba, A. 2025. Upaya Pemerintah Daerah Kabupaten Dalam Mitigasi Dan Adaptasi Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca: Regency Regional Government Efforts in Mitigation and Adaptation to Control Greenhouse Gas Emissions. *Jurnal Media Hukum*. 13(1): 27-40.
- Anhar, A., Hayati, D., Muslih, A. M., Siregar, A. W., Jamilah, M., Baihaqi, A., ... & Hanan, A. 2025. Comparing aboveground carbon stocks in coffee agroforestry and secondary and primary forests in Gayo Highlands, Indonesia. *Frontiers in Forests and Global Change*. 8: 1541302.

- Anna, A. J. 2023. Pengenalan dan Pemahaman Program FOLU NET SINK 2030 Indonesia bagi Siswa SMK Kehutanan Negeri Pekanbaru. *ABDIMAS Lectura: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 1(2): 174-187.
- Antarissubhi, H., Serang, R., Leda, J., Salamena, G. E., Pagoray, G. L., Gusty, S., Rachman, R.M., & Safar, A. 2023. *Krisis Iklim Global di Indonesia (Dampak dan Tantangan)*. Tohar Media.
- Anto, A., Mappasere, F. A., Usman, J., & Alyas, A. 2024. Strategi kebijakan konservasi hutan tropis indonesia untuk mengatasi perubahan iklim: Sebuah literatur review. *Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik (JISIP)*. 13(3): 521-533.
- Arba, M., & Yuniansari, R. 2023. Perlindungan Hutan Dan Fungsinya Bagi Kehidupan Manusia Dan Lingkungan Alam. *Jurnal Kompilasi Hukum*. 8(2).
- Arifin, B., Reed, M., Rosanti, N., Ismono, R. H., & Budiyuwono, S. 2022. Partnership for sustainable coffee certification: Linking up smallholder farmers to global coffee market. *Sustainability Science and Resources*. 2(3): 24-44.
- Arifin, Z., Nugroho, Y., & Tanjung, R. 2021. Estimasi Biomassa dan Karbon pada Sistem Agroforestri Kakao. *Jurnal Pertanian Lestari*. 9(2): 99–108.
- Arkan, R. A., & Kurniati, E. 2025. Keunggulan dan Tantangan Sistem Pertanian Kopi dan Lada di Provinsi Lampung dalam Menghadapi Pasar Global. *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis*. 2(1): 14-26.
- Arsalan, A., Gravitioni, E., & Irianto, H. 2020. Biomassa di atas tanah dan penghitungan simpanan karbon Hutan Kalibiru Kabupaten Kulon Progo. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*. 6(1): 1-8.
- Arsyad, I. D. M., Md, A., Arsyad, A. A., & Aslim, M. A. F. I. 2025. Mitigasi Bencana di Lingkungan Kawasan Karst. *Indonesia Emas Group*.
- Asigbaase, M., Dawoe, E., Abugre, S., Kyereh, B., & Ayine Nsor, C. 2023. Allometric relationships between stem diameter, height and crown area of associated trees of cocoa agroforests of Ghana. *Scientific Reports*. 13(1): 14897.
- Asrul R. A. R. 2024. Model alometrik penduga biomassa jati putih (*Gmelina arborea*) di atas permukaan tanah pada hutan rakyat di Desa Mirring Kecamatan Binuang Kabupaten Polewali Mandar. *Doctoral Dissertation, Universitas Sulawesi Barat*.
- Astuti, Y., & Hadi, S. 2023. Analisis Keanekaragaman Hayati pada Agroforestri Berbasis Buah Tropis di Jawa Barat. *Jurnal Biologi Tropis*. 15(1): 42–53.

- Ayuniza, S., Herwanti, S., Wulandari, C., & Kaskoyo, H. 2020. Kontribusi komposisi tanaman agroforestri terhadap pendapatan petani kelurahan pinang jaya kota bandar lampung. *Tengkawang: Jurnal Ilmu Kehutanan*, 10(2).
- Baharuddin, D. Sanusi, M. Daud, & Ferial. 2014. Potensi biomassa, cadangan karbon dan serapan karbon dioksida serta persamaan allometrik penduga biomassa pada tegakan bambu betung (*Dendrocalamus asper*) pada Hutan Bambu Rakyat di Kabupaten Tana Toraja. *Prosiding. Seminar Nasional Hasil Penelitian Teknologi Hasil Hutan Bukan Kayu*. Mataram.
- Barreto, J., Kelen, Y. P. K., & Lestari, A. K. D. 2025. Review Implementasi Sistem Informasi Geografis Pemetaan Lahan Pertanian Dan Komoditas Pertanian Di Kabupaten Belu Berbasis Dashboard. *ZONasi: Jurnal Sistem Informasi*. 7(1): 293-303.
- Budi, S.S., Prijono, A., & Kusumaningsih, K.R. 2023. Analisis vegetasi penyusun asmin tropical rain forest conservation 2, PT. Asmin Bara Bronang, Kapuas, Kalimantan Tengah. *Jurnal Wana Tropika*. 13(01): 17-24.
- Budiastuti, M. T. S. 2020. Agroforestri sebagai bentuk mitigasi perubahan iklim. In *Seminar Nasional Magister Agroteknologi Fakultas Pertanian UPN "Veteran."*
- Budiharto., Krisnawati, H., Manuri, S., Puwanto, J., Asaad, I., Nurhayati., Gunawan, W., Rusolono, T., Darmawan, A., Novita, A., Tosiani, A., Silva, N., Adinugroho, W.C., Marthinus, D., Dharmawan, I.W.S., Zamzani, F., Djuariah, R., Oktavia, E.R., Imansyah, T., Subarno., Wulandari, R. 2022. *National Forest Reference Level for Deforestation, Forest Degradation and Enhancement of Forest Carbon Stock*. Director General of Climate Change. Republik of Indonesia.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111: 1-11.
- Cinda, F. G., Panambe, N., & Peday, M. H. 2019. Analisis Vegetasi Tumbuhan Berkayu pada Kawasan Hutan Tropis Dataran Rendah Cagar Alam Pegunungan Wondiwoi. *Jurnal Kehutanan Papuasiasia*. 5(1): 79-92.
- Critchley, W., Harari, N., Mollee, E., Mekdaschi-Studer, R., & Eichenberger, J. 2023. Sustainable land management and climate change adaptation for small-scale land users in Sub-Saharan Africa. *Land*. 12(6): 1206.
- Damanik, S. E., Hut, S., & Sahudra, T. M. 2021. *Manajemen Wilayah Hutan*. Penerbit K-Media.
- Darmawan, A., Warta, Z., Molidena, E., Valla, A., Firdaus, M. I., Winarno, G. D., Winarno, B., Rusolono, T., & Tsuyuki, S. 2022. Aboveground forest carbon

- stock in protected area: A case study of Bukit Tigapuluh National Park, Indonesia. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*. 7(1): 1–17.
- De Foresta, H., Michon, G., & Somarriba, E. 2000. *Criteria and Indicators for Simple and Complex Agroforestry Systems*. CIFOR.
- Duffy, C., Toth, G. G., Hagan, R. P., McKeown, P. C., Rahman, S. A., Widyaningsih, Y., Sunderland, T. C. H., & Spillane, C. 2021. Agroforestry contributions to smallholder farmer food security in Indonesia. *Agroforestry Systems*. 95(6): 1109-1124.
- Dutta Roy, A., Das, S. K., & Debnath, B. 2023. A non-destructive approach to develop tree-level allometric equations for estimating aboveground biomass in the forests of Tripura, Northeast India. *Tropical Ecology*. 64(3): 532-542.
- Fadillah, M. R. A., Bashit, N., Qoyimah, S., Susilo, H., & Apriyanti, D. 2023. Analisis Pendugaan Stok Karbon Vegetasi Dengan Penginderaan Jauh Menggunakan Metode Light Use Efficiency Di Hutan Penggaron, Kota Ungaran Kabupaten Semarang Provinsi Jawa Tengah. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*. 6(1): 32-42.
- Febryano, I. G., Sari, Y. P., Herwanti, S., & Bintoro, A. 2024. Planting patterns in rubber agroforestry (*Hevea brasiliensis*) developed by the communities of Menggala Mas Village, Lampung Province, Indonesia. *Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry*. 66(1).
- Fehrmann, L., Kleinn, C., Magdon, P., Cruzado, C.P. 2017. *Penentuan Standar Minimum Untuk Inventarisasi Pengelolaan Hutan Pada Tingkat KPH*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmHB, FORCLIME Forests and Climate Change Programme. Jakarta. 96 hlm.
- Fikry, M. Y., & Sarjan, M. 2024. Peran agroforestri dalam mendukung pengelolaan sumberdaya alam berkelanjutan. *Lamda: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA dan Aplikasinya*. 4(1): 16-22.
- Gulo, H. M., & Moimau, A. L. 2024. Tanda-tanda Zaman Pada Perubahan Iklim Dan Dampaknya Pada Dunia. *Sinar Kasih: Jurnal Pendidikan Agama dan Filsafat*. 2(3): 29-38.
- Gupta, S. R., Dagar, J. C., Sileshi, G. W., & Chaturvedi, R. K. 2023. Agroforestry for climate change resilience in degraded landscapes. *Agroforestry for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa*. 121-174.
- Hanafi, I., Subhan, S., & Basri, H. 2021. Analisis vegetasi mangrove (studi kasus di hutan mangrove Pulau Telaga Tujuh Kecamatan Langsa Barat). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. 6(4): 740-748.

- Harsya, E. P., Safitri, I., Riniarti, M., Wulandari, C., & Kaskoyo, H. 2025. Efektifitas Kebijakan Daerah Dalam Pengelolaan Hutan Berbasis Agroforestri. *Makila*. 19(1): 27-42.
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. 2011. An Introduction to Geographical Information Systems. *Pearson Education*.
- Husni, N., & Remiswal, R. 2024. Peran manusia terhadap keseimbangan lingkungan hidup di Nagari Limakaum. *Jurnal Penelitian Ilmu Pendidikan Indonesia*. 3(2): 338-344.
- Ibrahim, A. O., Adedeji, A. S., & Meduna, P. N. 2019. Constraints facing agroforestry practices among farmers in New Bussa, Nigeria. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*. 11(3): 133-141.
- Imburi, C. S., Angrianto, R., Tanur, E. A., Widodo, I., & Sitompul, G. A. 2024. Peran hutan mangrove dalam menanggulangi dampak perubahan iklim di wilayah pesisir Indonesia. *Jurnal Geosains West Science*. 2(3): 122-132.
- Indrayatie, E. R. 2021. Inventarisasi Tanam Tumbuh Dan Pola Ruang Pada Tapak Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 Kv Amuntai-Tamiang Layang. *Jurnal Sylva Scientiae*. 4(2): 218-226.
- Indriyanto. 2006. Ekologi Hutan. *Buku*. Bumi Aksara. Jakarta. 210 hlm.
- Insusanty, E., Ikhwan, M., & Sadjati, E. 2017. Kontribusi agroforestri dalam mitigasi gas rumah kaca melalui penyerapan karbon. *Jurnal Hutan Tropis*. 5(3).
- IPCC. 2001. Climate Change 2001 Mitigation, Summary for Policymakers, WG III Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva.
- Irma, M. F., & Gusmira, E. 2024. Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia. *JSSIT: Jurnal Sains dan Sains Terapan*. 2(1).
- Irundu, D., Idris, A. I., & Sudiatmoko, P. 2023. Biomassa Dan Karbon Tersimpan Diatas Tanah Pada Hutan Rakyat Agroforestri Di Kecamatan Bulo Kabupaten Polman. *Jurnal Hutan dan Masyarakat*. 32-41.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. 2019. *Teknik pendugaan cadangan karbon hutan*. Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan.
- Kennedy, P. S. J. 2024. Kajian mengenai pemanfaatan perhutanan sosial dalam perdagangan karbon di Indonesia untuk menghadapi perubahan iklim. *Fundamental Management Journal*. 9(1): 106-120.

- Ketterings, Q.M., R. Coe., M. Van Noordwijk., Y. Ambangau., dan C. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*. Bogor, Indonesia.
- Kittredge, J. 1944. *Estimation of the amount of foliage of trees and stands*. J. For.
- Krisnawati, H., Imanuddin, R., Adinugroho, W.C., Hutabarat, S. 2015. *Metode Standar untuk Pendugaan Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Kehutanan di Indonesia (Versi 1)*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitas, KLHK. Bogor
- Kumar, R., Pandey, A., Rana, R., & Yadav, A. 2019. Climate change and mitigation through agroforestry. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 8(6): 1662-1667.
- Latue, Y. A., Pattinama, M. J., & Lawalata, M. 2019. Sistem pengelolaan agroforestri di Negeri Riring Kecamatan Taniwel Kabupaten Seram Bagian Barat. *Agrilan: Jurnal Agribisnis Kepulauan*, 6(3), 212-230.
- Lestari, K. W., & Dewi, N. 2023. Potensi simpanan karbon pada beberapa tipe agroforestri berbasis kopi robusta di Desa Rowosari, Jember. *Journal Of Tropical Silviculture*. 14(02): 150-157.
- Leuser, G., KPHVI, U., Umar, J. T., Jontor, D., & Subulussalam, K. 2022. Agroforestri: Integrasi Pertanian dan Jasa Lingkungan Hutan dalam Mitigasi Perubahan Iklim Berbasis Kearifan Lokal dan Konservasi Alam. *Dinamika Kemajuan Dalam Studi Pembangunan Pertanian: Membangun Kesadaran dan Pengembangan Inovasi Pertanian*. 29.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. 2015. *Geographic Information Science and Systems*. John Wiley & Sons.
- Maipauw, N. J., Silaya, M., dan Loppies, R. 2020. Strategi pengembangan agroforestri dusung di Negeri Hative Besar Kecamatan Teluk Ambon Kota Ambon. *Median: Jurnal Ilmu Ilmu Eksakta*. 12(1).
- Malamassam, D., Putranto, B., Pebriani, R., Nasir, A., Chairil, A., & Nursaputra, M. 2021. Potential of carbon stock on red jabon stand (*Anthocephalus macrophyllus* (Roxb.) Havil) in Tampinna Village, Angkona District, Luwu Timur Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 870(1): 012032.
- Manuri, S., Brack, C., Rusolono, T., Noor'an, F., Verchot, L., Maulana, S. I., & Soraya, E. 2017. Effect of species grouping and site variables on aboveground biomass models for lowland tropical forests of the Indo-Malay region. *Annals of forest science*. 74: 1-14.

- Mapegau, B. I., Hakim, L., Hayati, I., & Marlina, B. 2025. Tumpangsari: Implementasi Pertanian Berkelanjutan. *USK Press*.
- Masita, S., Suprapti, I., Wijayanti, D. E., & Sunyigono, A. K. 2024. Analisis Perilaku Konsumen Terhadap Keputusan Pembelian Di Coffee Shop “Retorika Kopi” Bangkalan. *Jurnal Agrosains: Karya Kreatif Dan Inovatif*. 9(1): 1-12.
- Muhammad, I. N. 2023. analisis kelayakan potensi wisata alam agroforestri kopi di KPHL Batutege (*Studi Kasus: Desa Penantian dan Desa Sinar Banten*).
- Mustikaningrum, D., Kristiawan, K., & Suprayitno, S. 2021. Emisi gas rumah kaca sektor pertanian di Kabupaten Tuban: inventarisasi dan potensi aksi mitigasi. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*. 9(2): 155-171.
- Natalia, D., Yuwono, S. B., & Qurniati, R. 2014. Potensi penyerapan karbon pada sistem agroforestri di desa pesawaran indah kecamatan padang cermin kabupaten pesawaran provinsi lampung. *Jurnal Sylva Lestari*. 2(1): 11-20.
- Ningsih, E. P. 2024. Peran hutan dalam mitigasi perubahan iklim: analisis penyerapan karbon oleh hutan hujan tropis. *Journal of Horizon*. 1(1): 1-5.
- Nurfadillah, A., Zulfikar, M., & Yani, F. 2023. Agroforestri sebagai Solusi Mitigasi Karbon di Lahan Marginal Kalimantan. *Jurnal Klimatologi dan Lingkungan*. 7(3): 117–126.
- Odum, E.P. 1996. *Dasar-Dasar Ekologi*. Edisi ketiga. Buku. Gajah Mada Universitas Press. Yogyakarta.
- Ohorella, S., Febriadi, I., & Sangadji, Z. 2022. Sengon biomass carbon stock in tradisional agroforestry land tipe; climate change implication. *Agrikan Jurnal Agribisnis Perikanan*. 15(2): 759-769.
- Oliveira, J. V., Cohen, J. C. P., Pimentel, M., Tourinho, H. L. Z., Lôbo, M. A., Sodr e, G., & Abdala, A. 2020. Urban climate and environmental perception about climate change in Bel em, Par a, Brazil. *Urban Climate*. 31: 100579.
- Olivi, R., Qurniati, R., & Firdasari, F. 2015. Kontribusi agroforestri terhadap pendapatan petani di Desa Sukoharjo 1 Kecamatan Sukoharjo Kabupaten Pringsewu. *Jurnal Sylva Lestari*. 3(2): 1-12.
- Pakaya, P., Baderan, D. W. K., & Hamidun, M. S. 2025. Efektivitas Sistem Agroforestri dalam Meningkatkan Kesehatan Tanah dan Produktivitas Pertanian. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*. 2(2): 12-27.

- Pangastuti, G. A. P. A., Hartati, R., Sedjati, S., & Pratama, A. 2025. Kandungan Karbon Pada Sedimen Dan Struktur Komunitas Mangrove Di Kelurahan Lalowaru, Sulawesi Tenggara. *Journal of Marine Research*. 14(2): 302-310.
- Passal, I., Mardiatmoko, G., & Latumahina, F. 2019. Hubungan volume tegakan dengan kandungan biomassa tersimpan skala plot pada areal agroforestry Dusung di dusun Toisapu kota Ambon. *Jurnal Hutan Pulau-Pulau Kecil*. 3(1): 40-54.
- Pertiwi, V., & Chairul, C. 2024. Analisis Vegetasi Tumbuhan Tingkat Pohon di Kawasan Geopark Silokek Kabupaten Sijunjung. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(1), 367-379.
- Podong, C., Khamfong, K., Noinamsai, S., & Mhon-ing, S. 2024. Carbon sequestration in agrosilviculture agroforestry systems: preliminary results from three villages in Uttaradit Province, Northern Thailand. *Biotropia*. 31 (2): 134–145.
- Pontoh, S., Ratag, S. P., Pangemanan, E. F., & Ngangi, C. R. 2024. Agrosilvopasture Pattern In Paslaten Village, Tatapaan District, South Minahasa Regency, North Sulawesi Province. *Jurnal Agroekoteknologi Terapan*. 5(1): 68-74.
- Prasetyaningtyas, O., & Trimurtini, T. 2024. Peran konservasi sumber daya alam hutan terhadap tujuan sustainable development goals (sdgs). *Conserva*. 2(1): 13-21.
- Prasetyo, M. A., & Suharyanto, B. 2020. Nilai Penting Spesies pada Sistem Agroforestri Campuran di Lahan Terdegradasi. *Jurnal Ekosistem Hutan*. 8(3): 175–183.
- Putri, R., Susilawati, W. O., & Sukron, M. 2021. Analisis Faktor Pendukung dan Faktor Penghambat Di SD Negeri 104/II Sungai Pinang. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*. 1(2): 109-112.
- Rahayu S, Lusiana B, Noordwijk M. 2007. Pendugaan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur. *Icraf*. Bogor.
- Rahmadanty, A., Handayani, I. G. A. K. R., & Najicha, F. U. 2021. Kebijakan pembangunan kesatuan pengelolaan hutan di Indonesia: suatu terobosan dalam menciptakan pengelolaan hutan lestari. *Al-Adl: Jurnal Hukum*. 13(2): 264-283.
- Rahman, V. S. P. 2024. Strategi Indonesia dalam Mengatasi Perubahan Iklim Melalui Kerjasama Internasional. *Mimbar: Jurnal Penelitian Sosial dan Politik*. 13(1).

- Rahmawati, D., Siregar, R. E., & Wibowo, A. 2022. Potensi Agroforestri Kopi dalam Menyerap Karbon di Sumatera Selatan. *Jurnal Agroklimat*. 19(2): 112–123.
- Rawana., Wijayani, S., dan Masrur, M.A. 2022. Indeks nilai penting dan keanekaragaman komunitas vegetasi penyusun hutan di Alas Burno SUBKPH Lumajang. *Jurnal Wana Tropika*. 12(02): 80-89.
- Riogilang, H., Riogilang, H., Sompie, O. B. A., & Jansen, T. 2022. Analisis Adaptasi Dan Mitigasi Perubahan Iklim Provinsi Sulawesi Utara. *TEKNO*. 20(82): 1259-1269.
- Riswan, S., Fauzi, R., & Lestari, T. 2021. Agroforestri dan Ketahanan Ekosistem Tropika: Kajian di Kalimantan Timur. *Jurnal Kehutanan Tropis*. 13(1): 87–96.
- Sahureka, M., Wattimena, C. M., & Latupapua, L. 2024. Pengelolaan Agroforestry Berdasarkan Pola Tanam Oleh Masyarakat Di Negeri Waai Kecamatan Salahutu Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Hutan Pulau-Pulau Kecil*. 8(1): 82-92.
- Santoso, T., Darmawan, A., & Hilmanto, R. 2024. Agroforestry Land Use Land Cover Area Classification Using Decision Tree Algorithm. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 30(3): 399-399.
- Sari, N. K., Fathoni, A., & Permana, M. 2020. Restorasi Ekosistem melalui Agroforestri di DAS Citarum Hulu. *Jurnal Konservasi Hayati*. 11(4): 230–241.
- Sari, R. R., Ishaq, R. M., Purnamasari, E., & Saputra, D. D. 2025. Fungsi Ganda Agroforestri Kopi: Konservasi Cadangan Karbon Dan Keanekaragaman Vegetasi. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 12(1): 159-169.
- Savitri, A. K., & Yuliasuti, N. 2024. Mitigasi Perubahan Iklim melalui Upaya Pengelolaan Sampah di Dusun Soka, Kabupaten Semarang. *Teknik PWK (Perencanaan Wilayah Kota)*. 13(4).
- Siarudin, M., Rahman, S. A., Artati, Y., Indrajaya, Y., Narulita, S., Ardha, M. J., & Larjavaara, M. 2021. Carbon sequestration potential of agroforestry systems in degraded landscapes in West Java, Indonesia. *Forests*. 12(6): 714.
- Sihotang, F. M. P. 2025. Kontribusi Aktor Non-Negara Terhadap Lingkungan Global Melalui Implementasi Pasar Karbon: Penerapan Sistem Registri Nasional-Pengendalian Perubahan Iklim di Indonesia. *Padjadjaran Journal of International Relations*. 7(2): 137-153.

- Simamora, H. I. 2024. Kontribusi Pertanian Agroforestry Terhadap Pendapatan Usaha Tani Kopi. *Agri Wiralodra*. 16(1): 1-11.
- Simarmata, N., Lisafitri, Y., & Hakim, D. M. 2019. Pemetaan cadangan karbon menggunakan citra resolusi tinggi untuk pengelolaan Tahura Wan Abdul Rachman, Lampung. *J SIG (Jurnal Sains Informasi Geografi)*. 2(1): 18-29.
- Siregar, C. N. 2012. Formulasi persamaan allometrik untuk pendugaan biomassa karbon jati (*Linn. f*) di Jawa Barat tectona Grandis. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*. 9(3): 29078.
- Standarisasi Nasional Indonesia. 2011. *Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon – Pengukuran lapangan untuk penaksiran cadangan karbon hutan (ground based forest carbon accounting)*. BSN. Jakarta.
- Sudarma, I. M., & As-syakur, A. R. 2018. Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian di Provinsi Bali. *SOCA J. Sos. Ekon. Pertan*. 12(1): 87.
- Suhendi, H., & Ali, F. U. 2020. Sistem informasi geografis berbasis web untuk pemetaan jalan dan jembatan di Kota Cirebon. *Naratif: Jurnal Nasional Riset, Aplikasi dan Teknik Informatika*. 2(1): 6-15.
- Sukiman, I. S. H., Wardani, M., dan Heriyanto, N. M. 2016. Pendugaan biomassa dan kandungan karbon kayu afrika (*Maesopsis emenii*) Di Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*. 13(1): 73-81.
- Supriyono, S., Guntar, D., Edwar, E., Zairin, Z., & Sugandi, W. 2018. Sosialisasi potensi bencana dan sistem informasi geografi (SIG) kebencanaan di Kabupaten Seluma. *Bagimu Negeri: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1).
- Suryanto, P. 2024. Agroforestri Pangan Fungsional. *UGM PRESS*.
- Susanto, E. R. 2021. Sistem informasi geografis (GIS) tempat wisata di Kabupaten Tanggamus. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi*. 2(3): 125-135.
- Sutaryo, D. 2009. *Penghitungan Biomassa Sebuah Pengantar untuk Studi Karbon dan Perdagangan Karbon*. Wetlands International Indonesia Programme. Bogor. 48 hlm.
- Syahroni, D. 2021. Inovasi dan Kreativitas Pustakawan Terhadap Layanan Penelusuran, Penggunaan Internet dan Jurnal Online Pada Perpustakaan IAIN Tulungagung. *ACARYA PUSTAKA: Jurnal Ilmiah Perpustakaan dan Informasi*. 8(1): 33-52.
- Tefera, Y., Hailu, Y., & Siraj, Z. 2019. Potential of agroforestry for climate change mitigation through carbon sequestration. *Agricultural Research Technology Open Access Journal*. 22. 556196.

- Triwanto, J. 2024. Peran Agroforestri dalam ketahanan pangan dan kelestarian Lingkungan Secara Berkelanjutan. *UMMPress*.
- Tuah, N., Sulaeman, R., & Yoza, D. 2017. Penghitungan biomassa dan karbon di atas permukaan tanah di hutan larangan adat Rumbio Kab Kampar. (*Doctoral dissertation, Riau University*).
- Wajdi, A., Anjarwani, S. E., & Agitha, N. 2023. Rancang bangun sistem informasi geografis pemetaan lahan garapan kelompok tani pada hutan kemasyarakatan Desa Karang Sidemen berbasis mobile. *Jurnal Teknologi Informasi, Komputer, dan Aplikasinya (JTIKA)*. 5(1): 120-131.
- Wang, T., Dong, L., dan Liu, Z. 2024. Factors driving carbon accumulation in forest biomass and soil organic carbon across natural forests and planted forests in China. *Frontiers in Forests and Global Change*. 6.
- Wattie, G. G. R. W., & Sukendah, S. 2023. Peran penting agroforestri sebagai sistem pertanian berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perkebunan*. 5(1): 30-38.
- Wibowo, D. H., Rakatama, A., & Irhamna, A. D. 2022. The Political Economy of Sustainable Development in Indonesia. *Sustainability Science and Resources*. 1(1).
- World Meteorological Organization. 2024. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023.
- Wulandari, C. 2021. Identifying climate change adaptation efforts in the batutegei forest management unit, Indonesia. *Forest and Society*. 5(1): 48-59.
- Wulandari, C. 2021. Identifying climate change adaptation efforts in the batutegei forest management unit, Indonesia. *Forest and Society*. 5(1): 48-59.
- Wulandari, C., Sari, D. R., Syahiib, A. N., & Novasari, D. 2024. Correlation status of cultural significance index to characteristics of Krui indigenous people as a base for Repong Damar conservation efforts. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 19(1): 69–80.
- Wulandari, S., Mahendra, R., & Darmawan, H. 2021. Peran Partisipasi Masyarakat dalam Keberhasilan Agroforestri. *Jurnal Sosial Ekologi*. 10(2): 135–144.
- Yaqin, N., Rizkiyah, M., Putra, E. A., Suryanti, S., & Febrianto, S. 2022. Estimasi serapan karbon pada kawasan mangrove tapak di desa tugurejo semarang. *Buletin Oseanografi Marina*. 11(1): 19-29.

- Yeny, I., Murniati, M., & Suharti, S. 2020. Community participation in the development of agroforestry at Gedong Wani Forest Management Unit/FMU. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 17(1), 49-66.
- Yuliana, T., Subekti, S., & Hermanto, D. 2024. Stok Karbon dalam Sistem Agroforestri Kayu Keras di Sumatera Barat. *Jurnal Ekologi Tropika*. 12(1): 70–81.
- Yunita, L. 2016. Pendugaan cadangan karbon tegakan meranti (*Shorea leprosula*) di hutan alam pada area silin PT Inhutani II Pulau Laut Kalimantan Selatan. *Jurnal Hutan Tropis*. 4(2): 187-197.