

**ANALISIS DEGRADASI LINGKUNGAN DAN PERTUMBUHAN TANAMAN
PENGIJAUAN DALAM PROGRAM RESTORASI PASCA ALIH FUNGSI
HUTAN LINDUNG DI UB FOREST, MALANG**

DISERTASI

oleh

MUHAMMAD YUSUF

177090100011001



PROGRAM STUDI DOKTOR BIOLOGI

JURUSAN BIOLOGI

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2021

**ANALISIS DEGRADASI LINGKUNGAN DAN PERTUMBUHAN TANAMAN
PENGHIJAUAN DALAM PROGRAM RESTORASI PASCA ALIH FUNGSI
HUTAN LINDUNG DI UB *FOREST*, MALANG**

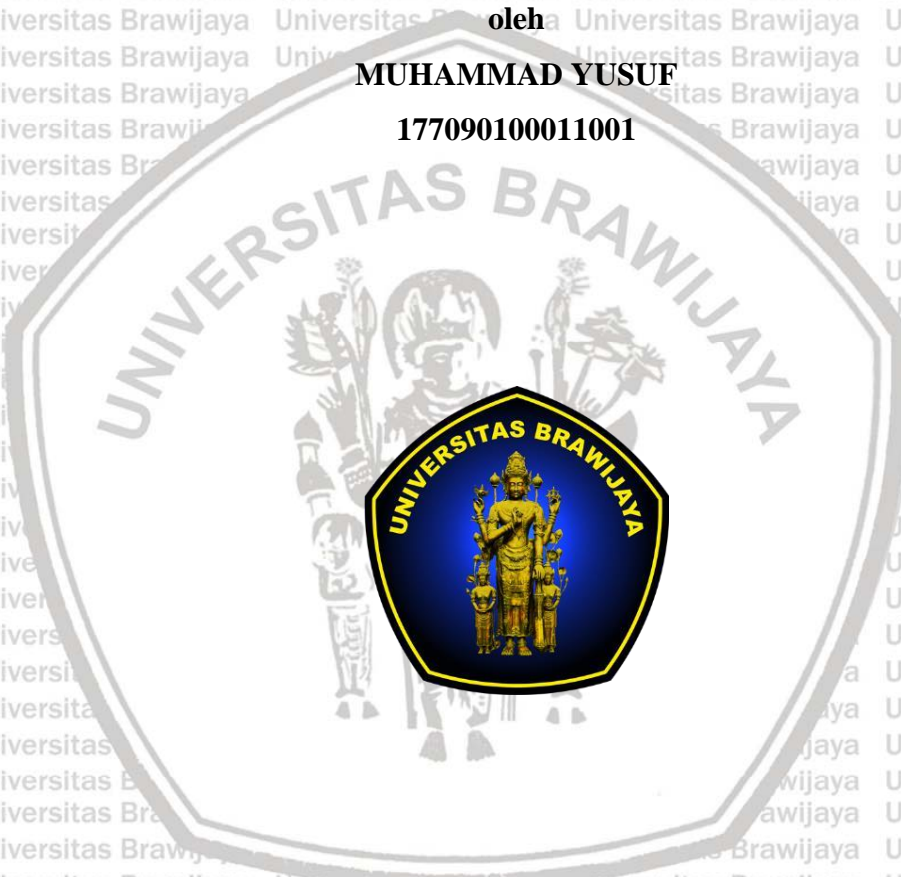
DISERTASI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor dalam bidang Biologi

oleh

MUHAMMAD YUSUF

177090100011001



PROGRAM STUDI DOKTOR BIOLOGI

JURUSAN BIOLOGI

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2021

HALAMAN PENGESAHAN DISERTASI

ANALISIS DEGRADASI LINGKUNGAN DAN PERTUMBUHAN TANAMAN
PENGIHAJUAN DALAM PROGRAM RESTORASI PASCA ALIH FUNGSI
HUTAN LINDUNG DI UB FOREST, MALANG

MUHAMMAD YUSUF, S.Si., M.Si.
177090100011001


Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal 15 Juli 2021 dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh
gelar Doktor dalam Bidang Biologi


Menyetujui,
Promotor


Dr. Endang Arisoeslaningsih, MS.
NIP. 195909081989032001

Ko-Promotor I

Ko-Promotor II


Dr. Adji Achmad R.F., S.Si., M.Sc.
NIP. 198109082005011002


Svahrul Kurniawan, SP, MP, Ph.D.
NIP. 197910182005011002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Biologi

Ketua Program Studi Doktor Biologi



Prof. Muhaimin Rifai, S.Si., Ph.D., Med.Sc.
NIP. 196806261997021001


Dra. Tri Ardvati, M.Agr., Ph.D.
NIP. 196712131991032001

SUSUNAN KOMISI PEMBIMBING DAN PENGUJI DISERTASI

Judul Disertasi:

**ANALISIS DEGRADASI LINGKUNGAN DAN PERTUMBUHAN TANAMAN
PENGHIJAUAN DALAM PROGRAM RESTORASI PASCA ALIH FUNGSI
HUTAN LINDUNG DI UB *FOREST*, MALANG**

Nama : Muhammad Yusuf

NIM : 177090100011001

KOMISI PROMOTOR :

Promotor : Dr. Endang Arisoesilaningsih, MS

Ko-Promotor : Dr. Adji Achmad Rinaldo Fernandes, S.Si., M.Sc.

Ko-Promotor : Syahrul Kurniawan, SP, MP, Ph.D.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji I : Dr. Endang Arisoesilaningsih, MS

Dosen Penguji II : Dr. Adji Achmad Rinaldo Fernandes, S.Si., M.Sc.

Dosen Penguji III : Syahrul Kurniawan, SP, MP, Ph.D.

Dosen Penguji IV : Prof. Amin Setyo Leksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Dosen Penguji V : Irfan Mustafa, S.Si., M.Si., Ph.D.

Dosen Penguji VI : Dr. Vivi Novianti, S.Si., M.Si.

Tanggal Ujian Tertutup : 7 Juli 2021



HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam Naskah Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, saya bersedia Disertasi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (DOKTOR) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, 15 Juli 2021



Nama : Muhammad Yusuf

NIM : 177090100011001

PEDOMAN PENGGUNAAN DISERTASI

Disertasi ini tidak dipublikasikan namun terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Daftar Pustaka diperkenankan untuk dicatat, tetapi pengutipan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai kebiasaan ilmiah untuk menyebutkannya.



RIWAYAT HIDUP

Muhammad Yusuf, lahir di Mojokerto, 21 Maret 1989, putra dari Ayah Masduki dan Ibu Maimunah, lulus dari pendidikan SD pada tahun 2001, pendidikan SMP tahun 2004, dan pendidikan SMA tahun 2007. Pendidikan sarjana S-1 ditempuh di Jurusan Biologi FMIPA Universitas Brawijaya pada tahun 2007-2011, pendidikan magister S-2 ditempuh di Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati, Institut Teknologi Bandung pada tahun 2012-2014. Kemudian, pada tahun 2015 hingga sekarang penulis bekerja menjadi salah satu tenaga kependidikan kontrak di Jurusan Biologi FMIPA UB. Pada tahun 2017, penulis menempuh pendidikan S-3 di Program Studi Doktor Biologi, Fakultas MIPA, UB dan lulus pada tahun 2021.

Malang, Juli 2021

Muhammad Yusuf



RINGKASAN

Analisis Degradasi Lingkungan dan Pertumbuhan Tanaman Penghijauan dalam Program Restorasi Pasca Alih Fungsi Hutan Lindung di UB Forest, Malang

Muhammad Yusuf, Endang Arisoesilaningsih, Adji AR Fernandes, Syahrul Kurniawan
Program Studi Doktor Biologi FMIPA Universitas Brawijaya
2021

Degradasi lingkungan akibat aktivitas alih fungsi hutan berdampak negatif terhadap hilangnya biodiversitas, penurunan kualitas jasa layanan lingkungan, dan terganggunya fungsi ekologis. Salah satu upaya pemulihan fungsi ekosistem hutan terdegradasi dapat dilakukan dengan restorasi melalui penanaman berbagai jenis tanaman hutan dan multiguna. Penilaian cepat (*rapid assessment*) keberhasilan restorasi, yang sensitif terhadap perubahan struktur vegetasi, diperlukan saat ini untuk melengkapi sistem pemantauan yang selama ini ada. Kawasan lindung UB Forest (UBF) adalah contoh ekosistem hutan pegunungan tropis yang mengalami degradasi akibat konversi dan membutuhkan pemulihan. Penelitian ini dilakukan untuk menggali informasi sosial petani hutan terkait kegiatan restorasi dan konservasi biodiversitas hutan, menganalisis dampak aktivitas alih fungsi hutan terhadap lingkungan biotik dan abiotik, menentukan organisme bioindikator, menganalisis keberhasilan hidup dan pertumbuhan tanaman restorasi serta menentukan interaksi variabel-variabel yang berkontribusi terhadapnya.

Penelitian ini dilakukan di area hutan lindung UBF yang telah dialihfungsikan menjadi lahan pertanian, meliputi area pertanian intensif (PI), kebun kopi monokultur tidak terawat (KTT), hutan lindung terdegradasi dengan tanaman campuran (HLS). Area hutan sekunder terkonservasi digunakan sebagai *reference site* (RS). Sebanyak 13 petani hutan menjadi responden dalam kegiatan survei sosial menggunakan teknik wawancara mendalam (*depth interview*) pada penelitian ini. Pengambilan contoh makrofauna tanah dilakukan dengan botol jebak yang ditanam secara acak di masing-masing area. Selain itu, contoh tanah juga diambil secara komposit untuk penentuan karakteristik fisika (agregat, bobot isi, kelembaban), kimia (pH, bahan organik, konduktivitas elektrik), dan komunitas bakteri tanah. Profil kondisi lingkungan biotik dan abiotik ditentukan berdasarkan pengamatan struktur vegetasi, kualitas tanah, komunitas makrofauna dan bakteri tanah. Penentuan organisme bioindikator dilakukan dengan menggunakan indeks nilai indikator (IndVal) pada komunitas makrofauna dan bakteri tanah. Pengamatan tanaman restorasi dilakukan setiap satu bulan sekali dengan mengukur diameter batang dan tinggi tanaman selama 6 – 12 bulan. Data survei sosial dianalisis dengan metode statistik deskriptif untuk mendapatkan informasi hubungan dari data kategorik tersebut. Data penelitian dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA untuk melihat perbedaan nekromassa serasah, karakteristik tanah, diversitas makrofauna, dan komunitas bakteri tanah, serta pertumbuhan tanaman restorasi di masing-masing area. ANOVA diterapkan dengan menggunakan RStudio sementara untuk penyajian data menggunakan Ms. Excel, XLSTAT, dan QIIME untuk deskripsi komunitas dan diversitas bakteri tanah. Analisis komponen utama (PCA) dan korelasi Pearson dilakukan untuk menentukan hubungan antara struktur vegetasi, karakteristik tanah, komunitas makrofauna dan bakteri tanah. Pemodelan interaksi dari berbagai variabel yang berkontribusi terhadap tanaman restorasi dilakukan dengan pemodelan struktural SEM-PLS menggunakan WarpPLS 7.0.

Petani hutan yang mengelola lahan di area penelitian memiliki pengetahuan cukup baik terkait kondisi awal, biodiversitas, dan fungsi hutan lindung. Petani menyatakan sikap setuju dalam upaya pemulihan hutan dan bersedia berpartisipasi dalam restorasi. Namun, adanya

petani yang kurang peduli menjadi salah satu kendala penyebab terganggunya tanaman restorasi pada penelitian ini. Struktur vegetasi (tiang dan pancang) di tiga area pertanian (PI, KTT, HLS) memiliki kemiripan yang didominasi oleh kopi (*Coffea* sp.) dan gamal (*Gliricidia sepium*). PI adalah area dengan diversitas jenis pohon, tiang, pancang paling rendah sebaliknya area RS memiliki diversitas terbesar. Vegetasi bawah menunjukkan keanekaragaman jenis tinggi dan komposisi taksa yang bervariasi antar lokasi. Kemantapan agregat, bobot isi, kelembaban, pH, bahan organik, dan konduktivitas elektronik tanah menunjukkan kesamaan kondisi di tiga lahan pertanian namun berbeda ketika dibandingkan dengan RS ($p < 0,05$). Kondisi tanah di area pertanian saat ini menunjukkan kecenderungan penurunan kualitas. Hal ini terlihat dari nilai kelembaban, bahan organik, pH, dan konduktivitas elektrik tanah lebih rendah dan bobot isi tanah yang lebih tinggi dibandingkan tanah di RS. Komposisi taksa penyusunan komunitas makrofauna tanah memperlihatkan perbedaan di setiap tipe lahan.

Famili Gryllidae dan Isotomidae lebih banyak ditemukan di area PI dibandingkan dengan lokasi lain. Komposisi taksa makrofauna di RS lebih seimbang dibandingkan tiga area pemanfaatan. Sementara itu, pola komposisi taksa penyusun komunitas bakteri tanah memperlihatkan kesamaan pada tingkat filum tetapi berbeda pada tingkat genus. Kegiatan alih fungsi hutan menjadi bentuk pemanfaatan lain ternyata meningkatkan diversitas *alpha* bakteri tetapi hal ini tidak diikuti nilai diversitas *beta*-nya. Diversitas *beta* bakteri di ketiga area pemanfaatan berbeda jika dibandingkan dengan RS. Kelompok makrofauna tanah yang berpotensi sebagai bioindikator lingkungan berkualitas baik di antaranya Silphidae (0,439), Talitridae (0,375), Armadillididae (0,304), sedangkan indikator lingkungan dengan kualitas kurang baik diindikasikan oleh Formicidae (0,543), Gryllidae (0,507), Isotomidae (0,405), dan Araneidae (0,301). Bakteri tanah sebagai bioindikator tanah terdegradasi meliputi kelompok Actinobacteria, Chloroflexi, dan Firmicutes.

Kelulushidupan tanaman penghijauan berada pada rentang 60 – 80%, dengan yang terendah teramati di area PI. Pertambahan diameter tanaman restorasi cenderung lambat berkisar 0,06 – 4,35 mm/bulan. Beberapa jenis tanaman penghijauan dengan daya hidup dan pertumbuhan yang bagus di antaranya bendo (*Artocarpus elasticus*), daun kari (*Murraya koenigii*), nangka (*A. heterophyllus*), *Homalanthus giganteus*, *Mallotus* sp., damar (*Agathis borneoensis*), gondang (*Ficus variegata*), dan trete (*Microcos tomentosa*). Ukuran bibit tanaman yang kecil, terbatasnya ketersediaan air, dan gangguan antropogenik menjadi beberapa kendala yang memengaruhi daya hidup dan pertumbuhan tanaman restorasi. Hasil pemodelan menginformasikan bahwa daya hidup dan pertumbuhan tanaman restorasi lebih dipengaruhi faktor lingkungan tumbuh, seperti tanah dan vegetasi, dibandingkan faktor lain. Karakteristik fisika tanah (kelembaban dan bobot isi tanah) menjadi variabel paling signifikan memengaruhi tanaman restorasi.

Hasil penelitian ini menggambarkan bagaimana interaksi antara faktor lingkungan, tanaman, dan juga aktivitas antropogenik dalam memengaruhi keberhasilan restorasi hutan dalam jangka pendek. Integrasi antara aspek ekologi dan antropogenik penting dilakukan untuk mendukung keberhasilan restorasi hutan dalam jangka panjang. Hasil temuan penelitian seperti jenis tanaman yang unggul pertumbuhannya, jenis bioindikator menjadi luaran yang dapat dimanfaatkan dalam pemulihan ekosistem dan pemantauan restorasi di lokasi lain pada region serupa. Ekosistem baru (*novel ecosystem*) yang terbentuk dari hasil restorasi dalam penelitian ini melengkapi informasi perkembangan dan kesesuaian konsep tersebut dengan kondisi saat ini. Akan tetapi, untuk memantau dinamika ekosistem tersebut, maka evaluasi keberhasilan restorasi hutan lindung UBF perlu dilakukan sesuai tujuan dan secara periodik.

SUMMARY

Analysis of Environmental Degradation and Plant Growth in Restoration Program after Protected Forest Conversion at UB Forest, Malang

Muhammad Yusuf, Endang Arisoesilangsih, Adji AR Fernandes, Syahrul Kurniawan
Biology Doctoral Study Program, Faculty of Mathematics and Natural Sciences,
Universitas Brawijaya 2021

Environmental degradation due to forest conversion activities has a negative impact on biodiversity loss, decreased quality of environmental services, and disruption of ecological functions. One of the efforts to restore the function of degraded forest ecosystems can be carried out by restoration through planting various types of forest and multipurpose trees species. Rapid assessment of restoration success, which is sensitive to changes in vegetation structure, is needed now to complement the existing monitoring system. The protected area of UB Forest (UBF) is an example of a tropical mountain forest ecosystem that has been degraded due to conversion and needs to be restored. This research was conducted to explore forest farmers' social information related to forest restoration and biodiversity conservation activities, analyze the impact of forest conversion on the biotic and abiotic environment, determine bioindicator organisms, analyze the survival and growth of restoration plants, and determine the interaction of variables that contribute to it.

This research was conducted in UBF protected forest area, which has been converted into agricultural land, including intensive agriculture area (PI), untreated monoculture coffee plantation (KTT), degraded protected forest with mixed crops (HLS). In addition, the conserved secondary forest area is used as a reference site (RS). Thirteen forest farmers became respondents in the social survey using in-depth interview techniques in this study. A sampling of soil macrofauna was carried out with trap bottles planted randomly in each area. Composite soil samples were also taken to determine physical characteristics (aggregate, bulk density, moisture), chemical (pH, organic matter, electrical conductivity), and soil bacterial community. Profiles of biotic and abiotic environmental conditions were determined based on observations of vegetation structure, soil quality, soil macrofauna, and soil bacterial communities. Determination of bioindicator organisms was carried out using the indicator value index (IndVal) in the macrofauna and soil bacterial communities. Observations of restoration plants were carried out once a month by measuring stem diameter increment and plant height for 6-12 months. Social survey data were analyzed by descriptive statistical methods to obtain related information from the categorical data. The research data were statistically analyzed using ANOVA to see differences in litter necromass, soil characteristics, macrofauna diversity, soil bacterial communities, and the growth of restoration plants in each area. ANOVA was applied using RStudio while for data presentation using Ms. Excel, XLSTAT, and QIIME to describe community and soil bacterial diversity. Principal component analysis (PCA) and Pearson correlation were performed to determine the relationship between vegetation structure, soil characteristics, macrofauna community, and soil bacteria. The interaction modeling of various variables that contribute to the restoration plants was carried out by SEM-PLS using WarpPLS 7.0.

Forest farmers who manage land in the research area had good knowledge of the initial conditions, biodiversity, and functions of protected forests. Farmers expressed their agreement in forest restoration efforts and were willing to participate in restoration. However, farmers who did not care are one of the obstacles that cause the disruption of restoration plants in this study. Vegetation structures (poles and saplings) in three agricultural areas (PI, KTT, HLS) showed similarities, which were dominated by coffee

(*Coffea* sp.) and Gamal (*Gliricidia sepium*). PI was the area with the lowest diversity of tree species, poles, and saplings, while the RS area had the greatest diversity. The lower vegetation showed high species diversity, and the composition of taxa varied between locations. Aggregate stability, bulk density, moisture, pH, organic matter, and soil electrical conductivity showed similar conditions in the three agricultural fields but differed from RS ($p < 0.05$). Soil conditions in agricultural areas currently informed a tendency to decrease in quality. This condition could be seen from the lower values of moisture, organic matter, pH, and electrical conductivity of the soil and a higher bulk density than the soil in RS. The composition of taxa making up the soil macrofauna community showed differences in each land type.

The Gryllidae and Isotomidae families were more commonly found in the PI area compared to other locations. The composition of macrofauna taxa in RS was more balanced than the three utilization areas. Meanwhile, the compositional patterns of taxa making up the soil bacterial community had similarities at the phylum level but differences at the genus level. The activity of converting forest into other forms of utilization area had increased the diversity of alpha bacteria, but this was not followed by the value of the beta diversity. The diversity of beta bacteria in the three utilization areas was different when compared to RS. Soil macrofauna groups that have the potential as environmental bioindicators of good quality included Silphidae (0.439), Talitridae (0.375), Armadillididae (0.304), while environmental indicators with poor quality were indicated by Formicidae (0.543), Gryllidae (0.507), Isotomidae (0.405), and Araneidae (0.301). Soil bacteria as bioindicators of degraded soil were indicated by the Actinobacteria, Chloroflexi, and Firmicutes groups.

The survival rate of reforestation plants was 60 – 80%, with the lowest observed in the PI area. The increase in diameter of restoration plants tended to be slow, ranging from 0.06 to 4.35 mm.month⁻¹. Several types of trees species with good viability and growth included bendo (*Artocarpus elasticus*), daun kari (*Murraya koenigii*), jackfruit (*A. heterophyllus*), *Homalanthus giganteus*, *Mallotus* sp., damar (*Agathis borneoensis*), gondang (*Ficus variegata*), and trete (*Microcos tomentosa*). The small size of plant seeds, limited water availability, and anthropogenic disturbances were some of the obstacles that affect the viability and growth of restoration plants. The modeling results informed that the viability and growth of restoration plants were more affected by growing environmental factors, such as soil and vegetation, than other factors. Soil physical characteristics (moisture and bulk density) were the most significant variables affecting restoration plants.

This study illustrated how the interaction between environmental factors, plants, and anthropogenic activities influenced forest restoration success in the short term. Integration between ecological and anthropogenic aspects is essential to support the success of forest restoration in the long term. Research findings such as kind of plant species with superior growth, bioindicators become outputs that can be utilized in ecosystem restoration and monitoring in other locations in similar regions. The new ecosystem (novel ecosystem) formed from the restoration results in this study complements information on the development and suitability of the concept with current conditions. However, to monitor the dynamics of the ecosystem, evaluation of the success of UBF protected area restoration needs to be carried out according to the objectives and periodically.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim. Alhamdulillahirobbil ‘alamiin, Allahumma sholli ‘ala sayyidina Muhammad wa ‘ala ali sayyidina Muhammad. Atas perkenan dan ridlo Allah SWT, serangkaian kegiatan penelitian dan penulisan disertasi dengan judul “ANALISIS DEGRADASI LINGKUNGAN DAN PERTUMBUHAN TANAMAN PENGHIJAUAN DALAM PROGRAM RESTORASI PASCA ALIH FUNGSI HUTAN LINDUNG DI UB *FOREST, MALANG*” telah berhasil diselesaikan dan disajikan. Disertasi ini menitikberatkan pada penggambaran dampak alih fungsi hutan alam terhadap lingkungan biotik dan abiotik, serta pengaplikasian teknik restorasi berbeda dari yang sudah ada sebelumnya untuk pemulihan ekosistem hutan tropis pegunungan terdegradasi.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Rektor dan Dekan Fakultas MIPA yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Brawijaya (UB).
2. Ketua Jurusan Biologi Fakultas MIPA UB yang telah memberikan ijin kepada penulis untuk melanjutkan studi ke jenjang doktor.
3. Ketua Program Studi Doktor Biologi yang telah memberikan dukungan dan arahan selama masa studi.
4. Ibu Dr. Endang Arisoesilaningih, MS., selaku promotor, yang telah memberikan amanah, bimbingan, dan dorongan semangat sehingga penulis mampu menyelesaikan semua tahapan penelitian dan penulisan disertasi dengan baik.
5. Bapak Dr. Adji Achmad Rinaldo Fernandes, S.Si., M.Sc., selaku ko-promotor I, yang telah banyak memberikan banyak saran, bimbingan, motivasi, dan pengetahuan terkait analisis statistik kepada penulis.
6. Bapak Syahrul Kurniawan, SP, MP, Ph.D., selaku ko-promotor II, yang juga telah banyak meluangkan waktu untuk memberikan arahan, bimbingan, saran, dan motivasi kepada penulis.
7. Bapak Prof. Amin Setyo Leksono, Ph.D., Bapak Irfan Mustafa, Ph.D., dan Ibu Dr. Vivi Novianti, selaku tim penguji, atas kesediaannya untuk menguji dan memberikan saran, kritik, dan pengetahuan yang bermanfaat bagi perbaikan disertasi ini.
8. Direktur UB *Forest*, Prof. Eko Ganis Sukoharsono, MCom (Accy), MCom-Hons, CSP, Ph.D., beserta manager dan staf lapangan, yang telah memberikan ijin, bantuan, dan akomodasi saat kegiatan penelitian di lapangan.
9. Dekan, melalui BPPM Fakultas MIPA, yang telah memberikan danah hibah penelitian pada tahun 2019 dan 2020.
10. Kedua orang tua (kandung dan mertua), istri, beserta keluarga besar atas dukungan penuh kepada penulis dalam menyelesaikan studi doktor ini.
11. Rekan-rekan mahasiswa (S3, S2, dan S1 Biologi) dan kolega yang terlibat membantu penulis dalam melaksanakan dan menyelesaikan rangkaian tahapan penelitian.

Penulis menyadari atas keterbatasan yang dimiliki, oleh karena itu masih dimungkinkan ada kekurangan pada disertasi ini. Segala bentuk saran dan kritik sangat penulis butuhkan untuk perbaikan tulisan dan manfaat yang lebih luas.

Malang, Juli 2021

Penulis

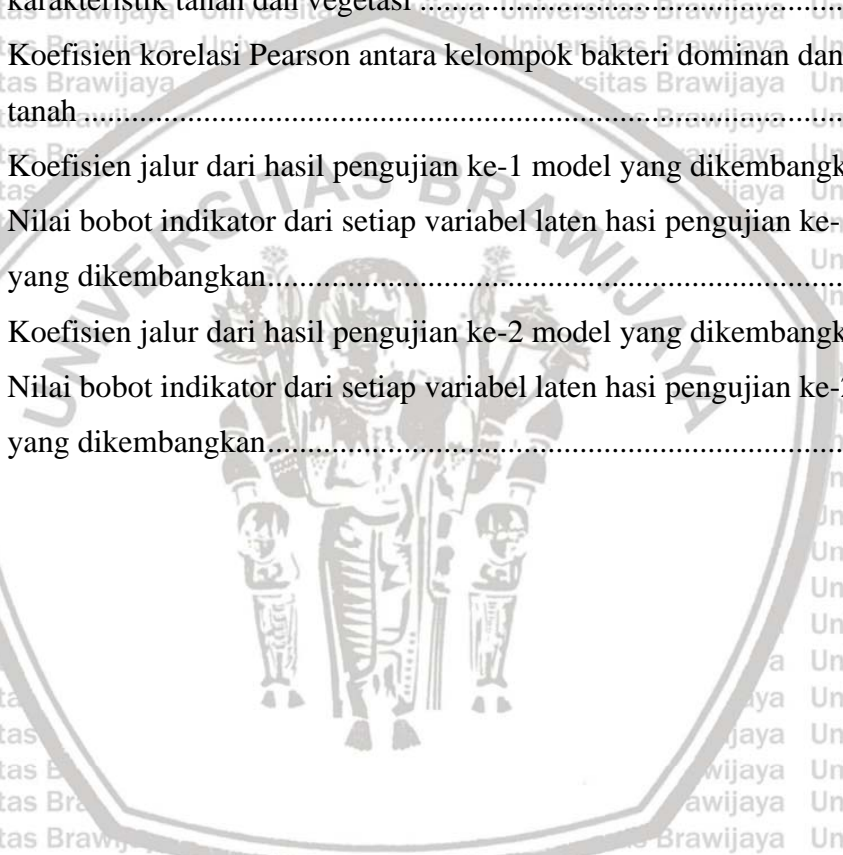
DAFTAR ISI

	Halaman
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
KATA PENGANTAR	xii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Ekologi Hutan	6
2.2. Kelestarian Kawasan Hutan Pegunungan dan Ancamannya	6
2.3. Kawasan Hutan Pegunungan di Sekitar Gunung Arjuno	8
2.4. Restorasi Ekosistem Hutan Pegunungan Terdegradasi	10
2.5. Bioindikator Perubahan Kualitas Lingkungan dalam Kegiatan Restorasi Hutan	12
2.6. Pemodelan Ekologi Restorasi Ekosistem Hutan Terdegradasi	13
2.7. Kerangka Konsep	14
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2. Kerangka Operasional Penelitian	19
3.3. Penentuan Sikap dan Tingkat Pemahaman Masyarakat sekitar Hutan terkait Konservasi Biodiversitas	23
3.4. Penentuan Profil Lingkungan Biotik dan Abiotik pada Beberapa Tipe Alih Guna Lahan dan Hutan di Area Penelitian	23
3.4.1. Struktur komunitas dan diversitas vegetasi di area penelitian	23
3.4.2. Penentuan kualitas tanah di area penelitian	24
3.4.3. Struktur komunitas makrofauna dan bakteri tanah di area penelitian	25

3.5.	Pengamatan Kelulushidupan dan Pertumbuhan Beberapa Spesies Pohon Multiguna untuk Restorasi	28
3.6.	Penentuan Interaksi Antar Variabel yang Berkontribusi pada Keberhasilan Pertumbuhan dan Kelulushidupan Tanaman di Area Restorasi Hutan Lindung UBF	29
3.7.	Analisis Data	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		34
4.1.	Sikap dan Tingkat Pemahaman Masyarakat sekitar Hutan terkait Konservasi Biodiversitas	34
4.2.	Variasi Spasial Profil Lingkungan Biotik dan Abiotik	41
4.2.1.	Variasi spasial diversitas dan struktur vegetasi	41
4.2.2.	Variasi spasial karakteristik fisika dan kimia tanah	45
4.2.3.	Variasi spasial diversitas dan struktur komunitas makrofauna tanah	48
4.2.4.	Variasi spasial komunitas bakteri tanah	55
4.3.	Jenis Taksa Makrofauna dan Bakteri Tanah yang Berpotensi sebagai Bioindikator Perubahan Kualitas Lingkungan	62
4.4.	Kelulushidupan dan Pertumbuhan Beberapa Spesies Pohon Penghijauan di Area Restorasi	66
4.5.	Interaksi Antar Variabel yang Berkontribusi pada Kelulushidupan dan Keberhasilan Pertumbuhan Tanaman di Area Restorasi Hutan Lindung UBF	72
4.6.	Pembahasan Umum	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		82
5.1.	Kesimpulan	82
5.2.	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA		84
LAMPIRAN		99

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1	Variabel dan indikator penyusun model struktural yang dikembangkan	31
2	Diversitas alpha komunitas bakteri di setiap area penelitian	58
3	Pengaruh tidak langsung antara variabel independen (X) dan dependen (Y)	75
4	Kelimpahan individu makrofauna yang diperoleh di setiap area beserta peran fungsionalnya di ekosistem	101
5	Koefisien korelasi Pearson antara kelompok makrofauna dominan dengan karakteristik tanah dan vegetasi	102
6	Koefisien korelasi Pearson antara kelompok bakteri dominan dan karakteristik tanah	103
7	Koefisien jalur dari hasil pengujian ke-1 model yang dikembangkan	104
8	Nilai bobot indikator dari setiap variabel laten hasil pengujian ke-1 pada model yang dikembangkan	104
9	Koefisien jalur dari hasil pengujian ke-2 model yang dikembangkan	105
10	Nilai bobot indikator dari setiap variabel laten hasil pengujian ke-2 pada model yang dikembangkan	105



DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Kerangka konsep penelitian	16
2	Lokasi penelitian di kawasan lindung UBF	17
3	Gambaran kondisi lingkungan di area penelitian.....	18
4	Letak titik-titik penanaman bibit pohon di tiap sub plot pada masing-masing area restorasi	19
5	Kerangka operasional penelitian	22
6	Titik pengambilan contoh tanah di plot pengamatan setiap area penelitian	24
7	Penanda batas pengukuran diameter batang dan tinggi di setiap individu tanaman penghijauan	29
8	Model struktural interaksi antar variabel yang berkontribusi terhadap keberhasilan pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman penghijauan di area restorasi	30
9	Profil demografi petani hutan di sekitar kawasan lindung UBF	34
10	Tabulasi silang beberapa indikator demografi dari hasil survei sosial kepada petani hutan	35
11	Sikap dan persepsi petani responden terkait konservasi biodiversitas hutan di kawasan UBF	37
12	Tabulasi silang beberapa indikator dari hasil survei sosial kepada petani hutan..	38
13	Profil komunitas vegetasi awal di area penelitian.....	43
14	Nekromassa pada masing-masing area restorasi.....	44
15	Karakteristik fisika dan kimia tanah di setiap area restorasi dibandingkan dengan <i>reference site</i>	46
16	Struktur komunitas makrofauna tanah di masing-masing area penelitian	49
17	Keanekaragaman (A), pemerataan (B), kekayaan (C), dan dominansi (D) taksa komunitas makrofauna tanah di area penelitian	50
18	Perbandingan komposisi makrofauna berdasarkan kelompok fungsionalnya di masing-masing area restorasi	51
19	Hubungan antara kelimpahan taksa makrofauna dengan karakteristik tanah dan vegetasi di masing-masing area	54
20	Kelimpahan relatif populasi bakteri tanah pada tingkat filum di masing-masing area penelitian	56

21	Kelimpahan genus bakteri berdasarkan heatmap <i>cluster</i> di masing-masing area.....	58
22	Diversitas <i>beta</i> komunitas bakteri di masing-masing area.....	59
23	Hubungan antara kelimpahan komunitas bakteri tanah dengan karakteristik tanah di masing-masing area.....	61
24	Kelompok taksa makrofauna tanah yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah berdasarkan penghitungan nilai indikator (IndVal).....	64
25	Kelompok taksa bakteri tanah yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah berdasarkan penghitungan nilai indikator (IndVal).....	65
26	Persentase tanaman penghijauan yang berhasil hidup di masing-masing area restorasi.....	66
27	Kelulushidupan tiap tanaman penghijauan di masing-masing area restorasi.....	70
28	Pertumbuhan tiap jenis tanaman penghijauan di area restorasi.....	71
29	Interaksi faktor biotik, abiotik lingkungan, antropogenik yang berkontribusi terhadap daya hidup dan pertumbuhan tanaman penghijauan di area restorasi	74
30	Hasil gel elektroforesis sampel DNA bakteri yang diisolasi dari contoh tanah di area penelitian.....	99
31	Struktur komunitas dan komposisi tumbuhan bawah/semay di masing-masing area berdasarkan INP	100
32	Hasil pengujian ke-1 dari model SEM yang dikembangkan.....	104
33	Hasil pengujian ke-2 dari model SEM yang dikembangkan.....	105

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1	Hasil gel elektroforesis DNA bakteri tanah 99
2	Struktur komunitas tumbuhan bawah berdasarkan indeks nilai penting (INP) di area penelitian 100
3	Kelimpahan dan peran fungsional masing-masing taksa makrofauna 101
4	Korelasi Pearson antara populasi makrofauna tanah dengan karakteristik tanah dan vegetasi 102
5	Korelasi Pearson antara populasi bakteri tanah dengan karakteristik fisika-kimia tanah 103
6	Hasil analisis model SEM yang dikembangkan 104
7	Sertifikat Bebas Plagiasi Naskah Disertasi 106



DAFTAR SINGKATAN

- ACE : *abundance-based coverage estimator*
- ANOVA : *analysis of variance*
- BTSA-BR : *Bromo-Tengger-Semeru-Arjuno biosphere reserve*
- CTAB : *cetyltrimethylammonium bromide*
- DMR : *diameter massa rerata*
- DNA : *deoxyribonucleic acid*
- IAS : *invasive alien species*
- INP : *indeks nilai penting*
- MTPS : *multi purpose tree species*
- OTU : *operational taxonomic unit*
- PCA : *principal component analysis*
- PLS : *partial least square*
- RNA : *ribonucleic acid*
- SDS : *sodium dodecyl sulfate*
- SEM : *structural equation modeling*
- UBF : *UB Forest*



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Deforestasi di Indonesia terjadi disebabkan aktivitas pembalakan liar, kebakaran hutan, konversi hutan, dan praktek pertanian tidak berkelanjutan sebagai konsekuensi dari adanya peningkatan kebutuhan ekonomi. Deforestasi merupakan penyebab utama hilangnya hutan primer di wilayah Indonesia. Area hutan primer di Indonesia telah hilang sebesar 6,02 Mha dari tahun 2000 hingga 2012 dan meningkat rata-rata sebesar 47.600 ha per tahun. Pada tahun 2012, kehilangan hutan primer tahunan di Indonesia diperkirakan lebih tinggi daripada di Brasil (Margono dkk., 2014). Di wilayah hutan tropis Indonesia, kegiatan alih fungsi hutan dilakukan untuk perluasan area perkebunan, seperti sawit di Kalimantan dan Sumatra, atau pertanian seperti yang terjadi di kawasan hutan alam tersisa di Jawa (Juniyanti dkk., 2021). Padahal, ekosistem hutan dikenal berperan penting dalam regulasi iklim lokal sampai global, regulasi air, regulasi udara, siklus nutrisi, siklus biogeokimia, habitat organisme, dan penyedia jasa layanan lingkungan. Penurunan fungsi layanan lingkungan dapat terjadi ketika ekosistem hutan mengalami gangguan (degradasi). Contoh bentuk adanya penurunan kualitas layanan lingkungan dari ekosistem hutan terganggu yaitu tanah longsor, banjir, kebakaran hutan, dan kekeringan.

Kegiatan alih fungsi hutan tidak hanya menciptakan lingkungan baru tetapi juga permasalahan yang perlu untuk mendapatkan perhatian dan penyelesaian. Degradasi hutan menyebabkan terganggunya fungsi asli hutan seperti hilangnya habitat bagi satwa liar, berkurangnya ketersediaan sumber pakan dan air, hilangnya biodiversitas, terganggunya kondisi iklim mikro, dan penurunan kualitas lingkungan. Konversi hutan yang kemudian dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian secara kontinyu tanpa memperhatikan keberlanjutan ekosistem adalah penyebab utama penurunan kualitas tanah di lingkungan. Kualitas tanah yang semakin buruk dapat mengakibatkan terjadinya penurunan produktivitas dan menghambat pertumbuhan tanaman. Jika hal ini dibiarkan tanpa upaya pemulihan dalam waktu lama maka tanah di lingkungan tersebut menjadi mati (miskin nutrisi atau unsur hara) sehingga tidak dapat mendukung kehidupan tanaman atau organisme tanah secara optimal. Tanah yang terdegradasi perlu untuk dipulihkan agar dapat mendukung kehidupan dari berbagai organisme dan mengembalikan fungsi ekologisnya.

Mengingat dampak negatif hilangnya hutan terhadap kehidupan manusia dan lingkungan, berbagai upaya dilakukan oleh baik pemerintah dan masyarakat untuk mengembalikan

fungsi hutan, salah satunya dengan restorasi hutan. Definisi restorasi mengalami perkembangan dari pengertian awal sebagai upaya untuk memulihkan hutan ke atau mendekati kondisi awal sebelum mengalami gangguan, baik dari aspek struktur atau fungsi (Bradshaw, 1996), atau menyerupai kondisi ekosistem referensi (SER, 2004; Shackelford dkk., 2013; McDonald dkk., 2016). Kegiatan restorasi sangat ditentukan oleh tujuan akhir yang ingin dicapai, secara khusus, restorasi bertujuan untuk memulihkan fungsi dari ekosistem yang terganggu. Namun, saat ini, tujuan restorasi mulai berubah dan berkembang menggunakan pendekatan yang dengan mempertimbangkan aspek ekologis dan aspek antropogenik, seperti konservasi biodiversitas dan pemanfaatan yang berkelanjutan (Corlett, 2016; Löf dkk., 2019; Gann dkk., 2019).

Restorasi hutan biasanya dilakukan dengan menanam berbagai jenis tanaman pohon yang memiliki nilai ekologis dan manfaat penting di lingkungan. Contoh kegiatan restorasi di Indonesia dapat dilihat di kawasan Hutan Harapan di Sumatera Selatan seperti yang dilakukan oleh Harrison & Swinfield (2015), Swinfield dkk. (2016), Kardiman dkk. (2019). Harrison & Swinfield (2015) mencoba untuk menerapkan tiga pendekatan berbeda dalam melakukan restorasi yaitu penjarangan selektif, penanaman yang diperkaya (*enrichment planting*), dan penyemaian langsung. Ketiga pendekatan ini digunakan untuk menguji efek dari masing-masing intervensi tersebut pada tingkat pemulihan hutan dalam hal sumber daya kayu dan non kayu, nilai keanekaragaman hayati, dan stok karbon. Sementara itu, Swinfield dkk. (2016) dalam hasil penelitiannya melaporkan bahwa penjarangan selektif tumbuhan bawah pionir adalah pilihan praktis yang dapat digunakan untuk memanipulasi komposisi tegakan dan berpotensi mempercepat regenerasi alami di area restorasi. Kardiman dkk. (2019) menggunakan 38 jenis tanaman berbeda yang ditanam di area restorasi Hutan Harapan untuk dipelajari daya hidup, pertumbuhan, kerentanan terhadap gangguan, dan kapasitas bertunasnya. Hasil temuannya menginformasikan bahwa peningkatan keberhasilan restorasi dapat dicapai melalui pencocokan lokasi spesies (*species-site matching*) yang lebih baik.

Penelitian restorasi di kawasan Hutan Harapan Sumatera memberikan informasi penting terkait bagaimana teknik-teknik yang digunakan memengaruhi keberhasilan restorasi. Namun, informasi yang diberikan belum lengkap karena hanya menggambarkan kondisi di ekosistem hutan dataran rendah sedangkan kegiatan restorasi juga diperlukan di area lain, seperti hutan pegunungan. Selain itu, kurangnya parameter terukur yang dapat digunakan untuk pemantauan keberhasilan restorasi secara berkala juga menjadi permasalahan lain yang perlu untuk dicari solusinya, khususnya untuk wilayah hutan pegunungan hujan tropis

hangat. Dengan permasalahan yang masih muncul tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan solusi dengan pendekatan-pendekatan berbeda. Keberhasilan restorasi sangat bergantung pada aspek-aspek ekologi dan juga sosioekonomi. Evangelista de Oliveira dkk. (2021) menyatakan dalam penelitiannya, terdapat enam kategori indikator yang dapat digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan restorasi dalam tahapan waktu berbeda, meliputi fisik dan struktur, komposisi/biodiversitas, jasa layanan lingkungan, proses-proses ekologis, ekonomi, dan sosial. Pemilihan indikator yang akan digunakan ditentukan berdasarkan tujuan akhir restorasi dan waktu.

Selanjutnya, penelitian ini dilakukan di kawasan Hutan Pendidikan Universitas Brawijaya atau UB *Forest* (UBF). UBF merupakan kawasan hutan dengan tujuan khusus untuk pendidikan dan pelatihan yang ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan di akhir 2016, dengan luas total mencapai 544,74 ha yang terbagi menjadi hutan produksi dan lindung (50 ha). Namun, saat ini, kawasan lindung UBF telah mengalami degradasi fungsi akibat praktek alih fungsi hutan yang dilakukan oleh petani hutan. Pemulihan area hutan lindung tersebut telah diinisiasi sejak akhir tahun 2019 melalui kegiatan restorasi dalam penelitian ini. Penggunaan berbagai jenis tanaman pohon lokal multiguna dengan sistem penanaman polikultur dengan kombinasi teknik restorasi aktif dan pasif menjadi pendekatan berbeda yang diaplikasikan pada penelitian ini. Selain itu, identifikasi organisme bioindikator pada level makro dan mikroorganisme sebagai petunjuk perubahan kualitas lingkungan dan alat untuk pemantauan keberhasilan restorasi juga diterapkan.

Penelitian ini dilakukan dengan maksud utama adalah pemulihan kawasan lindung pasca alih fungsi menjadi lahan pertanian melalui kegiatan restorasi menggunakan berbagai jenis pohon rimba dan buah lokal multiguna. Pada awal kegiatan restorasi, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi demografi dan sosioekonomi warga lokal, kemudian mengungkap kondisi lingkungan biotik dan abiotik pasca alih fungsi hutan lindung menjadi lahan pertanian serta mengeksplorasi organisme berpotensi sebagai bioindikator perubahan kualitas lingkungan. Pemodelan ekologis juga dikembangkan dalam penelitian ini untuk menggambarkan dan menentukan interaksi berbagai faktor alam dan non alam yang memiliki dampak terhadap tanaman restorasi. Pemulihan ekosistem hutan yang dilakukan pada penelitian ini akan menjadi model atau contoh restorasi hutan pegunungan bawah di daerah tropis.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, maka restorasi dalam penelitian ini dibatasi sebagai upaya pemulihan fungsi hutan terdegradasi, baik dari aspek ekologi atau sosial-ekonomi, dengan penanaman berbagai jenis tanaman penghijauan lokal multiguna tanpa menekankan struktur vegetasi harus kembali seperti kondisi awal. Adapun permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini meliputi:

- a. Bagaimana sikap dan tingkat pemahaman masyarakat sekitar hutan terkait konservasi biodiversitas hutan melalui kegiatan restorasi di hutan lindung UBF?
- b. Bagaimana profil struktur vegetasi, kualitas tanah, diversitas makrofauna, dan bakteri tanah pasca alih fungsi kawasan lindung UBF menjadi lahan pertanian?
- c. Bagaimana jenis makrofauna dan bakteri tanah yang berpotensi sebagai bioindikator perubahan kualitas tanah pada beberapa bentuk alih guna lahan berbeda di area restorasi?
- d. Bagaimana kelulushidupan dan keberhasilan pertumbuhan beberapa spesies pohon lokal multiguna untuk restorasi di kawasan lindung UBF yang beralih fungsi menjadi lahan pertanian?
- e. Bagaimana interaksi antar variabel yang berkontribusi pada keberhasilan pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman restorasi di kawasan lindung UBF berdasar pemodelan ekologi yang dikembangkan?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan di antaranya:

- a. Menentukan sikap dan tingkat pemahaman masyarakat sekitar hutan terkait konservasi biodiversitas hutan melalui kegiatan restorasi di hutan lindung UBF;
- b. Menganalisis kondisi struktur vegetasi, kualitas tanah, diversitas makrofauna, dan bakteri tanah pasca alih fungsi kawasan lindung menjadi lahan pertanian;
- c. Menentukan taksa dari makrofauna dan bakteri tanah yang berpotensi sebagai bioindikator perubahan kualitas tanah di beberapa bentuk alih guna lahan berbeda di area restorasi;
- d. Mengevaluasi kelulushidupan dan keberhasilan pertumbuhan berbagai spesies pohon lokal multiguna untuk restorasi di beberapa bentuk alih guna lahan berbeda;

- e. Menentukan interaksi dan mengidentifikasi variabel-variabel yang berkontribusi pada keberhasilan pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman restorasi di hutan lindung UBF berdasar pemodelan ekologi yang dikembangkan.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat, di antaranya:

- a. Bagi ilmu pengetahuan, informasi mengenai jenis pohon rimba lokal yang digunakan dalam penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pemilihan jenis pohon untuk kegiatan restorasi di area hutan pegunungan. Selain itu, jenis-jenis bioindikator perubahan kualitas lingkungan akibat alih fungsi hutan, khususnya di hutan pegunungan tropis, dapat melengkapi informasi yang belum ada sebelumnya. Hasil analisis multivariat pada faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan pertumbuhan tanaman restorasi menjadi informasi awal yang penting untuk pengkajian lebih mendalam terkait interaksi antara lingkungan biotik dan abiotik di area restorasi;
- b. Bagi masyarakat, masyarakat lokal dapat mengembangkan persemaian berbagai jenis tanaman penghijauan dari kelompok pohon rimba lokal secara mandiri berdasarkan hasil penelitian ini terkait jenis pohon berpotensi dengan pertumbuhan unggul. Bibit pohon tersebut kemudian dapat digunakan untuk kegiatan penghijauan lahan terdegradasi atau dijual untuk memperoleh keuntungan ekonomi;
- c. Bagi pengelola UBF, hasil penelitian ini dapat menjadi *data base* awal kondisi kawasan lindung sebelum dilakukan pengelolaan kawasan hutan lebih lanjut. Selain itu, dengan beragamnya jenis pohon rimba lokal yang ditanam maka area kawasan lindung UBF dapat dimanfaatkan sebagai area konservasi *in situ* secara berkelanjutan, dan konservasi tanah pada area sempadan sungai yang bertebing.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Ekologi Hutan

Hutan didominasi tegakan pohon dengan tutupan kanopi rapat (Sen, 2018) dikaji terkait semua aspek ekologi dari suatu area yang terdapat tegakan pohon (*wooded area*) di dalamnya termasuk hutan hujan, hutan musim, *evergreen forest*, hutan boreal dan temperata.

Dalam hal ini juga termasuk ekologi komunitas pohon, tumbuhan lain, dan spesies makhluk hidup bukan tumbuhan, serta proses-proses dalam ekosistem dan konservasi (Anonymous, 2018). Hutan merupakan ekosistem yang kompleks dan di dalamnya berlangsung berbagai proses ekologis dengan fungsinya masing-masing. Interaksi antar komponen penyusun ekosistem hutan terjadi dari mulai level mikro sampai makro organisme, mulai dari skala waktu detik sampai bertahun-tahun, dan mulai dari skala sempit sampai luas.

Ekosistem hutan menyediakan berbagai macam sumberdaya yang menjadi kebutuhan makhluk hidup, selain itu, jasa layanan ekosistem (*ecosystem services*) juga dapat dirasakan manfaatnya oleh manusia (FAO, 2018; Nurbaya dkk., 2018). Jasa layanan ekosistem tersebut terbagi menjadi empat tipe menurut FAO (2018) yaitu jasa penyedia (*provisioning services*), jasa regulasi (*regulating services*), jasa pendukung (*supporting services*), dan jasa kultural (*cultural services*). Jasa penyedia dapat berwujud barang-barang yang diperoleh dari ekosistem seperti kayu, air, bahan makanan, minyak bumi dan lain-lain, sementara jasa regulasi berkaitan dengan proses-proses regulasi ekosistem seperti regulasi air, udara, penyerbukan, dan pengendalian banjir. Untuk jasa pendukung dapat berupa ketersediaan habitat bagi kehidupan hewan dan tumbuhan, pelestarian diversitas spesies dan genetik. Jasa kultural merupakan manfaat yang diperoleh manusia tidak dalam bentuk barang seperti keindahan, spiritual, dan budaya.

2.2. Kelestarian Kawasan Hutan Pegunungan dan Ancamannya

Letak geografis Negara Indonesia yang berada di antara dua benua (Australia dan Asia) dan dua samudera (Pasifik dan Hindia) serta di kawasan tropis berdampak pada tingginya biodiversitas dan endemisitas makhluk hidupnya. Indonesia memiliki lebih dari 17.000 pulau di sepanjang garis ekuator bumi dan terbagi ke dalam tiga zona waktu. Kepulauan Indonesia bagian barat terhubung dengan daratan Asia sementara bagian timur dengan Australia. Kondisi ini menyebabkan Indonesia memiliki dua kali jumlah flora dan fauna. Sebanyak 10% tanaman berbunga, 12% mamalia, dan sekitar 17% reptil, amfibi, burung dari

total di dunia dapat ditemukan di Indonesia. Oleh karena itu, Indonesia merupakan salah satu *biodiversity hot spot* di dunia (Normile, 2010).

Indonesia memiliki luas kawasan hutan sebesar 120,6 juta hektare atau sekitar 63% dari total luas daratan. Kawasan hutan tersebut kemudian terbagi lagi menjadi tiga yaitu hutan produksi (68,8 juta hektare atau 57%), hutan konservasi (22,1 juta hektare atau 18%), dan hutan lindung (29,7 juta hektare atau 25%) (Nurbaya dkk., 2018). Kawasan hutan di Indonesia dapat ditemukan dengan berbagai jenis tipe seperti contohnya adalah hutan dataran rendah dan hutan pegunungan (hutan montana). Hutan pegunungan terbagi menjadi tiga kelompok berdasarkan ketinggiannya yaitu hutan montana bawah/*sub montane* (700-1400 mdpl), hutan montana tengah/*lower montane* (1400-2000 mdpl), dan hutan montana atas/*upper montane* (>2000 mdpl) (Brambach dkk., 2017). Area hutan pegunungan memiliki tingkat diversitas, baik flora dan fauna, yang tinggi dibandingkan dengan jenis hutan yang lain (Martínez dkk., 2009). Selain itu, endemisitas di area tersebut umumnya juga lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi lain. Diversitas dan endemisitas tertinggi dapat ditemukan pada hutan pegunungan dengan ketinggian antara 500-2000 mdpl. Sebenarnya, sebab tingginya tingkat diversitas pada area tersebut masih menjadi pertanyaan namun beberapa asumsi yang ada menduga hal tersebut disebabkan variasi iklim (temperatur, kelembapan), ketersediaan energi, produktivitas ekosistem, sejarah dan proses evolusi, dan keterbatasan penyebaran (*dispersal limitation*) (Kessler & Kluge, 2008). Penelitian yang dilakukan oleh Brambach dkk. (2017) di kawasan hutan pegunungan Sulawesi Tengah menunjukkan bahwa diversitas pohon mencapai 27-78 spesies per 0,24 hektare dengan endemisitas tumbuhan berpembuluh mencapai 22% dari total spesies endemik Sulawesi. Hal ini cukup membuktikan bahwa hutan pegunungan mengandung biodiversitas yang tinggi sehingga perlu untuk dijaga kelestariannya. Selain itu, ekosistem hutan pegunungan tropis juga memiliki peran penting dalam menyediakan jasa layanan ekosistem seperti penyedia air (Martínez dkk., 2009) dan penyimpanan karbon (Culmsee dkk., 2010; Spracklen & Righelato, 2014).

Kebutuhan manusia yang semakin meningkat terhadap kebutuhan lahan pertanian dan pemukiman menjadi salah satu ancaman bagi kelestarian ekosistem hutan, selain faktor bencana alam. Faktor antropogenik ini merupakan penyebab utama terjadinya deforestasi dan degradasi hutan. Ancaman ini menjadi hal yang harus mendapat perhatian lebih ketika terjadi pada kawasan hutan pegunungan. Hal ini dikarenakan jika kawasan hutan tersebut mengalami deforestasi maka dapat dipastikan bahwa biodiversitas di dalamnya juga akan terganggu, habitat satwa liar semakin berkurang, dan terganggunya berbagai proses ekologis

di ekosistem. Laju deforestasi kawasan hutan Indonesia semakin meningkat, hal ini berdampak pada semakin terancam pula biodiversitas di dalamnya (Normile, 2010).

Manusia memiliki andil besar terhadap perubahan massif ekosistem hutan pegunungan.

Eksplorasi berlebih sumber daya hutan memicu terjadinya penurunan kualitas ekosistem secara signifikan. Perubahan kualitas ekosistem hutan tersebut terwujud dalam penurunan jasa layanan lingkungan yang saat ini mulai dirasakan oleh manusia. Masyarakat desa yang tinggal di sekitar kawasan hutan dan menjadikan kawasan hutan tersebut sebagai tempat bekerja, bercocok tanam, penyedia berbagai kebutuhan (makanan, kayu, air) adalah yang paling merasakan dampaknya. Hal ini tidak mengherankan karena degradasi kawasan hutan seringkali disebabkan oleh aktivitas masyarakat yang tinggal di sekitar hutan, terutama dalam pembukaan lahan pertanian.

2.3. Kawasan Hutan Pegunungan di Sekitar Gunung Arjuno

Gunung Arjuno merupakan salah gunung berapi aktif yang berada di Provinsi Jawa Timur dengan ketinggian mencapai 3.339 mdpl. Kawasan gunung ini melingkupi tiga kabupaten berbeda yaitu Mojokerto, Malang, dan Pasuruan. Kawasan Gunung Arjuno telah masuk ke dalam Bromo-Tengger-Semeru-Arjuno *Biosphere Reserve* (BTSA-BR) yang telah ditetapkan oleh UNESCO pada tahun 2015. Penetapan kawasan tersebut menjadi *biosphere reserve* bertujuan untuk konservasi biodiversitas khususnya Jawa Timur dari ancaman kepunahan dan meningkatkan kesejahteraan sosial-ekonomi masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan tersebut secara berkelanjutan (Hakim & Soemarno, 2017). Pada kawasan ini juga terdapat Taman Hutan Rakyat (Tahura) R. Soerjo yang merupakan kawasan pelestarian biodiversitas dan ekosistem hutan pegunungan serta menjadi bagian dari BTSA-BR. Kawasan hutan Gunung Arjuno memiliki kekayaan biodiversitas yang tinggi dan perlu untuk dijaga kelestariannya.

Hutan pendidikan Universitas Brawijaya atau yang dikenal dengan UB *Forest* (UBF), merupakan kawasan hutan pegunungan yang berada di lereng bagian selatan Gunung Arjuno. Kawasan UBF memiliki luas mencapai 544,74 ha dan terbagi menjadi dua area pemanfaatan yaitu hutan produksi (agroforestri) dan kawasan lindung serta berada pada ketinggian mulai dari 500 sampai 1500 mdpl. Area hutan produksi memiliki luas lebih besar dibandingkan dengan hutan lindung. Pengelolaan UBF berkenaan dengan kepentingan pendidikan memiliki beberapa tujuan meliputi sebagai laboratorium lapangan, dan tempat observasi bagi mahasiswa, peneliti; sebagai pusat penelitian yang bermaksud untuk meningkatkan SDM melalui program pendidikan di UBF; optimalisasi pemanfaatan

kawasan hutan secara berkelanjutan; sebagai tempat untuk pendidikan dan pelatihan multi disiplin berbasis hutan; sebagai sebuah demonstrasi kehutanan berkelanjutan praktis (BUA UB, 2017).

Profil vegetasi yang ada di UBF saat ini sangat dipengaruhi oleh aktivitas masyarakat masa lalu dan saat ini. Pada awalnya, area UBF merupakan hutan pegunungan tropik yang selanjutnya dikonversi oleh Perhutani menjadi hutan produksi yang didominasi tegakan pinus dan mahoni. Di beberapa bagian dengan topografi yang berlereng curam, sempit dan tidak memungkinkan ditanami dengan pinus atau mahoni menjadi habitat bagi vegetasi asli hutan. Area ini untuk selanjutnya diperuntukkan sebagai kawasan lindung. Hasil eksplorasi awal oleh Tim Taksasi UBF tahun 2016 menunjukkan bahwa ada sekitar 231 spesies tumbuhan berbagai bentuk hidup yang teramati. Beberapa spesies tumbuhan memiliki nilai ekonomi yang dapat dimanfaatkan. Selain itu, beberapa spesies anggrek hutan juga teramati di antaranya *Aerides* sp., *Agrostophyllum bicuspidatum*, *Coelogyne speciosa*, *Dendrobium linearifolium*, *Eria hyacinthoides*, *E. longifolia*, *E. monostachya*, *Flickingeria* sp., *Liparis* sp., *Sarcantus* sp. (Hakim dkk., 2017).

Saat ini, kawasan lindung UBF telah mengalami kerusakan akibat konversi menjadi lahan budidaya pertanian oleh masyarakat sekitar hutan. Beberapa jenis tanaman komoditi yang banyak ditanam oleh masyarakat di kawasan ini diantaranya sawi, kubis, cabai, kopi, dan lain-lain. Kawasan lindung UBF perlu mendapat perhatian secara khusus karena keberadaannya semakin berkurang akibat eksploitasi intensif oleh masyarakat yang melebihi daya dukung ekosistem. Konversi kawasan lindung menjadi lahan budidaya secara massif yang tidak terkelola secara baik perlu untuk segera ditindaklanjuti agar tidak semakin meluas. Dengan memperhatikan kondisi hutan lindung UBF yang di beberapa bagian memiliki kontur tanah yang terjal dan curam, penggunaan tanaman budidaya semacam itu tentu pilihan yang kurang tepat. Karena dengan sistem perakaran tanaman yang tidak dalam menyebabkan stabilitas tanah menjadi kurang terjaga sehingga potensi terjadinya erosi, tanah longsor, dan banjir semakin besar. Selain itu, penyebaran dan ancaman dari spesies asing invasif (IAS) di area lindung juga masalah lain bagi regenerasi alami vegetasi hutan. Penelitian yang dilakukan oleh Rahma & Arisoesilningsih (2017) menunjukkan persebaran spesies tanaman IAS eksotik sudah cukup luas dengan spesies dominan yaitu *Debregeasia orientalis*, *D. longifolia*, *Brugmansia suaveolen*, dan *Araliaceae*. Selain itu, di beberapa bagian juga banyak ditemukan *Tithonia diversifolia* yang banyak tumbuh liar.

2.4. Restorasi Ekosistem Hutan Pegunungan Terdegradasi

Ekosistem hutan terdegradasi perlu mendapat perhatian khusus karena jumlahnya semakin meningkat seiring waktu. Degradasi ekosistem hutan memiliki dampak terhadap penurunan kualitas ekosistem, penurunan jasa layanan lingkungan, kerusakan habitat satwa, dan terganggunya berbagai proses ekologis di lingkungan. Hal tersebut terjadi akibat perubahan struktur dan fungsi dari ekosistem hutan. Pemulihan ekosistem hutan terdegradasi dapat dilakukan melalui restorasi. Pada dasarnya, restorasi memiliki pengertian upaya atau kegiatan untuk mengembalikan ekosistem ke kondisi awal (atau mendekati) sebelum gangguan (Bradshaw, 1996), kemudian SER (2004) mendefinisikan restorasi sebagai proses membantu pemulihan ekosistem yang telah terdegradasi, rusak, atau musnah dengan menggunakan ekosistem referensi sebagai target capaian. McDonald dkk. (2016) dan Shackelford dkk. (2013) menyebutkan restorasi bertujuan untuk memperbaiki beberapa permasalahan dalam ekosistem seperti perubahan komposisi vegetasi penyusun, struktur, fungsi, diversitas, dan ekosistem bentang alam. Penggunaan ekosistem referensi sebagai target dan kriteria keberhasilan restorasi mungkin akan digantikan dari waktu ke waktu akibat perubahan orientasi menuju masa depan yang tidak pasti dan dinamis (Corlett, 2016). Faktor antropogenik yang berpengaruh besar terhadap terjadinya degradasi ekosistem hutan perlu mendapat perhatian dan pertimbangan dalam melakukan restorasi. Oleh karena itu, saat ini, definisi dan pendekatan-pendekatan restorasi yang lebih berkembang dengan memperhatikan aspek ekologi dan antropogenik tanpa mengurangi tujuan aslinya, untuk pemulihan fungsi ekosistem, mulai dimunculkan seperti yang dinyatakan oleh Gann dkk. (2019), Löff dkk. (2019), Stanturf dkk. (2019), dan Noulèkoun dkk. (2021). Restorasi ekologis, bila diterapkan secara efektif dan berkelanjutan, berkontribusi untuk melindungi keanekaragaman hayati; meningkatkan kesehatan dan kesejahteraan manusia; meningkatkan ketahanan pangan dan air; penyediaan barang, jasa, dan kemakmuran ekonomi; dan mendukung mitigasi, ketahanan, dan adaptasi perubahan iklim. Pendekatan berbasis solusi yang melibatkan masyarakat, ilmuwan, pembuat kebijakan, dan pengelola lahan dapat memperbaiki kerusakan ekologis dan membangun kembali hubungan yang lebih sehat antara manusia dan alam. Ketika dikombinasikan dengan konservasi dan pemanfaatan berkelanjutan, restorasi ekologi adalah mata rantai yang diperlukan untuk mengembalikan kondisi lingkungan lokal, regional, dan global dari keadaan yang menurun kualitasnya menuju kondisi yang lebih baik (Gann dkk., 2019).

Kegiatan restorasi dengan melakukan penanaman berbagai jenis tanaman merupakan salah satu cara untuk mempercepat proses suksesi alami hutan terdegradasi. Penggunaan

berbagai spesies pohon lokal multiguna dengan maksud pengayaan jenis dapat membantu dalam memulihkan stabilitas ekosistem hutan, penyediaan jasa layanan ekosistem yang komplit, penyediaan sumber makanan yang beragam dan habitat bagi satwa liar. Selain itu, penggunaan berbagai spesies pohon lokal multiguna juga diharapkan mampu untuk mengantisipasi kolonisasi spesies tanaman asing invasif yang seringkali mengancam pertumbuhan tanaman lain di sekitarnya (Hakim & Miyakawa 2015; Padmanaba dkk., 2017; Rahma & Arisoesilaningih, 2017). Penggunaan tanaman pohon lokal multiguna juga berpotensi menghasilkan produk hutan non-kayu, seperti buah, yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai komoditi perdagangan ke depannya.

Teknik restorasi hutan dengan pengayaan jenis tanaman lokal dengan tujuan peningkatan kualitas ekosistem dan biodiversitas telah banyak dilakukan di daerah tropis (McNamara dkk., 2006; Sovu dkk., 2010; Millet dkk., 2013; Yeong dkk., 2016). Dalam aplikasinya, penanaman pohon tersebut memperhatikan beberapa hal yang meliputi jumlah dan desain penanaman (*planting density and design*), keberagaman spesies yang digunakan (*species diversity*), regenerasi alami, dan teknik atau pola penanaman. Beberapa aspek tersebut perlu menjadi perhatian agar keberhasilan restorasi dapat tercapai. Intervensi manusia dalam percepatan regenerasi hutan secara alami (*assisted natural regeneration*) sangat diperlukan saat ini (Uebel dkk., 2017). Hal ini dikarenakan laju kerusakan hutan alam lebih cepat dibandingkan dengan laju regenerasinya secara alami, tanpa intervensi manusia. Oleh karena itu, jika hal tersebut tidak diseimbangkan maka laju hilangnya habitat dan biodiversitas, kepunahan spesies, bencana alam akan semakin cepat terjadi.

Keterlibatan peran masyarakat sekitar hutan dalam upaya restorasi hutan mutlak diperlukan karena kehidupan masyarakat tersebut secara langsung bersinggungan dengan hutan. Pelibatan masyarakat dalam perencanaan, pelaksanaan dan evaluasi kegiatan restorasi hutan harus menjadi perhatian dan pertimbangan bagi para pelaku restorasi. Masyarakat memiliki peran sangat penting dalam upaya restorasi hutan karena masyarakat yang lebih mengetahui secara detil kondisi hutan di sekitarnya. Upaya restorasi hutan tanpa melibatkan masyarakat berpotensi besar untuk tidak sukses. Pengetahuan lokal masyarakat mengenai jenis-jenis tanaman hutan tertentu dan kondisi hutan terkadang menjadi informasi penting bagi pelaksanaan restorasi. Kesuksesan restorasi ekologi sangat bergantung pada koordinasi yang efektif antara pengetahuan saintifik dan lokal masyarakat (Mawardi & Sudaryono 2006; Uprety dkk., 2012).

2.5. Bioindikator Perubahan Kualitas Lingkungan dalam Kegiatan Restorasi Hutan

Perubahan kualitas lingkungan sebagai akibat konversi hutan menjadi berbagai bentuk alih guna lahan perlu dievaluasi dalam rangka program restorasi hutan terdegradasi. Evaluasi tersebut dapat dilakukan mulai dari awal, tengah, atau akhir kegiatan restorasi dalam kurun atau periode waktu tertentu sehingga dengan demikian, status dan pemulihan ekosistem yang telah dicapai dapat diketahui. Untuk penilaian keberhasilan restorasi sendiri, paling tidak, harus mencakup tiga hal yang merepresentasikan kondisi di dalam ekosistem yaitu komposisi, struktur, dan fungsi (Gatica-Saavedra dkk., 2017). Pemilihan indikator untuk menilai perubahan kualitas lingkungan perlu memperhatikan karakteristik dari indikator tersebut. Indikator yang baik memiliki karakteristik mudah diukur (*measurable*), sensitif terhadap perubahan, dapat diinterpretasikan, dan murah (*cost effective*) (Dey & Schweitzer, 2014; Gatica-Saavedra dkk., 2017). Selain itu, pemilihan indikator yang sesuai juga harus mempertimbangkan periode waktu penilaian (jangka pendek atau panjang), tingkat degradasi hutan, lokasi area, tujuan dan target restorasi. Oleh karena itu, kualitas hasil penilaian keberhasilan restorasi sangat ditentukan oleh jenis indikator yang digunakan.

Perubahan kualitas lingkungan dalam restorasi hutan dapat ditentukan dengan menggunakan bioindikator (Gatica-Saavedra dkk., 2017). Bioindikator merupakan spesies makhluk hidup yang keberadaan (kelimpahan) atau ketidakteradaannya mencerminkan kondisi spesifik lingkungan, habitat, atau komunitas. Bioindikator digunakan karena dapat menyediakan informasi terkait adanya perubahan lingkungan dan juga menunjukkan kesehatan dari lingkungan atau ekosistem (Carignan & Villard, 2002; Rempel dkk., 2016).

Perbaikan atau peningkatan kualitas ekosistem hutan selama periode restorasi perlu untuk dievaluasi secara berkala sampai sejauh mana pemulihan terjadi. Hasil evaluasi ini dapat dibandingkan dengan kondisi awal atau hutan alami terkonservasi sebagai *reference site*.

Berkenaan dengan restorasi hutan terdegradasi, ada banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan restorasi dengan menggunakan berbagai jenis indikator seperti komunitas semut (Jamison dkk., 2016), mikrobia tanah (Singh dkk., 2013; Couto dkk., 2016; Chang dkk., 2017), vegetasi (Hariyati dkk., 2013; Sukanuma & Durigan, 2015), serangga tanah (*dung beetle*) (Derhé dkk., 2016), serangga terestrial (Longcore, 2003).

Penggunaan beberapa indikator untuk menentukan perubahan kualitas ekosistem hutan yang direstorasi mampu memberikan informasi lebih baik dibandingkan jika hanya menggunakan satu indikator. Hal ini dikarenakan ekosistem hutan sangat kompleks dan tidak cukup jika hanya dipilih satu variabel saja (Gatica-Saavedra dkk., 2017). Selain itu, dengan mengintegrasikan beberapa indikator, maka interaksi antar indikator tersebut akan

meningkatkan efektivitasnya. Dengan demikian, besarnya pengaruh setiap indikator terhadap keberhasilan restorasi dapat ditentukan dengan menggunakan metode analisis yang sesuai dan tepat.

2.6. Pemodelan Ekologi Restorasi Ekosistem Hutan Terdegradasi

Pemodelan ekologi dapat digunakan dalam memahami perilaku suatu sistem secara kompleks. Pemodelan ekologi sangat bermanfaat untuk mensimulasikan dan menganalisis dinamika jangka panjang dan kompleksitas sistem ekologi. Penggunaan pemodelan ekologi memungkinkan integrasi informasi dari berbagai sumber data berbeda serta menganalisis, menginterpretasi dan memahami pengamatan di lapang (Frank, 2008). Pemodelan ekologi juga menjadi alat penting untuk strategi perencanaan restorasi dan manajemen ekosistem, pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan (Swannack dkk., 2012), prediksi kondisi atau perubahan ekosistem di masa depan (Xi, 2014). Ekosistem hutan kompleks dan di dalamnya terjadi interaksi antar faktor penyusunnya. Untuk dapat memahami suatu ekosistem dengan baik maka interaksi antar faktor tersebut harus dipahami secara menyeluruh dan terintegrasi, tidak secara parsial. Faktor-faktor tersebut bekerja dalam ekosistem pada skala temporal dan spasial yang berbeda (Swannack dkk., 2012). Oleh karena itu, interaksi dan hubungan antar faktor tidak dapat disederhanakan tanpa ada pemahaman dasar terhadap faktor-faktor tersebut.

Pada pemodelan ekologi, ada beberapa tipe model yang dapat digunakan untuk memahami ekosistem lebih mendalam yaitu di antaranya model analitis, model konseptual, model indeks, model simulasi, model statistik, dan model spasial (Miina dkk., 2006; Swannack dkk., 2012). Pemilihan tipe model yang akan dikembangkan bergantung pada tujuan dan periode waktu penilaian ekosistem. Jika penilaian hanya dilakukan dalam satu periode saja maka dapat menggunakan model analitis, konseptual, indeks, statistik, dan spasial. Namun, jika hal yang dikehendaki adalah prediksi perubahan yang terjadi dalam ekosistem maka digunakan model simulasi atau spasial. Pada model ini, data yang diperlukan adalah data dengan rentang waktu yang lama atau banyak tahun (*multi years*). Karena dengan rentang waktu yang lama tersebut variasi data dapat diperoleh secara lengkap dan mewakili dinamika sistem yang terjadi. Contoh penelitian yang menggunakan model konseptual untuk evaluasi restorasi dilakukan oleh DiGemaro dkk. (2012) di Sacramento-San Joaquin Delta, California. Pada penelitian tersebut, model konseptual digunakan untuk mengevaluasi dan membuat peringkat terkait aktivitas restorasi. Dengan menggunakan model tersebut memungkinkan bagi peneliti atau pengelola kawasan untuk mensintesis

informasi saintifik dan membuat prediksi kualitatif berkaitan dengan fungsi ekosistem dan luaran dari restorasi yang dilakukan. Contoh penelitian yang lain adalah penggunaan model konseptual untuk memahami peran spesies eksotik invasif dalam ekosistem ekologi dan menentukan dampak dari keberadaan spesies tersebut terhadap keberhasilan restorasi (Doren dkk., 2009).

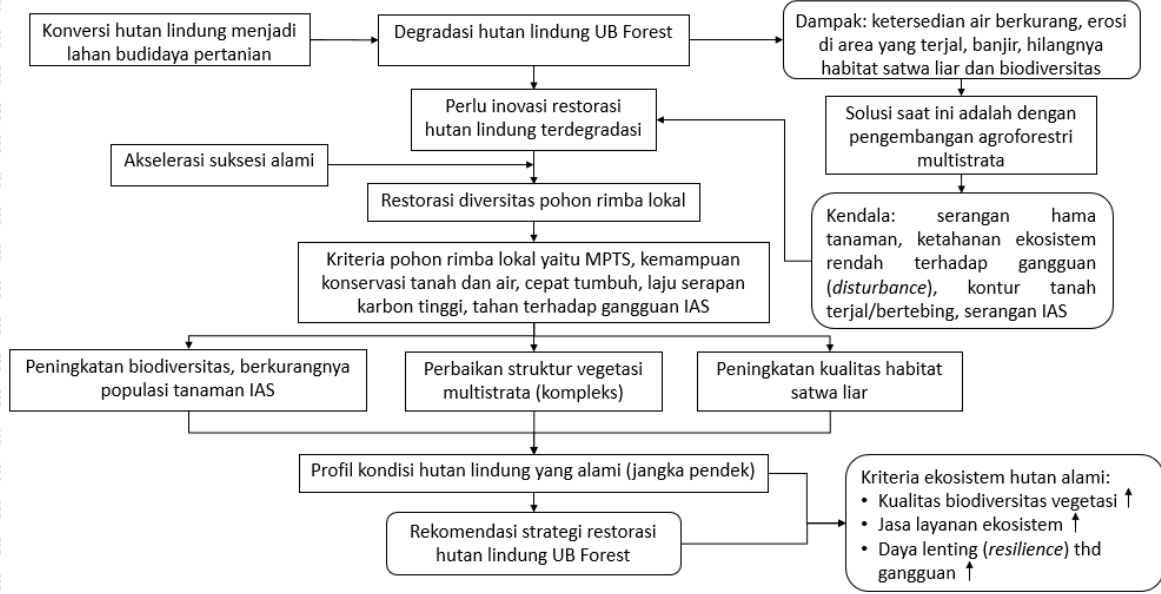
Selain penggunaan model konseptual, model persamaan struktural (*structural equation modeling/SEM*) juga dapat digunakan untuk analisis ekosistem. Pada model ini memadukan antara model konseptual dan persamaan matematis dalam proses analisis datanya. Data yang diperlukan juga melibatkan banyak variabel sehingga sesuai untuk diaplikasikan dalam analisis ekosistem yang bersifat kompleks. Dalam kasus restorasi, kesuksesan restorasi dapat dianalisis dengan menggunakan SEM. Hal ini dapat dilakukan melalui penentuan interaksi antar variabel penilaian kesuksesan dan pengaruh langsung atau tidak langsung variabel penilai terhadap kesuksesan restorasi. Penelitian yang dilakukan oleh Bessi dkk. (2018) merupakan salah satu contoh penggunaan SEM untuk mengevaluasi keberhasilan restorasi hutan dalam meningkatkan kondisi air tanah di Cerrado, Brasil. Pengaruh langsung dan tidak langsung dari variabel struktur hutan, yang direstorasi, dan variabel hidrologi (jatuhan air, *stem flow*, *rainfall interception*) terhadap kondisi air tanah (*penetration resistance*, laju infiltrasi, kelembaban tanah) juga ditentukan dengan menggunakan SEM.

2.7. Kerangka Konsep

Adanya kegiatan alih fungsi hutan lindung UBF menjadi lahan budidaya pertanian yang cukup massif menyebabkan penurunan kualitas dan jasa layanan lingkungan di area tersebut. Dampak dari degradasi hutan yang terjadi di antaranya hilangnya habitat satwa liar, hilangnya biodiversitas, berkurangnya ketersediaan air, erosi, dan tanah longsor. Permasalahan ini perlu untuk diselesaikan agar dampaknya tidak semakin meluas dan bertambah buruk. Saat ini, pengembangan sistem agroforestri multistrata menjadi salah satu solusi untuk permasalahan tersebut karena dianggap dapat mengakomodir pemulihan fungsi area hutan sebagai hutan lindung. Tetapi, beberapa kendala muncul dalam penerapan sistem ini yaitu di antaranya adanya serangan hama tanaman pertanian, terbatasnya spesies pohon lokal yang digunakan, ketahanan ekosistem yang rendah terhadap gangguan (*disturbance*), dan sulit untuk diterapkan di daerah dengan kontur tanah yang terjal dan bertebing. Karena tidak sepenuhnya kepentingan konservasi biodiversitas hutan lindung dapat terpenuhi dengan penerapan sistem agroforestri multistrata maka diperlukan inovasi restorasi kawasan hutan lindung yang terdegradasi ini.

Restorasi adalah upaya yang dilakukan dengan tujuan memulihkan fungsi hutan agar dapat bekerja sebagaimana peran dan peruntukannya. Restorasi hutan melalui pengayaan diversitas pohon lokal merupakan salah satu alternatif yang dapat diterapkan. Dengan dasar meniru konsep regenerasi alami pada pemulihan hutan alam terdegradasi, maka campur tangan manusia diperlukan agar tercapai percepatan perbaikan dan pemulihan ekosistem hutan. Intervensi manusia dalam kegiatan restorasi terwujud dalam bentuk pemilihan teknik restorasi yang digunakan seperti pengayaan jenis, pola penanaman, dan pemilihan spesies pohon lokal yang digunakan. Dalam pemilihan spesies pohon lokal ada beberapa kriteria yang menjadi pertimbangan agar dapat tercapai tujuan konservasi dan pemulihan fungsi hutan dalam pelaksanaan restorasi, seperti spesies pohon yang digunakan harus memiliki banyak kegunaan (*multi purposes tree species*/MTPS), memiliki kemampuan untuk konservasi tanah dan air, memiliki laju pertumbuhan dan laju serapan karbon yang cepat, serta memiliki ketahanan hidup yang baik di lingkungan berkualitas rendah dan gangguan spesies tanaman asing invasif (*invasive alien plant species*/IAS).

Kegiatan restorasi hutan yang mempertimbangkan aspek teknik restorasi, pemilihan spesies pohon unggul diharapkan mampu untuk memberikan dampak yang sesuai dengan tujuan restorasi. Paling tidak, restorasi hutan dapat dikatakan berhasil jika ada pemulihan fungsi hutan disertai dengan peningkatan biodiversitas, pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman tinggi, perbaikan struktur vegetasi multistrata, dan peningkatan ketersediaan habitat yang berkualitas bagi satwa liar. Profil hutan yang semacam ini dapat mengindikasikan bahwa kegiatan restorasi berhasil dalam jangka pendek. Keberhasilan restorasi dalam jangka panjang dapat ditunjukkan jika tercapai kemiripan struktur dan fungsi dengan ekosistem hutan alam yang terkonservasi sebagai *reference site*. Ekosistem hutan alami memiliki beberapa kriteria yaitu kualitas biodiversitas yang tinggi, mampu menyediakan jasa layanan ekosistem yang lengkap, dan memiliki daya lenting (*resilience*) yang sangat baik terhadap adanya gangguan. Informasi dari hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai rekomendasi dalam penyusunan strategi restorasi hutan lindung di UB *Forest* yang mengacu pada kriteria ekosistem hutan lindung alami (Gambar 1).



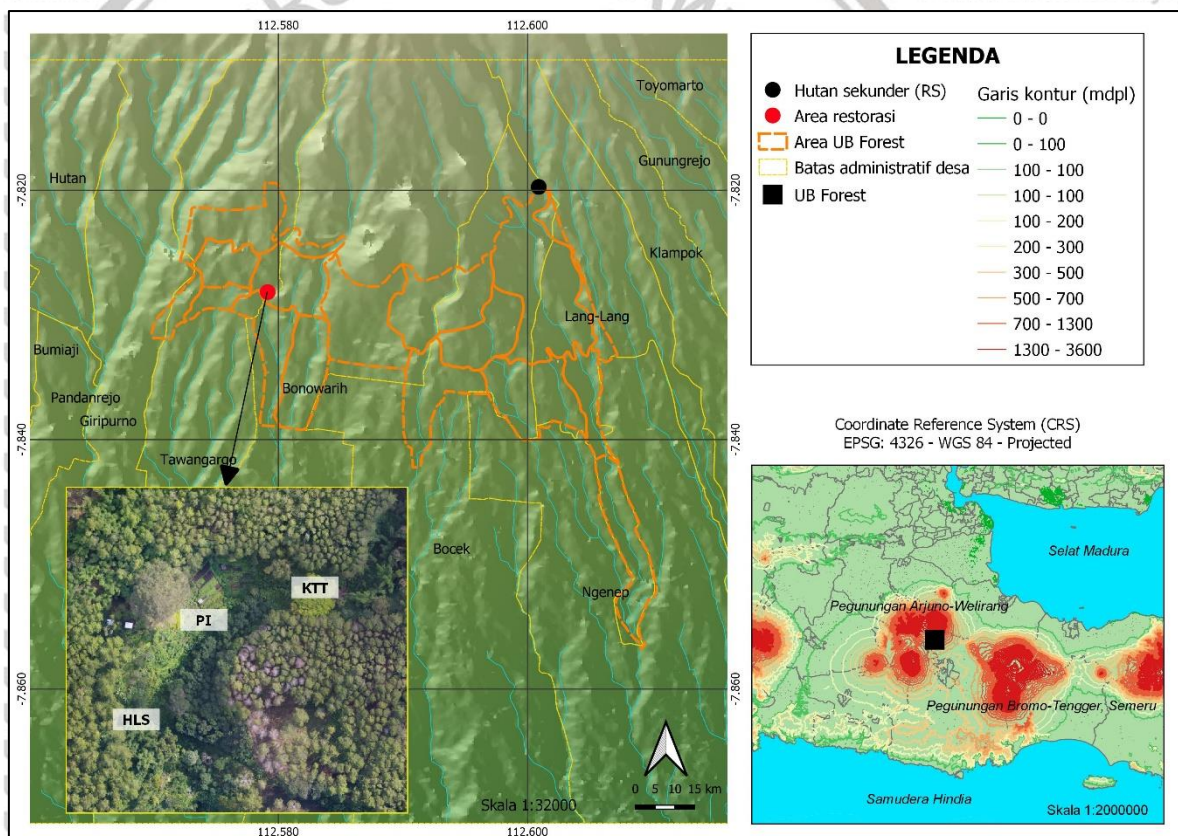
Gambar 1. Kerangka konsep penelitian



BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2018 – Januari 2021 di kawasan lindung UBF yang terletak di lereng Gunung Arjuno, tepatnya di Dusun Sumpersari, Desa Tawang Argo, Karangploso, Kabupaten Malang (Gambar 2). Lokasi penelitian berada pada ketinggian 900 – 1200 mdpl dengan kontur tanah terjal (kemiringan lereng >30%), pada bagian bawah terdapat alur sungai yang terdapat air hanya ketika musim hujan. Kawasan lindung ini mayoritas sudah terkonversi menjadi lahan pertanian seperti kopi, wortel, cabai, dan kacang tanah. Beberapa jenis tegakan pohon hutan tersisa di antaranya bulu (*Ficus drupacea*), trete (*Microcos tomentosa*), sementara tegakan lain terdapat alpukat (*Persea americana*) dan nangka (*Artocarpus heterophyllus*) yang ditanam oleh petani.



Gambar 2. Lokasi penelitian di kawasan lindung UBF.

Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Area penelitian merupakan kawasan hutan lindung (HL) terdegradasi yang direstorasi.

Area ini terbagi menjadi area PI (lahan pertanian intensif), area KTT (kebun kopi

monokultur); dan area HLS (HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran) (Gambar 3). Selain ketiga area tersebut, kawasan hutan lindung terkonservasi atau hutan sekunder juga digunakan sebagai pembandingan (*reference site/RS*) pada penelitian ini. Pada masing-masing area tersebut ditanam beragam jenis pohon perpaduan antara buah dan kayu lokal (pohon multiguna) sebagai tanaman penghijauan.

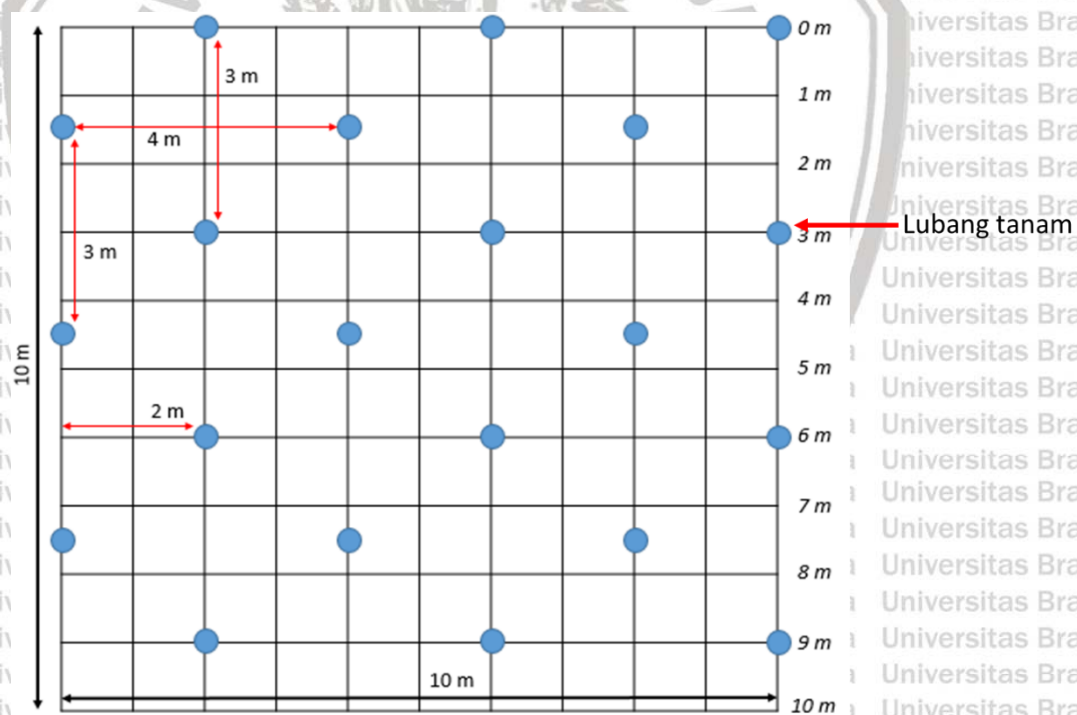


Gambar 3. Gambaran kondisi lingkungan di area penelitian A. Area PI; B. Area KTT; C. Area HLS; D. *Reference site/RS*

Berbagai jenis pohon lokal multiguna yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sukun (*Artocarpus altilis*), bendo (*A. elasticus*), angka (*A. heterophyllus*), cempedak (*A.s integer*), aren (*Arenga pinnata*), matoa (*Pometia pinnata*), melinjo (*Gnetum gnemon*), asem (*Tamarindus indica*), petai (*Parkia speciosa*), bambu (Bambuseae), damar (*Agathis borneoensis*), jambu biji (*Psidium guajava*), daun kari (*Murraya koenigii*), durian (*Durio zibethinus*), jambu air (*Syzigium sp.*), juwet (*S. cumini*), salam (*S. polyanthum*), kelengkeng (*Dimocarpus longan*), mangga (*Mangifera indica*), pala (*Myristica fragrans*), dan delima (*Punica granatum*). Tanaman buah ini dimanfaatkan sebagai tanaman sela di antara tanaman budidaya dan restorasi yang lain. Selain tanaman-tanaman tersebut, ada beberapa jenis pohon rimba yang juga ditanam seperti trete (*M. tomentosa*), tutup lumbu (*Mallotus sp.*), tutup kerikil (*Homalanthus giganteus*), tutup (*Macaranga sp.*), pasang (*Lithocarpus sp.*), gondang (*Ficus variegata*), beringin (*Ficus sp.*), kepuh (*Sterculia foetida*), jambu lir (*Syzigium sp.*), kukrup (*Engelhardia spicata*), cempaka (*Magnolia champaca*). Penanaman bibit pohon penghijauan dilakukan di dalam sub plot/area berukuran 10x10 m², yang

letaknya tersebar secara menyeluruh di setiap area restorasi. Pada setiap sub plot tersebut terdapat minimal 21 lubang tanam yang dibuat untuk tempat penanaman (Gambar 4). Tujuan pembuatan sub plot ini adalah untuk memudahkan pengamatan dan pengukuran pertumbuhan tanaman penghijauan yang telah ditanam.

Pada beberapa individu setiap jenis tanaman penghijauan yang ditanam diberikan dua perlakuan berbeda yaitu tanaman dengan pembersihan tumbuhan bawah/gulma liar (+Pgks) dan tanaman tanpa pembersihan tumbuhan bawah/gulma liar (-Pgks). Perlakuan +Pgks dilakukan dengan melakukan pembersihan tanaman liar yang tumbuh liar di sekitar tegakan tanaman penghijauan dalam petak ukuran 1x1 m². Individu tanaman dengan perlakuan ini adalah maksimal 50% dari jumlah total individu pada tiap jenis, sisanya merupakan individu tanpa perlakuan. Perlakuan ini secara rutin diberikan setiap dua minggu sekali di tiga area restorasi yaitu PI, KTT, dan HLS. Untuk tanaman penghijauan di area RS tidak mendapatkan perlakuan ini dengan maksud agar tidak mengganggu ekosistem hutan alam yang masih bagus kondisinya.



Gambar 4. Letak titik-titik penanaman bibit pohon di tiap sub plot pada masing-masing area restorasi

3.2. Kerangka Operasional Penelitian

Penelitian ini diawali dengan survei sosial kepada petani dan masyarakat magersari tentang sikap dan tingkat pemahaman terkait konservasi biodiversitas melalui kegiatan

restorasi hutan lindung (HL) yang akan dilakukan (Tahap I). Petani yang dipilih merupakan orang yang mengolah lahan di hutan lindung tersebut. Kajian ini dilakukan dengan menggunakan teknik wawancara mendalam kepada responden. Informasi utama yang akan digali dari responden meliputi sosial ekonomi, kondisi awal vegetasi dan fungsi hutan lindung, jenis sumberdaya alam yang dimanfaatkan, luas lahan pertanian yang dikelola, jenis komoditi pertanian yang dibudidayakan, kesediaan berpartisipasi dalam kegiatan restorasi, sikap dan harapan dari kegiatan restorasi yang akan dilakukan.

Kawasan hutan lindung yang direstorasi dibagi menjadi tiga plot berbeda menyesuaikan kondisi lingkungan saat ini. Area tersebut meliputi lahan pertanian intensif (PI) yang sedang diolah oleh petani untuk budidaya tanaman sayur; kebun kopi monokultur yang tidak terawat (KTT); HL dengan tanaman campuran yaitu kebun kopi muda-tanaman budidaya (HLS).

Selain tiga area tersebut, area HL terkonservasi juga digunakan sebagai *reference site* (RS).

Pada Tahap II penelitian, pengamatan struktur komunitas tumbuhan, makrofauna tanah, bakteri tanah, dan lingkungan abiotik (fisika dan kimia tanah) dilakukan secara bertahap.

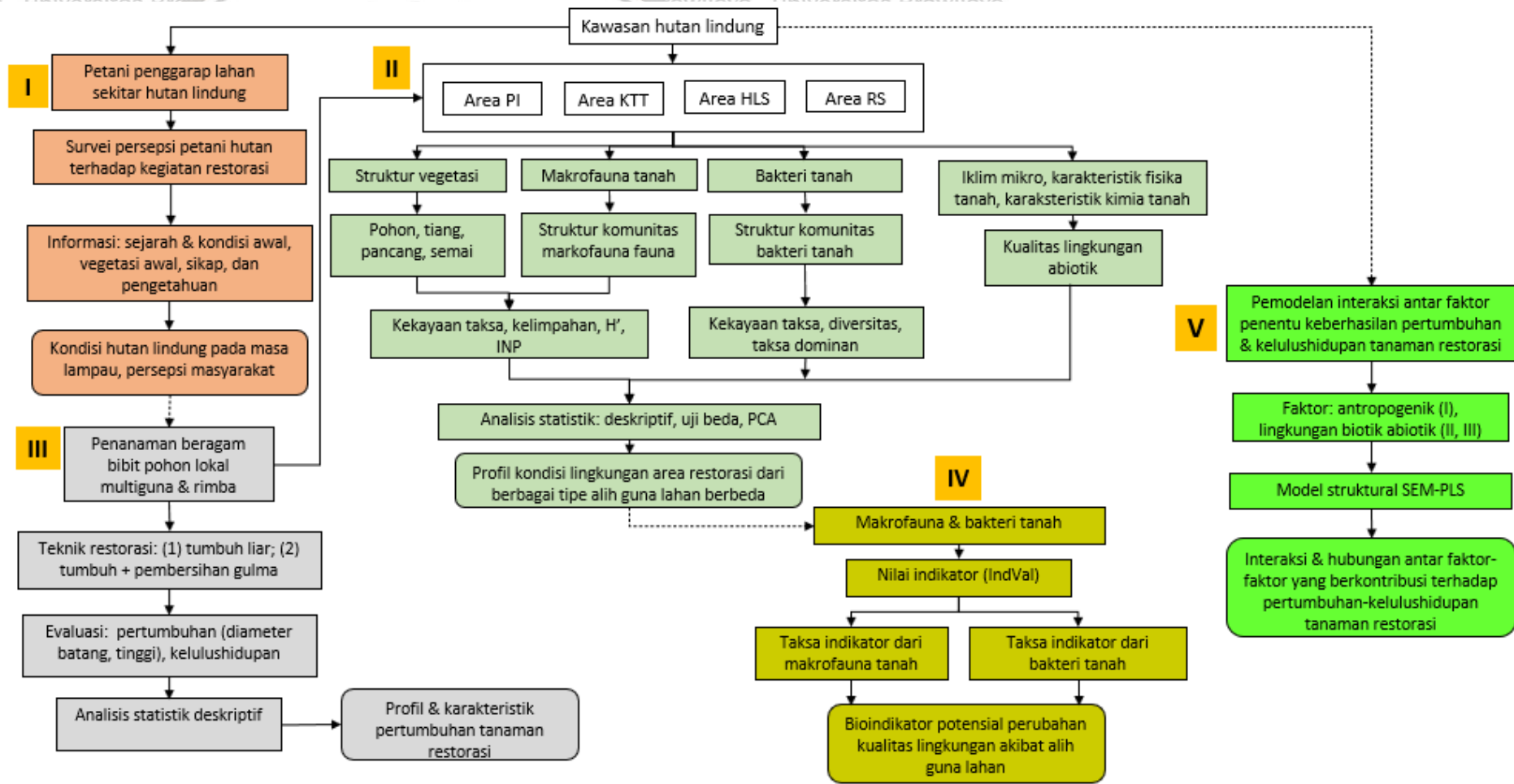
Analisis vegetasi dilakukan untuk menentukan komposisi dan diversitas tumbuhan pada level pohon, tiang, pancang, dan semai/tumbuhan bawah di masing-masing area saat ini.

Demikian halnya dengan komunitas makrofauna tanah, pengamatan dilakukan dengan pencuplikan hewan tanah menggunakan botol jebak (*pitfall trap*) yang dipasang secara acak di area penelitian. Contoh tanah dari masing-masing lokasi diambil secara komposit yang kemudian dianalisis di laboratorium dengan analisis metagenomik menggunakan teknologi *next generation sequencing* (NGS) gen 16S rRNA. Data sekuensing selanjutnya digunakan untuk menentukan kelimpahan, kekayaan, struktur komunitas dan diversitas (*alpha & beta*) bakteri tanah. Dari tahap ini, informasi mengenai profil dan kualitas lingkungan hutan lindung pasca alih fungsi dapat diperoleh.

Pada Tahap III penelitian, berbagai jenis bibit pohon lokal multiguna dan rimba ditanam di masing-masing area. Penanaman bibit-bibit tersebut memperhatikan kesesuaian dengan lahan yang digunakan. Pengamatan pertumbuhan dilakukan dengan mengukur diameter batang dan tinggi bibit pohon secara rutin setiap sebulan sekali selama 6-12 bulan pengamatan. Setiap kali ada bibit yang mati maka segera mungkin untuk ditanam sulam dengan jenis sama atau berbeda menyesuaikan stok bibit yang ada. Pada bibit pohon yang ditanam sebagian diberi perlakuan dengan pembersihan gulma secara rutin di sekitar tegaknya dan sebagian yang lain dibiarkan tumbuh secara liar. Ukuran area yang dibersihkan seluas $1 \times 1 \text{ m}^2$. Pada akhir pengamatan pertumbuhan kemudian dihitung perubahan diameter batang dan tinggi tanaman dari masing-masing jenis yang ditanam

sehingga diperoleh informasi mengenai kelulushidupan dan laju pertumbuhan tanaman restorasi. Selain itu, informasi tersebut juga dijadikan dasar untuk menyusun rekomendasi berbagai jenis tanaman lokal yang sesuai digunakan sebagai tanaman penghijauan di kawasan hutan pegunungan.

Adanya perubahan kualitas lingkungan akibat alih fungsi hutan dikaji pada Tahap IV penelitian ini. Hal tersebut dilakukan dengan menentukan organisme bioindikator dari komunitas makrofauna dan bakteri tanah yang diamati. Penentuan bioindikator dilakukan dengan menghitung nilai indikator (IndVal) masing-masing taksa yang ditemukan berdasarkan data kelimpahan menggunakan metode statistik di program RStudio. Bioindikator potensial yang didapatkan selanjutnya dijadikan rekomendasi dalam melakukan pemantauan dan evaluasi program restorasi hutan untuk menentukan sejauh mana pemulihan yang berlangsung. Interaksi antar faktor-faktor yang diasumsikan berkontribusi terhadap kelulushidupan dan pertumbuhan tanaman restorasi ditentukan melalui pemodelan struktural pada Tahap V penelitian ini. Pemodelan diterapkan dengan menggunakan *structural equation modeling – partial least square* (SEM-PLS) pada program WarpPLS 7.0. Pada pemodelan ini, antara faktor antropogenik dan lingkungan diinteraksikan dalam bentuk hubungan antar variabel yang saling terkait. Pemodelan ini mengintegrasikan hasil penelitian dari Tahap I, II, dan III. Hasil dari pemodelan kemudian dijadikan acuan dalam menyusun strategi dan rekomendasi program restorasi hutan lindung jangka panjang yang berorientasi konservasi biodiversitas dan peningkatan jasa layanan ekosistem bagi masyarakat. Tahapan-tahapan penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kerangka operasional penelitian

3.3. Penentuan Sikap dan Tingkat Pemahaman Masyarakat sekitar Hutan terkait Konservasi Biodiversitas

Survei sosial dilakukan kepada petani hutan (pesanggem) yang mengolah lahan di dalam kawasan lindung UBF tepatnya di area penelitian. Responden pada penelitian ini adalah petani atau anggota masyarakat dengan kriteria umur berkisar 20-50 tahun. Mengingat area yang diamati tidak luas maka jumlah responden yang berpartisipasi dalam penelitian ini sejumlah 13 orang. Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan teknik wawancara (*depth interview*) kepada setiap responden. Informasi yang digali dari responden meliputi profil demografi, persepsi responden terhadap keberadaan kawasan lindung di UBF, dan sikap responden terhadap upaya konservasi kawasan lindung. Variabel demografi yang dikaji dalam penelitian ini meliputi kondisi sosial seperti umur, pendidikan, pekerjaan utama, dan kondisi ekonomi seperti pendapatan, komoditi pertanian yang dibudidayakan, luas lahan yang dikelola, lama bercocok tanam, serta status pengelolaan lahan di UBF. Sementara itu, untuk menentukan persepsi dan pengetahuan responden mengenai keberadaan hutan lindung di kawasan UBF, variabel yang diamati di antaranya informasi tentang kondisi awal dan fungsi hutan lindung. Sikap terhadap upaya konservasi hutan khususnya kawasan lindung UBF ditentukan berdasarkan tingkat kepedulian dan pengalaman setiap responden. Semua aspek tersebut disusun dalam pertanyaan yang diwujudkan dalam bentuk kuisioner sebagai pedoman wawancara. Sebanyak 25 butir pertanyaan disiapkan untuk memperoleh informasi penelitian yang dibutuhkan.

3.4. Penentuan Profil Lingkungan Biotik dan Abiotik pada Beberapa Tipe Alih Guna Lahan dan Hutan di Area Penelitian

3.4.1. Struktur komunitas dan diversitas vegetasi di area penelitian

Analisis vegetasi (anveg) dilakukan di setiap area penelitian dengan mengamati pohon ($dbh > 20$ cm), tiang ($10 < dbh < 20$ cm), pancang ($dbh < 10$ cm, tinggi > 150 cm), dan semai/tumbuhan bawah. Plot pencuplikan disusun secara bertingkat (*nested plot*) dengan pembagian sebagai berikut plot pohon berukuran 20×20 m², plot tiang berukuran 10×10 m², plot pancang berukuran 5×5 m², dan plot semai/tumbuhan bawah berukuran 1×1 m². Penentuan plot anveg dilakukan secara acak dan mewakili kondisi komunitas tumbuhan di area tersebut (representatif). Pembuatan plot anveg dilakukan minimal sebanyak tiga kali ulangan di setiap area. Kelimpahan individu, kekayaan spesies, dominansi spesies, indeks nilai penting (INP), dan indeks diversitas Shannon-Wiener dihitung dengan menggunakan rumus 1, berdasarkan hasil analisis vegetasi yang dilakukan.

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \dots \dots \dots (1)$$

keterangan:

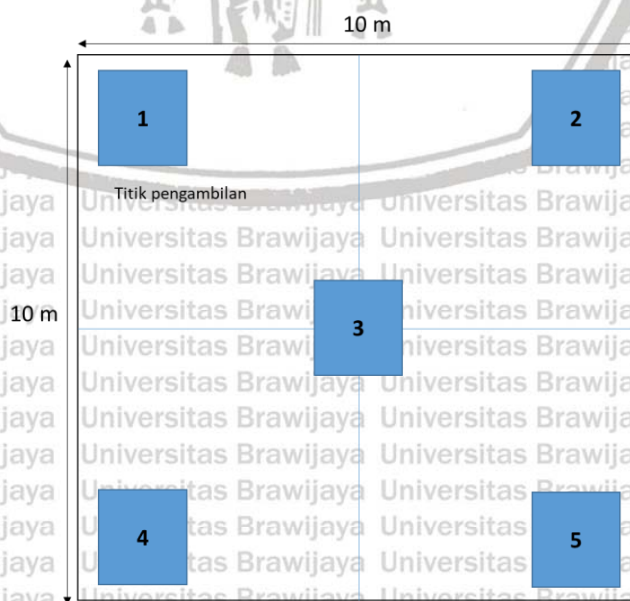
H' = indeks diversitas Shannon-Wiener

P_i = proporsi spesies i terhadap jumlah total spesies yang ditemukan

Indeks diversitas Shannon-Wiener merepresentasikan tingkat diversitas di suatu area, umumnya nilai indeks ini berkisar antara 0 – 5. Semakin besar nilai indeks menunjukkan bahwa suatu area memiliki keanekaragaman spesies yang tinggi, begitu sebaliknya.

3.4.2. Penentuan kualitas tanah di area penelitian

Penentuan kualitas tanah didahului dengan pengambilan contoh tanah secara komposit sebanyak tiga ulangan pada setiap area penelitian. Pengambilan contoh tanah dilakukan pada lima titik berbeda. Contoh tanah diambil dengan menggunakan *soil ring* pada kedalaman 0-10 cm. Contoh tanah yang sudah diambil kemudian segera dimasukkan ke dalam plastik sampel dan dibawa ke laboratorium. Tiap plastik sampel diisi dengan contoh tanah yang berasal dari lima titik pengambilan (Gambar 6). Karakteristik fisika tanah yang diamati yaitu agregat, bobot isi, dan kadar air tanah. Contoh tanah yang diperoleh kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Contoh tanah yang telah kering kemudian dipisahkan dari sisa-sisa bagian tumbuhan yang ikut terambil. Contoh tanah yang sudah bersih kemudian ditimbang berat keringnya. Berat kering yang diperoleh selanjutnya dibagi dengan volume *soil ring* yang digunakan untuk memperoleh nilai bobot isi tanah (g/cm^3).



Gambar 6. Titik pengambilan contoh tanah di plot pengamatan setiap area penelitian

Penentuan agregat tanah dilakukan dengan menggunakan metode pengayakan tunggal. Tingkat agregasi tanah dihitung berdasarkan pada besarnya persentase kemantapan tanah dari sampel yang dianalisis dengan menggunakan rumus 2 sebagai berikut:

$$AS = Wt2/(Wt1+Wt2) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

keterangan:

AS = kemantapan agregat (%)

Wt1 = berat material pada pengayakan pertama menggunakan air suling

Wt2 = berat material pada pengayakan kedua menggunakan larutan pendispersi

Untuk pengukuran kadar air tanah, contoh tanah dalam wadah ditimbang berat basah nya dengan menggunakan timbangan digital. Setelah pengukuran berat basah tanah, contoh tanah tersebut dikeringkan di dalam oven pada suhu 80°C sampai diperoleh berat konstan. Persentase kadar air tanah dihitung berdasarkan perbandingan selisih dari berat basah dan kering setelah pengovenan.

Karakteristik kimia tanah yang diukur meliputi pH, konduktivitas, dan bahan organik tanah pada setiap area penelitian. Tanah contoh diambil secara komposit dari lima titik berbeda di dalam plot restorasi. Tanah contoh yang diperoleh kemudian diaduk secara merata agar tercampur dan homogen. Sebanyak lima gram tanah dimasukkan ke dalam gelas ukur berisi 10 ml aquades kemudian campuran tersebut diaduk secara merata dengan menggunakan *magnetic stirrer*. pH dan konduktivitas tanah diukur dengan menggunakan pH-meter dan *conductivity meter*. Sensor alat pengukur dimasukkan ke dalam gelas ukur tersebut lalu ditunggu sampai pembacaan nilai pH dan konduktivitas konstan. Pengukuran bahan organik tanah dilakukan dengan metode pengabuan menggunakan *furnace*. Sebanyak lima gram contoh tanah kering bersih dihaluskan dengan mortar kemudian dimasukkan ke dalam cawan *furnace*. Selanjutnya, cawan tersebut dibakar di dalam tungku *furnace*. Jika sudah terjadi perubahan warna pada contoh tanah menjadi merah-jingga maka proses pembakaran dihentikan. Kadar bahan organik dihitung dengan cara mengurangi berat contoh tanah sebelum dan sesudah pembakaran.

3.4.3. Struktur komunitas makrofauna dan bakteri tanah di area penelitian

Pengamatan fauna tanah dilakukan dengan menggunakan metode botol jebak (*pitfall trap*) untuk memperoleh contoh hewan tersebut. Botol jebak diaplikasikan sebanyak 22 botol di area PI, 12 botol di area KTT, 12 botol di area HLS, dan delapan botol di area RS. Botol

jebak secara acak ditanam dalam tanah selama 48 jam dengan jarak minimal 10 m. Contoh hewan tanah yang diperoleh kemudian diidentifikasi di laboratorium dan selanjutnya dianalisis struktur komunitas penyusunnya. Kelimpahan individu, kekayaan taksa, dominansi jenis, indeks diversitas Shannon-Wiener, indeks pemerataan Pielou, indeks kekayaan Margalef, dan indeks dominansi Simpson dihitung berdasarkan data yang telah diperoleh. Penentuan dominansi jenis fauna tanah dilakukan dengan melakukan penghitungan Indeks Nilai Penting (INP) di setiap lokasi penelitian. Nilai ini dapat menggambarkan komposisi penyusun komunitas fauna tanah di masing-masing area.

Indeks pemerataan Pielou dihitung dengan menggunakan rumus 3 sebagai berikut.

$$E = \frac{H'}{\ln S} \dots \dots \dots (3)$$

keterangan:

- E : Indeks pemerataan Pielou
- H' : Indeks diversitas Shannon-Wiener
- S : Jumlah spesies total

Sementara itu, untuk menghitung indeks pemerataan Margalef digunakan rumus 4 sebagai berikut.

$$DMg = \frac{(S - 1)}{\ln N} \dots \dots \dots (4)$$

keterangan:

- DMg : Indeks kekayaan Margalef
- S : Jumlah spesies total
- N : Jumlah total individu dari semua spesies

Ada tidaknya dominansi spesies atau taksa tertentu dalam komunitas dihitung dengan menggunakan indeks dominansi Simpson (rumus 5).

$$D = \frac{\sum ni (ni - 1)}{N(N - 1)} \dots \dots \dots (5)$$

keterangan:

- D : Indeks dominansi Simpson
- ni : Total individu spesies/taksa i
- N : Total individu semua spesies

Untuk pengamatan bakteri tanah, contoh tanah diambil secara komposit dari beberapa titik pengambilan di setiap area. Kemudian contoh tanah dicampur agar homogen dan

dijadikan menjadi satu sampel dalam wadah plastik dari setiap area. Total terdapat empat sampel yang diperoleh dengan berat masing-masing 500 g, yang kemudian segera dibawa ke laboratorium untuk dianalisis. Sampel tanah dikirim ke Laboratorium Genetika Science sebagai laboratorium mitra. Penentuan struktur komunitas dan diversitas bakteri tanah dilakukan dengan pendekatan metagenomik berbasis molekuler dengan menggunakan teknologi *next generation sequencing* (NGS) agar dapat diperoleh profil lengkap yang representatif dari komunitas bakteri di setiap area. Analisis NGS ini sudah banyak dilakukan dan digunakan dalam studi komunitas bakteri tanah pada berbagai lingkungan atau ekosistem berbeda. Gen 16S ribosomal RNA (rRNA) digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan penyusun dan struktur komunitas bakteri tanah. Gen 16S rRNA adalah gen ribosomal bakteri dan bagian dari subunit 30S yang dapat digunakan dalam identifikasi, karakterisasi, dan klasifikasi berbagai jenis bakteri. Gen ini merupakan sekuens DNA yang berperan dalam pengkodean rRNA bakteri, yang terdapat dalam genom semua bakteri. Gen 16S rRNA adalah gen yang sangat terkonservasi dan spesifik dengan urutan sekuens cukup panjang yang sesuai untuk digunakan dalam analisis metagenomik bakteri (Janda & Abbott, 2007). Pada berbagai studi, gen ini terbukti mampu untuk digunakan dalam mempelajari komposisi dan diversitas bakteri tanah (Miyashita dkk., 2013; Meng dkk., 2019).

Ada beberapa tahapan yang dilakukan dalam analisis ini meliputi ekstraksi DNA bakteri dari sampel tanah, perbanyakan sekuens gen *marker* dengan PCR (amplifikasi), kuantifikasi-kualifikasi produk PCR, purifikasi produk PCR, *library preparation*, dan sekuensing. Total genom DNA bakteri diekstraksi dengan menggunakan metode CTAB/SDS. Konsentrasi dan kemurnian DNA bakteri diukur dengan menggunakan spektrofotometer. Dengan berdasar konsentrasinya, kemudian DNA bakteri tersebut didilusi sampai 1 ng/ μ L dengan menggunakan air steril. Amplifikasi dilakukan pada gen 16S rRNA pada area (*region*) 16SV3-V4 dengan menggunakan primer spesifik. Semua proses PCR ini dilakukan dengan Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix (New England Biolabs). Selanjutnya, campuran larutan 1X *loading buffer* dengan 3 μ L produk PCR diproses (*running*) untuk elektroforesis dalam 1% TBE gel agarosa. Sampel DNA bakteri yang diperoleh dengan warna terang dan panjang 600-700 bp kemudian dipilih untuk analisis lebih lanjut (Lampiran 1). Produk PCR lalu dicampur pada rasio densitas yang sama dan dimurnikan (*purifikasi*) dengan menggunakan Qiagen Gel Extraction Kit (Qiagen, Germany). Untuk DNA *library* dihasilkan dengan menggunakan NEBNext® Ultra™ DNA Library Prep Kit untuk Illumina dan dikuantifikasi dengan Qubit dan Q-PCR. DNA *library* ini kemudian dianalisis dengan menggunakan Illumina *platform*. DNA amplikon disekuensing dengan menggunakan

Illumina *platform* untuk diperoleh 250 bp *paired-end raw reads* (Raw PE) lalu digabungkan dan diperlakukan (*pretreated*) untuk mendapatkan *clean tags*. Sekuens *chimeric* pada *clean tags* dideteksi dan dihilangkan agar diperoleh *effective tags* yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut.

3.5. Pengamatan Kelulushidupan dan Pertumbuhan Beberapa Spesies Pohon Multiguna untuk Restorasi

Pengamatan pertumbuhan tanaman penghijauan dilakukan selama 6 – 12 bulan pengamatan. Tanaman penghijauan yang mati di awal penanaman diganti dengan tanaman baru sejenis atau berbeda jenis, bergantung pada stok tanaman yang tersedia. Variabel pertumbuhan yang diamati atau diukur yaitu diameter batang dan tinggi tanaman.

Pengukuran diameter dilakukan dengan menggunakan *digital calliper* sedangkan tinggi tanaman diukur dengan menggunakan meteran. Pengukuran dilakukan sebanyak satu kali di setiap bulan pengamatan. Pada batang masing-masing tanaman diberi tanda sebagai penanda letak pengukuran agar selalu pada posisi yang sama di setiap pengukuran (Gambar 7).

Terdapat 312 individu (32 jenis) tanaman di area PI, 120 individu (24 jenis) tanaman di area KTT, 110 individu (23 jenis) tanaman di area HLS, dan 59 individu (12 jenis) tanaman yang ditanam di masing-masing area. Kelulushidupan tanaman penghijauan diamati pada setiap waktu pengukuran dan jumlah akhir tanaman yang berhasil hidup sampai akhir pengamatan dicatat. Jumlah tanaman yang mati, baik secara alami (kurang beradaptasi) atau terganggu, juga dicatat. Kelulushidupan tanaman di setiap area ditentukan dengan membandingkan jumlah tanaman hidup dengan jumlah total tanaman yang ditanam sejak awal periode penelitian (rumus 6).

$$LH = \frac{\sum \text{tanaman yang hidup}}{\sum \text{total tanaman}} \quad (6)$$

keterangan:

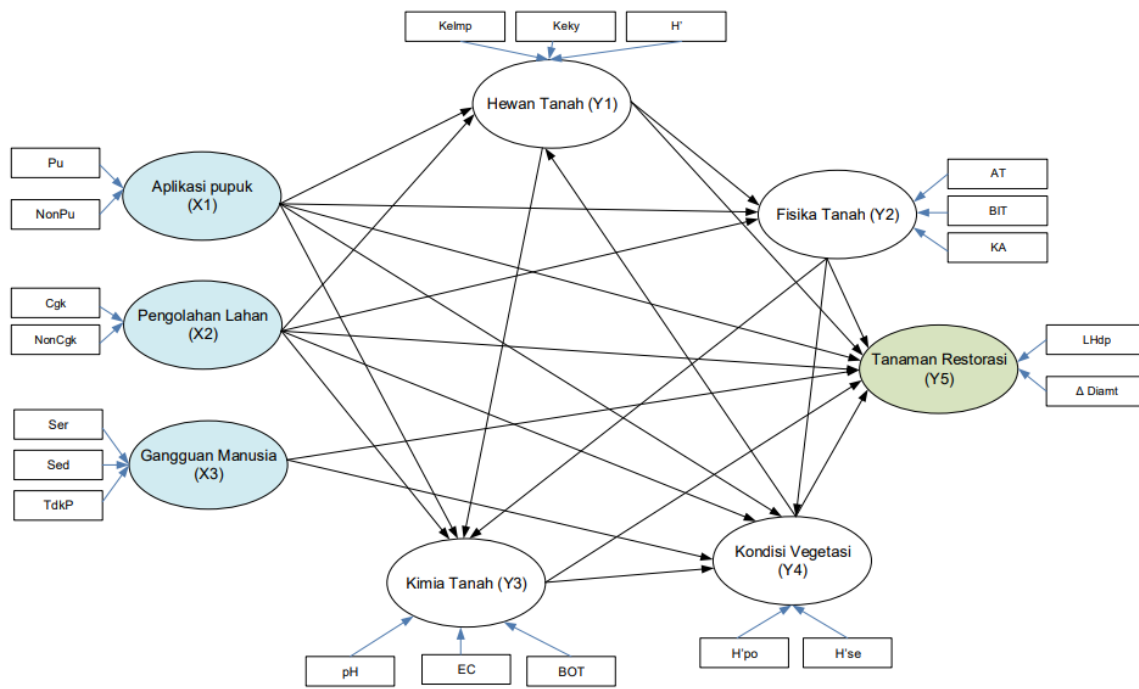
LH = tanaman yang berhasil lulus hidup pada periode pengamatan



Gambar 7. Penanda batas pengukuran diameter batang dan tinggi di setiap individu tanaman penghijauan

3.6. Penentuan Interaksi Antar Variabel yang Berkontribusi pada Keberhasilan Pertumbuhan dan Kelulushidupan Tanaman di Area Restorasi Hutan Lindung UBF

Interaksi antar variabel yang diduga berkontribusi terhadap keberhasilan pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman penghijauan ditentukan dalam penelitian ini dengan menggunakan pemodelan *Structural Equation Modeling – Partial Least Square* (SEM-PLS). Variabel-variabel yang digunakan dalam pemodelan ini meliputi aplikasi pupuk oleh petani di lahan, aktivitas pengolahan lahan, gangguan terhadap tanaman restorasi, komunitas hewan tanah, karakteristik fisika tanah, karakteristik kimia tanah, kondisi vegetasi di masing-masing area, dan tanaman restorasi. Interaksi antar variabel digambarkan dalam bentuk arah panah yang mengindikasikan hubungan ekologis. Variabel-variabel tersebut ada yang bertindak sebagai variabel penjelas (X) dan juga variabel respon (Y). Interaksi antar variabel dalam penelitian digambarkan dalam bentuk model struktural seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Model struktural interaksi antar variabel yang berkontribusi terhadap keberhasilan pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman penghijauan di area restorasi. Keterangan lengkap variabel dan indikator tersaji dalam Tabel 1.

Pada model yang dikembangkan, kombinasi antara faktor manajemen lahan (antropogenik) dan faktor lingkungan dipilih untuk menggambarkan interaksi yang terjadi antar variabel. Variabel aplikasi pupuk merepresentasikan ada tidaknya penggunaan pupuk di lahan yang dikelola oleh petani pada kawasan restorasi. Hal ini juga sejalan dengan variabel pengolahan lahan yang menunjukkan aktivitas pengolahan lahan oleh petani yaitu ada atau tidak adanya praktek penyangkulan tanah. Untuk variabel gangguan manusia menggambarkan adanya aktivitas manusia yang berpotensi mengganggu atau menyebabkan kematian pada tanaman restorasi, seperti penyangkulan, penyiangan, atau cari rumput. Variabel hewan tanah menggambarkan struktur komunitas makrofauna tanah yang diindikasikan dengan kelimpahan individu, kekayaan taksa, dan diversitas dari masing-masing area. Untuk menggambarkan kondisi lingkungan abiotik bagi pertumbuhan tanaman restorasi maka karakteristik fisika dan kimia tanah digunakan sebagai variabel pengukuran. Kondisi lingkungan biotik seperti struktur komunitas tumbuhan di masing-masing area diwujudkan dalam variabel kondisi vegetasi. Masing-masing variabel tersebut memiliki indikator yang merupakan parameter pengukuran atau pengamatan dalam penelitian ini. Hasil pengukuran berbagai parameter tersebut direpresentasikan menjadi indikator-indikator dari variabel penelitian (Tabel 1).

Tabel 1. Variabel dan indikator penyusun model struktural yang dikembangkan

No	Variabel	Indikator	Skala data
1	Aplikasi pupuk (X1)	Diberi pupuk (Pu)	Ordinal
		Tidak diberi pupuk (NonPu)	Ordinal
2	Pengolahan lahan (X2)	Ada penyangkulan (Cgk)	Ordinal
		Tidak ada penyangkulan (NonCgk)	Ordinal
3	Gangguan manusia (X3)	Sering, >5 tanaman terganggu (Ser)	Ordinal
		Sedang, 1-5 tanaman terganggu (Sed)	Ordinal
		Tidak pernah (TdkP)	Ordinal
4	Hewan tanah (Y1)	Kelimpahan individu (Kelimp)	Rasio
		Kekayaan taksa (Keky)	Rasio
		Diversitas (H')	Interval
5	Fisika tanah (Y2)	Agregat tanah (AT)	Rasio
		Bobot isi tanah (BIT)	Rasio
		Kadar air (KA)	Rasio
6	Kimia tanah (Y3)	Keasaman tanah (pH)	Interval
		Konduktivitas elektrik tanah (EC)	Rasio
		Bahan organik tanah (BOT)	Rasio
7	Kondisi vegetasi (Y4)	Diversitas pohon (H'po)	Interval
		Diversitas semai/tumbuhan bawah (H'se)	Interval
8	Tanaman restorasi (Y5)	Tanaman lulus hidup (LHdp)	Rasio
		Perubahan diameter (Δ Diamt)	Rasio

3.7. Analisis Data

Data survei sosial, iklim mikro, struktur komunitas makrofauna tanah, dan struktur vegetasi yang telah diperoleh selanjutnya dianalisis secara statistik deskriptif. Penyajian data dengan menggunakan diagram batang dan *pie* dipilih untuk membantu dalam menjelaskan hasil analisis. Analisis dan penyajian data ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* XLSTAT dalam Ms. *Excel*. Untuk data lingkungan tanah (edafis) yang meliputi karakteristik fisika dan kimia; dianalisis dengan metode statistik. Uji normalitas dan homogenitas data edafis dilakukan terlebih dahulu sebelum dilakukan analisis varians (*analysis of variance*/ANOVA). Analisis varians ini dilakukan untuk menentukan perbedaan rata-rata data masing-masing variabel antar area yang dibandingkan. Setelah dilakukan analisis varians dan hasilnya signifikan maka uji lanjutan Tukey *test* dilakukan untuk menentukan kelompok mana saja yang memiliki perbedaan signifikan atau tidak signifikan. Analisis varians ini dilakukan dengan menggunakan paket '*agricolae*' dalam program RStudio.

Penentuan taksa organisme makrofauna dan bakteri tanah yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas lingkungan dilakukan dengan menghitung nilai indikator (*indicator value/IndVal*) yang dikembangkan oleh Dufrene & Legendre (1997). Nilai indikator ini dapat digunakan untuk mengetahui hubungan antara keberadaan organisme tertentu dengan kondisi lingkungan, seperti tanah (Figuerola dkk., 2012). Nilai indikator ini dihitung dengan menggunakan fungsi *IndVal* dalam paket '*labdsv*' pada program R. Untuk organisme makrofauna tanah, data yang digunakan dalam analisis adalah data kelimpahan dari masing-masing taksa yang teridentifikasi sedangkan untuk komunitas bakteri tanah, data yang digunakan adalah *operational taxonomic unit* (OTU). OTU merupakan definisi operasional yang digunakan untuk mengklasifikasikan grup dari individu-individu yang berhubungan erat. Pada kajian metagenomik bakteri, OTU ditentukan berdasarkan kesamaan sekuen gen 16S dari grup bakteri yang memiliki similaritas lebih dari 97,5%.

Data sekuen mentah (*raw tags*) hasil sekuensing gen 16S rRNA bakteri digabung dan diseleksi untuk didapatkan *clean tags sequence*. Sekuen chimera pada *clean tags* kemudian dihilangkan agar diperoleh *effective tags*. Selanjutnya, pengelompokan OTU dilakukan berdasarkan data *effective tags*. Berdasarkan hasil pengelompokan OTU, anotasi taksonomi dibuat untuk urutan representatif dari setiap OTU agar didapatkan informasi taksa yang sesuai dan distribusi kelimpahan berbasis taksa. Pada saat yang sama, OTU dianalisis untuk menentukan kekayaan jenis, pemerataan, keanekaragaman *alpha* (*Observed-Species*, Chao1, Shannon, Simpson, *Abundance-based Coverage Estimator* (ACE), dan keanekaragaman *beta*. Untuk membandingkan keanekaragaman bakteri antar area atau sampel tanah (diversitas *beta*), jarak kuadrat atau matriks ketidaksamaan, seperti *weighted unifrac* dan *unweighted unifrac*, ditentukan untuk mewakili perbedaan di antara sampel dari masing-masing area. Penghitungan variabel-variabel tersebut dilakukan dengan program QIIME. Analisis korelasi Pearson dan komponen utama (*principal component analysis/PCA*) juga dilakukan dengan menggunakan program XLSTAT pada Ms. *Excel* untuk mengidentifikasi hubungan antara faktor edafis dan komunitas bakteri. Analisis korelasi Pearson juga diterapkan untuk mengevaluasi hubungan antara kelimpahan bakteri dan karakteristik tanah di area penelitian. Penyajian data komunitas bakteri tanah antar lokasi penelitian ditunjukkan dalam bentuk *heatmap* yang digambarkan dengan bantuan aplikasi *web* <http://www.heatmapper.ca/> menggunakan data OTU.

Pada analisis pemodelan SEM-PLS, ada beberapa tahapan yang dilakukan yaitu penyusunan model struktural (*inner model*), model pengukuran (*outer model*), konstruksi diagram jalur (*path diagram*), konversi diagram jalur ke sistem persamaan, estimasi

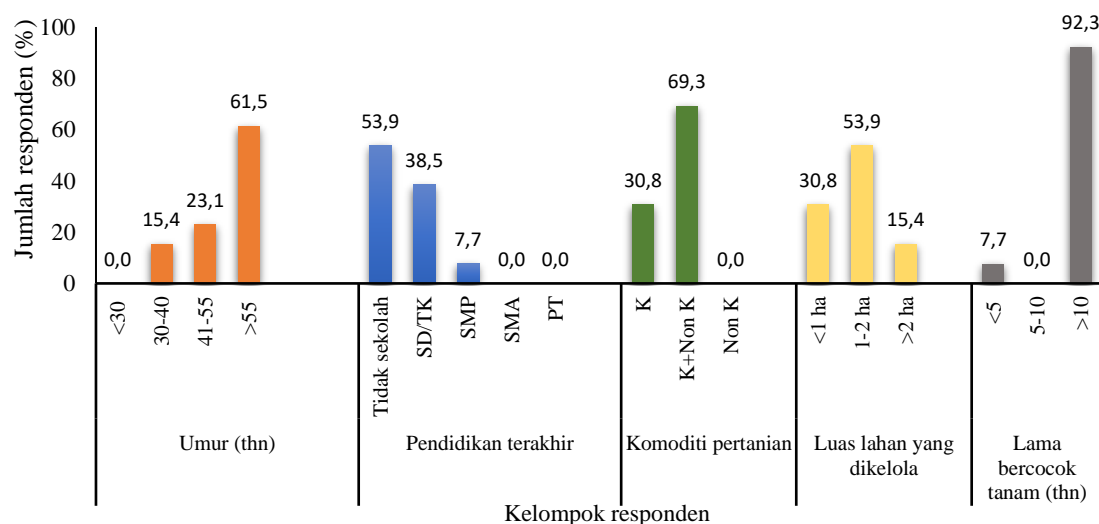
koefisien jalur, estimasi nilai bobot indikator (*indicator weight*), evaluasi kekuatan model (*goodness of fit*), dan pengujian hipotesis (*re-sampling bootstrapping*). Uji statistik diterapkan dengan menggunakan uji-t pada $\alpha = 5\%$. Jika nilai *p-value* $\leq 0,05$ maka model dikatakan signifikan. *Outer model* yang signifikan menunjukkan indikator yang valid sementara pada *inner model* menunjukkan bahwa variabel tersebut signifikan. Analisis pemodelan struktural dilakukan dengan bantuan program WarpPLS 7.0.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Sikap dan Tingkat Pemahaman Masyarakat sekitar Hutan terkait Konservasi Biodiversitas

Masyarakat yang hidup di dalam atau sekitar kawasan hutan memiliki peran penting dalam kegiatan pengelolaan dan konservasi ekosistem hutan. Masyarakat tersebut perlu untuk dilibatkan dalam perumusan atau pembuatan kebijakan-kebijakan pengelolaan hutan yang berkelanjutan. Menurut Chowdhury dkk. (2014), masyarakat lokal tersebut memiliki hubungan yang penting dan sudah lama terbentuk dengan kawasan hutan sehingga kebutuhan, aspirasi, dan perilaku mereka sangat diperlukan untuk pengelolaan kawasan hutan, khususnya hutan lindung. Umumnya, aktivitas keseharian masyarakat tersebut adalah bertani dengan memanfaatkan bagian hutan yang memang diperuntukkan untuk dikelola sebagai lahan pertanian. Sistem pertanian yang biasanya dipraktekkan oleh petani hutan adalah agroforestri, yaitu sistem pertanian yang memadukan antara aspek budidaya tanaman dan kehutanan. Di kawasan UBF, petani hutan menanam tanaman kopi, sayuran, dan tanaman semusim di bawah tegakan pinus dan mahoni.

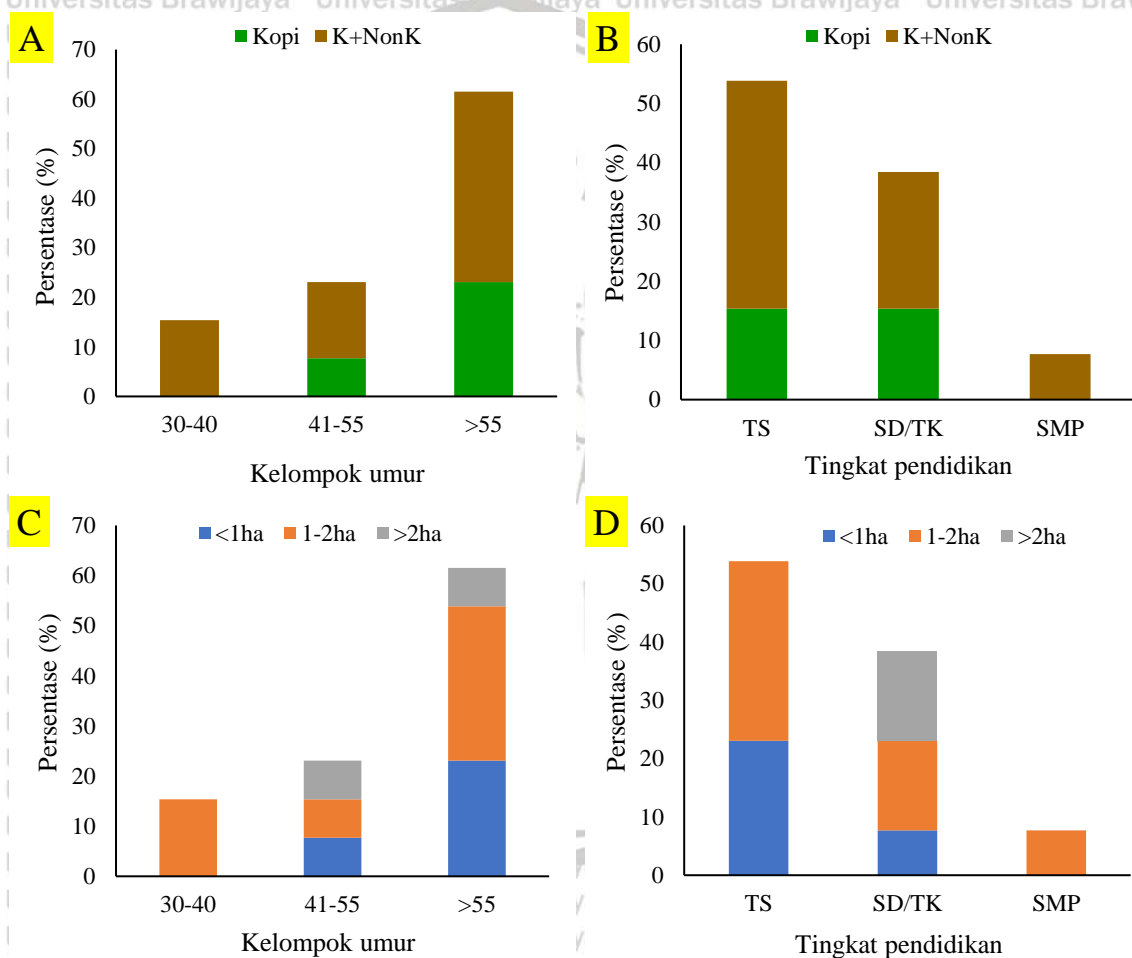


Gambar 9. Profil demografi petani hutan di sekitar kawasan lindung UBF.

Keterangan: K = Tanaman Kopi; K+Non K = Tanaman Kopi & Non Kopi; Non K = Tanaman Non Kopi

Berdasarkan survei sosial, umumnya, petani penggarap lahan baik yang di dalam dan/atau sekitar hutan lindung, didominasi oleh responden berumur >55 tahun. Tidak banyak responden berusia muda (<30 – 40 tahun) yang ditemui saat pengumpulan data. Sebagian

besar dari responden tersebut tidak menjalani pendidikan sekolah (>53%) baik tingkat dasar, menengah, atau atas (Gambar 9). Berdasarkan informasi saat survei, kebanyakan responden sudah diajak oleh orang tua ke ladang untuk bercocok tanam sejak usia dini. Seringkali peneliti mendapati petani mengajak anaknya yang masih kecil untuk bekerja di ladang, hal ini merupakan bentuk pembelajaran kepada anak secara langsung. Oleh karena itu, lahan yang dikelola saat ini mayoritas adalah warisan temurun dari orang tua responden. Hal ini didukung dengan data bahwa hampir semua responden menyatakan telah menggarap lahan di kawasan UBF lebih dari 10 tahun. Adapun responden yang menggarap lahan kurang dari lima tahun, biasanya, adalah petani penyewa dari pemilik lahan yang digarapnya.



Gambar 10. Tabulasi silang beberapa indikator demografi dari hasil survei sosial kepada petani hutan.
Keterangan: A. Tabulasi silang Umur – Jenis tanaman komoditi; B. Tabulasi silang Tingkat pendidikan – Jenis tanaman komoditi; C. Tabulasi silang Umur – Luas lahan; dan D. Tabulasi silang Tingkat pendidikan – Luas lahan

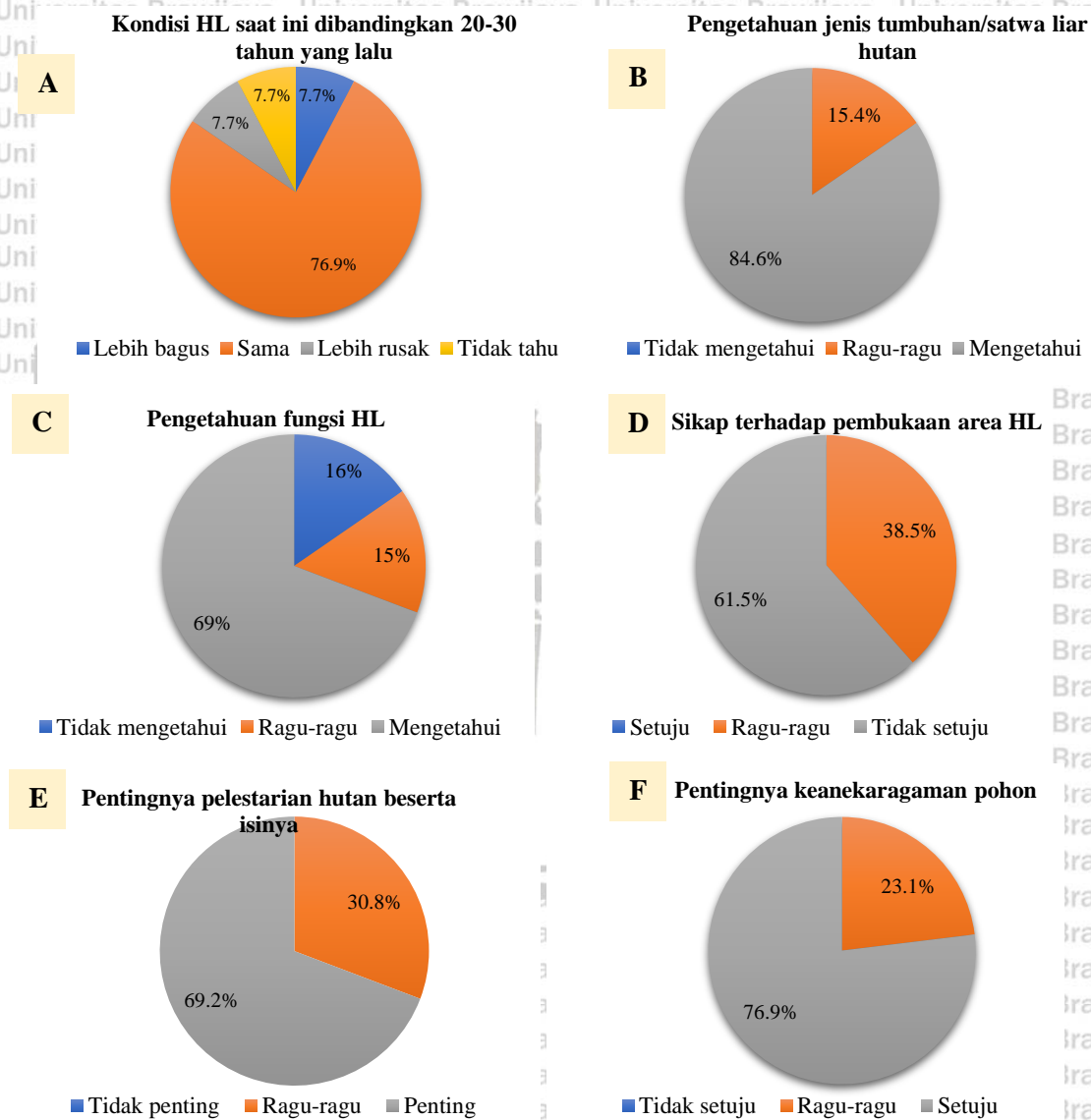
Kopi merupakan jenis komoditi utama yang ditanam oleh petani hutan di kawasan UBF meskipun menjadi produk utama, petani juga menanam tanaman budidaya lain untuk

memaksimalkan pendapatan ekonomi. Saat tanaman kopi berusia muda, petani menanam beberapa jenis sayuran atau tanaman semusim sebagai penyela di antara tegakan kopi, seperti sawi, wortel, kubis dan lain-lain. Sebanyak >69% responden melakukan praktek seperti ini dan didominasi oleh petani dengan umur >55 tahun. Mayoritas petani tersebut tidak memiliki latar belakang pendidikan formal dan hanya sebagian kecil (7%) saja petani yang memiliki pendidikan sampai jenjang sekolah menengah pertama (SMP), Gambar 10A-B. Sebagian besar petani menggarap lahan dengan luas rata-rata 1-2 ha yang terletak di beberapa tempat berbeda, hanya sedikit petani yang memiliki lahan seluas itu pada satu lokasi yang sama (Gambar 9). Petani hutan yang mengolah lahan dengan luas 1-2 ha juga didominasi oleh responden dengan umur >55 tahun dengan tidak memiliki latar pendidikan sekolah formal (Gambar 10C-D).

Informasi tentang usia dan lama waktu petani bercocok tanam di kawasan UBF dapat membantu untuk memperoleh informasi tentang sejarah dan kondisi awal hutan lindung. Kondisi kawasan UBF, berdasar informasi dari responden, menunjukkan adanya perubahan jenis tegakan yang ditanam ketika kawasan tersebut masih dikelola oleh Perhutani. Tegakan awal yang pernah ada adalah jenis akasia pada tahun 1950-1970-an, setelah itu pinus (*Pinus merkusii*) mulai ditanam sampai akhir 1990-an. Sampai saat ini, pinus merupakan tegakan utama yang ditemukan di sebagian besar kawasan UBF. Sementara itu, kondisi area lindung UBF tidak mengalami perubahan sejak 20-30 tahun yang lalu. Kondisi area lindung saat ini dan masa lalu adalah sama, tidak banyak jenis pohon rimba yang dapat ditemukan khususnya di bagian kawasan lindung tempat penelitian (Gambar 11A). Tegakan pohon hutan yang masih tersisa di lokasi penelitian meliputi bulu (*Ficus drupacea*), gondang (*F. variegata*), dan trete (*M. tomentosa*). Mayoritas responden pada kelas umur berbeda-beda menyatakan bahwa kondisi hutan lindung tidak menunjukkan perbedaan antara kondisi masa lalu dengan saat ini, Gambar 11A. Hal ini memberikan gambaran bahwa kemungkinan besar alih fungsi yang berdampak pada degradasi hutan lindung sudah terjadi sejak lama. Berdasarkan pengamatan di lapangan, alih fungsi kawasan lindung terutama terjadi pada bagian UBF yang berdekatan dengan area pemukiman atau perkampungan. Beberapa petani membuka kawasan lindung tersebut sebagai lahan untuk menanam kopi sekitar 1-5 tahun terakhir.

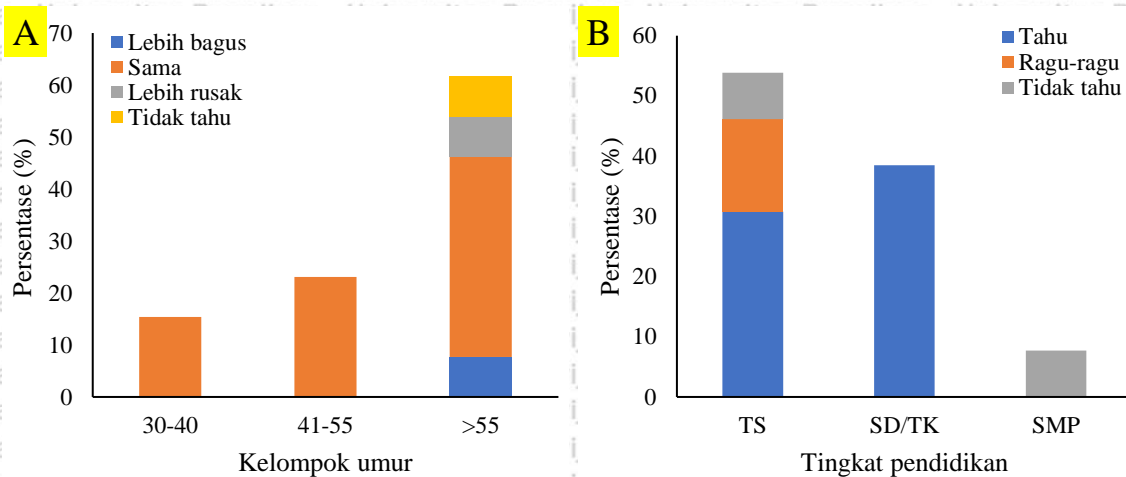
Petani responden memiliki pengetahuan yang bagus mengenai diversitas pohon rimba serta hewan liar yang hidup di kawasan UBF (>84%) (Gambar 11B). Ketika mereka diminta untuk menyebutkan tumbuhan atau hewan yang masih ada dan terkadang dijumpai, mereka dapat menyebutkannya secara lengkap dengan informasi lokasi ditemukannya. Mayoritas responden menyebutkan pasang (*Lithocarpus* sp.), bulu (*F. drupacea*), trete (*M. tomentosa*),

gondang (*F. variegata*), dan kukrup (*E. spicata*) sebagai pohon rimba yang tumbuh di kawasan UBF. Untuk satwa liar, responden menyebutkan budeng/lutung hitam (*Trachypithecus auratus*), monyet/keras ekor panjang (*Macaca fascicularis*), babi hutan (*Sus* sp.), dan kidang/kijang (*Munticus muntjak*) sebagai hewan yang terkadang masih ditemui di lahan. Bahkan beberapa jenis dianggap sebagai hama bagi tanaman sayuran, seperti babi dan keras. Informasi ini mengindikasikan bahwa sebagian responden masih mengetahui diversitas tumbuhan dan hewan asli hutan, meskipun saat ini jenis-jenis tersebut sulit ditemukan di kawasan UBF.



Gambar 11. Sikap dan persepsi petani responden terkait konservasi biodiversitas hutan di kawasan UBF.

Keterangan: HL: Hutan Lindung



Gambar 12. Tabulasi silang beberapa indikator dari hasil survei sosial kepada petani hutan. Keterangan: A. Tabulasi silang Umur – Kondisi awal HL; B. Tabulasi silang Tingkat pendidikan – Fungsi HL

Berkaitan dengan hutan lindung UBF, semua responden menyatakan mengetahui keberadaan dan letak area tersebut. Ketika wawancara dilakukan, responden mampu menunjukkan lokasi yang termasuk ke dalam wilayah hutan lindung. Kebanyakan responden mengidentifikasi area hutan ini berdasarkan letaknya yaitu berada pada lereng bukit dengan kemiringan curam dan/atau sepanjang sempadan sungai. Sebenarnya, pengetahuan mengenai hutan lindung ini sudah diperoleh sejak dulu oleh responden, informasi diperoleh dari Perhutani selaku pengelola utama kawasan hutan sebelum penyerahan hak kelola kepada Universitas Brawijaya. Responden tidak hanya mengetahui keberadaan hutan lindung tetapi juga fungsi dari kawasan tersebut. Sebanyak >69% responden menyampaikan bahwa fungsi hutan lindung yang utama adalah untuk konservasi tanah dan air (Gambar 11C). Pengetahuan tersebut sebagian besar ditunjukkan oleh petani yang tidak memiliki jenjang pendidikan sekolah tinggi, justru responden dengan pendidikan yang lebih tinggi menyatakan tidak mengetahui fungsi HL (Gambar 12B). Kebanyakan petani yang mengetahui fungsi HL tidak berani untuk membuka lahan di kawasan tersebut, selain karena menganggap akan terganggunya fungsi perlindungan tanah dan air, adanya larangan dari Perhutani, saat itu, masih menjadi aturan yang harus dipatuhi sampai saat ini. Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Ambayoek dkk. (2021) yang menunjukkan kesadaran warga petani khususnya *magersaren* cukup baik terhadap kelestarian hutan terutama kawasan lindung. Mereka perlu untuk melestarikan keberadaan hutan lindung agar keberadaan mata air yang digunakan oleh warga setempat tetap ada. Warga petani tidak mengubah vegetasi pohon atau yang tumbuh di sekitar mata air tersebut

agar ketersediaan air tetap dapat mencukupi kebutuhan mereka. Oleh karena itu, kondisi vegetasi hutan lindung pada bagian tersebut cenderung lebih bagus dibandingkan bagian lainnya. Meskipun demikian, masih ada petani yang membuka hutan lindung untuk bercocok tanam. Ketika responden diminta menanggapi kondisi tersebut, sebanyak 61,5% menyatakan ketidaksetujuan dengan alasan utama keselamatan orang lain sedangkan 38,5% responden menyatakan ragu-ragu (Gambar 11D). Karena responden tersebut berpikir jika hutan lindung dikonversi dapat menyebabkan tanah longsor dan banjir. Responden yang menyatakan ragu-ragu dalam menjawab menyampaikan alasan utama yaitu ekonomi. Mereka menyadari bahwa adanya pembukaan area tersebut lebih disebabkan faktor kebutuhan ekonomi yang semakin meningkat sementara pekerjaan tidak mudah diperoleh. Selain itu, kecilnya luas lahan pertanian yang digarap sebelumnya juga diduga menjadi faktor lain penyebab terjadinya pembukaan hutan lindung.

Selain berfungsi untuk perlindungan tanah dan air, hutan lindung juga memiliki peran penting sebagai habitat dan penyedia sumber makanan bagi satwa liar, khususnya burung. Namun, dengan jumlah dan keberagaman pohon yang sedikit maka fungsi tersebut tidak dapat berjalan secara maksimal. Responden menilai bahwa biodiversitas hutan (tumbuhan dan hewan) penting dan perlu untuk dilestarikan. Hal ini terlihat dari persetujuan mereka terhadap pernyataan terkait pelestarian biodiversitas hutan melalui kegiatan restorasi. Sebanyak 69% petani menyatakan setuju dengan pernyataan tersebut tetapi sebagian responden yang lain menyatakan ragu-ragu terhadap pernyataan tersebut (Gambar 11E). Mereka beranggapan ketika keberadaan satwa liar semakin banyak maka ada kekhawatiran satwa-satwa tersebut akan merusak tanaman di lahan. Semua responden menyatakan setuju jika dilakukan pemulihan kawasan hutan lindung yang rusak melalui kegiatan restorasi. Mereka berpendapat kondisi hutan lindung yang rusak akibat pembukaan lahan, saat ini perlu segera dipulihkan agar terhindar dari bencana di kemudian hari. Ketika para responden ditanya mengenai tanggung jawab menjaga kawasan hutan, semua sepakat bahwa warga di sekitar hutan turut bertanggung jawab dalam menjaga kelestarian hutan khususnya hutan lindung. Hal ini terbukti dengan partisipasi aktif warga menangani bencana kebakaran hutan ketika musim kemarau. Bentuk lain dari peran responden untuk melestarikan biodiversitas hutan terwujud dalam kegiatan penanaman pohon. Kegiatan penanaman pohon dilakukan secara mandiri atau melalui program penghijauan dari pemerintah, dan kegiatan ini sudah sejak lama ada. Salah satu contoh konkrit dari kegiatan tersebut adalah hutan bambu di sekitar area restorasi. Sebanyak >75% responden setuju bahwa kegiatan restorasi menggunakan beragam jenis pohon adalah keputusan yang baik, terutama pohon yang

memiliki nilai guna tidak hanya bagi lingkungan tetapi juga manusia (Gambar 11F). Jika dilakukan program restorasi, responden turut memberikan saran jenis pohon terutama buah untuk ditanam seperti nangka (*A. heterophyllus*) dan alpukat (*P. americana*) selain jenis-jenis pohon lokal multiguna yang digunakan.

Jumlah responden pada penelitian ini didominasi oleh kelompok petani berumur >55 tahun dengan latar belakang pendidikan sekolah dasar atau tidak bersekolah dan sejak lama (>10 tahun) telah mengolah lahan di area tersebut. Mayoritas dari responden tersebut adalah berjenis kelamin laki-laki (85%) dan sisanya wanita. Petani dengan umur >55 tahun memberikan jawaban bervariasi mengenai kondisi awal hutan lindung di UBF. Pada penelitian ini tidak dapat memberikan informasi apakah jenis kelamin dapat berpengaruh terhadap pengetahuan dan sikap terkait kondisi beserta fungsi hutan lindung. Namun demikian, studi lain memberikan informasi tentang hal ini. Menurut Allendorf dkk. (2018) dalam hasil penelitiannya menyatakan bahwa wanita cenderung memiliki pengetahuan dan pemahaman yang kurang terkait pengelolaan hutan dan area lindung. Perempuan cenderung kurang tahu dibandingkan laki-laki tentang kawasan lindung karena perempuan seringkali memiliki kehidupan yang lebih terbatas dan kurang berpartisipasi dalam pengambilan keputusan dalam masyarakat, memberi mereka lebih sedikit akses ke informasi yang diperoleh laki-laki dari menghadiri pertemuan masyarakat dan berinteraksi dengan pengelola kawasan hutan.

Fungsi dari hutan lindung seperti konservasi tanah dan air merupakan bentuk jasa layanan ekosistem hutan yang diberikan alam kepada manusia. Lebih dari 50% responden mengetahui fungsi dari hutan lindung di sekitar mereka. Pengetahuan ini tidak hanya dimiliki oleh petani kelompok umur tertentu saja tetapi pada semua kelompok umur yang dikaji dalam penelitian ini. Umur petani yang lebih dari >55 tahun disertai dengan lama waktu bercocok tanam di area hutan adalah faktor yang turut memengaruhi tingkat pengetahuan petani terhadap fungsi hutan lindung. Pengalaman, pengamatan lapang yang mereka dapatkan selama berinteraksi dengan ekosistem hutan menjadi informasi dan pengetahuan penting akan dampak yang akan terjadi jika konversi hutan lindung semakin luas. Penelitian yang dilakukan oleh Tadesse & Teketay (2017) di hutan Wof-Washa, Ethiopia menunjukkan bahwa umur memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap persepsi petani terkait kegiatan pengelolaan hutan partisipatif yang diterapkan di daerah tersebut. Selain itu, penelitian di Jawa Barat oleh Muhamad dkk. (2014) juga menginformasikan bahwa umur dan pendidikan responden memengaruhi persepsi mereka terhadap jasa layanan ekosistem hutan. Pendidikan terutama memengaruhi tingkat pengetahuan petani tentang pemanfaatan

hutan dan persepsi kemanfaatannya. Dalam hal ini, pendidikan adalah variabel sosial ekonomi yang paling sering dikaitkan secara signifikan dengan sikap positif dan persepsi, juga dan dikaitkan dengan berkurangnya ketergantungan pada hutan karena adanya peluang ekonomi lainnya (Bragagnolo dkk., 2016). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengetahuan fungsi hutan lindung lebih banyak diketahui oleh responden yang tidak pernah menjalani pendidikan formal atau hanya sampai pendidikan tingkat dasar. Berdasar hal tersebut, nampaknya, jenjang pendidikan tidak memberikan pengaruh besar terhadap sikap dan pengetahuan tentang fungsi hutan lindung pada kasus petani hutan di UBF. Hasil berbeda ditunjukkan dari penelitian oleh Tadesse & Teketay (2017), yang menginformasikan bahwa peningkatan pengetahuan dan partisipasi petani dalam kegiatan pengelolaan hutan diikuti dengan tingkat pendidikan responden yang semakin tinggi. Ketidaktahuan petani tentang fungsi dari area lindung di ekosistem hutan menjadi ancaman serius bagi keberadaan kawasan tersebut ke depan. Kegiatan alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian yang tidak dikelola dengan baik berdampak pada perubahan kondisi lingkungan baik biotik atau abiotik di area tersebut.

4.2. Variasi Spasial Profil Lingkungan Biotik dan Abiotik

4.2.1. Variasi spasial diversitas dan struktur vegetasi

Kondisi lingkungan biotik khususnya vegetasi awal perlu untuk dieksplorasi melalui analisis struktur komunitas tumbuhan di lokasi penelitian. Struktur komunitas pohon yang dianalisis di masing-masing lokasi menunjukkan hasil yang berbeda. Secara umum, jumlah individu dan jenis pohon yang tumbuh di area pertanian, kebun kopi sangat sedikit. Tidak ada pohon yang tumbuh di area PI, satu pohon tumbuh hidup di KTT dari jenis trete (*M. tomentosa*) yang merupakan pohon asli hutan tersisa di tempat tersebut, dan terdapat dua jenis pohon di area HLS dari jenis alpukat (*P. americana*), pinus (*P. merkusii*). Kondisi berbeda teramati di kawasan hutan, kekayaan pohon di tempat tersebut tercatat sebanyak 15 individu dari sembilan jenis pohon di plot pengamatan. Dua jenis pohon dominan yang ditemukan di RS meliputi *Macropanax dispermus* (66,84%) dan *Helicia* sp. (56,3%), sedangkan yang lain seperti *Bischofia javanica*, kelompok *Ficus*, *Lithocarpus* sp., Proteaceae, dan satu jenis tidak teridentifikasi, masing-masing memiliki nilai penting <32%. Tidak berbeda halnya dengan pohon di area PI, vegetasi tiang dan pancang juga tidak ditemukan di lokasi ini. Kopi (*Coffea* sp.) merupakan satu-satunya jenis tegakan tiang yang ditemukan di KTT, sementara itu, terdapat empat jenis vegetasi tiang yang ditemukan di HLS meliputi *Gliricidia sepium*, alpukat (*P. americana*), kopi (*Coffea* sp.), dan pasang

(*Lithocarpus* sp.). Keempat jenis tumbuhan tersebut adalah hasil penanaman pada kegiatan penghijauan di waktu sebelumnya berdasarkan informasi ketika wawancara dengan petani.

G. sepium adalah jenis tegakan yang paling dominan di HLS dengan nilai penting 166,7%.

Tanaman kopi (*Coffea* sp.) adalah jenis yang paling dominan tumbuh, baik di KTT atau HLS pada tingkat pancang, dengan nilai penting masing-masing 285% dan 231%. Jenis tegakan pancang lain yang ada di KTT yaitu trete (*M. tomentosa*, 14,9%) sedangkan di HLS terdapat *G. sepium* (51,1%) dan alpukat (*P. americana*, 17,3%). Komunitas pancang di RS

sedikit lebih banyak dibandingkan dua area sebelumnya yang disusun oleh *Trevesia sundaica* (107%), *Pilea* sp. (74%), *Laportea stimulans* (59,8%), *Brugmansia suaveolens* (31,9%), dan *Ficus* sp. (27,1%). Untuk vegetasi semai/tumbuhan bawah, kekayaan jenis

yang ditemukan lebih banyak dibandingkan jenis vegetasi sebelumnya (pohon, tiang, dan pancang). Kekayaan jenis tumbuhan bawah terbanyak terdapat di area HLS kemudian diikuti

RS, KTT, dan yang paling sedikit di PI. Komposisi taksa penyusun komunitas tumbuhan bawah di setiap lokasi menunjukkan perbedaan satu dengan yang lain, terutama pada jenis-

jenis yang dominan. Pada area pertanian (PI), vegetasi bawah yang mendominasi adalah jenis tanaman budidaya seperti jagung (*Zea mays*, 40%) dan kacang tanah (*Arachis hypogea*, 25,8%), selain itu, terdapat juga *Galinsonga parviflora* (34%), Amaranthaceae (14%), dan

Drymaria cordata (14%). Beberapa jenis tumbuhan bawah yang teramati di area KTT dengan nilai penting tertinggi meliputi *Oplismenus compositus*, *Aerva* sp., *Ageratina riparia*,

Rubus rosaefolius, dan *Athyrium* sp., dengan nilai penting berkisar 11 – 43,7%. Sementara itu, komposisi jenis penyusun komunitas tumbuhan bawah di HLS lebih seimbang dengan

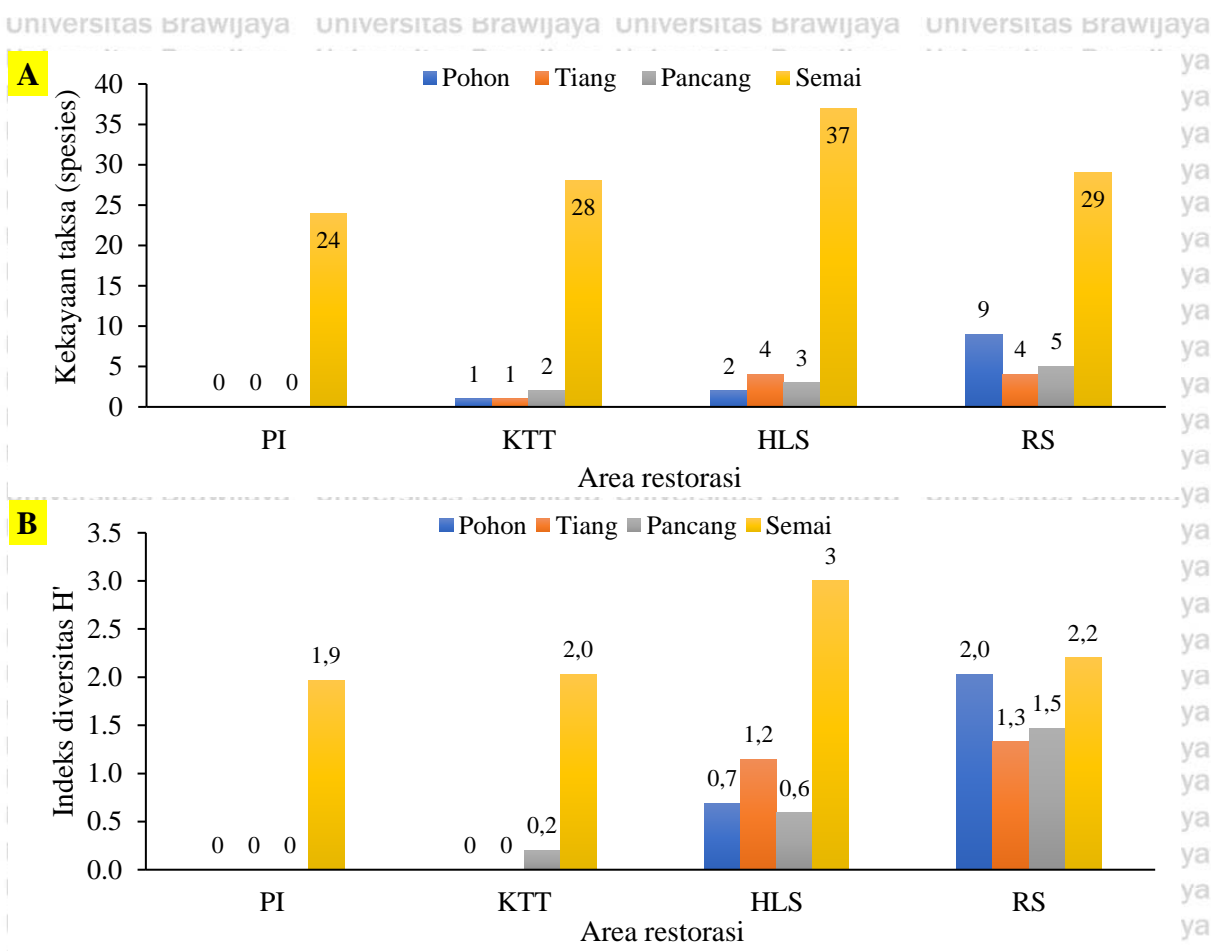
tidak adanya jenis yang mendominasi. Beberapa jenis tumbuhan bawah dengan nilai penting tertinggi diantaranya *Imperata cylindrica*, *Euphorbia heterophylla*, *Bidens biternata*,

Globba marantina, *Elatostema* sp., dan *Alocasia* sp. (10,3 – 18,8%). *Elatostema* sp. merupakan jenis tumbuhan bawah yang ditemukan dominan di area hutan dengan nilai

penting mencapai 113,6%. Beberapa jenis lain berikutnya dengan nilai penting 14 – 22% di antaranya *Panicum* sp., Pteridaceae, *Amomum* sp., *Strobilanthes*, dan *Pilea* sp. Famili

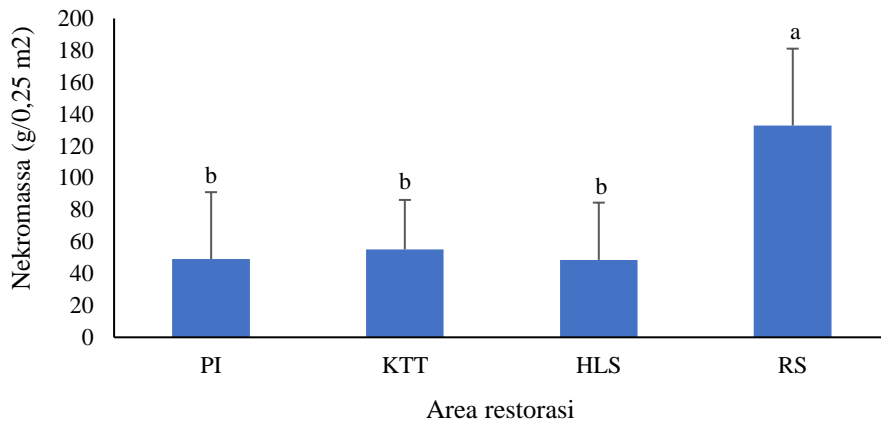
Asteraceae lebih banyak ditemukan di area yang terbuka (PI, KTT, dan HLS) dengan paparan cahaya matahari penuh dibandingkan area yang tertutup (RS) (Gambar 13A,

Lampiran 2). Oleh karena itu, keberadaan kelompok ini pada komunitas tumbuhan bawah dapat dijadikan indikasi perubahan lingkungan.



Gambar 13. Profil komunitas vegetasi awal di area penelitian
 Keterangan: A. Kekayaan taksa, B. Keanekaragaman Shannon-Wiener; PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Keanekaragaman vegetasi baik pohon, tiang, dan pancang teramati lebih rendah di kawasan yang dimanfaatkan oleh petani untuk bertani atau bercocok tanam dibandingkan dengan kawasan hutan. Diversitas tumbuhan bawah menunjukkan nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tipe vegetasi lainnya (Gambar 13B). Adanya perbedaan komunitas vegetasi yang cukup mencolok berdampak juga pada jatuhnya serasah di antara area penelitian. Pengukuran nekromassa memperlihatkan perbedaan antara ketiga area pemanfaatan (PI, KTT, HLS) dengan hutan. Nekromassa di ketiga area pemanfaatan tersebut memiliki nilai rata-rata sama namun sangat berbeda secara signifikan ketika dibandingkan dengan RS ($p < 0,05$) (Gambar 14). Sedikitnya nekromassa di tiga area pemanfaatan sebanding dengan jumlah tegakan di dalamnya yang menjadi penghasil utama serasah. Informasi tentang struktur komunitas vegetasi di lokasi penelitian memberikan bukti bahwa adanya aktivitas alih fungsi hutan menjadi bentuk pemanfaatan lain berdampak pada perubahan susunan dan diversitas tumbuhan di dalamnya.



Gambar 14. Nekomassa pada masing-masing area restorasi. Ket: notasi huruf berbeda menunjukkan perbedaan signifikan pada $p < 0,05$

Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Faktor antropogenik sangat memengaruhi struktur dan susunan komunitas vegetasi di beberapa tipe alih guna lahan yang diamati. Kondisi vegetasi saat ini merupakan hasil dari aktivitas manusia di waktu lampau seperti sedikitnya vegetasi pohon rimba di area PI, KTT, dan HLS. Sebaliknya, banyak terdapat beberapa jenis tanaman budidaya yang tumbuh setelah penanaman oleh petani setempat semisal alpukat (*P. americana*), gamal (*G. sepium*), nangka (*A. heterophyllus*), pinus (*P. merkusii*), dan kopi (*Coffea* sp.). Di area hutan, pohon berdiameter besar lebih banyak ditemukan dibandingkan dengan lokasi lain, yang hal ini mengindikasikan besarnya simpanan karbon dan volume kayu di dalamnya. Namun, kondisi ini semakin menurun seiring dengan adanya alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian atau budidaya. Penelitian oleh Pitopang (2012) yang dilakukan di area hutan Sulawesi Tengah juga memberikan informasi yang sama bahwa peningkatan gangguan akibat alih fungsi hutan menyebabkan penurunan volume atau biomassa kayu, perubahan struktur, dan komposisi pohon di tipe lahan berbeda.

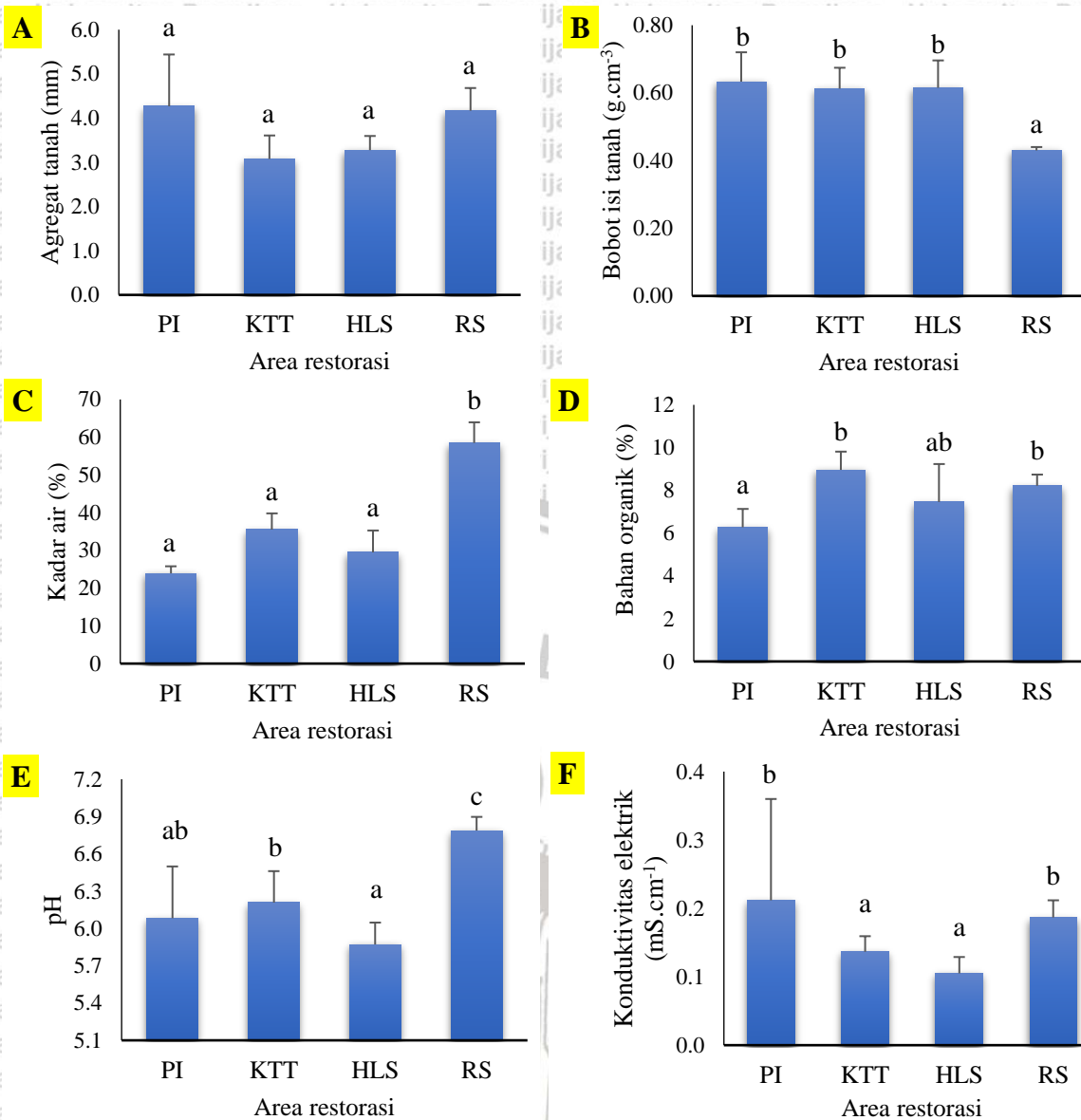
Perbedaan vegetasi penyusun komunitas tumbuhan terutama pohon, tiang, dan pancang antara area pemanfaatan dengan hutan sangat terlihat pada jatuhnya serasah (nekomassa) di area-area tersebut. Vegetasi yang tumbuh di atas permukaan tanah merupakan sumber karbon utama di ekosistem. Penghilangan biomassa tumbuhan, penanaman vegetasi secara monokultur memiliki efek pada rendahnya masukan karbon ke lingkungan, hal ini seperti yang dinyatakan oleh Liao dkk. (2012) dalam penelitiannya tentang dampak hutan tanaman terhadap kondisi tanah. Kurniawan dkk. (2019) menyatakan dalam hasil penelitiannya di UBF bahwa perbedaan kondisi vegetasi seperti kerapatan pohon, basal area,

tutupan kanopi, dan jatuhnya serasah di berbagai bentuk alih guna lahan menghasilkan perbedaan pada kandungan dan simpanan karbon organik di tanah. Struktur dan komposisi vegetasi di berbagai penggunaan lahan menunjukkan bahwa peran gangguan antropogenik dapat memiliki efek jangka panjang yang memengaruhi ekosistem seperti hilangnya habitat, hilangnya biodiversitas, dan penurunan kualitas lingkungan.

4.2.2. Variasi spasial karakteristik fisika dan kimia tanah

Selain data struktur vegetasi, informasi mengenai faktor edafis (tanah) di area restorasi sangat dibutuhkan untuk dapat mendeskripsikan kondisi tempat tumbuh dan mendukung data pertumbuhan tanaman. Karakteristik fisika (agregat, bobot isi, dan kadar air), kimia (bahan organik, pH, konduktivitas elektrik) tanah diukur berdasarkan contoh tanah yang diambil dari keempat lokasi. Pada karakteristik fisika tanah, ketiga area restorasi dan RS memiliki nilai agregat tanah yang secara statistik tidak berbeda satu dengan lain. Berdasarkan hasil pengukuran diameter massa rerata (DMR), ukuran diameter butiran tanah berada pada rentang 3,0 - 4,0 mm. Pada rentan nilai tersebut, kondisi tanah pada ketiga plot restorasi termasuk ke dalam kelas atau kategori sangat stabil sekali ($DMR > 2,00$ mm) (Gambar 15A). Agregat tanah dapat mengindikasikan kemantapan tanah dalam bertahan terhadap gaya-gaya yang mampu merusak atau mengganggu kestabilan tanah, seperti angin, butiran hujan, dan aktivitas pengolahan tanah. Tanah dengan indeks kemantapan tanah yang baik memiliki kestabilan yang baik pula sehingga mampu bertahan dari potensi erosi atau longsor. Selain itu, agregasi tanah yang baik memiliki dampak pada tingkat infiltrasi air, aerasi tanah yang baik sehingga menjadi media respirasi akar dan mendukung aktivitas mikrobia dalam tanah. Oleh karena itu, agregat tanah dapat dijadikan indikator dalam evaluasi kualitas tanah (Dou dkk., 2020).

Bobot isi tanah menggambarkan tingkat kepadatan tanah pada suatu lahan. Semakin padat tanah maka nilai bobot isi juga semakin tinggi, hal ini berarti bahwa tanah makin sulit untuk meneruskan air dalam kolom tanah dan ditembus akar tumbuhan. Ketiga area restorasi memiliki nilai bobot isi tanah yang secara statistik tidak berbeda nyata, namun berbeda nyata terhadap area RS (Gambar 15B). Bobot isi tanah yang diukur berada pada rentang $0,43 - 0,63$ g/cm³, berdasar nilai tersebut maka kondisi tanah pada area restorasi termasuk gembur sehingga cocok bagi pertumbuhan tanaman ($< 1,10$ g/cm³, untuk tanah dengan struktur liat).



Gambar 15. Karakteristik fisika dan kimia tanah di setiap area restorasi dibandingkan dengan *reference site*.

Keterangan: A. Agregat tanah; B. Bobot isi tanah; C. Kadar air tanah; D. Bahan organik tanah; E. pH tanah; F. Konduktivitas elektrik tanah; PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Rendahnya nilai bobot isi tanah ini merupakan karakteristik dari tanah yang terbentuk dari abu vulkanik gunung berapi. Meskipun demikian, kondisi tanah di ketiga area restorasi mulai menunjukkan terjadinya pemadatan dengan nilai agregat yang lebih besar dibandingkan dengan tanah di RS. Hal ini diduga karena aktivitas pengolahan lahan yang terjadi di area PI, KTT, dan HLS seperti penyangkulan, pemupukan. Tanah yang padat memiliki dampak negatif terhadap pertumbuhan akar, rendahnya aerasi, rendahnya porositas, dan menghambat sirkulasi air sehingga hal tersebut memengaruhi pertumbuhan

tanaman (Beylich dkk., 2010; Bagheri dkk., 2012). Sampel tanah di area restorasi dan hutan sekunder diambil pada kedalaman 0-10 cm dari permukaan tanah. Umumnya, tanah lapisan atas memiliki bobot isi tanah lebih rendah daripada lapisan di bawahnya. Hal ini dikarenakan pada tanah lapisan atas biasanya memiliki kandungan bahan organik yang lebih tinggi. Bahan organik dalam tanah dapat menurunkan nilai bobot isi tanah sehingga meningkatkan porositas tanah. Menurut Tarigan dkk. (2015), tanah dengan bobot isi tanah $< 1 \text{ g/cm}^3$ biasanya memiliki nilai bahan organik yang tinggi.

Kadar air tanah di ketiga area restorasi lebih rendah dan secara signifikan berbeda dengan RS ($p < 0,05$). Antara ketiga area restorasi, area KTT memiliki kadar air lebih tinggi (35%) dibandingkan dengan dua area lain (23-29%) (Gambar 15C). Area PI memiliki kadar air paling rendah dibandingkan dengan area lain, hal ini diduga karena tidak adanya tumbuhan penutup tanah di area ini. Pada saat pengambilan contoh tanah, area ini baru saja dibuka dan digarap oleh petani sehingga terlihat sangat terbuka dengan sedikit bagian yang ditanami dengan tanaman semusim. Kondisi ini berbeda dengan area KTT, HLS, dan RS. Pada ketiga area ini masih terdapat vegetasi penutup tanah baik itu berupa pohon atau semak. Keberadaan vegetasi dapat menjaga ketersediaan air tanah melalui mekanisme penurunan laju penguapan air tanah sehingga ketersediaan air tanah masih cukup bagi pertumbuhan tanaman ketika musim kemarau. Selain itu, efek keberadaan vegetasi terhadap kadar air adalah melalui pembentukan pori-pori tanah akibat sistem perakaran tumbuhan yang kompleks karena butiran air akan mengisi pori-pori tanah. Tingginya tutupan vegetasi akan diikuti dengan semakin banyak dan kompleksnya sistem perakaran sehingga meningkatkan pori-pori tanah dan kandungan air dalam tanah. Penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. (2013) menginformasikan bahwa ketersediaan air dalam tanah dipengaruhi oleh keberadaan dan tipe vegetasi penutup tanah. Variasi vegetasi penutup dapat menyebabkan perbedaan pola intersepsi air, aliran batang/*stemflow*, dan karakteristik sistem perakaran-tanah.

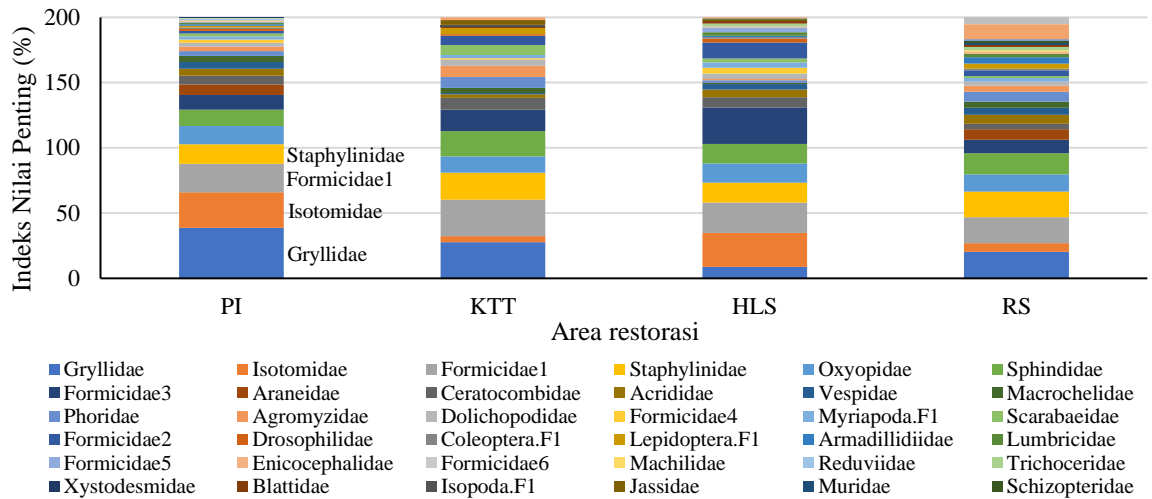
Secara umum, karakteristik kimia tanah di ketiga area restorasi menunjukkan perbedaan signifikan jika dibandingkan dengan area RS ($p < 0,05$). Kandungan bahan organik tertinggi teramati di area KTT diikuti RS, sedangkan area PI memiliki kandungan bahan organik tanah terendah (Gambar 15D). Kandungan bahan organik tanah sangat dipengaruhi oleh jatuhnya serasah dan akar-akar mati dari vegetasi yang tumbuh di permukaan tanah seperti pohon, semak/tumbuhan bawah, sebagai salah satu sumber bahan organik di ekosistem. Kegiatan konversi hutan menjadi lahan pertanian seperti di area PI diduga kuat sebagai penyebab rendahnya kandungan bahan organik tanah di lokasi tersebut. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan dari penelitian Guimarães dkk. (2013) di Brazil yang menginformasikan

bahwa konversi hutan menjadi lahan pertanian menyebabkan perubahan fraksi-fraksi karbon dari bahan organik dalam tanah dan juga menurunkan kesuburan tanah. Perubahan vegetasi juga mempunyai dampak negatif pada dekomposisi serasah yang tidak dapat berlangsung secara optimal akibat adanya perubahan iklim mikro tanah. Selain bahan organik tanah, kualitas dan kesuburan tanah dapat diidentifikasi dari derajat keasaman (pH) tanah. pH tanah di tiga area restorasi memiliki rentang nilai dari 5,8 sampai 6,2 yang diklasifikasikan agak asam. Nilai pH ini lebih rendah dibandingkan dengan RS (Gambar 15E). Nilai pH tanah yang rendah diduga akibat dari terganggunya dekomposisi serasah dan/atau penggunaan pupuk sintetis di tiga area budidaya (PI, KTT, dan HLS). Sebaliknya, jika dekomposisi serasah berlangsung secara normal (tanpa ada gangguan) seperti kondisi di RS, maka pH tanah cenderung netral (7,0). Nilai pH netral mengindikasikan kesuburan tanah yang bagus sehingga sangat bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman. Perubahan pH tanah secara signifikan dapat memengaruhi perubahan proses-proses kimia dan biologi di ekosistem (Andrews & Wander, 2011). Oleh karena itu, perubahan kecil pada pH tanah (peningkatan atau penurunan) mungkin akan menyebabkan dampak serius khususnya pada proses-proses biologis dalam tanah. Bersama dengan pH, konduktivitas elektrik tanah juga dapat digunakan sebagai penanda kesehatan tanah. Konduktivitas elektrik tanah mencerminkan kemampuan tanah untuk mengalirkan muatan listrik sebagai indikasi ketersediaan nutrisi dalam tanah. Area RS menunjukkan nilai konduktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan KTT dan HLS tetapi lebih rendah dibandingkan PI. Konduktivitas elektrik tanah di PI teramat paling tinggi (Gambar 15F). Tingginya nilai konduktivitas elektrik di area PI dimungkinkan karena pengaruh dari penggunaan pupuk inorganik oleh petani selama pengolahan lahan. Penggunaan pupuk inorganik ke lahan dapat meningkatkan konduktivitas elektrik tanah karena hal tersebut berkontribusi terhadap penambahan unsur hara (anion dan kation) dalam tanah.

4.2.3. Variasi spasial diversitas dan struktur komunitas makrofauna tanah

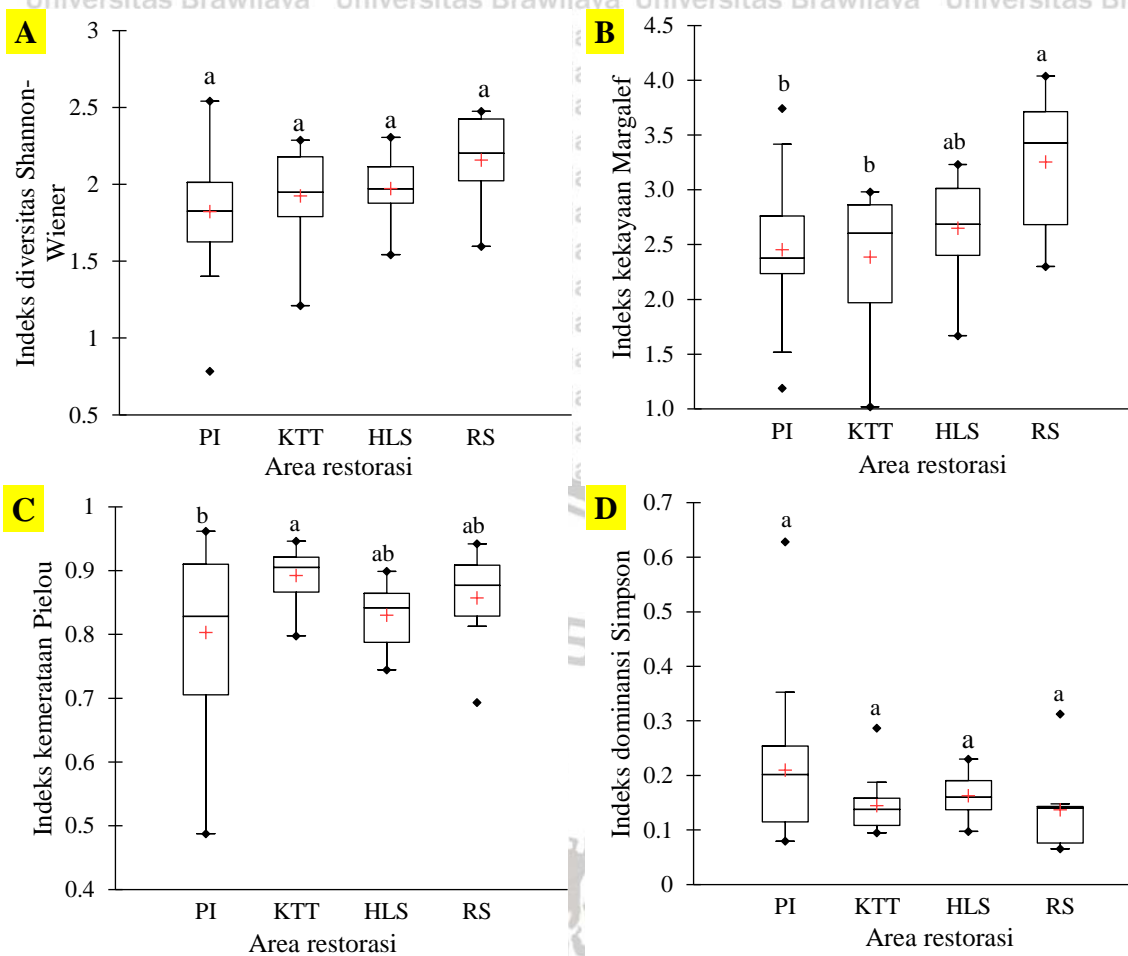
Ada sebanyak 2164 individu dari 31 famili, 18 ordo makrofauna tanah yang berhasil diperoleh dengan menggunakan 56 botol jebak. Kelimpahan individu terbanyak ditemukan di area PI sedangkan yang paling sedikit ditemukan di area RS. Meskipun demikian, area pertanian PI dan hutan sekunder RS memiliki kekayaan taksa famili yang seimbang yaitu 31 famili. Kekayaan famili terendah teramat di area kebun kopi atau KTT. Struktur komunitas makrofauna tanah pada tingkat famili tidak menunjukkan banyak perbedaan tetapi komposisi penyusunnya memperlihatkan adanya variasi antar lokasi (Gambar 16). Famili

Gryllidae menjadi taksa dominan yang ditemukan di area pertanian, namun taksa tersebut terlihat kodominan dengan Formicidae1 di KTT dan RS. Komposisi taksa penyusun komunitas makrofauna di area KTT, HLS, dan RS lebih berimbang dibandingkan dengan PI berdasarkan indeks nilai pentingnya (INP). Beberapa taksa famili yang sering ditemukan di area penelitian meliputi Gryllidae, Isotomidae, Formicidae1, Staphylinidae, Oxyopidae, Sphindidae, dan Formicidae3, informasi lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3.



Gambar 16. Struktur komunitas makrofauna tanah di masing-masing area penelitian
 Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur;
 HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder
 sebagai *reference site*

Keanekaragaman makrofauna tanah di area hutan yang mengalami alih fungsi lebih rendah dibandingkan dengan kawasan hutan sebagai pembanding. Meskipun area pertanian, PI, memiliki kekayaan taksa paling banyak tetapi hal ini tidak diikuti dengan tingginya nilai diversitas makrofauna di dalamnya. Selain itu, berdasarkan penghitungan indeks kekayaan Margalef, kawasan hutan yang telah dialihfungsikan juga memiliki kekayaan taksa yang lebih sedikit dibandingkan hutan sekunder (Gambar 17A-B). Sebaran taksa makrofauna teramati cenderung merata di semua area penelitian berdasarkan indeks kemerataan Pielou dengan nilai rata-rata terendah sebesar 0,8 di area PI. Lahan pertanian ini memiliki nilai indeks Pielou paling rendah karena terlihat ada dominansi dari taksa Gryllidae di komunitasnya. Hal ini didukung juga dengan hasil penghitungan indeks dominansi Simpson yang menginformasikan nilai rata-rata indeks tertinggi ada pada komunitas makrofauna di PI (Gambar 17C-D). Pada indeks dominansi Simpson, semakin kecil nilai (mendekati 0) mengindikasikan bahwa tidak ada dominansi taksa tertentu dalam komunitas tersebut, begitu sebaliknya.



Gambar 17. Keanekaragaman (A), kemerataan (B), kekayaan (C), dan dominansi (D) taksa komunitas makrofauna tanah di area penelitian

Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Pada penelitian ini, aktivitas alih fungsi kawasan hutan menjadi lahan pertanian atau perkebunan monokultur memengaruhi struktur komunitas makrofauna tanah di dalamnya.

Meskipun perubahan komunitas masih minim, namun pola perubahan tersebut sudah nampak secara jelas baik dari aspek komposisi taksa penyusun atau keanekaragaman jenisnya.

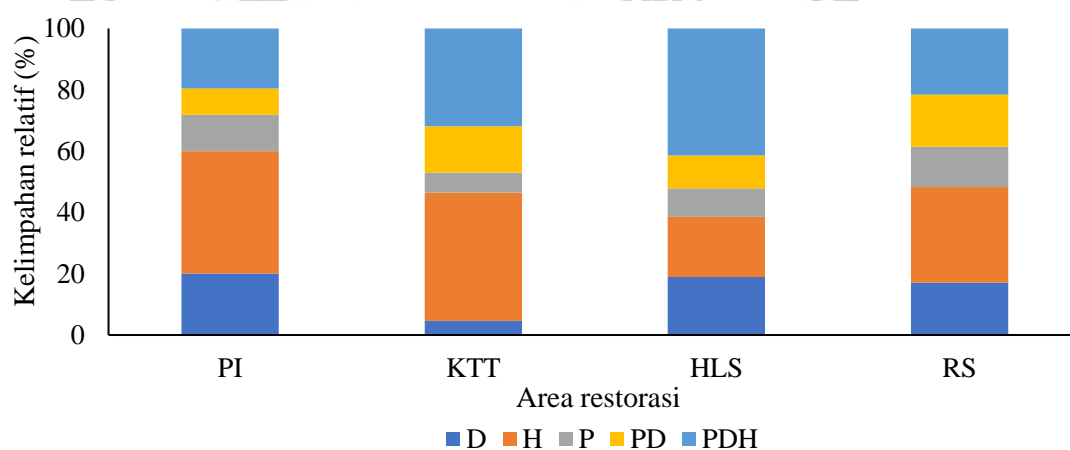
Bukti lain dari efek bentuk alih guna lahan beserta pengelolannya terhadap hewan tanah juga ditunjukkan oleh Silva dkk. (2018) yang melaporkan bahwa praktek alih guna

dan pengelolaan lahan menyebabkan variasi spasial atau perbedaan pola kelimpahan, kekayaan jenis, dan diversitas hewan tanah antara area pertanian dan hutan. Menurut

Prayogo dkk. (2019), sistem pertanian monokultur yang seringkali mengalami pembersihan dan pembakaran lahan, pengolahan secara terus menerus, rotasi tanaman, penggunaan

bahan-bahan kimiawi telah terbukti menjadi salah satu penyebab perubahan struktur

populasi hewan tanah. Dampak dari hal tersebut, menurut Sisay & Ketema (2015), dapat mengurangi atau menghilangkan berbagai taksa kunci yang berperan penting dalam ekosistem. Hal ini dikarenakan perubahan struktur vegetasi dan tutupan lahan di permukaan tanah sebagai akibat dari cara pengolahan lahan yang kurang tepat memengaruhi produksi bahan organik dan serasah di area pertanian atau perkebunan sehingga hal ini turut memberikan efek terhadap ketersediaan makanan bagi makrofauna tanah (Siqueira dkk., 2014). Berbeda halnya dengan di hutan, diversitas makrofauna tanah di area ini teramati lebih tinggi dengan komposisi taksa yang lebih berimbang dibandingkan komunitas hewan tanah di tiga lokasi lainnya. Seperti yang dinyatakan oleh Suárez dkk. (2018), keanekaragaman pohon yang lebih tinggi di hutan dapat menghasilkan heterogenitas dan jumlah serasah yang melimpah, pasokan makanan dan habitat mikro yang lebih besar, kondisi tanah yang lebih baik, serta iklim mikro yang sesuai bagi kehidupan makrofauna tanah.



Gambar 18. Perbandingan komposisi makrofauna berdasarkan kelompok fungsionalnya di masing-masing area restorasi
 Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*

Terdapat empat kelompok fungsional dari komunitas makrofauna yang diamati di area penelitian yaitu detritivor (D), predator (P), herbivor (H), predator-detritivor (PD), dan predator, detritivor, herbivor (PDH) (Gambar 18). Adanya kelompok dengan lebih dari satu status fungsional dikarenakan takson makrofauna yang berhasil teridentifikasi berada pada level famili, tidak spesifik genus atau spesies, yang tingkat tersebut memungkinkan memiliki lebih dari satu status fungsional. Komposisi kelompok fungsional makrofauna memperlihatkan variasi antar lokasi penelitian. Kelompok makrofauna herbivor (H)

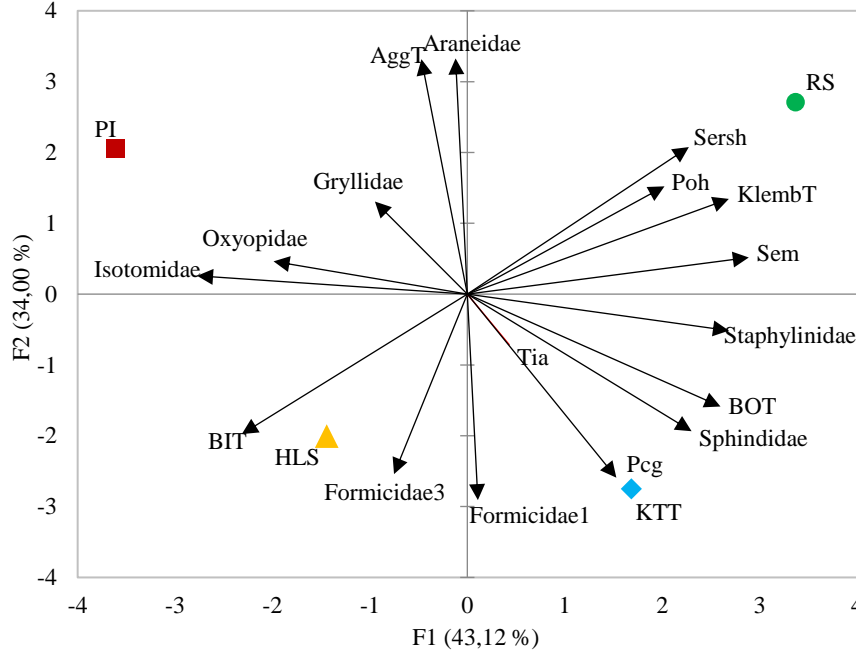
mendominasi di area KTT, PI, dan RS dengan kelimpahan relatif masing-masing 41,9%, 39,8%, dan 31,2%, tetapi tidak di HLS, yang lebih didominasi oleh kelompok predator, detritivor, herbivor (PDH) dengan kelimpahan mencapai 41,4%. Kelompok makrofauna detritivor (D) di KTT teramati paling sedikit dengan kelimpahan 4,6% dibandingkan semua kelompok fungsional antar lokasi. Komposisi makrofauna di area hutan (RS), berdasarkan kelompok fungsionalnya, cenderung lebih seimbang dibandingkan tiga area lain. Pada penelitian ini, kelompok makrofauna detritivor (D) didominasi oleh Isotomidae (Ordo Entomobryomorpha), untuk kelompok herbivor (H) didominasi oleh Gryllidae (Ordo Orthoptera). Famili Oxyopidae dan Araneidae (Ordo Araneae) adalah kelompok makrofauna predator dominan sementara itu, Staphylinidae (Ordo Coleoptera) dan Phoridae (Ordo Diptera) merupakan kelompok predator, detritivor (PD) yang banyak terdapat di area penelitian. Famili Formicidae (Ordo Hymenoptera) menjadi makrofauna paling dominan dengan status fungsional sebagai predator, detritivor, herbivor (PDH). Informasi lengkap disajikan pada Lampiran 3, Tabel 4.

Pada ekosistem hutan, serasah daun memainkan peran penting dalam siklus nutrisi, sumber bahan organik, dan habitat mikro organisme. Penurunan jumlah serasah secara linier berkaitan dengan intensitas gangguan yang disebabkan oleh aktivitas pertanian. Kelimpahan detritivor paling sedikit, pada penelitian ini, ditemukan di area KTT ini merupakan area kebun kopi monokultur dengan produksi serasah yang termasuk rendah (Gambar 14). Hasil ini sejalan dengan penelitian Kwon dkk. (2013), yang melaporkan bahwa penurunan kelimpahan detritivor berkaitan erat dengan jumlah serasah yang sedikit di tanah terganggu. Namun, kondisi serupa tidak terlihat di area PI dan HLS, kelimpahan makrofauna detritivor di area ini cenderung sama dengan di kawasan hutan (RS). Hal ini diduga adanya pengaruh dari aplikasi pupuk organik yang pernah dilakukan oleh petani di dua area tersebut. Kelimpahan makrofauna herbivor tinggi terutama di lahan yang diolah petani yaitu PI dan KTT. Mengingat kondisi area lebih terbuka, tumbuhan bawah/semay liar banyak tumbuh di lokasi tersebut dan menjadi sumber makanan bagi beberapa makrofauna herbivor. Pada penelitiannya, Kwon dkk. (2013) menyatakan area atau lahan terganggu membuka peluang untuk kemunculan dan pertumbuhan tanaman bawah atau belukar yang menjadi makanan bagi arthropoda herbivor. Oleh karena itu, tingkat dan intensitas gangguan yang tinggi pada tanah atau lingkungan secara positif berhubungan dengan peningkatan jumlah herbivor. Kelompok predator memiliki kerentanan yang lebih besar rentan gangguan daripada kelompok lain, karena umumnya kelompok ini lebih berlimpah di lingkungan yang stabil (Choi dkk., 2010). Kelimpahan predator lebih banyak ditemukan di area hutan dibandingkan

dengan area budidaya kecuali di PI. Kelimpahan predator yang tinggi di suatu area mengindikasikan ketersediaan mangsa, sebagai sumber makanan, yang cukup pada tempat tersebut. Jumlah mangsa yang mencukupi di area PI akibat keberadaan tanaman bawah liar atau budidaya, sebagai habitat, diduga menjadi salah satu faktor penyebab cukup melimpahnya makrofauna predator di lokasi ini.

Sebanyak delapan famili dominan dipilih untuk digunakan melihat hubungan antara makrofauna, karakteristik fisika-kimia tanah, dan vegetasi dengan menggunakan analisis komponen utama (PCA). Delapan famili tersebut yaitu Araneidae, Gryllidae, Oxyopidae, Isotomidae, Formicidae¹, Formicidae³, Sphindidae, dan Staphylinidae. Hasil PCA menunjukkan dua sumbu pertama (F1 dan F2) menjelaskan 77,1% dari total variabilitas pada data yang digunakan (Gambar 19). Sumbu 1 (F1) menunjukkan gradien kualitas lingkungan dari rendah ke tinggi (kiri ke kanan atau negatif ke positif) berdasarkan variabel sifat tanah dan vegetasi. Famili Gryllidae, Oxyopidae, dan Isotomidae lebih dominan ditemukan di area dengan kualitas tanah yang rendah, seperti area PI. Sebaliknya, kelompok Staphylinidae dan Sphindidae cenderung ditemukan di lingkungan dengan kondisi bagus, seperti RS. Area PI dicirikan dengan rendahnya jumlah pohon, tiang, pancang, semai, rendahnya nekromassa, dan bahan organik tanah, kondisi ini merupakan kebalikan dari area RS. Sementara itu, kondisi di KTT dan HLS cenderung mirip sehingga kelompok makrofauna yang dominan ditemukan juga relatif sama yaitu Formicidae¹ dan Formicidae³.

Keberadaan makrofauna tanah di suatu area sangat dipengaruhi kondisi lingkungan area tersebut. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa struktur vegetasi baik tingkat pohon, tiang, pancang, dan semai berpengaruh terhadap kelimpahan jenis makrofauna di masing-masing area. Perbedaan komunitas vegetasi antar area turut menghasilkan perbedaan karakteristik tanah, selain karena pengaruh dari aktivitas antropogenik. Famili Sphindidae memiliki hubungan yang erat dengan bahan organik tanah (BOT) yang ditunjukkan dengan kecilnya sudut yang terbentuk antar dua variabel tersebut dengan koefisien korelasi sebesar 0,981 ($p < 0,05$) (Lampiran 4). McHugh (1993) menyebutkan bahwa Sphindidae termasuk kelompok serangga dalam golongan *myxomycophagous/slime mould feeding* atau pemakan jamur lendir, yang dapat dikatakan juga sebagai detritivor. Jenis jamur semacam itu banyak ditemukan di bahan organik dalam dekomposisi serasah atau material organik sehingga kelimpahan taksa ini berkorelasi positif dengan banyaknya serasah di tanah.



Gambar 19. Hubungan antara kelimpahan taksa makrofauna dengan karakteristik tanah dan vegetasi di masing-masing area

Keterangan: Poh: Jumlah individu pohon; Tia: Jumlah individu tiang; Pcg: Jumlah individu pancang; Sem: kerimbunan semai, Sersh: nekromassa; AggrT: Agregat tanah; BIT: Bobot isi tanah; KlembT: Kelembaban tanah; BOT: Bahan organik tanah; PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

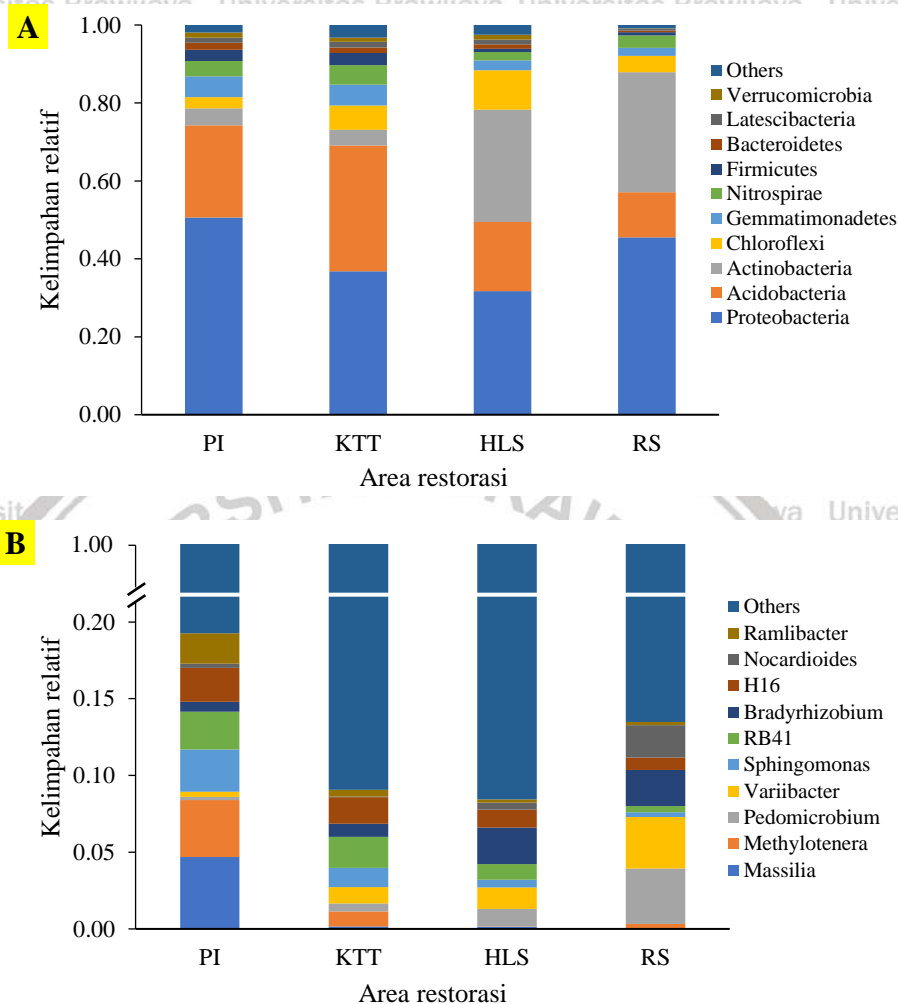
Makrofauna tanah merupakan komponen penting dalam ekosistem yang memiliki peran krusial dalam menjamin keberlangsungan berbagai proses ekologi seperti dekomposisi, siklus nutrisi, pembentukan tanah, dan regulasi air dan udara. Pada umumnya, menurut Bottinelli dkk. (2015), sebagian besar makrofauna tanah bertindak sebagai *soil engineer* dapat memengaruhi struktur tanah melalui penggabungan atau penyampuran serasah di dalam tanah. Beberapa jenis makrofauna memakan serasah dan residu organik di permukaan tanah kemudian mencampurkan bahan organik ini ke dalam profil tanah di dalam agregat-agregat tanah atau pada lubang-lubang tempat tinggal, seperti pada kelompok Formicidae, Lumbricidae. Masuknya bahan organik ke dalam tanah, yang jika tidak akan terdegradasi di permukaan tanah, memiliki konsekuensi besar bagi struktur tanah karena bahan organik tersebut adalah salah satu faktor kunci yang memengaruhi porositas tanah dan stabilitas agregat tanah (Velásquez dkk., 2012; Bottinelli dkk., 2015) yang kemudian meningkatkan infiltrasi dan kemampuan menahan air dalam tanah.

4.2.4. Variasi spasial komunitas bakteri tanah

Distribusi populasi bakteri tanah pada tingkat filum memperlihatkan pola sebaran yang serupa. Dari 42 filum yang ditemukan, terdapat sepuluh dominan kelompok yang teridentifikasi meliputi Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Chloroflexi, Gemmatimonadetes, Nitrospirae, Firmicutes, Bacteriodes, Latesbacteria, dan Verrucomicrobia dengan kelimpahan relatif mencapai 95% dari total kelimpahan (Gambar 20A). Meskipun pola distribusi bakteri tanah adalah identik, komposisi penyusun dari populasi tersebut menunjukkan perbedaan terutama pada sepuluh filum terbesar. Proteobacteria memiliki kelimpahan relatif terbesar di setiap area, khususnya terbesar di area PI dengan persentase mencapai 50%. Acidobacteria memiliki kelimpahan terbesar kedua baik di area PI dan KTT dengan nilai masing-masing 23% dan 32%. Sebaliknya, komposisi berbeda teramati di area HLS dan RS yang memperlihatkan Actinobacteria menjadi kelompok dengan kelimpahan terbesar kedua setelah Proteobacteria dengan persentase sebesar 28% dan 30%. Proteobacteria merupakan kelompok bakteri yang umum ditemukan di tanah yang terdiri dari beberapa anggota. Spesies dari filum ini telah diketahui memiliki peran dalam dekomposisi serasah dan transformasi bahan organik (Huang dkk., 2016; Mander dkk., 2012). Sementara itu, Acidobacteria adalah kelompok bakteri yang umumnya ditemukan pada tanah dengan tingkat keasaman tinggi (pH rendah) (Jones dkk., 2009). Namun, pada penelitian ini diperoleh hasil berbeda yang menunjukkan kelimpahan Acidobacteria justru teramati lebih tinggi di area dengan nilai pH tanah tinggi seperti pada area KTT dan PI. Temuan ini juga sama dengan hasil yang diungkapkan oleh Sengupta dkk. (2020) yang menyatakan bahwa beberapa anggota filum Acidobacteria tidak umum ditemukan di tanah asam karena berkaitan dengan fungsi metabolis yang luas dan adaptasi fisiologis.

Tidak seperti Proteobacteria dan Acidobacteria, kelimpahan relatif Actinobacteria memperlihatkan perbedaan yang signifikan antara area pertanian (PI, KTT) dengan kawasan hutan (RS). Kelimpahan famili ini lebih rendah di tanah pertanian dibandingkan dengan tanah hutan. Perbedaan kelimpahan Actinobacteria di lokasi ini diduga berkaitan dengan kandungan bahan organik dan kelembaban tanah. Aktivitas petani saat pembersihan lahan dan pembakaran sisa tumbuhan yang dibersihkan menurunkan sumber masukan bahan organik ke tanah. Rendahnya kandungan bahan organik tanah berdampak pada penurunan kelimpahan Actinobacteria. Menurut Sengupta dkk. (2020), kegiatan pembersihan lahan atau tanah dapat memengaruhi rendahnya input residu organik dan menurunkan ketersediaan sumber makanan bagi pertumbuhan bakteri. Actinobacteria adalah komunitas bakteri yang

memainkan peran penting dalam dekomposisi serasah (Kopecky dkk., 2011), menginduksi pertumbuhan tanaman, siklus nutrisi, dan biogeokimia (Bhatti dkk., 2017; Zhang dkk., 2019).



Gambar 20. Kelimpahan relatif populasi bakteri tanah pada tingkat filum di masing-masing area penelitian

Keterangan: A. Kelimpahan pada tingkat famili; B. Kelimpahan pada tingkat genus; PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

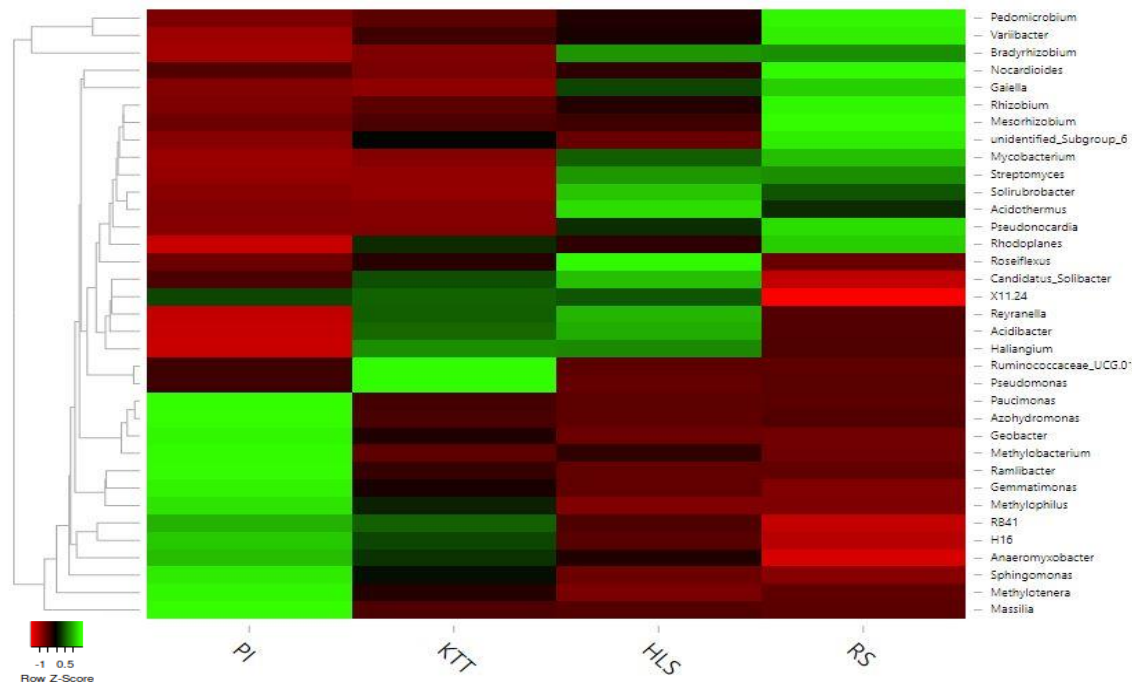
Lebih dari 430 genus bakteri tanah telah diidentifikasi pada penelitian ini. Ada sepuluh genus bakteri dominan yang memiliki kelimpahan relatif kumulatif <20% di setiap area, kelompok bakteri tersebut meliputi *Massilia*, *Methylotenera*, *Pedomicrobium*, *Variibacter*, *Sphingomonas*, *RB41*, *Bradyrhizobium*, *H16*, *Nocardioideis*, dan *Ramlibacter*. Meskipun struktur komunitas di masing-masing area, khususnya bakteri dominan, menunjukkan kesamaan, namun, komposisi bakteri penyusun komunitas tersebut memperlihatkan

perbedaan (Gambar 20B). Genus *Massilia*, *Methylothermobacter*, *Sphingomonas*, dan RB41 kodominan di area PI sementara kelompok bakteri pemfiksasi nitrogen (N) seperti *Pedomicrobium*, *Variibacter*, dan *Bradyrhizobium*, banyak ditemukan di KTT, HLS, dan RS. Kelimpahan bakteri pemfiksasi nitrogen teramati semakin meningkat seiring minimnya gangguan terhadap tanah (PI<KTT<HLS<RS). Hasil ini menginformasikan bahwa adanya kegiatan alih fungsi hutan menjadi bentuk pemanfaatan lain seperti pertanian intensif dapat memengaruhi komposisi bakteri tanah pada tingkat genus. Hasil ini tidak berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Vitali dkk. (2016), Meng dkk. (2019), dan Sun dkk. (2020).

Sebagai hasil alih guna lahan, suatu komunitas bakteri tanah dapat terbentuk dengan komposisi populasi penyusunnya yang berbeda dengan aslinya. Pada Gambar 21, komposisi dari populasi bakteri di tanah yang terganggu (PI, KTT, dan HLS) membentuk pola yang berbeda jika dibandingkan dengan populasi di tanah yang tidak mendapat gangguan (RS). Kondisi ini diduga kuat karena perbedaan karakteristik tanah di masing-masing area seperti bobot isi tanah, kadar air, bahan organik, dan pH. Beberapa kelompok bakteri berbeda ditemukan lebih melimpah di area RS dibandingkan di lokasi lain seperti genus *Pedomicrobium*, *Variibacter*, *Bradyrhizobium*, dan *Nocardioides*. Sementara, genus *Massilia*, *Methylothermobacter*, *Sphingomonas*, dan RB41 adalah kelompok yang melimpah di area dengan kondisi tanah terganggu. Informasi ini mengindikasikan bahwa kelompok-kelompok bakteri ini dapat bertindak sebagai pembeda antar area sehingga mungkin kelompok tersebut juga berpotensi menjadi bioindikator lingkungan. Keadaan lingkungan di atas permukaan tanah memberikan pengaruh yang kuat terhadap kehidupan bakteri tanah. Perubahan vegetasi dan ketidaksesuaian cara pengolahan lahan berkontribusi pada perubahan populasi bakteri tanah yang kemudian dapat memengaruhi fungsi jasa layanan ekosistem.

Berdasarkan perhitungan diversitas *alpha* bakteri tanah menggunakan beberapa indeks seperti *Observed Species*, *Chao1*, ACE, Shannon, dan Simpson, kekayaan spesies bakteri teramati paling banyak ditemukan di area HLS, diikuti KTT, PI sedangkan RS memiliki kekayaan spesies terendah (Tabel 2). Aktivitas alih fungsi lahan seperti pembuatan terasering, penggunaan pupuk anorganik (Fitria & Kurniawan, 2021), pembukaan lahan, dan pemanfaatan mesin dalam pengelolaan tanaman dapat memodifikasi karakteristik fisika-kimia tanah yang berkonsekuensi terhadap perubahan diversitas *alpha* bakteri. Hasil penelitian ini sejalan dengan studi lain yang dilakukan oleh Bissett dkk. (2011) dan Suleiman dkk. (2013). Menurut Zhang dkk. (2016), area yang baru dibuka akan dihuni oleh kelompok spesies oportunistik kemudian diikuti dengan peningkatan diversitas spesies sebagai hasil kumulatif peningkatan sumber daya. Seiring dengan pematangan ekosistem, kompetitor

yang lebih kuat mungkin berganti untuk mulai mendominasi yang kemudian menyebabkan penurunan kekayaan spesies. Campur tangan manusia dalam pengolahan lahan dapat memodifikasi atau merubah komunitas khususnya diversitas bakteri tanah. Penggunaan pupuk di area pertanian (PI, KTT, dan HLS) diduga memengaruhi jumlah ketersediaan nutrisi di tanah sehingga memicu pertumbuhan mikroflora yang lebih besar.



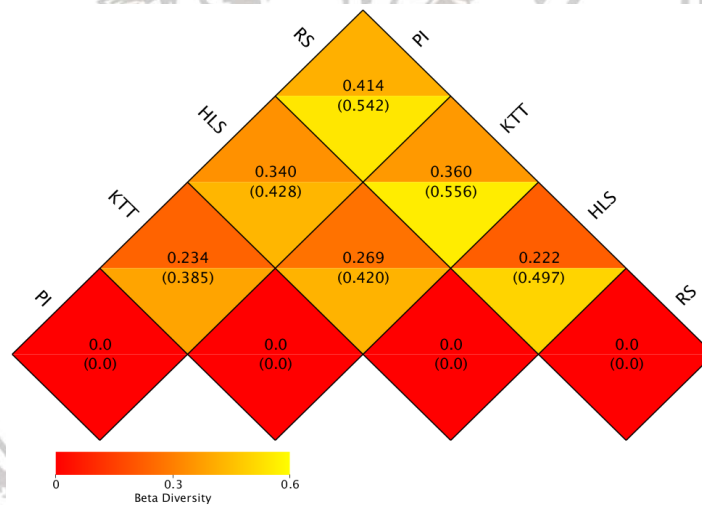
Gambar 21. Kelimpahan genus bakteri berdasarkan *heatmap cluster* di masing-masing area. Warna hijau merepresentasikan genus dengan kelimpahan tinggi, sedangkan warna merah sebaliknya
Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Tabel 2. Diversitas *alpha* komunitas bakteri di setiap area penelitian

Area	Observed Species	Chao1	ACE	Shannon	Simpson
PI	2981	3193.588	3220.685	9.215	0.995
KTT	3316	3494.979	3506.519	9.612	0.996
HLS	3451	3605.801	3634.892	9.878	0.997
RS	2394	2424.102	2478.877	8.833	0.993

Diversitas *beta* dari komunitas bakteri tanah di area penelitian menunjukkan perbedaan antar lokasi. Diversitas *beta* menggambarkan diversitas populasi bakteri di antara lokasi berdasarkan komposisi bakteri penyusunnya. Berdasarkan Gambar 22, nilai diversitas *beta* dari dua lokasi yang dibandingkan akan semakin besar (mendekati 1) jika dua populasi bakteri di dua lokasi tersebut berbeda, begitu sebaliknya. Komunitas bakteri di tanah

pertanian (PI) menunjukkan perbedaan yang paling besar ketika dibandingkan dengan tanah hutan (RS). Sementara itu, komunitas bakteri di area kebun kopi (KTT) dan area pertanian campuran (HLS) menunjukkan kemiripan komunitas bakteri dengan nilai diversitas 0,269. Diversitas bakteri di area PI tampaknya membentuk komunitas baru yang berbeda dengan area lain. Aktivitas alih guna lahan menurunkan level diversitas *beta* pada penelitian ini dan hasil ini mengonfirmasi kajian di wilayah lain yang dilakukan oleh Rodrigues dkk (2013). Rodrigues dkk. (2013) menyatakan bahwa konversi kawasan hutan Amazon di Brasil menjadi lahan pertanian meningkatkan diversitas *alpha* tetapi justru menurunkan nilai diversitas *beta* bakteri. Selain itu, penelitian lain oleh Flores-Rentería dkk. (2016, 2020) yang menginvestigasi pengaruh konversi menjadi lahan pertanian terhadap populasi bakteri tanah juga menunjukkan hasil serupa. Analisis diversitas *beta* menyediakan informasi bahwa kegiatan alih guna lahan telah menginduksi perubahan komunitas bakteri tanah di area penelitian. Hal tersebut dapat dikarenakan adanya modifikasi komunitas tumbuhan, karakteristik tanah, dan iklim mikro di area hutan terdegradasi. Sebagai konsekuensinya, komposisi dari bakteri tanah bervariasi di kondisi lingkungan berbeda.



Gambar 22. Diversitas *beta* komunitas bakteri di masing-masing area. Keterangan: setiap grid merepresentasikan koefisien ketidaksamaan antar area yang dibandingkan. Skor tinggi menunjukkan bahwa dua area yang dibandingkan memiliki kesamaan yang rendah.

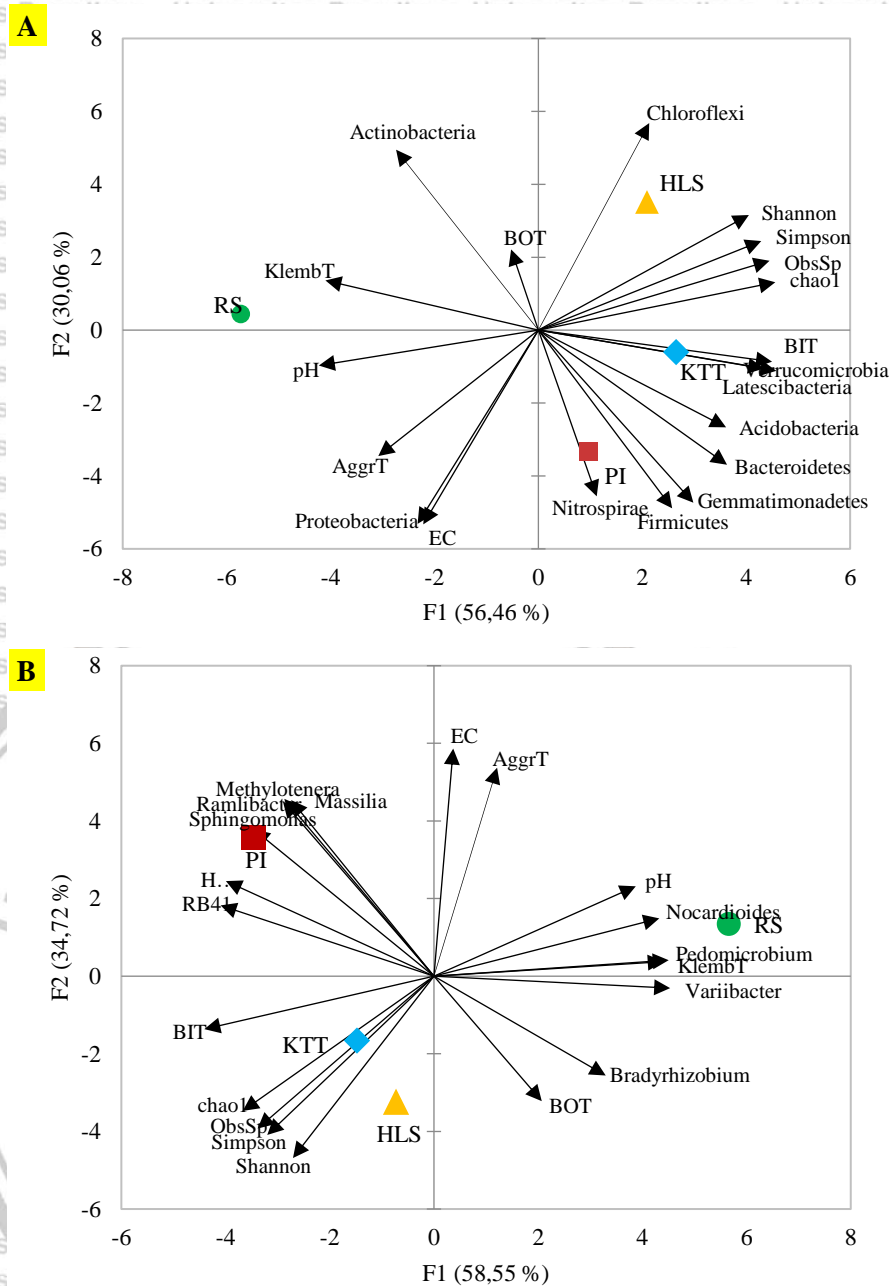
Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Analisis komponen utama atau PCA dilakukan untuk menentukan hubungan antara kelompok bakteri dominan dengan karakteristik tanah, hasil analisis dapat dilihat pada

Gambar 23. Anak panah merepresentasikan panjang dan sudut dari variabel penjelas dan

respon yang mengindikasikan korelasi antar variabel. Plot PCA pada dua kelompok taksonomi yang dikaji menunjukkan kemiripan (identik). Komunitas bakteri dominan (kelompok filum dan genus) berkaitan erat dengan karakteristik tanah tertentu. Pada tingkat filum, nilai eigen pada masing-masing axis yaitu 11,29 dan 6,01 dengan total variasi yang dapat dijelaskan sebesar 86,5% (Gambar 23A). Analisis korelasi Pearson menginformasikan bahwa kelimpahan relatif Proteobacteria berkorelasi positif dengan konduktivitas elektrik tanah/EC (koefisien = 0,999 $p < 0,05$) dan agregat tanah/AggrS (koefisien = 0,911 $p < 0,05$). Latescibacteria dan Verrumicrobia secara positif berkorelasi dengan bobot isi tanah/BDst dengan koefisien korelasi masing-masing sebesar 0,958 ($p < 0,05$), 0,994 ($p < 0,05$), tetapi berkorelasi negatif dengan karakteristik tanah yang lain (Lampiran 5). Kelimpahan populasi bakteri dari filum yang dominan lebih banyak ditemukan di area PI dan KTT. Komposisi bakteri tanah di dua lokasi tersebut menunjukkan kemiripan dan digambarkan pada satu kuadran yang sama di plot ordinas.

Pada tingkat genus, nilai eigen pada axis pertama dan kedua berturut-turut sebesar 11,71 dan 6,94 yang menjelaskan 93,3% varians dari data. Hasil ini mengonfirmasi bahwa dua axis tersebut dapat menggambarkan hubungan antara karakteristik tanah dengan populasi bakteri (Gambar 23B). Kelimpahan relatif *Pedomicrobium* (koefisien = -0,971, $p < 0,05$), *Variibacter* (koefisien = -0,955, $p < 0,05$), *Nocardioides* (koefisien = -0,971, $p < 0,05$) berkorelasi negatif dengan bobot isi tanah, sementara itu hanya *Variibacter* (coef. = 0,960, $p < 0,05$) yang berkorelasi positif dengan kelembaban tanah (Lampiran 5). Populasi bakteri dominan di semua area menunjukkan variasi. Area PI dan RS memiliki komposisi bakteri dominan berbeda sementara populasi bakteri di KTT dan HLS cenderung identik. *Variibacter*, *Pedomicrobium*, *Nocardioides*, dan *Bradyrhizobium* memiliki kelimpahan tertinggi pada tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi, kelembaban tinggi, dan tidak asam, kondisi ini ditemukan di area RS atau tanah hutan. Sebaliknya, *Methylo tenera*, *Massilia*, *Ramlibacter*, *Sphingomonas*, H16, dan RB41 lebih banyak terdapat pada tanah dengan kondisi tanah yang berbeda dengan RS.



Gambar 23. Hubungan antara kelimpahan komunitas bakteri tanah dengan karakteristik tanah di masing-masing area.

Keterangan: A. Level filum; B. Level genus; AggrT: Agregat tanah; BIT: Bobot isi tanah; KlembT: Kelembaban tanah; pH: keasaman tanah; BOT: Bahan organik tanah; EC: Konduktivitas elektrik tanah; PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Di tanah hutan, musim dan sifat tanah dapat memengaruhi struktur filogenik dan fungsional komunitas mikroba (Preem dkk., 2012). Komunitas bakteri tanah memiliki kemampuan yang cepat dan baik dalam merespon perubahan kondisi lingkungan mikro pada habitatnya. Oleh karena itu, bakteri tanah dipilih dalam menjelaskan dampak perubahan

lingkungan tanah dibandingkan jenis organisme lain, seperti jamur, pada penelitian ini. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa variasi struktur komunitas bakteri tanah sangat terkait dengan perubahan sifat tanah. Perubahan sifat tanah ini berhubungan dengan bentuk penggunaan lahan. Adanya gradien perubahan lingkungan dapat diamati ketika data kelimpahan bakteri dan sifat tanah digunakan dalam analisis komponen utama seperti pada Gambar 23. Pada penelitian ini, bobot isi, kelembaban, dan konduktivitas elektrik tanah adalah faktor lingkungan utama yang menyebabkan variabilitas spasial, sementara agregat tanah, pH, dan kandungan organik memiliki efek yang kecil terhadap bakteri tanah. Hasil penelitian ini sejalan dengan kajian oleh Sun dkk. (2020) di tanah hutan tropis China. Namun, hasil penelitian ini berbeda dari kebanyakan penelitian yang menunjukkan bahwa pH adalah faktor lingkungan utama yang menyebabkan perbedaan komunitas bakteri secara spasial dan temporal. Penelitian lain menunjukkan bahwa pH tanah adalah aspek utama yang membentuk pola komunitas bakteri seperti yang dikaji oleh Bárcenas-Moreno dkk. (2016) dan Cho dkk. (2016). Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh kecilnya variasi pH pada tipe alih guna lahan yang dikaji dalam penelitian.

4.3. Jenis Taksa Makrofauna dan Bakteri Tanah yang Berpotensi sebagai Bioindikator Perubahan Kualitas Lingkungan

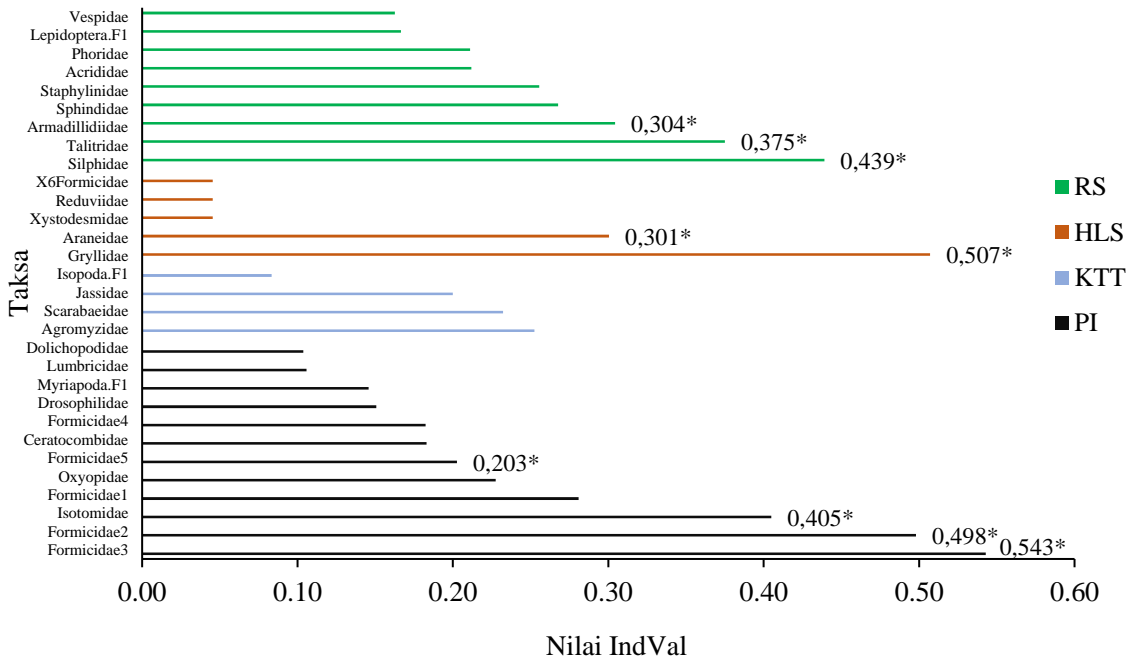
Adanya kegiatan konversi hutan menjadi lahan pertanian memiliki dampak negatif terhadap perubahan kondisi lingkungan khususnya tanah. Perubahan kondisi tanah tentunya turut memengaruhi komunitas makrofauna tanah yang dalam kehidupannya menjadikan tanah sebagai habitat alami. Makrofauna tanah merupakan kelompok hewan tanah dengan ukuran $>2 - 20$ mm yang sensitif terhadap perubahan lingkungan (Ertiban, 2019). Oleh karena itu, hewan tanah sangat berpotensi menjadi bioindikator perubahan kualitas tanah. Pada penelitian ini, penentuan taksa makrofauna tanah yang potensial menjadi bioindikator lingkungan dilakukan dengan menggunakan indeks nilai indikator (*Indicator Value index/IndVal*) yang di pertama kali dikemukakan oleh Dufrene & Legendre (1997).

Berdasarkan hasil perhitungan nilai IndVal, taksa hewan tanah berpotensi sebagai bioindikator ditemukan berbeda-beda jenisnya pada masing-masing area penelitian. Pada area pertanian (PI), taksa dengan nilai IndVal yang tinggi teramati pada famili Formicidae³, Formicidae², dan Isotomidae dengan nilai masing-masing 0,543; 0,498; 0,405 ($p < 0,05$). Sementara itu, Gryllidae dan Araneidae dengan nilai tertinggi masing-masing 0,507 dan 0,301 ($p < 0,05$) teramati di lokasi HLS. Pada kawasan hutan (RS), jenis taksa bioindikator yang ditemukan dengan nilai IndVal tertinggi yaitu berasal dari Famili Silphidae (0,439),

Talitridae (0,375), dan Armadillidiidae (0,304) (Gambar 24). Semua kelompok taksa berpotensi bioindikator ini tidak selalu memiliki kelimpahan tertinggi di setiap lokasi penemuan. Namun, merupakan taksa dengan kelimpahan dan frekuensi penemuan tinggi ketika dibandingkan antar seluruh lokasi.

Kelompok Formicidae dan Isotomidae merupakan taksa indikator yang teramati di tanah dengan gangguan tinggi yaitu lahan pertanian. Formicidae adalah jenis invertebrata tanah yang umum ditemukan di ekosistem terestrial. Formicidae adalah kelompok hewan tanah yang sangat penting karena mereka berpartisipasi dalam banyak proses ekosistem seperti pemecahan bahan organik, regulasi udara dalam tanah dari lubang-lubang galian habitatnya, dan sesitif terhadap perubahan lingkungan. Selain itu, menurut Coleman & Wall (2015), Formicidae juga bertindak sebagai predator utama invertebrata kecil di ekosistem dan aktivitas mereka mengurangi kelimpahan predator lain yang berlebih seperti laba-laba dan kumbang carabid. Selain itu, Formicidae adalah perekayasa ekosistem yang mampu memindahkan tanah bercampur bahan-bahan organik, seperti halnya cacing tanah sehingga secara tidak langsung dapat memengaruhi kondisi tanah. Latumahina dkk. (2014) menyebutkan bahwa Formicidae memiliki peran yang unik dalam interaksinya dengan tanaman atau serangga lainnya dan memiliki status fungsional yang cukup luas sebagai predator, *scavenger*, herbivora, detritivora, dan granivora. Kondisi ini menjadikan Formicidae sebagai kelompok hewan terestrial paling dominan di daerah tropis.

Penelitian oleh Nakamura dkk. (2007) membuktikan bahwa kelompok Formicidae mampu digunakan sebagai bioindikator kualitas lingkungan akibat konversi hutan dan kegiatan alih guna lahan di Australia. Keberadaan dan kelimpahan Formicidae dipengaruhi oleh adanya gangguan terhadap lingkungan, seperti pembukaan lahan atau aktivitas antropogenik yang lain. Hal ini ditunjukkan oleh Graham dkk. (2009) dalam penelitiannya yang mengungkapkan bahwa perubahan kekayaan dan kelimpahan spesies Formicidae adalah indikasi dari adanya kerusakan lingkungan terutama akibat aktivitas antropogenik. Selain itu, Ribas dkk. (2012) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa Formicidae dapat digunakan sebagai bioindikator adanya residu arsenik dari aktivitas pertanian di lingkungan khususnya tanah. Formicidae juga dimanfaatkan sebagai bioindikator dalam pemantauan kegiatan pengelolaan hutan oak di Maroko (Verdinelli dkk., 2017).

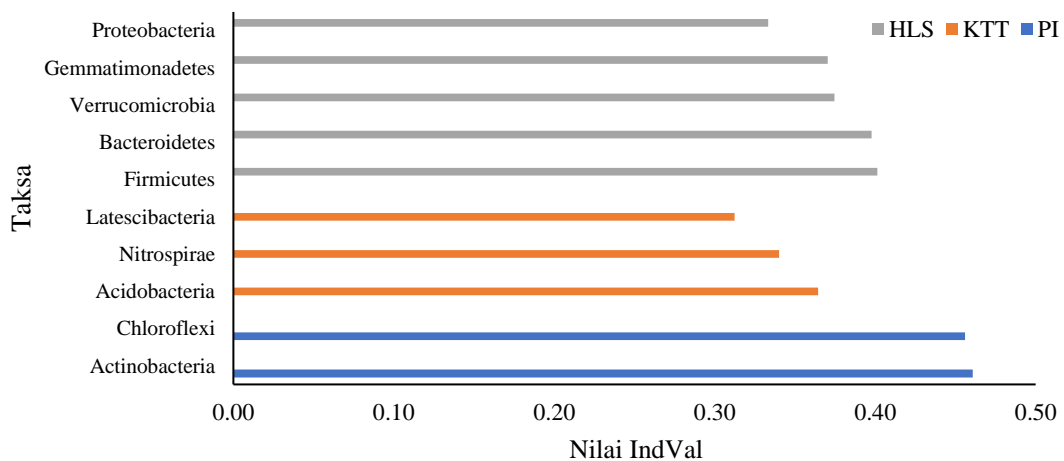


Gambar 24. Kelompok taksa makrofauna tanah yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah berdasarkan penghitungan nilai indikator (IndVal). Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*; *) nilai signifikan pada alpha 5%.

Isotomidae diketahui sebagai anggota Ordo Collembola yang dapat ditemukan di semua tipe ekosistem dengan kelimpahan dan kemampuan reproduksi tinggi (Rohyani, 2020). Isotomidae lebih melimpah pada lokasi yang terbuka dengan banyak mendapat paparan sinar matahari seperti di lokasi PI dan HLS daripada lokasi yang lebih tertutup seperti KTT dan RS. Akibat perubahan struktur vegetasi di kawasan hutan yang dikonversi memiliki dampak pada variabilitas mikroiklim. Pada lokasi tersebut kadar air tanah yang mengindikasikan kelembaban cenderung lebih rendah dibandingkan area hutan. Demikian halnya temperatur tanah, temperatur di area yang terbuka lebih tinggi dibandingkan area lain seperti KTT dan RS. Hal ini sangat dirasakan perbedaannya ketika pengambilan data dilakukan. Menurut Spiller dkk. (2017), keberadaan Famili Isotomidae sangat dipengaruhi variasi mikroiklim terutama temperatur dan kelembaban di habitatnya. Kedua faktor ini menentukan laju reproduksi serta distribusi jenis tersebut di ekosistem. Peneliti menduga bahwa Isotomidae lebih menyukai lingkungan tanah dengan tingkat kelembaban tanah rendah dan temperatur tinggi sehingga mendukung kehidupannya, yang kondisi ini ditemukan di area PI. Famili Silphidae merupakan kelompok taksa yang berpotensi menjadi organisme indikator di lokasi hutan atau RS. Organisme ini banyak ditemukan pada lokasi dengan tingkat gangguan lingkungan minim seperti di RS. Keberadaan organisme kelompok ini mengindikasikan

suatu lingkungan masih terjaga kondisinya dari gangguan atau kerusakan. Penelitian yang dilakukan oleh Creighton dkk. (2009) pada *Nicrophorus*, salah satu genus dari Famili Silphidae, membuktikan bahwa populasi famili ini lebih banyak ditemukan di kawasan hutan yang masih terjaga dibandingkan dengan kawasan hutan yang telah mengalami deforestasi dan fragmentasi di Amerika.

Selain hewan tanah, pada penelitian ini juga menggunakan bakteri tanah untuk ditentukan jenisnya yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah. Berdasarkan analisis nilai IndVal, beberapa kelompok bakteri memiliki nilai IndVal tinggi, seperti Actinobacteria (0,46), Chloroflexi (0,45), dan Firmicutes (0,40). Kelimpahan Actinobacteria memperlihatkan perbedaan pada setiap area yang dibandingkan khususnya pada area dengan gangguan minimal (RS) (Gambar 25). Pembakaran sisa tanaman ketika pembersihan dan pengolahan lahan diduga menjadi salah satu faktor yang menyebabkan rendahnya kelimpahan Actinobacteria di area PI dan KTT. Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian oleh Jiménez-Bueno dkk. (2016) yang menyatakan bahwa pembakaran sisa-sisa tanaman pertanian atau yang lain berdampak pada penurunan kelimpahan Actinobacteria di tanah. Hal ini dimungkinkan karena abu sisa pembakaran tanaman mengubah kandungan bahan organik, pH, dan atau karakteristik kimia lain pada tanah yang merupakan habitat bagi bakteri tanah.

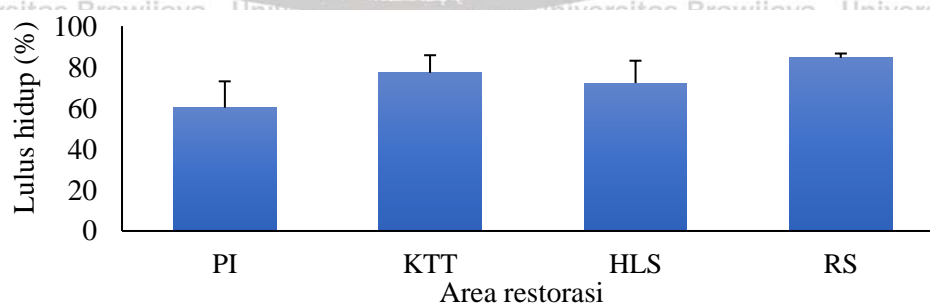


Gambar 25. Kelompok taksa bakteri tanah yang berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah berdasarkan penghitungan nilai indikator (IndVal)
 Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Chloroflexi teramati memiliki kelimpahan yang tinggi di dua lokasi, yaitu KTT dan HLS. Menurut Lee dkk. (2020), Chloroflexi merupakan kelompok bakteri tanah yang umum ditemukan di lingkungan oligotropik dengan konduktivitas elektrik tanah rendah yang biasanya keadaan ini dapat ditemui di tanah pertanian. Area KTT dan HLS adalah dua lokasi dengan nilai konduktivitas elektrik tanah lebih rendah dibandingkan dengan lokasi lain. Trivedi dkk (2016) di dalam hasil penelitiannya menyatakan bahwa pada tanah pertanian, kelimpahan Chloroflexi teramati lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di kawasan yang masih alami tanpa gangguan. Chloroflexi memainkan peran ekofisiologis penting dalam siklus nitrogen di ekosistem dan anggota dari kelompok ini dapat juga mengindikasikan adanya penggunaan pupuk nitrogen inorganik di tanah (Jiménez-Bueno dkk., 2016). Seperti halnya dengan Chloroflexi, Firmicutes juga banyak terdapat di tanah pertanian dibandingkan dengan tanah hutan. Kelompok ini umumnya memiliki prevalensi di lingkungan kopiotropik seperti tanah pertanian yang mendapatkan masukan nutrisi tambahan dan pengolahan tanah yang intensif.

4.4. Kelulushidupan dan Pertumbuhan Beberapa Spesies Pohon Penghijauan di Area Restorasi

Total ada sebanyak 601 individu tanaman penghijauan yang ditanam di area penelitian dengan rincian 312 individu di area PI, 120 individu di area KTT, 110 individu di area HLS, dan 59 individu di area RS. Jenis tanaman yang digunakan dalam penelitian ini ada sebanyak 11 sampai 30 jenis di semua lokasi penelitian. Dari total individu tanaman tersebut, jumlah tanaman yang berhasil hidup berkisar antara 60 – 84% dengan persentase hidup terendah ditunjukkan pada area PI, sedangkan persentase hidup tertinggi terdapat pada area RS (Gambar 26).



Gambar 26. Persentase tanaman penghijauan yang berhasil hidup di masing-masing area restorasi

Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Rendahnya tingkat kelulushidupan tanaman penghijauan di lokasi PI yang merupakan lahan pertanian dikarenakan beberapa hal, berdasarkan pengamatan selama periode pengambilan dan pengumpulan data lapangan. Pertama, kurangnya ketersediaan air yang dikandung dalam tanah. Kondisi lingkungan di PI yang minim vegetasi penutup tanah sebagai akibat aktivitas pertanian berdampak pada tingginya tingkat penguapan air di tanah. Jumlah terbanyak tanaman yang mati teramati terjadi pada periode musim kemarau terutama pada awal-awal masa kegiatan penanaman sekitar pertengahan sampai akhir tahun 2019. Oleh karena itu, penyiraman air pada tanaman dilakukan secara rutin pada periode tersebut agar tanaman penghijauan dapat bertahan hidup. Kedua, mayoritas bibit tanaman yang digunakan memiliki ukuran atau tinggi yang belum ideal (tinggi minimal 20-30 cm). Ukuran bibit tanaman yang demikian berpotensi besar menurunkan daya tahan hidup ketika pindah tanam dan akibat gangguan alami atau antropogenik. Ketiga, faktor gangguan antropogenik. Aktivitas pengolahan lahan seperti pembersihan gulma, penggemburan tanah dengan penyangkulan, dan pembuatan bedengan menjadi faktor yang menyebabkan tingkat kematian tanaman di area ini lebih tinggi dibandingkan dengan area lain. Kematian tersebut dapat disebabkan karena akar atau batang tanaman yang terpotong sehingga berdampak pada tidak optimalnya pertumbuhan. Selain itu, adanya kegiatan orang yang mencari rumput juga menjadi bentuk gangguan lain yang ditemui di lapangan. Gangguan-gangguan yang secara tidak sengaja tersebut banyak terjadi pada tanaman dengan ketinggian 30 cm an meskipun pada setiap tanaman sudah diberi penanda seperti ajir dan label.

Kelulushidupan tiap jenis tanaman restorasi di lokasi PI bervariasi pada rentang 24 – 100%. Kelompok tanaman sukun (*A. altilis*) dan matoa (*P. pinnata*) adalah jenis yang memiliki tingkat lulus hidup terendah (<40%). Pada persentase hidup 40 – 60%, ada beberapa jenis tanaman seperti petai (*P. speciosa*), nangka (*A. heterophyllus*), alpukat (*P. americana*), dan delima (*P. granatum*). Selebihnya adalah jenis tanaman dengan tingkat lulus hidup >60% (Gambar 27A). Jenis tanaman dengan kelulushidupan <40% di area KTT dan HLS agak berbeda dengan PI. Pada KTT, selain sukun, terdapat delima (*P. granatum*) dan durian (*D. zibethinus*) yang menjadi jenis dengan daya hidup rendah sedangkan kukrup (*E. spicata*) adalah jenis tanaman yang tidak mampu bertahan hidup di HLS (Gambar 27B-C). Jenis tanaman penghijauan yang ditanam di area hutan (RS) memiliki komposisi berbeda dibandingkan dengan tiga area lain. Pada area ini, jenis tanaman pohon rimba lebih dominan seperti cempaka (*M. champaca*), gondang (*F. variegata*), *Homalanthus giganteus*, kukrup (*E. spicata*), *Macaranga* sp., *Mallotus* sp., manting (*Syzigium* sp.), pasang (*Lithocarpus* sp.), bima/trete (*M. tomentosa*), dan sukun (Gambar 27D). Sukun merupakan jenis yang juga

menunjukkan kemampuan bertahan hidup yang rendah di lokasi ini. Sukun merupakan jenis tanaman yang selalu menunjukkan kelulushidupan rendah di semua area restorasi dengan persentase berkisar 21 – 37%. Hal ini diduga karena ukuran tanaman yang terlalu kecil sehingga kurang dapat beradaptasi dengan optimal setelah pindah tanam dari *polybag* ke tanah. Selain itu, faktor gangguan manusia juga menjadi salah satu penyebab kematian dari individu ini. Hal ini terbukti dengan ditemukannya beberapa individu sukun yang gagal hidup akibat terpotong atau tertutup tanah ketika bedengan dibuat terutama di area PI.

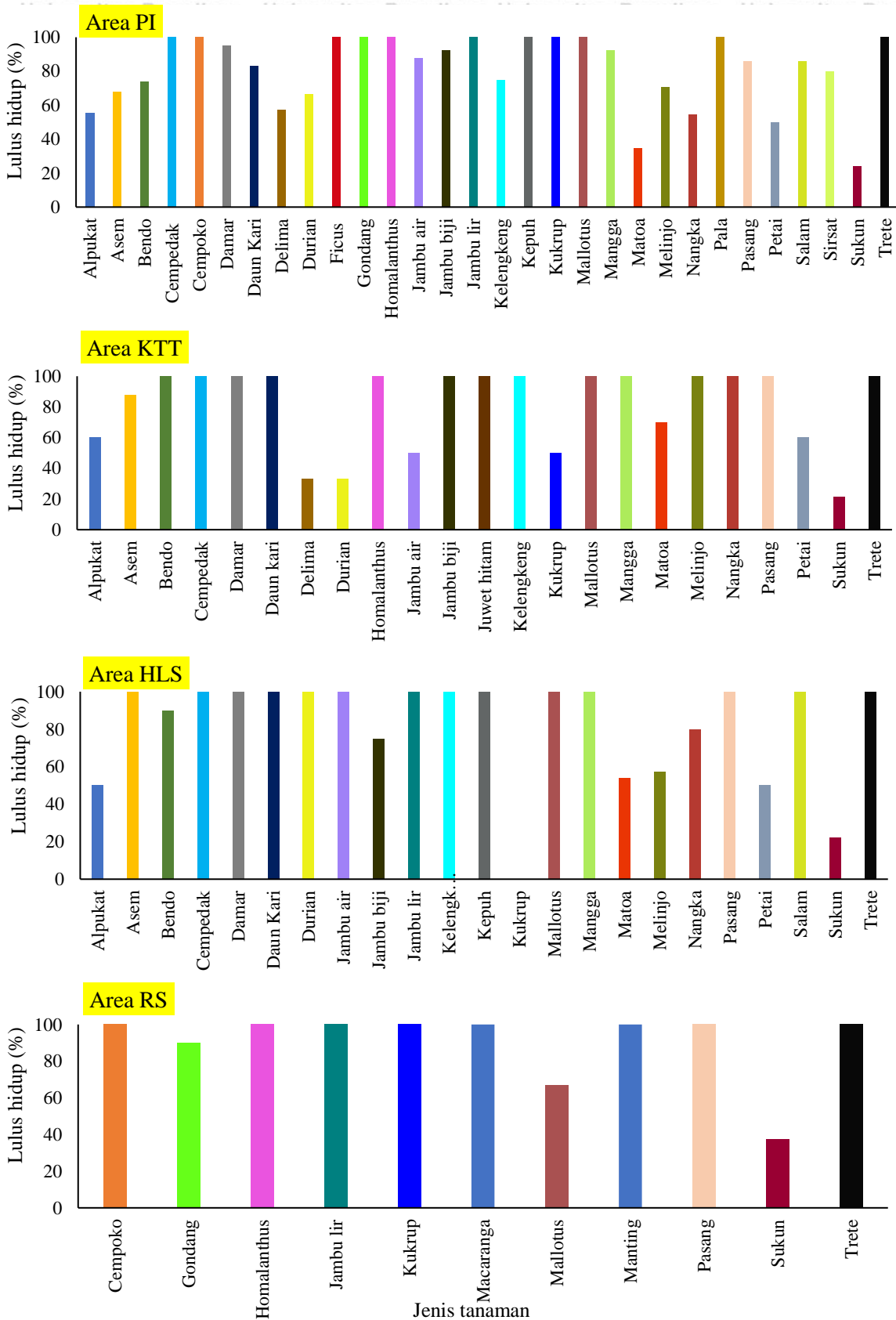
Pertumbuhan tanaman penghijauan selama periode pengamatan (6 – 12 bulan) ditentukan berdasarkan rata-rata nilai pertambahan diameter batang antar waktu pengukuran (Δ diameter). Pada Gambar 28A-C, informasi pertumbuhan tiap jenis tanaman ditampilkan ke dalam tiga bagian, yang semuanya mendapatkan perlakuan +Pgks atau -Pgks. Bagian pertama merupakan pertumbuhan tiap jenis tanaman dengan jumlah individunya memadai untuk dibandingkan, bagian kedua merupakan pertumbuhan tiap jenis tanaman dengan jumlah individunya tidak memadai untuk dibandingkan, dan bagian ketiga adalah pertumbuhan tiap jenis tanaman dengan salah satu perlakuan yang berhasil bertahan hidup.

Pertumbuhan tiap jenis tanaman antar perlakuan di tiga area restorasi (PI, KTT, HLS) menunjukkan variasi tetapi secara statistik tidak berbeda signifikan. Hal ini diduga kuat karena pertambahan ukuran diameter batang antar waktu pengukuran terlalu kecil sehingga tidak tampak perbedaannya. Pada area PI, jenis tanaman pohon rimba seperti *Mallotus* sp., *H. giganteus*, gondang (*F. variegata*), damar (*A. borneoensis*), trete (*M. tomentosa*) memperlihatkan pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan tanaman multiguna lainnya (Gambar 28A). Jenis tanaman multiguna yang memiliki pertumbuhan cepat meliputi daun kari (*M. koenigii*), mangga (*M. indica*), nangka (*A. heterophyllus*), cempedak (*A. integer*), dan sirsak (*A. muricata*). Seperti halnya di area PI, jenis tanaman rimba juga teramati memiliki pertumbuhan lebih cepat dibandingkan dengan jenis lainnya di area KTT. *H. giganteus* dan *Mallotus* sp. adalah jenis dengan pertumbuhan paling cepat kemudian diikuti nangka (+Pgks) (Gambar 28B).

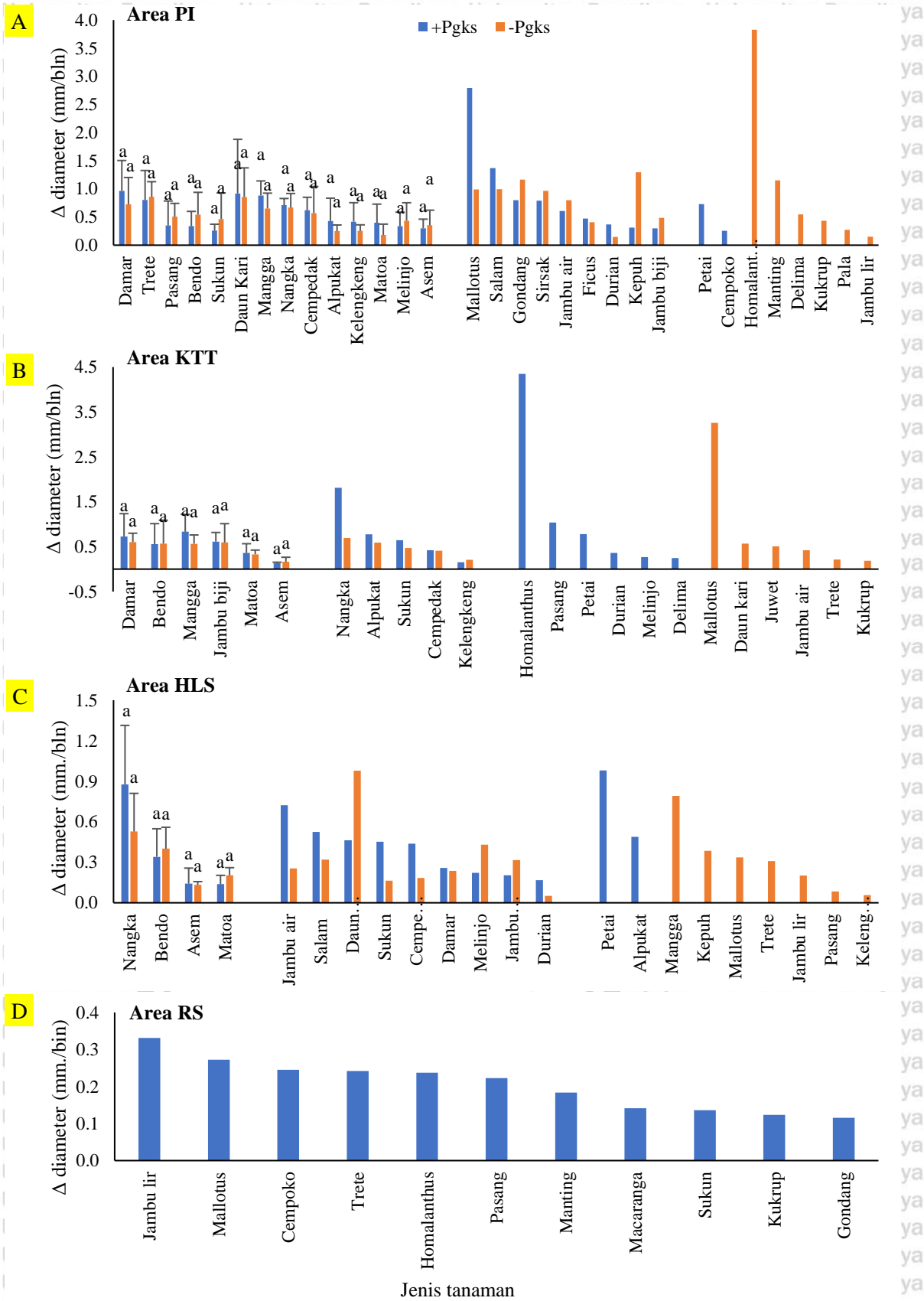
Berbeda halnya dengan area HLS, pertumbuhan jenis tanaman multiguna seperti penghasil buah terlihat lebih cepat dibandingkan dengan pohon rimba yang ditanam di area tersebut (Gambar 28C). Jenis tanaman multiguna tersebut di antaranya nangka (*A. heterophyllus*), daun kari (*M. koenigii*), mangga (*M. indica*), petai (*P. speciosa*), dan jambu air (*S. aquaeum*) sedangkan jenis pohon rimba yaitu bendo (*A. elasticus*), *Mallotus* sp., trete (*M. tomentosa*), damar (*A. borneoensis*), pasang (*Lithocarpus* sp.) dan lain-lain. Pertumbuhan tanaman penghijauan yang ditanam di area RS khususnya jenis-jenis pohon

rimba menunjukkan variasi antar jenis meskipun perbedaannya kecil (Gambar 28D). Semua jenis pohon rimba yang ditanam, jambu lir (*Syzigium* sp.) dan *Mallotus* sp. memiliki pertumbuhan lebih cepat dibandingkan dengan jenis lain, Gondang (*F. variegata*) dan kukrup (*E. spicata*) adalah jenis yang paling lambat pertumbuhannya di lokasi ini.

Daya hidup dan pertumbuhan tanaman secara alami dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kesuburan tanah, iklim, lingkungan biotik, efek antropogenik (Karyati dkk., 2017), dan genetik tanaman. Selain itu, terkadang campur tangan manusia juga menjadi salah satu faktor yang turut berperan dalam hal tersebut khususnya berlaku pada tanaman untuk restorasi. Pertumbuhan tanaman penghijauan di area penelitian dapat dikatakan berjalan lambat selama periode pengamatan berkisar 0,15 – 3,83 mm/bln di PI; 0,16 – 4,35 mm/bln di KTT; 0,06 – 0,98 mm/bln di HLS; dan 0,12 – 0,33 mm/bln di RS. Berdasarkan hal tersebut, pertumbuhan tanaman penghijauan di PI dan KTT cenderung lebih cepat dibandingkan area HLS dan RS. Rata-rata peningkatan diameter batang tanaman di RS adalah paling rendah di antara semua lokasi. Rendahnya nilai ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di RS yang masih banyak terdapat vegetasi hutan dan kanopi yang cukup rapat. Hal ini berdampak pada adanya kompetisi sumber daya pendukung pertumbuhan terutama cahaya matahari. Meskipun kualitas tanah (kadar air, bahan organik, pH, dan konduktivitas elektrik tanah) di RS lebih baik dibanding area lain namun ketersediaan cahaya matahari yang cukup menjadi faktor pembatas bagi pertumbuhan tanaman penghijauan. Selain itu, jarak antar tanaman penghijauan dan tegakan asli hutan diduga juga memengaruhi pertumbuhan tanaman. Mawazin & Suhaendi (2012) dalam penelitiannya menyatakan bahwa peningkatan diameter tahunan dari tanaman dapat dipengaruhi oleh jarak tanam. Jarak tanam antara tanaman penghijauan dan/atau dengan tanaman lain yang terlalu dekat dapat menyebabkan kompetisi untuk memperoleh berbagai sumberdaya yang dibutuhkan bagi kehidupan dan pertumbuhan. Area PI dan KTT memiliki lingkungan lebih terbuka karena tidak banyak terdapat tegakan pohon besar dengan kanopi lebar yang menghalangi sinar matahari. Meski kesuburan tanah di kedua area ini tidak lebih bagus dari RS tetapi mampu memberikan suplai sumber daya yang cukup bagi pertumbuhan tanaman, dengan ketersediaan cahaya matahari yang cukup.



Gambar 27. Kelulushidupan tiap tanaman penghijauan di masing-masing area restorasi
 Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur;
 HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder
 sebagai *reference site*.



Gambar 28. Pertumbuhan tiap jenis tanaman penghijauan di area restorasi

Keterangan: PI: lahan pertanian intensif; KTT: kebun kopi monokultur; HLS: HL tersisa dengan tanaman budidaya campuran; RS: hutan sekunder sebagai *reference site*.

Kematian tanaman penghijauan pada tahun pertama restorasi mencapai 20-40% dengan kematian tertinggi teramati di area PI. Mortalitas tanaman pada penelitian ini tidak berbeda jauh dibandingkan jenis tanaman penghijauan lain seperti *Aritotelia serrata*, *Cordyline australis*, *Pittosporum eugenoides*, dalam penelitian yang dilakukan oleh Anton dkk. (2015) di New Zealand dengan persentase berkisar 11-38%. Pada penelitian tersebut juga disebutkan bahwa kematian tertinggi terjadi pada tanaman dengan ukuran pendek atau kecil, hal yang sama ini juga teramati pada penelitian di UBF. Adanya kompetisi dari tanaman liar di sekitar tanaman penghijauan diduga menjadi salah satu faktor penyebab kematian tanaman selain faktor edafis dan yang lain. Menurut Anton dkk. (2015) dan Bhadouria dkk. (2020), mengurangi biomassa atau menjaga kondisi tanaman liar tetap di bawah ketinggian tanaman penghijauan dapat menurunkan persaingan dan meningkatkan kelangsungan hidup. Selain itu, manajemen yang tepat selama dan setelah penanaman, misalnya menggunakan teknik penanaman yang memadai, menghindari pemotongan tanaman yang tidak disengaja, juga mengurangi tingkat kematian.

Pemberian perlakuan pemangkasan atau pembersihan tanaman liar di sekitar tanaman penghijauan memberikan hasil bervariasi pada pertumbuhan tiap jenis tanaman di setiap lokasi. Tanaman dengan perlakuan tersebut menunjukkan pertumbuhan lebih cepat dibandingkan tanaman tanpa perlakuan meskipun secara statistik tidak berbeda signifikan. Hasil penelitian ini konsisten dengan studi Jurisch dkk. (2013) di Afrika Barat dan Bhadouria dkk. (2020) di area hutan tropis India, yang menyatakan bahwa bibit tanaman dapat terpengaruh negatif akibat kompetisi dengan berbagai flora tanah untuk sumber daya baik yang terdapat di atas dan di bawah tanah, yang dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan secara signifikan. Faktor internal seperti genetik dan kemampuan adaptasi juga menjadi faktor lain yang turut memengaruhi kemampuan pertumbuhan dari tanaman penghijauan yang digunakan.

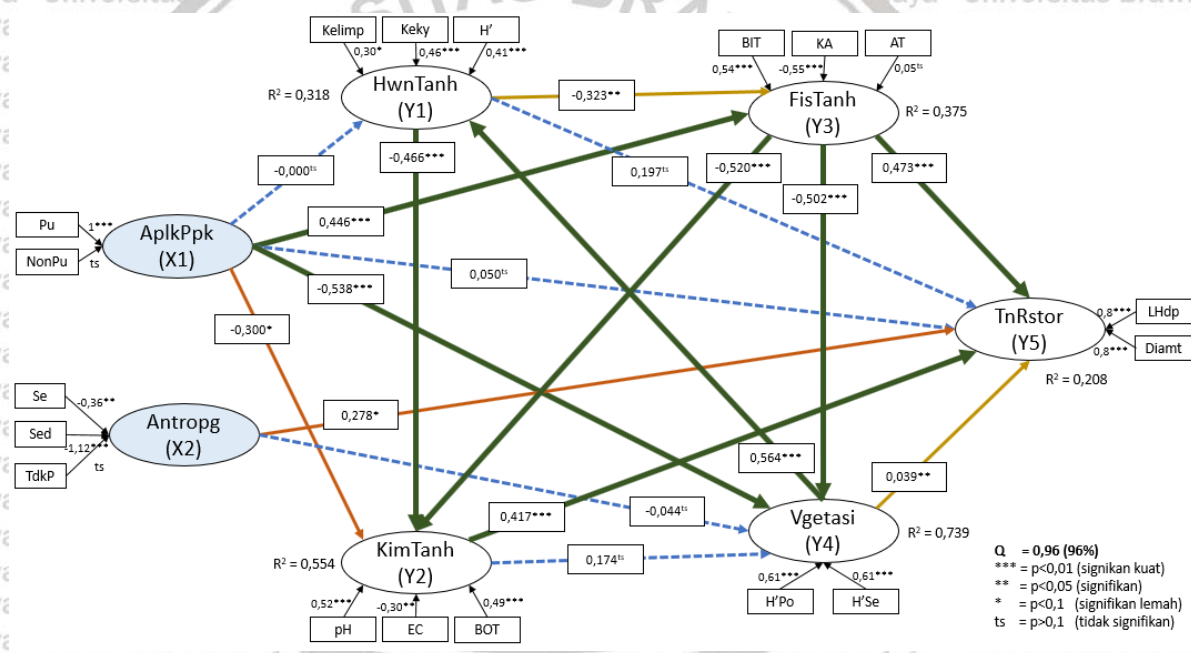
4.5. Interaksi Antar Variabel yang Berkontribusi pada Kelulushidupan dan Keberhasilan Pertumbuhan Tanaman di Area Restorasi Hutan Lindung UBF

Pemodelan multivariat dengan menggunakan metode *structural equation modeling* (SEM) diaplikasikan dalam penelitian ini guna menentukan interaksi berbagai variabel yang berkontribusi terhadap kelulushidupan dan pertumbuhan tanaman penghijauan. Pada pengujian awal model, hasil analisis menunjukkan bahwa ada satu variabel laten yang tidak signifikan, yaitu Pengolahan lahan, sehingga variabel ini perlu dihilangkan dari model dalam pengujian berikutnya (Lampiran 3). Hasil analisis lanjutan dari model yang dikembangkan

dapat dilihat pada Gambar 29. Berdasarkan hasil tersebut, daya hidup dan pertumbuhan tanaman restorasi (TnRstor) dipengaruhi beberapa variabel seperti karakteristik fisika-kimia tanah (FisTanh, KimTanh), komunitas tumbuhan di masing-masing area (Vgetasi), dan gangguan manusia (Antropg) sedangkan dua variabel lain yaitu komunitas makrofauna tanah (HwnTanh) dan aktivitas penggunaan pupuk oleh petani (AplkPpk) tidak termasuk salah satunya. Nilai koefisien determinasi (Q) dari model menunjukkan angka 0,96. Hal ini menginformasikan bahwa model yang dikembangkan sangat baik dan mampu menjelaskan fenomena yang diteliti sebesar 96% dari data yang digunakan.

Kelulushidupan dan pertumbuhan tanaman penghijauan sangat dipengaruhi kondisi lingkungan khususnya tanah sebagai tempat tanaman tumbuh. Karakteristik fisika dan kimia tanah menjadi faktor penting yang mendukung pertumbuhan dari tanaman penghijauan. Kedua faktor tersebut ditunjukkan memiliki nilai hubungan positif yang sangat signifikan dengan kehidupan dan pertumbuhan tanaman ($p < 0,01$). Dengan semakin baiknya kualitas tanah maka akan diikuti dengan pertumbuhan optimal dari tanaman. Selain itu, kondisi awal komunitas vegetasi di area restorasi juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tanaman penghijauan ($p < 0,05$). Pada penelitian ini, keanekaragaman pohon dan semai/tumbuhan bawah digunakan sebagai indikator untuk membentuk variabel Vgetasi dalam model. Area dengan vegetasi pohon rapat, khususnya pohon berdiameter besar dan kanopi lebar, akan memiliki kondisi iklim mikro berbeda dengan area yang terbuka (sedikit pohon). Hal ini tentunya berdampak pada adanya kompetisi untuk memperoleh sumber daya (nutrisi, air, cahaya matahari) dengan vegetasi asli sehingga turut memberikan efek terhadap daya hidup dan pertumbuhan tanaman penghijauan. Perbedaan komunitas vegetasi di masing-masing area juga mengakibatkan adanya variasi vegetasi semai/tumbuhan bawah. Komunitas semai/tumbuhan bawah juga menjadi kompetitor bagi tanaman penghijauan di area penelitian. Pada area terbuka, seperti PI, kelompok tumbuhan bawah dari golongan Asteraceae teramati mampu mengkolonisasi area dengan cepat sehingga berpotensi memengaruhi pertumbuhan tanaman restorasi. Sementara itu, aktivitas manusia yang mengganggu tanaman penghijauan seperti pembasmian gulma, mencari rumput, menunjukkan pengaruh yang tidak besar ($p < 0,1$) terhadap keberlangsungan hidup tanaman penghijauan di area restorasi. Beberapa kasus terganggu atau kematian tanaman penghijauan memang diduga kuat akibat faktor manusia karena ada bukti-bukti yang menguatkan hal tersebut. Namun, faktor tersebut tidak menjadi variabel yang signifikan dalam memengaruhi kehidupan tanaman penghijauan secara keseluruhan. Hal ini dikarenakan kejadian tersebut lebih sering terjadi di lahan pertanian (PI) dibandingkan dengan lokasi lainnya.

Aktivitas petani dalam penggunaan pupuk di lahan tidak secara langsung memengaruhi tanaman penghijauan. Demikian halnya dengan komunitas hewan tanah, variabel tersebut menunjukkan hubungan langsung yang tidak signifikan dalam memengaruhi pertumbuhan tanaman penghijauan. Aplikasi pupuk, baik organik atau inorganik, yang diamati di lapangan memengaruhi tanaman penghijauan melalui dampaknya terhadap perubahan karakteristik fisika dan kimia tanah (Gambar 29). Lebih mudahnya, pengaruh pemberian pupuk dapat dikatakan tidak secara langsung berdampak pada tanaman penghijauan. Hasil pemodelan menginformasikan bahwa pemberian pupuk ke tanah secara signifikan kuat ($p < 0,01$) memengaruhi karakteristik fisika tanah namun tidak terlalu kuat pada variabel kimia tanah ($p < 0,1$). Demikian juga dengan komunitas makrofauna tanah, kelompok fauna ini memengaruhi tanaman restorasi melalui perannya di ekosistem sebagai *soil engineer* atau dekomposer yang kemudian menyebabkan perubahan kualitas tanah.



Gambar 29. Interaksi faktor biotik, abiotik lingkungan, antropogenik yang berkontribusi terhadap daya hidup dan pertumbuhan tanaman penghijauan di area restorasi
 Keterangan: AplkPpk: Penggunaan pupuk; Antropg: Gangguan manusia; HwnTanh: Komunitas makrofauna; KimTanh: Karakteristik kimia tanah; FisTanh: Karakteristik fisika tanah; Vgetasi: Komunitas vegetasi; TnRestorasi: Kelulushidupan & pertumbuhan tanaman penghijauan; Pu: menggunakan pupuk; NonPu: tidak menggunakan pupuk; Se: gangguan sering; Sed: gangguan sedang; TdkP: tidak ada gangguan; Kelimp: kelimpahan; Keyk: kekayaan taksa; H': keanekaragaman; pH: keasaman tanah; EC: konduktivitas elektrik tanah; BOT: bahan organik tanah; BIT: bobot isi tanah; KA: kadar air; AT: agregat tanah; H'Se: keanekaragaman semai/tumbuhan bawah; H'Po: keanekaragaman pohon; LHdp: kelulushidupan tanaman penghijauan; Diamt: peningkatan diameter batang.

Karakteristik fisika (FisTanh) dan kimia (KimTanh) tanah menjadi variabel yang paling signifikan memengaruhi tanaman penghijauan (TnRstor) berdasarkan hasil uji dalam pemodelan. Kedua variabel tersebut dapat memberikan pengaruh baik secara langsung atau tidak langsung dengan melalui variabel ketiga (antara): Variabel fisika tanah memberikan pengaruh langsung sebesar 22,3% dan pengaruh tidak langsung melalui variabel vegetasi sebesar 24,2% dengan pengaruh total sebesar 46,5% terhadap variabel tanaman penghijauan. Untuk variabel kimia tanah, besarnya pengaruh langsung, tidak langsung, dan total terhadap tanaman penghijauan lebih rendah dibandingkan dengan variabel fisika tanah dengan nilai masing-masing 17,4%, 17,8%, dan 35,2%. Karakteristik fisika tanah memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan karakteristik kimia tanah pada penelitian ini.

Tabel 3. Pengaruh tidak langsung antara variabel independen (X) dan dependen (Y)

No.	Pengaruh tidak langsung antar variabel			Koef.	SE	P-value	Ket
1	AplkPpk (X1)	HwnTanh (Y1)	KimTanh (Y2)	0,000	0,104	0,996	Nonsig
2	AplkPpk (X1)	HwnTanh (Y1)	FisTanh (Y3)	0,000	0,072	0,996	Nonsig
3	AplkPpk (X1)	HwnTanh (Y1)	TnRstor (Y5)	0,000	0,039	0,996	Nonsig
4	AplkPpk (X1)	KimTanh (Y2)	Vgetasi (Y4)	-0,052	0,067	0,436	Nonsig
5	AplkPpk (X1)	KimTanh (Y2)	TnRstor (Y5)	-0,130	0,100	0,194	Nonsig
6	AplkPpk (X1)	FisTanh (Y3)	KimTanh (Y2)	-0,224	0,113	0,047	Sig 5%
7	AplkPpk (X1)	FisTanh (Y3)	Vgetasi (Y4)	-0,224	0,113	0,047	Sig 5%
8	AplkPpk (X1)	FisTanh (Y3)	TnRstor (Y5)	0,211	0,110	0,055	Sig 10%
9	AplkPpk (X1)	Vgetasi (Y4)	HwnTanh (Y1)	-0,303	0,125	0,015	Sig 5%
10	AplkPpk (X1)	Vgetasi (Y4)	TnRstor (Y5)	0,182	0,112	0,104	NonSig
11	Antropg (X2)	Vgetasi (Y4)	HwnTanh (Y1)	-0,025	0,123	0,840	NonSig
12	Antropg (X2)	Vgetasi (Y4)	TnRstor (Y5)	-0,059	0,075	0,432	NonSig

Ada atau tidaknya pemberian pupuk ke tanah (AplkPpk) oleh petani memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisika tanah (FisTanh) dan kimia tanah (KimTanh). Moebius-Clune dkk. (2011) melaporkan bahwa degradasi bahan organik tanah akan meningkat seiring dengan peningkatan lama waktu konversi hutan menjadi lahan pertanian, apabila tidak diimbangi dengan penambahan pupuk organik maupun pengembalian sisa panen. Selain itu, praktek pemupukan yang kurang tepat juga dapat berdampak pada terjadinya degradasi sifat fisik dan kimia tanah. Sebagai contoh aplikasi pupuk anorganik, Bhatt dkk. (2019) menyatakan bahwa dampak negatif dari aplikasi pupuk anorganik secara terus-menerus adalah percepaan dekomposisi bahan organik yang dapat berakibat pada penurunan agregasi tanah dan peningkatan bobot isi tanah. Selain itu, aplikasi pupuk anorganik juga dapat merusak dekomposer dan organisme tanah lainnya. Hal ini ditunjukkan dengan nilai koefisien -0,224 pada $p < 0,05$. Tanda negatif pada koefisien menandakan bahwa

adanya aplikasi pupuk (anorganik) ke lahan dapat menurunkan kualitas fisika dan kimia tanah. Oleh karena itu, aplikasi pupuk organik perlu dilakukan pada lahan lokasi penelitian guna meningkatkan kandungan bahan organik tanah sekaligus memperbaiki struktur tanah, menurunkan bobot isi tanah, dan meningkatkan kemampuan tanah menahan air (memperbaiki kelembaban tanah). Aplikasi pupuk juga secara tidak langsung, melalui faktor fisika tanah, memengaruhi kondisi vegetasi (Vgetasi) dan tanaman penghijauan (TnRstor) dengan nilai koefisien jalur masing-masing $-0,224$ ($p < 0,05$) dan $0,211$ ($p < 0,1$). Komunitas hewan tanah (HwnTanh) dipengaruhi secara tidak langsung oleh adanya aplikasi pupuk (ApkPpk) melalui kondisi vegetasi di masing-masing lokasi (Vgetasi) dengan nilai koefisien jalur $-0,303$ ($p < 0,05$) (Tabel 3). Berdasarkan hasil analisis jalur pada Gambar 29 dan Tabel 3, kondisi tanah terutama karakteristik fisika menjadi variabel mediasi dalam pemodelan yang dikembangkan.

Karakteristik fisika tanah di semua area restorasi cenderung menunjukkan kesamaan satu dengan yang lain seperti. Namun, peneliti menduga satu indikator dari variabel fisika tanah yaitu kadar air tanah menjadi karakteristik yang berpengaruh besar. Hal ini didukung dengan nilai bobot indikator kadar air tanah (KA) memiliki nilai paling signifikan dan valid dalam membentuk variabel fisika tanah. Kadar air tanah menentukan seberapa tinggi kelembaban tanah yang tentunya memengaruhi pertumbuhan tanaman. Menurut Sovu dkk. (2010), kelembaban tanah merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman, selain faktor lainnya seperti cahaya, nutrisi, dan gangguan lingkungan. Lahan dengan kelembaban tanah yang rendah dapat membatasi pertumbuhan sistem perakaran dan peningkatan biomassa tanaman secara optimal di suatu area (Liao dkk., 2012). Tingkat kelembaban tanah juga akan memengaruhi dekomposisi, metabolisme bakteri tanah, mineralisasi unsur hara sehingga turut menentukan seberapa besar tingkat keasaman tanah (pH), kandungan bahan organik tanah, ketersediaan unsur hara serta parameter kesuburan tanah lainnya. Selain kadar air tanah, bobot isi tanah (BIT) juga menjadi faktor penting yang memengaruhi karakteristik tanah lain yang lain. Bobot isi tanah sangat terkait dengan tingkat kepadatan tanah. Struktur tanah yang padat mempunyai efek negatif terhadap lingkungan dan produktivitas tanaman. Tanah yang padat menyebabkan terbatasnya pertumbuhan akar untuk mendapatkan air dan nutrisi, menurunkan pertukaran gas dalam tanah, menurunkan laju respirasi akar, dan dekomposisi serasah.

4.6. Pembahasan Umum

Kawasan hutan lindung menyediakan berbagai jasa layanan ekosistem yang membantu dalam pemenuhan kebutuhan masyarakat lokal yang tinggal di dalam dan di sekitar area tersebut. Meskipun kawasan lindung biasanya telah disisihkan dari eksploitasi manusia, saat ini semakin diakui bahwa area tersebut juga memainkan peran dalam mempertahankan kehidupan masyarakat lokal yang hidup tinggal berdekatan. Oleh karena itu, eksploitasi hutan lindung berupa konversi atau alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian, perkebunan, atau bentuk lain semakin banyak terjadi di berbagai tempat. Hal ini berdampak pada degradasi kualitas ekosistem hutan. Faktor-faktor yang berpotensi menjadi penyebab eksploitasi hutan lindung secara berlebihan oleh manusia di antaranya kondisi sosioekonomi, rendahnya pengetahuan tentang fungsi dan biodiversitas hutan, serta pengelolaan kawasan hutan yang kurang tepat.

Pada umumnya, masyarakat yang tinggal di dalam atau sekitar kawasan hutan memiliki pekerjaan utama sebagai petani hutan yang hidupnya sangat bergantung pada sumberdaya di dalamnya. Selain itu, mayoritas petani hutan ini memiliki tingkat pendidikan atau perekonomian tidak lebih baik dibandingkan masyarakat perkotaan yang mudah mendapatkan fasilitas pendidikan atau umum lainnya. Beberapa penelitian lain menunjukkan hasil bahwa level pendidikan memengaruhi tingkat pengetahuan dan pemahaman warga lokal terkait peran dan manfaat area lindung di ekosistem hutan. Semakin tinggi pendidikan warga diikuti dengan pengetahuan atau pemahaman warga tentang hutan lindung. Namun, hal tersebut tidak sejalan dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini. Meskipun warga lokal memiliki pendidikan yang tidak tinggi namun pengetahuan dan pemahaman mereka tentang hutan lindung cukup baik. Hal ini diduga pengalaman mereka selama puluhan tahun beraktivitas dan berinteraksi di hutan menjadi pengetahuan lokal yang patut diapresiasi.

Beberapa pernyataan responden penelitian menyebutkan bahwa kebutuhan ekonomi menjadi aspek yang sulit untuk tidak diperhatikan. Kecilnya luas lahan budidaya yang dikelola saat ini memaksa beberapa petani membuka area lindung untuk dimanfaatkan guna menambah pendapatan ekonomi mereka. Oleh karena itu, menurut Chowdhury dkk. (2014), kebutuhan, aspirasi, sikap dari warga lokal harus selalu dipertimbangkan dalam upaya pengelolaan area hutan. Selain itu, kebijakan-kebijakan terkait pengelolaan kawasan hutan oleh pengelola atau pemangku kepentingan juga menjadi aspek yang perlu diintegrasikan secara baik dengan kepentingan sosial masyarakat. Rashid dkk. (2013) menunjukkan bahwa dukungan dan keterlibatan masyarakat lokal harus dimasukkan dalam pengelolaan

kolaboratif pada kawasan lindung, jika tidak, upaya konservasi kawasan tersebut tidak akan efektif. Strategi pelibatan masyarakat lokal dalam mendukung kegiatan restorasi dapat diwujudkan melalui pengembangan persemaian bibit tanaman hutan untuk penghijauan. Bibit-bibit tanaman hutan yang disemai oleh masyarakat dapat dimanfaatkan dan dijual kepada yang membutuhkan untuk kegiatan pemulihan area hutan terdegradasi sehingga dengan begitu masyarakat juga memperoleh tambahan pemasukan ekonomi.

Aktivitas konversi atau alih fungsi hutan menjadi berbagai lahan pemanfaatan baik pada masa lampau atau kini berdampak langsung terhadap kondisi vegetasi alami hutan. Perubahan struktur dan komposisi teramati dalam penelitian ini yang menunjukkan adanya penurunan jumlah, jenis, dan diversitas vegetasi di area pemanfaatan dibandingkan area hutan. Dampak alih fungsi hutan menjadi berbagai tipe lahan pemanfaatan terhadap perubahan struktur dan komposisi vegetasi juga dinyatakan dalam penelitian Pitopang (2012) di kawasan hutan Sulawesi Tengah. Perubahan vegetasi ini berdampak pada jasa layanan ekosistem hutan, hal ini ditunjukkan salah satunya dari hasil penelitian Martínez dkk. (2009). Selain itu, struktur vegetasi yang berubah ini turut memengaruhi ekosistem tanah di masing-masing area penelitian di UBF. Kondisi tanah di area hutan yang dialihfungsikan memperlihatkan penurunan kualitas jika dibandingkan dengan hutan alam terutama pada karakter fisika tanah (kelembaban, bobot isi tanah). Sistem penanaman monokultur yang sering diaplikasikan oleh petani di lahan hasil konversi hutan berdampak kurang baik pada tanah. Dalam hasil analisisnya, Liao dkk. (2012) menyatakan bahwa perubahan komunitas vegetasi hutan alam menjadi tanaman monokultur (seperti hutan tanaman, perkebunan, dan pertanian) menyebabkan terjadinya pemadatan tanah, rendahnya bahan organik dan kandungan nitrogen tanah, dan rendahnya kelembaban tanah. Oleh karena itu, berdasarkan analisis tersebut, Liao dkk. (2012) menyarankan untuk tidak menerapkan sistem tersebut jika ingin mempertahankan keberlanjutan ekosistem hutan.

Struktur komunitas makrofauna dan bakteri tanah adalah organisme yang juga sensitif terhadap perubahan lingkungan di sekitarnya. Bentuk alih fungsi hutan memengaruhi makrofauna melalui perubahan pada pola kelimpahan, kekayaan taksa, dan diversitas.

Penelitian yang dilakukan oleh Silva dkk. (2018) memperlihatkan bahwa sistem dan perbedaan pengelolaan lahan pertanian dan di hutan menyebabkan variabilitas spasial hewan tanah di masing-masing area. Hal ini juga teramati dalam penelitian di kawasan UBF yang dilakukan. Penelitian lain yang dilakukan oleh Prayogo dkk. (2019) di beberapa tipe agroforestri pinus-kopi UBF juga menunjukkan pengaruh dari sistem pengelolaan lahan terhadap komunitas hewan tanah. Bakteri tanah merupakan komponen penting dari fungsi

tanah dan karena itu dianggap sebagai bagian integral dari setiap program yang ditujukan untuk pemulihan ekosistem (Harris, 2009). Namun, perkembangan bakteri tersebut juga dipengaruhi oleh banyak faktor. Sifat tanah, seperti jenis, kelembaban, bahan organik, dan pH tanah memiliki dampak yang signifikan terhadap struktur komunitas bakteri tanah. Vegetasi di atas permukaan tanah juga memengaruhi komposisi komunitas bakteri tanah, hal ini ditunjukkan dari hasil penelitian oleh Lee-Cruz dkk. (2013), Mendes dkk. (2015), dan Sun dkk. (2020). Dengan karakteristik sensitif terhadap perubahan lingkungan, makrofauna dan bakteri tanah sangat berpotensi menjadi bioindikator yang dapat dimanfaatkan dalam pemantauan keberhasilan restorasi hutan.

Pemulihan ekosistem hutan lindung terdegradasi melalui restorasi dengan menggunakan berbagai jenis tanaman lokal multiguna, perpaduan antara tanaman rimba dan buah, diaplikasikan di area penelitian UBF. Kegiatan ini diharapkan dapat memulihkan terutama fungsi hutan lindung meski secara struktur vegetasi sulit untuk disamakan dengan kondisi awal. Löffler dkk. (2019) berpendapat bahwa penggunaan kondisi ekosistem masa lalu sebagai target dan kriteria keberhasilan restorasi mungkin akan berubah seiring waktu disebabkan oleh perubahan orientasi kebutuhan dan kondisi masa depan yang tidak pasti. Pada penelitian ini, penggunaan vegetasi polikultur dari jenis tanaman lokal multiguna yang memiliki daya hidup dan pertumbuhan bervariasi diaplikasikan dalam upaya restorasi hutan. Hal ini, selain memperhatikan aspek ekologi, juga mempertimbangkan jasa layanan yang diterima oleh warga lokal dari segi aspek ekonomi yang berasal dari produk tanaman restorasi di masa mendatang. Dengan demikian, keberlanjutan fungsi ekosistem hutan dan ekonomi masyarakat dapat terjamin. Restorasi yang dilakukan di ekosistem hutan pegunungan menengah-tinggi, seperti yang dilakukan pada penelitian ini, tentu berbeda dengan di pegunungan bawah (rendah). Jenis vegetasi dan tanah menjadi faktor yang sangat memengaruhi keberhasilan restorasi yang dilakukan. Jenis vegetasi yang digunakan dalam restorasi tentu akan menyesuaikan kondisi ekosistem yang dipulihkan, seperti kondisi tanah, agar pertumbuhan dan kelulushidupan tanaman tersebut terjamin.

Berdasarkan hasil penelitian ini, rekomendasi yang dapat diberikan kepada pihak pengelola UBF berkenaan dengan program pemulihan area hutan lindung terdegradasi.

1. Beberapa jenis tanaman penghijauan dengan daya hidup dan pertumbuhan unggul, seperti bendo (*A. elasticus*), daun kari (*M. koenigii*), nangka (*A. heterophyllus*), *Homalanthus giganteus*, *Mallotus* sp., damar (*A. borneoensis*), gondang (*F. variegata*), dan trete/bima (*M. tomentosa*), memiliki prospek yang bagus untuk digunakan sebagai tanaman restorasi hutan pegunungan UBF.

2. Guna mendukung pertumbuhan tanaman penghijauan yang optimal, campur tangan warga atau pelaku restorasi dalam wujud pemangkasan tanaman liar atau gulma di sekitar tanaman penghijauan perlu diintensifkan agar memberikan dampak yang lebih besar. Mengingat ketersediaan air di area restorasi sangat terbatas, maka untuk menjaga kelembaban tanah dapat terjaga dalam waktu yang lama terutama ketika musim kemarau, pembuatan kolam penampung air saat musim hujan dapat diterapkan di area restorasi. Air hasil tampungan di kolam tersebut dapat digunakan untuk menyiram tanaman penghijauan sehingga kekeringan ekstrim dapat diminimalkan. Selain itu, warga lokal perlu dilibatkan secara aktif dalam kegiatan pengelolaan hutan secara kolaboratif. Hal ini dapat diwujudkan dengan memberdayakan warga lokal dalam mengembangkan pembibitan pohon rimba lokal secara mandiri yang stok bibit tanaman tersebut dapat digunakan untuk penghijauan di kemudian hari.

Penelitian ini menggambarkan keadaan bahwa restorasi yang dilakukan mungkin akan menghasilkan ekosistem baru (*novel ecosystem*) karena jika tanaman penghijauan berhasil bertahan hidup dalam waktu lama membentuk struktur komunitas tumbuhan yang berbeda dengan kondisi awal. Perbedaan tersebut tentu akan menghasilkan kondisi lingkungan biotik dan abiotik yang juga berbeda (Hobbs dkk., 2006, 2009). Praktek restorasi yang dilakukan tidak lagi berorientasi ke susunan komposisi tetapi beralih ke target fungsional. Hal ini dikarenakan lebih sesuai dengan keadaan dan kebutuhan lingkungan di masa mendatang. Penelitian lain dilakukan oleh Perring dkk. (2012) untuk melihat bagaimana ekosistem baru yang terbentuk menyediakan fungsi dan layanan ekosistem yang bernilai dari sebelumnya. Kemudian penelitian oleh Firn dkk. (2013) juga dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh dari penggunaan spesies bukan asli (*non-native*) terhadap fungsi ekosistem yang dihasilkan dari sistem baru tersebut. Untuk menentukan apakah ekosistem yang terbentuk dari restorasi itu dikatakan baru atau tidak telah dikaji oleh Majer dkk. (2013). Pada penelitiannya, Majer dkk. (2013) menggunakan keanekaragaman hayati semut sebagai indikator di habitat yang sesuai, informasi tersebut diperoleh dengan membandingkan dua set data jangka panjang (37 tahun) pemantauan hutan jarrah yang direhabilitasi setelah penambangan bauksit di Australia Barat. Restorasi yang dilakukan pada penelitian ini, dalam jangka panjang, dapat digunakan untuk melengkapi informasi dan menguraikan fungsi dan layanan ekosistem berbeda dari ekosistem baru yang terbentuk. Mengingat bahwa restorasi di penelitian ini dilakukan pada beberapa tipe lahan berbeda, jadi sangat dimungkinkan dampak ekosistem baru tersebut terlihat. Penggunaan mikroorganismenya khususnya bakteri

tanah, seperti pada penelitian ini, dapat menjadi bioindikator yang relatif cepat digunakan untuk menentukan status dari ekosistem yang baru terbentuk.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Petani hutan yang menggarap lahan di dalam atau berdekatan dengan kawasan lindung UBF menunjukkan sikap mendukung kegiatan restorasi yang dilakukan. Selain itu, sebagian besar petani responden menyatakan ketidaksetujuan dengan adanya pembukaan lahan di hutan lindung yang saat ini banyak terjadi. Para petani menggarap lahan sudah dalam waktu yang lama sehingga pengetahuan tentang sejarah, kondisi awal, fungsi, dan letak dari kawasan hutan UB cukup bagus. Petani mendukung upaya pemulihan ekosistem hutan lindung UB terdegradasi dengan menggunakan beragam jenis pohon multiguna yang mengkombinasikan pohon rimba dan buah lokal bernilai ekonomi.
2. Komunitas vegetasi pohon, tiang, pancang di ketiga area restorasi PI, KTT, HLS cenderung sama baik dari segi kerapatan individu atau kekayaan jenis dan berbeda dengan RS. Komunitas tumbuhan bawah di keempat lokasi menunjukkan perbedaan kekayaan jenis, diversitas, dan komposisi penyusunnya. Sementara itu, kualitas tanah di ketiga area yang dikelola petani cenderung sama baik dari karakteristik fisika atau kimia tanah tetapi tidak lebih baik dari tanah hutan di RS. Komposisi taksa penyusun komunitas makrofauna tanah di semua area memperlihatkan pola berbeda. Diversitas rendah dan dominansi tinggi dari makrofauna terutama teramati di area PI, sebagai dampak dari aktivitas pertanian. Demikian halnya dengan komunitas bakteri tanah, komposisi bakteri penyusun komunitas teramati berbeda di setiap lokasi pada level genus. Aktivitas alih fungsi lahan tidak menurunkan diversitas *alpha* bakteri di area PI, KTT, dan HLS, tetapi dampak aktivitas tersebut terlihat pada nilai diversitas *beta* bakteri.
3. Beberapa taksa makrofauna dan bakteri tanah memiliki potensi untuk dijadikan bioindikator di lingkungan tanah yang mengalami degradasi akibat alih fungsi lahan. Formicidae dan Isotomidae merupakan kelompok hewan tanah yang dapat mengindikasikan kondisi tanah yang mengalami degradasi, sedangkan Silphidae, Talitridae, Armadillididae adalah taksa yang berpotensi sebagai bioindikator tanah berkualitas baik. Untuk bakteri tanah, kelompok Actinobacteria, Chloroflexi, Firmicutes dapat dimanfaatkan sebagai petunjuk terjadinya penurunan kualitas tanah di ekosistem.
4. Keberhasilan hidup tanaman restorasi berada dalam rentang 60-84% dengan faktor yang memengaruhi yaitu kondisi tanah, vegetasi awal, dan gangguan manusia. Pertumbuhan tanaman penghijauan dari kelompok pohon rimba lebih baik dibandingkan dengan jenis

pohon buah yang di tanam di lokasi penelitian. Perlakuan berupa pembersihan tanaman lain/gulma di sekitar tempat tumbuh tanaman penghijauan ternyata tidak memberikan hasil berbeda dibandingkan dengan pertumbuhan tanaman tanpa perlakuan. Beberapa jenis tanaman lokal multiguna dengan daya hidup dan pertumbuhan yang bagus di antaranya bendo (*A. elasticus*), daun kari (*M. koenigii*), nangka (*A. heterophyllus*) sedangkan untuk jenis pohon rimba di antaranya *Homalanthus giganteus*, *Mallotus* sp., damar (*A. borneoensis*), gondang (*F. variegata*), dan trete/bima (*M. tomentosa*).

5. Keberhasilan hidup dan pertumbuhan tanaman penghijauan lebih dipengaruhi oleh kondisi tempat tumbuh atau tanah (sifat fisika-kimia tanah) dan juga keberadaan vegetasi lain di masing-masing lokasi dibandingkan dengan faktor yang lain. Aktivitas pertanian dan gangguan manusia tidak memberikan dampak besar terhadap tanaman penghijauan di area restorasi.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian ke depan:

1. Pengamatan komunitas bakteri tanah masih diperlukan untuk beberapa tahun ke depan sebagai bioindikator keberhasilan restorasi dengan tanaman penghijauan sudah nampak memberikan pengaruh terhadap lingkungan, seperti semakin bertambah tinggi dan lebar kanopinya;
2. Pemberian perlakuan berupa pembersihan gulma ternyata belum efektif di hasil penelitian ini. Untuk menggambarkan ada atau tidaknya pengaruh bantuan manusia dalam mempercepat pertumbuhan dapat dilakukan dengan tambahan pemangkasan (*pruning*) atau penjarangan (*thinning*) pada vegetasi yang lebih tinggi dan kanopi lebar dari tanaman restorasi, selain menggunakan bibit tanaman yang cukup tinggi dan tidak terlalu kecil diameter batangnya.
3. Beberapa jenis tanaman penghijauan dengan daya hidup dan pertumbuhan unggul, seperti bendo (*A. elasticus*), daun kari (*M. koenigii*), nangka (*A. heterophyllus*), *Homalanthus giganteus*, *Mallotus* sp., damar (*A. borneoensis*), gondang (*F. variegata*), dan trete/bima (*M. tomentosa*), memiliki prospek yang bagus untuk digunakan sebagai tanaman restorasi hutan pegunungan UBF.
4. Kegiatan pengelolaan hutan secara kolaboratif guna mendukung pertumbuhan tanaman penghijauan yang optimal, penyediaan bibit, pembuatan kolam penampungan air dan membantu pemangkasan tanaman liar di sekitar tanaman penghijauan oleh masyarakat sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

- Allendorf, T. D., Khine, K., Aung, M., & Thorsen, A. (2018). Community use and perceptions of a biodiversity corridor in Myanmar 's threatened southern forests. *Global Ecology and Conservation*. 15: e00409. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00409>.
- Ambayoen, M. A., Fibriantingtyas, A., & Riyanto, S. (2021). Persepsi masyarakat magersaren terhadap kelestarian hutan di UB Forest. *Jurnal Ekonomo Pertanian Dan Agribisnis (JEPA)*. 5(2): 484–493.
- Andrews, S; Wander, M. (2011). Soil Quality: Indicators: Soil pH. Retrieved February 16, 2020, from http://soilquality.org/indicators/soil_ph.html.
- Anonymous. (2018). Forest ecology. Retrieved December 20, 2018, from <https://www.nature.com/subjects/forest-ecology>.
- Anton, V., Hartley, S., & Wittmer, H. U. (2015). Survival and growth of planted seedlings of three native tree species in urban forest restoration in Wellington, New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*. 39(2): 170–178.
- Bagheri, I., Kalhori, S. B., Akef, M., & Khormali, F. (2012). Effect of compaction on physical and micromorphological properties of forest soils. *American Journal of Plant Sciences*. 03(01): 159–163. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.31018>.
- Bárcenas-Moreno, G., Bååth, E., & Rousk, J. (2016). Functional implications of the pH-trait distribution of the microbial community in a re-inoculation experiment across a pH gradient. *Soil Biology and Biochemistry*. 93: 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.024>.
- Bessi, D., Tanaka, M. O., Costa, L. A. da, Correa, C. J. P., Tonello, K. C., Bessi, D., Tanaka, M. O., Costa, L. A. da, Correa, C. J. P., & Tonello, K. C. (2018). Forest restoration and hydrological parameters effects on soil water conditions: a structural equation modelling approach. *Brazilian Journal of Water Resources*. 23: 1–10. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180043>.
- Beylich, A., Oberholzer, H. R., Schrader, S., Höper, H., & Wilke, B. M. (2010). Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research*. 109(2): 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010>.
- Bhadouria, R., Srivastava, P., Singh, R., Tripathi, S., Verma, P., & Raghubanshi, A. S. (2020). Effects of grass competition on tree seedlings growth under different light and

- nutrient availability conditions in tropical dry forests in India. *Ecological Research*. 35(5): 807–818. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12131>.
- Bhatt, M.K., Labanya, R., & Joshi, H. C. (2019). Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility - A Review. *Universal Journal of Agricultural Research*. 7(5): 177–188. <https://doi.org/10.13189/ujar.2019.070502>.
- Bhatti, A. A., Haq, S., & Bhat, R. A. (2017). Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. *Microbial Pathogenesis*. 111: 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.09.036>.
- Bissett, A., Richardson, A. E., Baker, G., & Thrall, P. H. (2011). Long-term land use effects on soil microbial community structure and function. *Applied Soil Ecology*. 51(1): 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.010>.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowicz, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*. 146(PA): 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>.
- Bradshaw, A. D. (1996). Underlying principles of restoration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 53(SUPPL. 1): 3–9. <https://doi.org/10.1139/cjfas-53-s1-3>.
- Bragagnolo, C., Malhado, A. C. M., Jepson, P., & Ladle, R. J. (2016). Modelling local attitudes to protected areas in developing countries. *Conservation and Society*. 14(3): 163–182. <https://doi.org/10.4103/0972-4923.191161>.
- Brambach, F., Leuschner, C., Tjoa, A., & Culmsee, H. (2017). Diversity, endemism, and composition of tropical mountain forest communities in Sulawesi, Indonesia, in relation to elevation and soil properties. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 27: 68–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.06.003>
- BUA UB. (2017). UB Forest: Hutan pendidikan dan pelatihan UB. Retrieved October 12, 2018, from <http://bua.ub.ac.id/ubforest/>.
- Carignan, V., & Villard, M.A. (2002). Selecting indicator species to monitor ecological integrity: a Review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 78(1): 45–61. <https://doi.org/10.1023/A:1016136723584>.
- Chang, E. H., Tian, G., & Chiu, C. Y. (2017). The effect of re-planting trees on soil microbial communities in a wildfire-induced subalpine grassland. *Forests*. 8(10). <https://doi.org/10.3390/f8100385>.
- Cho, S. J., Kim, M. H., & Lee, Y. O. (2016). Effect of pH on soil bacterial diversity. *Journal of Ecology and Environment*. 40(1): 1–9. <https://doi.org/10.1186/s41610-016-0004-1>.

- Choi, I., Choi, K.-S., Lyu, D.-P., Lee, J.-S., Lim, J., Lee, S., Shin, S.-C., Chung, Y.-J., Park, Y.-S., Choi, W. I., Choi, K.-S., Lee, J.-S., Shin, S.-C., Chung, Y.-J., Lyu, D.-P., Lim, J., Lee, Á. S., & Park, Y.-S. (2010). Seasonal changes of functional groups in coleopteran communities in pine forests. *Biodivers Conserv.* 19: 2291–2305. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9842-9>.
- Chowdhury, M. S. H., Gudmundsson, C., Izumiya, S., Koike, M., Nazia, N., Rana, Md. P., Mukul, S. A., Muhammed, N., & Redowan, M. (2014). Community attitudes toward forest conservation programs through collaborative protected area management in Bangladesh. *Environment, Development and Sustainability.* 16(6): 1235–1252. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9524-y>.
- Coleman, D. C., & Wall, D. H. (2015). Soil Fauna. dalam **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. pp. 111–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00005-0>.
- Corlett, R. T. (2016). Restoration, reintroduction, and rewilding in a changing world. *Trends in Ecology and Evolution.* 31(6): 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.017>.
- Couto, G. M., Eisenhauer, N., Batista de Oliveira, E., Cesarz, S., Patriota Feliciano, A. L., & Marangon, L. C. (2016). Response of soil microbial biomass and activity in early restored lands in the northeastern Brazilian Atlantic Forest. *Restoration Ecology.* 24(5): 609–616. <https://doi.org/10.1111/rec.12356>.
- Creighton, J. C., Bastarache, R., Lomolino, M. v., & Belk, M. C. (2009). Effect of forest removal on the abundance of the endangered American burying beetle, *Nicrophorus americanus* (Coleoptera: Silphidae). *Journal of Insect Conservation.* 13(1): 37–43. <https://doi.org/10.1007/s10841-007-9115-4>.
- Culmsee, H., Leuschner, C., Moser, G., & Pitopang, R. (2010). Forest aboveground biomass along an elevational transect in Sulawesi, Indonesia, and the role of Fagaceae in tropical montane rain forests. *Journal of Biogeography.* 37(5): 960–974. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02269.x>.
- Derhé, M. A., Murphy, H., Monteith, G., & Menéndez, R. (2016). Measuring the success of reforestation for restoring biodiversity and ecosystem functioning. *Journal of Applied Ecology.* 53(6): 1714–1724. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12728>.
- Dey, D. C., & Schweitzer, C. J. (2014). Restoration for the future: Endpoints, targets, and indicators of progress and success. *Journal of Sustainable Forestry.* 33: S43–S65. <https://doi.org/10.1080/10549811.2014.883999>.
- DiGennaro, B., Reed, D., Swanson, C., Hastings, L., Hymanson, Z., Healey, M., Siegel, S., Cantrell, S., & Herbold, B. (2012). Using conceptual models and decision-support tools

- to guide ecosystem restoration planning and adaptive management: an Example from the Sacramento–San Joaquin Delta, California. *San Francisco Estuary and Watershed Science*. 10(3): 1–15. <https://doi.org/10.15447/sfews.2012v10iss3art1>.
- Doren, R. F., Richards, J. H., & Volin, J. C. (2009). A conceptual ecological model to facilitate understanding the role of invasive species in large-scale ecosystem restoration. *Ecological Indicators*. 9(6): 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.06.007>.
- Dou, Y., Yang, Y., An, S., & Zhu, Z. (2020). Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena*. 185: 104294. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104294>.
- Dufrene, M., & Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*. 67(3): 345–366.
- Ertiban, S. M. (2019). Soil fauna as webmasters, engineers and bioindicators in ecosystems: implications for conservation ecology and sustainable agriculture. *American Journal of Life Sciences*. 7(1): 17–26. <https://doi.org/10.11648/j.ajls.20190701.14>.
- Evangelista de Oliveira, R., Lex Engel, V., de Paula Loiola, P., Fernando Duarte de Moraes, L., & de Souza Vismara, E. (2021). Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*. 127: 107652. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107652>.
- FAO. (2018). Ecosystem Services & Biodiversity (ESB). Retrieved December 20, 2018, from <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/en/>.
- Figuerola, E. L. M., Guerrero, L. D., Rosa, S. M., Simonetti, L., Duval, M. E., Galantini, J. A., Bedano, J. C., Wall, L. G., & Erijman, L. (2012). Bacterial indicator of agricultural management for soil under no-till crop production. *PLoS ONE*. 7(11): e51075. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051075>.
- Firn, J., Price, J. N., & Whalley, R. D. (2013). Using strategically applied grazing to manage invasive alien plants in novel grasslands. *Ecological Processes*. 2(26): 1–11. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-26>.
- Fitria, A. D. & Kurniawan, S. (2021). Land-use changes and slope positions impact on the degradation of soil functions in nutrient stock within the Kalikungkuk micro watershed, East Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 8(2): 2689–2702. <https://doi.org/10.15243/jdmlm>.
- Flores-Rentería, D., Rincón, A., Valladares, F., & Curiel Yuste, J. (2016). Agricultural matrix affects differently the alpha and beta structural and functional diversity of soil

- microbial communities in a fragmented Mediterranean holm oak forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 92: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.09.015>.
- Flores-Rentería, D., Sánchez-Gallén, I., Morales-Rojas, D., Larsen, J., & Álvarez-Sánchez, J. (2020). Changes in the abundance and composition of a microbial community associated with land use change in a Mexican tropical rain forest. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 20(3): 1144–1155. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00200-6>.
- Frank, H. K. (2008). Course 5: Ecological Modelling. Retrieved December 12, 2018, from <https://www.peer.eu/projects/metier-training-courses/course-5-ecological-modelling/>
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*. 27(S1): S1–S46. <https://doi.org/10.1111/REC.13035>.
- Gatica-Saavedra, P., Echeverría, C., & Nelson, C. R. (2017). Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. *Restoration Ecology*. 25(6): 850–857. <https://doi.org/10.1111/rec.12586>.
- Graham, J. H., Krzysik, A. J., Kovacic, D. A., Duda, J. J., Freeman, D. C., Emlen, J. M., Zak, J. C., Long, W. R., Wallace, M. P., Chamberlin-Graham, C., Nutter, J. P., & Balbach, H. E. (2009). Species richness, equitability, and abundance of ants in disturbed landscapes. *Ecological Indicators*. 9(5): 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.10.003>.
- Guimarães, D. V., Gonzaga, M. I. S., da Silva, T. O., da Silva, T. L., da Silva Dias, N., & Matias, M. I. S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research*. 126: 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>.
- Hakim, L., & Soemarno, M. (2017). Biodiversity conservation, community development and geotourism development in Bromo-Tengger-Semeru-Arjuno Biosphere Reserve, East Java. *Geojournal of Tourism and Geosites*. 20(2): 220–230.
- Hakim, L., Yanuwadi, B., Arisoelaningsih, E., Gama, Z. P., Kurniawan, N., Batoro, J., Azrianingsih, R., Ekowati, G., & Leksono, A. S. (2017). **Flora UB Forest**. Selaras. Malang.



Hakim, Luchman, & Miyakawa, H. (2015). Exotic plant species in the restoration project area in Ranu Pani recreation forest, Bromo Tengger Semeru National Park (Indonesia).

Biodiversity Journal. 6(4): 831–836.

Hariyati, J. R., Arisoesilaningsih, E., & Hakim, L. (2013). Seedling growth of some native trees in Ranu Pani-Ranu Regulo restoration area, Bromo Tengger Semeru National Park. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*. 3(6): 47–55.

Harris, J. (2009). Soil microbial communities and restoration ecology: Facilitators or followers? *Science*. pp. 573–574. <https://doi.org/10.1126/science.1172975>.

Harrison, D. R., & Swinfield, T. (2015). Restoration of logged humid tropical forests: An experimental programme at Harapan Rainforest, Indonesia. *Tropical Conservation Science* Vol. 8. Retrieved from <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/us/>.

Hobbs, R. J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J. S., Bridgewater, P., Cramer, V. A., Epstein, P. R., Ewel, J. J., Klink, C. A., Lugo, A. E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D. M., Sanderson, E. W., Valladares, F., Vilà, M., Zamora, R., & Zobel, M. (2006). Novel ecosystems: Theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*. 15(1): 1–7. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00212.x>.

Hobbs, R. J., Higgs, E., & Harris, J. A. (2009). Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology and Evolution*. 24(11): 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.012>.

Huang, J., Hu, B., Qi, K., Chen, W., Pang, X., Bao, W., & Tian, G. (2016). Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in a subalpine spruce plantation. *European Journal of Soil Biology*. 72: 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.007>.

Jamison, S.-L., Robertson, M., Engelbrecht, I., & Hawkes, P. (2016). An assessment of rehabilitation success in an African grassland using ants as bioindicators. *Koedoe*. 58(1): 1–16. <https://doi.org/10.4102/koedoe.v58i1.1383>.

Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2007). MINIREVIEW 16S rRNA gene sequencing for bacterial identification in the diagnostic laboratory: Pluses, perils, and pitfalls. *Journal of Clinical Microbiology*. 45(9): 2761–2764. <https://doi.org/10.1128/JCM.01228-07>.

Jiménez-Bueno, N. G., Valenzuela-Encinas, C., Marsch, R., Ortiz-Gutiérrez, D., Verhulst, N., Govaerts, B., Dendooven, L., & Navarro-Noya, Y. E. (2016). Bacterial indicator taxa in soils under different long-term agricultural management. *Journal of Applied Microbiology*. 120(4): 921–933. <https://doi.org/10.1111/jam.13072>.

Jones, R. T., Robeson, M. S., Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009). A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses. *ISME Journal*, 3(4): 442–453. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.127>.

Juniyanti, L., Purnomo, H., Kartodihardjo, H., & Prasetyo, L. B. (2021). Understanding the driving forces and actors of land change due to forestry and agricultural practices in sumatra and kalimantan: A systematic review. *Land*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/land10050463>.

Jurisch, K., Hahn, K., Wittig, R., & Bernhardt-Römermann, M. (2013). Land-use impact on the growth and survival of seedlings and saplings in West African savannas. *Journal of Vegetation Science*, 24(1): 101–112. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01444.x>.

Kardiman, R., Afriandi, R., Schmidt, L. H., Ræbild, A., & Swinfield, T. (2019). Restoration of tropical rain forest success improved by selecting species for specific microhabitats. *Forest Ecology and Management*, 434(December 2018): 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.028>.

Karyati, Ipor, I. B., Jusoh, I., & Wasli, M. E. (2017). The diameter increment of selected tree species in a secondary tropical forest in Sarawak, malaysia. *Biodiversitas*, 18(1): 304–311. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180140>.

Kessler, M., & Kluge, J. (2008). Diversity and endemism in tropical montane forests - from patterns to processes. dalam S. R. Gradstein, J. Homeier, & D. Gansert (Eds.). **The tropical mountain forest. Patterns and processes in a biodiversity hotspot** Vol. 2. Universitätsverlag Göttingen. Göttingen. pp. 35–50. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-761-0-193>.

Kopecky, J., Kyselkova, M., Omelka, M., Cermak, L., Novotna, J., Grundmann, G. L., Moënné-Loccoz, Y., & Sagova-Mareckova, M. (2011). Actinobacterial community dominated by a distinct clade in acidic soil of a waterlogged deciduous forest. *FEMS Microbiology Ecology*, 78(2): 386–394. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01173.x>.

Kurniawan, S., Utami, S. R., Mukharomah, M., Navarette, I. A., & Prasetya, B. (2019). Land use systems, soil texture, control carbon and nitrogen storages in the forest soil of UB Forest, Indonesia. *Agrivita*, 41(3): 416–427. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v41i3.2236>.

- Kwon, T. S., Park, Y. K., Lim, J. H., Ryou, S. H., & Lee, C. M. (2013). Change of arthropod abundance in burned forests: Different patterns according to functional guilds. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 16(3): 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2013.04.008>.
- Latumahina, F. S., Musyafa, Sumardi, & Putra, N. S. (2014). Kelimpahan dan keragaman semut dalam Hutan Lindung Sirimau Ambon. *Biospecies*, 7(2): 53–58.
- Lee, S. A., Kim, J. M., Kim, Y., Joa, J.-H., Kang, S.-S., Ahn, J.-H., Kim, M., Song, J., & Weon, H.-Y. (2020). Different types of agricultural land use drive distinct soil bacterial communities. *Scientific Reports*, 10(17418): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74193-8>.
- Lee-Cruz, L., Edwards, D. P., Tripathi, B. M., & Adams, J. M. (2013). Impact of logging and forest conversion to oil palm plantations on soil bacterial communities in Borneo. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(23): 7290–7297. <https://doi.org/10.1128/AEM.02541-13>.
- Liao, C., Luo, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2012). The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 21(3): 318–327. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00690.x>.
- Löf, M., Madsen, P., Metslaid, M., Witzell, J., & Jacobs, D. F. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*, pp. 139–151. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>.
- Longcore, T. (2003). Terrestrial arthropods as indicators of ecological restoration success in Coastal Sage Scrub (California, U.S.A.). *Restoration Ecology*, 11(4): 251–252. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2003.rec0221.x>.
- Majer, J. D., Heterick, B., Gohr, T., Hughes, E., Mounsher, L., & Grigg, A. (2013). Is thirty-seven years sufficient for full return of the ant biota following restoration? *Ecological Processes*, 2(19): 1–12. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-19>.
- Mander, C., Wakelin, S., Young, S., Condron, L., & O'Callaghan, M. (2012). Incidence and diversity of phosphate-solubilising bacteria are linked to phosphorus status in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 44(1): 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.009>.
- Margono, B. A., Potapov, P. v., Turubanova, S., Stolle, F., & Hansen, M. C. (2014). Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012. *Nature Climate Change*, 4(8): 730–735. <https://doi.org/10.1038/nclimate2277>.

- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehltreter, K., Equihua, M., & Landgrave, R. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*. 258(9): 1856–1863. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.023>.
- Mawardi, I., & Sudaryono. (2006). Konservasi hutan dan lahan melalui pemberdayaan masyarakat sekitar hutan. *J.Tek.Ling*. 7(3): 317–324.
- Mawazin, & Suhaendi, H. (2012). The effect of tree spacing on diameter growth of 5 year old *Shorea leprosula* Miq. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*. 9(2): 189–197.
- McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., & Dixon, K. W. (2016). **International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts** 1st ed. Society for Ecological Restoration (SER). Washington D.C.
- McHugh, J. v. (1993). A revision of *Eurysphindus LeConte* (Coleoptera: Cucujoidea: Sphindidae) and a review of sphindid classification and phylogeny. *Systematic Entomology*. 18(1): 57–92. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.1993.tb00654.x>.
- McNamara, S., Tinh, D. V., Erskine, P. D., Lamb, D., Yates, D., & Brown, S. (2006). Rehabilitating degraded forest land in central Vietnam with mixed native species plantings. *Forest Ecology and Management*. 233(2–3): 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.033>.
- Mendes, L. W., de Lima Brossi, M. J., Kuramae, E. E., & Tsai, S. M. (2015). Land-use system shapes soil bacterial communities in Southeastern Amazon region. *Applied Soil Ecology*. 95: 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.06.005>.
- Meng, M., Lin, J., Guo, X., Liu, X., Wu, J., Zhao, Y., & Zhang, J. (2019). Impacts of forest conversion on soil bacterial community composition and diversity in subtropical forests. *Catena*. 175: 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.017>.
- Miina, J., Eerikäinen, K., & Hasenauer, H. (2006). Modeling Forest Regeneration. dalam H. Hasenauer (Ed.). **Sustainable forest management: Growth models for Europe**. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. pp. 93–109. https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4_9.
- Millet, J., Tran, N., Vien Ngoc, N., Tran Thi, T., & Prat, D. (2013). Enrichment planting of native species for biodiversity conservation in a logged tree plantation in Vietnam. *New Forests*. 44(3): 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9344-6>.

- Miyashita, N. T., Iwanaga, H., Charles, S., Diway, B., Sabang, J., & Chong, L. (2013). Soil bacterial community structure in five tropical forests in Malaysia and one temperate forest in Japan revealed by pyrosequencing analyses of 16S rRNA gene sequence variation. *Genes and Genetic Systems*, 88(2): 93–103. <https://doi.org/10.1266/ggs.88.93>.
- Moebius-Clune, B. N., van Es, H. M., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Kimetu, J. M., Ngoze, S., Lehmann, J., & Kinyangi, J. M. (2011). Long-term soil quality degradation along a cultivation chronosequence in Western Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(1–2): 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.018>.
- Muhamad, D., Okubo, S., Harashina, K., Parikesit, Gunawan, B., & Takeuchi, K. (2014). Living close to forests enhances people's perception of ecosystem services in a forest-agricultural landscape of West Java, Indonesia. *Ecosystem Services*, 8: 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.04.003>.
- Nakamura, A., Catterall, C. P., House, A. P. N., Kitching, R. L., & Burwell, C. J. (2007). The use of ants and other soil and litter arthropods as bio-indicators of the impacts of rainforest clearing and subsequent land use. *Journal of Insect Conservation*, 11(2): 177–186. <https://doi.org/10.1007/s10841-006-9034-9>.
- Normile, D. (2010). Saving forests to save biodiversity. *Science*, 329(5997): 1278–1280. <https://doi.org/10.1126/science.329.5997.1278>.
- Noulékoun, F., Mensah, S., Birhane, E., Son, Y., & Khamzina, A. (2021). Forest landscape restoration under global environmental change: Challenges and a future roadmap. *Forests*, 12(3): 1–13. <https://doi.org/10.3390/f12030276>.
- Nurbaya, S., Efransjah, Awang, S. A., Agung, R., ... Muttaqin, M. Z. (2018). **The state of Indonesia's forests 2018**. Ministry of Environment and Forestry, Republic of Indonesia. Jakarta.
- Padmanaba, M., Tomlinson, K. W., Hughes, A. C., & Corlett, R. T. (2017). Alien plant invasions of protected areas in Java, Indonesia. *Scientific Reports*, 7(1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09768-z>.
- Perring, M. P., Standish, R. J., Hulvey, K. B., Lach, L., Morald, T. K., Parsons, R., Didham, R. K., & Hobbs, R. J. (2012). The Ridgefield Multiple Ecosystem Services Experiment: Can restoration of former agricultural land achieve multiple outcomes? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 163: 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.016>.

- Pitopang, R. (2012). Impact of forest disturbance on the structure and composition of vegetation in tropical rainforest of Central Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 13(4): 178–189. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d130403>.
- Prayogo, C., Sholehuddin, N., Putra, E. Z. H. S., & Rachmawati, R. (2019). Soil macrofauna diversity and structure under different management of pine-coffee agroforestry system. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 6(3): 1727–1736. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2019.063.1727>.
- Preem, J. K., Truu, J., Truu, M., Mander, Ü., Oopkaup, K., Lõhmus, K., Helmisaari, H. S., Uri, V., & Zobel, M. (2012). Bacterial community structure and its relationship to soil physico-chemical characteristics in alder stands with different management histories. *Ecological Engineering*. 49: 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.034>.
- Rahma, A. F., & Arisoelaningsih, E. (2017). Threatening of invasive alien species (IAS) on vegetation structure and aerial arthropod diversity in protection area of UB Forest. *J-PAL*. 8(2): 89–92.
- Rashid, A. M., Craig, D., & Khan, S. A. M. N. A. (2013). A journey towards shared governance: status and prospects for collaborative management in the protected areas of Bangladesh. *Journal of Forestry Research*. 24(3): 599–605. <https://doi.org/10.1007/s11676-013-0391-4>.
- Rempel, R. S., Naylor, B. J., Elkie, P. C., Baker, J., Churcher, J., & Gluck, M. J. (2016). An indicator system to assess ecological integrity of managed forests. *Ecological Indicators*. 60: 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.033>.
- Ribas, C. R., Solar, R. R. C., Campos, R. B. F., Schmidt, F. A., Valentim, C. L., & Schoederer, J. H. (2012). Can ants be used as indicators of environmental impacts caused by arsenic? *Journal of Insect Conservation*. 16: 413–421. <https://doi.org/10.1007/s10841-011-9427-2>.
- Rodrigues, J. L. M., Pellizari, V. H., Mueller, R., Baek, K., Jesus, E. D. C., Paula, F. S., Mirza, B., Hamaou, G. S., Tsai, S. M., Feiglf, B., Tiedje, J. M., Bohannon, B. J. M., & Nußlein, K. (2013). Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 110(3): 988–993. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220608110>
- Rohyani, I. S. (2020). Community structure analysis of soil insects and their potential role as bioindicators in various ecosystem types in lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas*. 21(9): 4221–4227. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210937>.

- Sen, D. (2018). Information about a forest ecosystem. Retrieved December 20, 2018, from <https://sciencing.com/about-6325114-information-forest-ecosystem.html>.
- Sengupta, A., Hariharan, J., Grewal, P. S., & Dick, W. A. (2020). Bacterial community dissimilarity in soils is driven by long-term land-use practices. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1): 1–13. <https://doi.org/10.1002/agg2.20031>.
- SER, S. for E. R, I. S. & P. W. G. (2004). The SER international primer on ecological restoration. Retrieved from <https://www.ser-rrc.org/resource/the-ser-international-primer-on/>.
- Shackelford, N., Hobbs, R. J., Burgar, J. M., Erickson, T. E., Fontaine, J. B., Laliberté, E., Ramalho, C. E., Perring, M. P., & Standish, R. J. (2013). Primed for change: Developing ecological restoration for the 21st century. *Restoration Ecology*, 21(3): 297–304. <https://doi.org/10.1111/rec.12012>.
- Silva, R. A., Siqueira, G. M., Costa, M. K. L., Guedes Filho, O., & e Silva, Ê. F. de F. (2018). Spatial variability of soil fauna under different land use and managements. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 42: e0170121. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170121>.
- Singh, K. S. D., Arifin, A., Radziah, O., Shamshuddin, J., Hazandy, A. H., Majid, N. M., Aiza-Shaliha, J., Rui, T. X., & Keeren, S. R. (2013). Status of soil microbial population, enzymatic activity and biomass of selected natural, secondary and rehabilitated forests. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(4): 301–309. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2013.301.309>.
- Siqueira, G. M., Silva, E. F. F., & Paz-Ferreiro, J. (2014). Land use intensification effects in soil arthropod community of an entisol in Pernambuco State, Brazil. *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/625856>.
- Sisay, M., & Ketema, H. (2015). Variation in abundance and diversity of soil invertebrate macro-fauna and some soil quality indicators under agroforestry based conservation tillage and maize based conventional tillage in Southern Ethiopia. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 2(8): 100–107.
- Sovu, Tigabu, M., Savadogo, P., Odén, P. C., & Xayvongsa, L. (2010). Enrichment planting in a logged-over tropical mixed deciduous forest of Laos. *Journal of Forestry Research*, 21(3): 273–280. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0071-6>.
- Spiller, M. S., Spiller, C., & Garlet, J. (2017). Arthropod bioindicators of environmental quality. *Revista Agro*, 12(1): 41–57. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i1.4516>.

Spracklen, D. V., & Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10): 2741–2754. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2741-2014>.

Stanturf, J. A., Kleine, M., Mansourian, S., Parrotta, J., Madsen, P., Kant, P., Burns, J., & Bolte, A. (2019). Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach. *Annals of Forest Science*, 76: 50. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>.

Suárez, L. R., Josa, Y. T. P., Samboni, E. J. A., Cifuentes, K. D. L., Bautista, E. H. D., & Salazar, J. C. S. (2018). Soil macrofauna under different land uses in the Colombian Amazon. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 53(12): 1383–1391. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200011>.

Suganuma, M. S., & Durigan, G. (2015). Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restoration Ecology*, 23(3): 238–251. <https://doi.org/10.1111/rec.12168>.

Suleiman, A. K. A., Manoeli, L., Boldo, J. T., Pereira, M. G., & Roesch, L. F. W. (2013). Shifts in soil bacterial community after eight years of land-use change. *Systematic and Applied Microbiology*, 36(2): 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2012.10.007>.

Sun, Y., Luo, C., Jiang, L., Song, M., Zhang, D., Li, J., Li, Y., Ostle, N. J., & Zhang, G. (2020). Land-use changes alter soil bacterial composition and diversity in tropical forest soil in China. *Science of the Total Environment*, 712: 136526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136526>.

Swannack, T. M., Fischenich, J. C., & Tazi, D. J. (2012). **Ecological modeling guide for ecosystem restoration and management**. Vicksburg.

Swinfield, T., Afriandi, R., Antoni, F., & Harrison, R. D. (2016). Accelerating tropical forest restoration through the selective removal of pioneer species. *Forest Ecology and Management*, 381(2016): 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.020>.

Tadesse, S. A., & Teketay, D. (2017). Perceptions and attitudes of local people towards participatory forest management in Tarmaber District of North Shewa Administrative Zone, Ethiopia: the case of Wof-Washa Forests. *Ecological Processes*, 6(17): 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0084-6>.

Trivedi, P., Delgado-Baquerizo, M., Anderson, I. C., & Singh, B. K. (2016). Response of soil properties and microbial communities to agriculture: Implications for primary productivity and soil health indicators. *Frontiers in Plant Science*, 7(JULY2016): 990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00990>.

- Uebel, K., Wilson, K. A., & Shoo, L. P. (2017). Assisted natural regeneration accelerates recovery of highly disturbed rainforest. *Ecological Management and Restoration*, 18(3): 231–238. <https://doi.org/10.1111/emr.12277>.
- Uprety, Y., Asselin, H., Bergeron, Y., Doyon, F., & Boucher, J.-F. (2012). Contribution of traditional knowledge to ecological restoration: Practices and applications. *Écoscience*, 19(3): 225–237. <https://doi.org/10.2980/19-3-3530>.
- Velásquez, E., Fonte, S. J., Barot, S., Grimaldi, M., Desjardins, T., & Lavelle, P. (2012). Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. *Applied Soil Ecology*, 56: 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.008>.
- Verdinelli, M., Yakhlef, S. E. B., Cossu, C. S., Pilia, O., & Mannu, R. (2017). Variability of ant community composition in cork oak woodlands across the mediterranean region: Implications for forest management. *IForest*, 10(4): 707–714. <https://doi.org/10.3832/ifor2321-010>.
- Vitali, F., Mastromei, G., Senatore, G., Caroppo, C., & Casalone, E. (2016). Long lasting effects of the conversion from natural forest to poplar plantation on soil microbial communities. *Microbiological Research*, 182: 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.10.002>.
- Wang, S., Fu, B., Gao, G., Liu, Y., & Zhou, J. (2013). Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 101: 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.006>.
- Xi, W. (2014). Ecological modeling for informing forest restoration and management. *Forest Research: Open Access*, 03(01): 105–106. <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000e105>.
- Yeong, K. L., Reynolds, G., & Hill, J. K. (2016). Enrichment planting to improve habitat quality and conservation value of tropical rainforest fragments. *Biodiversity and Conservation*, 25(5): 957–973. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1100-3>.
- Zhang, B., Wu, X., Tai, X., Sun, L., Wu, M., Zhang, W., Chen, X., Zhang, G., Chen, T., Liu, G., & Dyson, P. (2019). Variation in actinobacterial community composition and potential function in different soil ecosystems belonging to the arid Heihe River Basin of Northwest China. *Frontiers in Microbiology*, 10: 2209. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02209>.

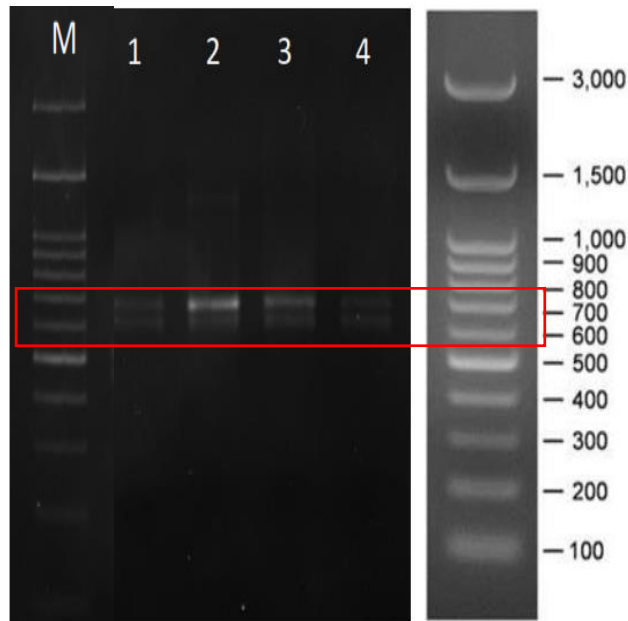
Zhang, Q., Wu, J., Yang, F., Lei, Y., Zhang, Q., & Cheng, X. (2016). Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change.

Scientific Reports. 6(1): 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep36587>.



LAMPIRAN

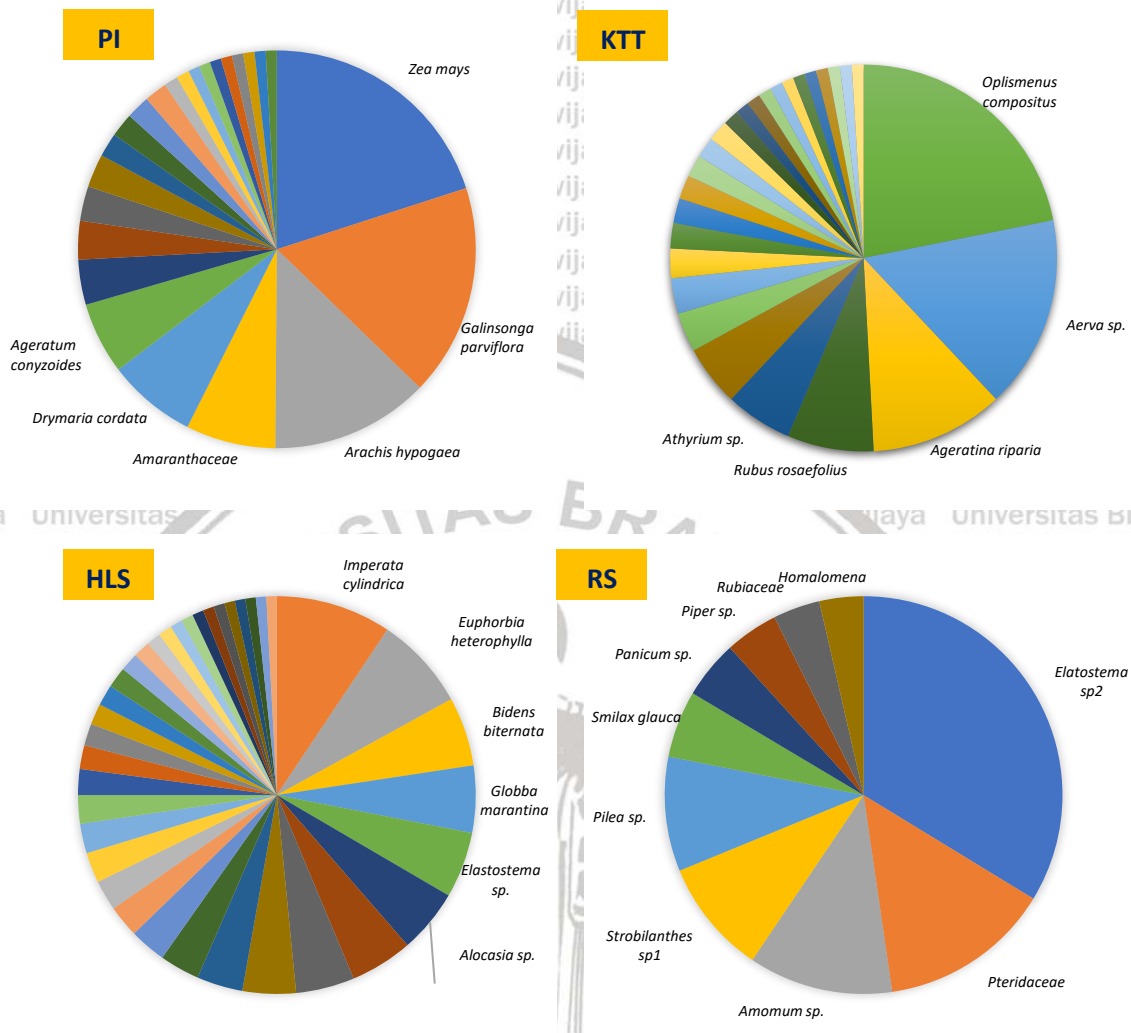
Lampiran 1. Hasil gel elektroforesis DNA bakteri tanah



Gambar 30. Hasil gel elektroforesis sampel DNA bakteri yang diisolasi dari contoh tanah di area penelitian

Keterangan: M: DNA ladder 100 bp; 1: Area PI; 2: Area KTT; 3: Area HLS; dan 4: Area RS.

Lampiran 2. Struktur komunitas tumbuhan bawah berdasarkan indeks nilai penting (INP) di area penelitian



Gambar 31. Struktur komunitas dan komposisi tumbuhan bawah/semayi di masing-masing area berdasarkan INP

Lampiran 3. Kelimpahan dan peran fungsional masing-masing taksa makrofauna

Tabel 4. Kelimpahan individu makrofauna yang diperoleh di setiap area beserta peran fungsionalnya di ekosistem

Kelas	Ordo	Famili	Kelimpahan relatif (%)				Total Proporsi (%)	Peran fungsional
			PI	KTT	HLS	RS		
Arachnida	Araneae	Araneidae	3,15	0,00	0,00	2,25	5,40	Predator
		Oxyopidae	5,86	5,14	7,86	7,40	26,25	Predator
Mesostigmata	Macrochelidae		1,63	1,08	0,18	1,93	4,82	Predator
			0,22	0,00	0,54	0,64	1,40	Detritivor
Clitellata	Opisthoptora	Lumbricidae	0,11	0,00	0,00	0,00	0,11	Detritivor
Diplopoda	Polydesmida	Xystodesmidae	0,54	0,54	1,07	0,64	2,80	Predator, Detritivor
Entognatha	Entomobryomorpha	Isotomidae	19,44	2,97	17,68	3,54	43,62	Detritivor
Insecta	Blattodea	Blattidae	0,00	0,27	0,36	0,64	1,27	Detritivor
	Coleoptera	Coleoptera.F1	0,33	0,00	0,36	0,32	1,00	Herbivor
		Scarabaeidae	0,54	2,97	0,54	0,64	4,69	Herbivor
		Schizopteridae	0,00	0,00	0,18	0,64	0,82	Herbivor
		Silphidae	0,00	1,08	0,18	7,72	8,98	Detritivor
		Sphindidae	4,78	11,08	6,61	9,32	31,79	Herbivor
		Staphylinidae	6,73	10,81	9,11	13,83	40,48	Predator, Detritivor
	Culicidae	Trichoceridae	0,11	0,00	0,71	0,64	1,47	Herbivor
Diptera	Agromyzidae		0,65	3,24	0,18	1,61	5,68	Herbivor
			0,33	0,27	0,71	0,00	1,31	Herbivor
		Phoridae	1,30	3,78	0,54	2,57	8,19	Predator, Detritivor
Hemiptera	Ceratocombidae		2,06	3,51	4,11	1,29	10,97	Herbivor
			0,11	0,00	0,18	0,32	0,61	Predator
		Reduviidae	0,11	0,00	0,00	0,00	0,11	Predator
Homoptera	Jassidae		0,00	1,08	0,18	0,00	1,26	Herbivor
			0,65	1,08	1,07	1,29	4,09	Herbivor
Hymenoptera	Dolichopodidae		1,09	0,27	1,07	1,29	3,71	Predator, Herbivor, Detritivor
			12,49	18,65	14,11	15,11	60,35	Predator, Herbivor, Detritivor
		Formicidae3	0,43	2,70	4,82	1,29	9,24	Predator, Herbivor, Detritivor
		Formicidae4	5,43	10,27	18,93	5,14	39,77	Predator, Herbivor, Detritivor
		Formicidae5	0,76	0,27	2,32	0,00	3,35	Predator, Herbivor, Detritivor
		Formicidae6	0,33	0,00	1,25	0,00	1,58	Predator, Herbivor, Detritivor
		Vespidae	0,11	0,00	0,00	0,00	0,11	Predator
Lepidoptera	Lepidoptera.F1		0,33	1,08	0,00	0,96	2,37	Herbivor
Microcoryphia	Machilidae		0,11	0,00	0,00	0,32	0,43	Detritivor
Orthoptera	Acrididae		1,30	0,81	1,43	1,93	5,47	Herbivor
			28,77	16,76	3,57	12,54	61,64	Herbivor
Malacostraca	Amphipoda	Talitridae	0,22	0,00	0,18	1,93	2,32	Detritivor
	Isopoda	Armadillidiidae	0,00	0,00	0,00	2,25	2,25	Detritivor
		Isopoda.F1	0,00	0,27	0,00	0,00	0,27	Detritivor
Total			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Lampiran 4. Korelasi Pearson antara populasi makrofauna tanah dengan karakteristik tanah dan vegetasi

Tabel 5. Koefisien korelasi Pearson antara kelompok makrofauna dominan dengan karakteristik tanah dan vegetasi

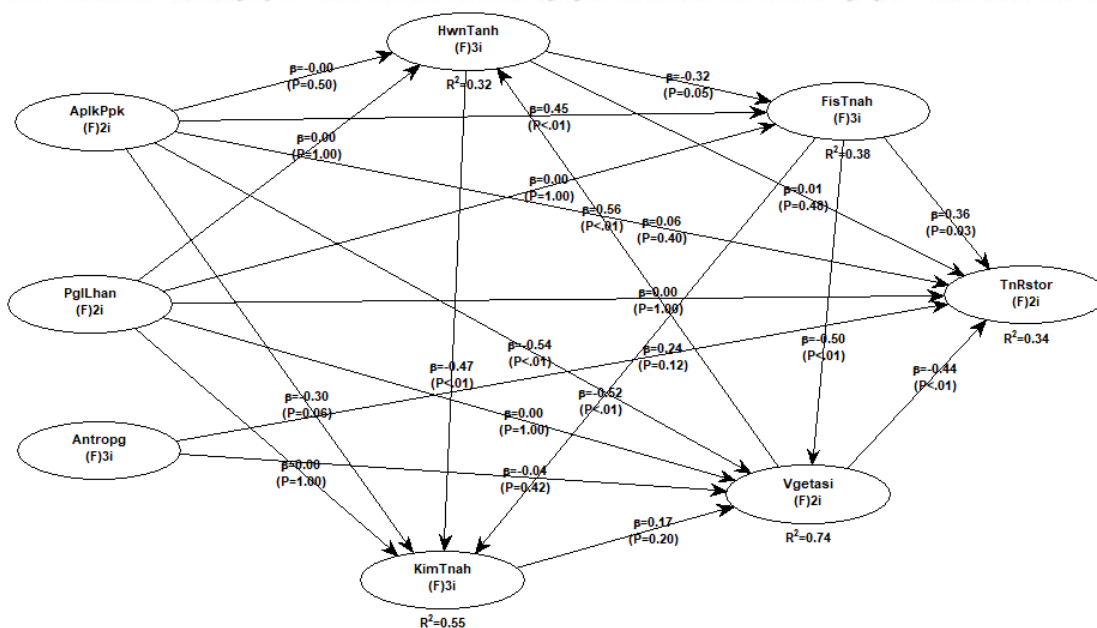
Variables	Gryllidae	Isotomidae	Formicidae1	Staphylinidae	Oxyopidae	Sphindidae	Formicidae3	Araneidae	Sersh	Poh	Tia	Pcg	Sem	AggT	BIT	KlembT	BOT
Gryllidae	1	0,013	0,085	0,008	-0,369	-0,233	-0,736	0,517	-0,171	-0,540	-0,964	-0,790	-0,420	0,470	0,218	-0,284	-0,339
Isotomidae	0,013	1	-0,281	-0,996	0,895	-0,859	0,394	-0,064	-0,590	-0,386	0,199	-0,399	-0,816	0,207	0,592	-0,741	-0,896
Formicidae1	0,085	-0,281	1	0,370	-0,510	0,662	0,342	-0,789	-0,605	-0,657	-0,295	0,496	-0,198	-0,838	0,596	-0,402	0,510
Staphylinidae	0,008	-0,996	0,370	1	-0,920	0,893	-0,358	-0,132	-0,511	0,304	-0,233	0,424	0,766	-0,276	-0,513	0,675	0,913
Oxyopidae	-0,369	0,895	-0,510	-0,920	1	-0,792	0,507	0,062	-0,279	0,035	0,583	-0,170	-0,478	0,210	0,266	-0,414	-0,747
Sphindidae	-0,233	-0,859	0,662	0,893	-0,792	1	0,076	-0,563	0,178	0,104	-0,030	0,736	0,603	-0,678	-0,197	0,415	0,981
Formicidae3	-0,736	0,394	0,342	-0,358	0,507	0,076	1	-0,821	-0,540	-0,163	0,708	0,682	-0,240	-0,732	0,500	-0,422	0,053
Araneidae	0,517	0,064	-0,789	-0,132	0,062	-0,563	-0,821	1	0,553	0,341	-0,349	-0,836	0,086	0,989	-0,518	0,335	-0,483
Sersh	-0,171	-0,590	-0,605	0,511	-0,279	0,178	-0,540	0,553	1	0,909	0,168	-0,012	0,871	0,481	-0,999	0,967	0,344
Poh	-0,540	-0,386	-0,657	0,304	0,035	0,104	-0,163	0,341	0,909	1	0,562	0,218	0,841	0,315	-0,926	0,894	0,295
Tia	-0,964	0,199	-0,295	-0,233	0,583	-0,030	0,708	-0,349	0,168	0,562	1	0,603	0,299	-0,273	-0,210	0,217	0,090
Pcg	-0,790	-0,399	0,496	0,424	-0,170	0,736	0,682	-0,836	-0,012	0,218	0,603	1	0,453	-0,857	-0,032	0,220	0,757
Sem	-0,420	-0,816	-0,198	0,766	-0,478	0,603	-0,240	0,086	0,871	0,841	0,299	0,453	1	-0,010	-0,887	0,967	0,742
AggT	0,470	0,207	-0,838	-0,276	0,210	-0,678	-0,732	0,989	-0,481	0,315	-0,273	-0,857	-0,010	1	-0,448	0,245	-0,597
BIT	0,218	0,592	0,596	-0,513	0,266	-0,197	0,500	-0,518	-0,999	-0,926	-0,210	-0,032	-0,887	-0,448	1	-0,973	-0,365
KlembT	-0,284	-0,741	-0,402	0,675	-0,414	0,415	-0,422	-0,335	0,967	0,894	0,217	0,220	0,967	0,245	-0,973	1	0,569
BOT	-0,339	-0,896	0,510	0,913	-0,747	0,981	0,053	-0,483	0,344	0,295	0,090	0,757	0,742	-0,597	-0,365	0,569	1

Lampiran 5. Korelasi Pearson antara populasi bakteri tanah dengan karakteristik fisika-kimia tanah

Tabel 6. Koefisien korelasi Pearson antara kelompok bakteri dominan dan karakteristik tanah

Kelompok Bakteri	BDst	AggrS	Moist	pH	EC	SOC
Phylum						
Proteobacteria	-0,283	0,911	0,121	0,448	0,999	-0,496
Acidobacteria	0,698	-0,533	-0,569	-0,453	-0,154	0,210
Actinobacteria	-0,620	0,090	0,583	0,323	-0,295	0,118
Chloroflexia	0,321	-0,783	-0,213	-0,550	-0,968	0,256
Gemmatimonadetes	0,672	-0,128	-0,635	-0,388	0,248	-0,140
Nitrospirae	0,181	-0,115	-0,084	0,149	0,314	0,338
Firmicutes	0,562	-0,123	-0,509	-0,255	0,281	-0,020
Bacteroidetes	0,885	-0,076	-0,912	-0,714	0,152	-0,514
Latescibacteria	0,958	-0,587	-0,875	-0,840	-0,360	-0,114
Verrucomicrobia	0,994	-0,359	-0,992	-0,947	-0,249	-0,463
Genus						
<i>Massilia</i>	0,422	0,606	-0,585	-0,285	0,702	-0,843
<i>Methylothenera</i>	0,433	0,531	-0,561	-0,229	0,720	-0,699
<i>Pedomicrobium</i>	-0,971	0,361	0,944	0,838	0,143	0,341
<i>Variibacter</i>	-0,955	0,227	0,960	0,822	0,028	0,465
<i>Sphingomonas</i>	0,584	0,351	-0,677	-0,366	0,582	-0,631
<i>RB41</i>	0,782	-0,054	-0,787	-0,544	0,254	-0,367
<i>Bradyrhizobium</i>	-0,567	-0,034	0,555	0,266	-0,409	0,193
<i>H16</i>	0,741	0,070	-0,774	-0,507	0,357	-0,464
<i>Nocardioides</i>	-0,971	0,538	0,902	0,853	0,317	0,176
<i>Ramlibacter</i>	0,450	0,558	-0,595	-0,281	0,699	-0,781

Lampiran 6. Hasil analisis model SEM yang dikembangkan



Gambar 32. Hasil pengujian ke-1 dari model SEM yang dikembangkan

Tabel 7. Koefisien jalur dari hasil pengujian ke-1 model yang dikembangkan

Path coefficients

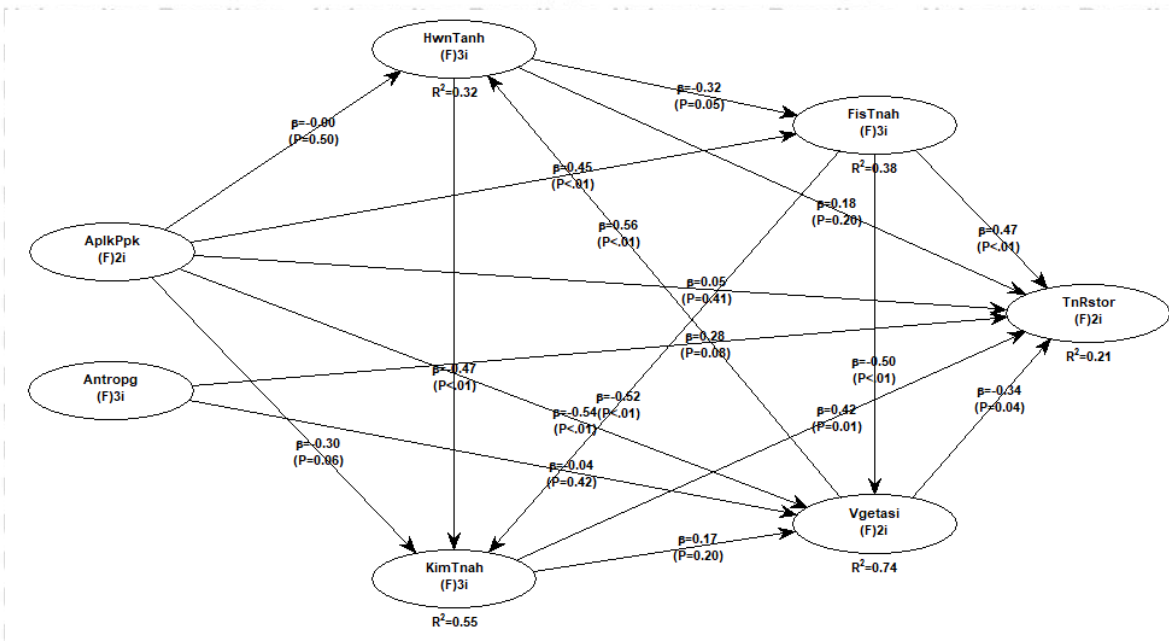
	AplkPpk	PglLhan	Antropg	HwnTanh	KimTnah	FisTnah	Vgetasi	TnRstor
HwnTanh	0,000						0,564***	
KimTnah	-0,300			-0,466***		-0,520***		
FisTnah	0,446			-0,323**				
Vgetasi	-0,538		-0,044		0,174	-0,502***		
TnRstor	0,055		0,235	0,010		0,363**	-0,444***	

Ket: ***) signifikan kuat (p<0,01); **) signifikan (p<0,05)

Tabel 8. Nilai bobot indikator dari setiap variabel laten hasil pengujian ke-1 pada model yang dikembangkan

	AplkPpk	PglLhan	Antropg	HwnTanh	KimTnah	FisTnah	Vgetasi	TnRstor	Type	SE	P value
Pu	1	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0,122	<0,001
NonPu	0	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0	1
Cgk	0	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0	1
NonCgk	0	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0	1
Ser	0	0	-0,365	0	0	0	0	0	Formatif	0,179	0,028
Sed	0	0	-1,119	0	0	0	0	0	Formatif	0,113	<0,001
TdkP	0	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0	1
Kelmp	0	0	0	0,304	0	0	0	0	Formatif	0,186	0,059
Keky	0	0	0	0,463	0	0	0	0	Formatif	0,169	0,006
H'	0	0	0	0,414	0	0	0	0	Formatif	0,174	0,014
pH	0	0	0	0	0,517	0	0	0	Formatif	0,163	0,003
EC	0	0	0	0	-0,340	0	0	0	Formatif	0,182	0,039
BOT	0	0	0	0	0,491	0	0	0	Formatif	0,166	0,004
AT	0	0	0	0	0	0,050	0	0	Formatif	0,217	0,411
BIT	0	0	0	0	0	0,540	0	0	Formatif	0,161	0,002
KA	0	0	0	0	0	-0,546	0	0	Formatif	0,16	0,001
H'po	0	0	0	0	0	0	0,608	0	Formatif	0,155	<0,001
H'se	0	0	0	0	0	0	0,608	0	Formatif	0,155	<0,001
LHdp	0	0	0	0	0	0	0	0,8	Formatif	0,137	<0,001
Diamt	0	0	0	0	0	0	0	0,8	Formatif	0,137	<0,001

Ket: signifikan kuat (p<0,01); signifikan (p<0,05); signifikan lemah (p<0,1)



Gambar 33. Hasil pengujian ke-2 dari model SEM yang dikembangkan

Tabel 9. Koefisien jalur dari hasil pengujian ke-2 model yang dikembangkan

Path coefficients

	AplkPpk	Antropg	HwnTanh	KimTnah	FisTnah	Vgetasi	TnRstor
HwnTanh	-0,000					0,564***	
KimTnah	-0,300*		-0,466***		-0,520***		
FisTnah	0,446***		-0,323**				
Vgetasi	-0,538***	-0,044		0,174	-0,502***		
TnRstor	0,050	0,278*	0,176	0,417***	0,473***	-0,339**	

Ket: (***) signifikan kuat (p<0,01); (***) signifikan (p<0,05); (*) signifikan lemah (p<0,1)

Tabel 10. Nilai bobot indikator dari setiap variabel laten hasil pengujian ke-2 pada model yang dikembangkan

	AplkPpk	Antropg	HwnTanh	KimTnah	FisTnah	Vgetasi	TnRstor	Type	SE	P value
Pu	1	0	0	0	0	0	0	Formatif	0,122	<0,001
NonPu	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0,000	1,000
Ser	0	-0,365	0	0	0	0	0	Formatif	0,179	0,028
Sed	0	-1,119	0	0	0	0	0	Formatif	0,113	<0,001
TdkP	0	0	0	0	0	0	0	Formatif	0,000	1,000
Kelmp	0	0	0,304	0	0	0	0	Formatif	0,186	0,059
Keky	0	0	0,463	0	0	0	0	Formatif	0,169	0,006
H'	0	0	0,414	0	0	0	0	Formatif	0,174	0,014
pH	0	0	0	0,517	0	0	0	Formatif	0,163	0,003
EC	0	0	0	-0,34	0	0	0	Formatif	0,182	0,039
BOT	0	0	0	0,491	0	0	0	Formatif	0,166	0,004
BIT	0	0	0	0	0,54	0	0	Formatif	0,161	0,002
KA	0	0	0	0	-0,546	0	0	Formatif	0,160	0,001
AT	0	0	0	0	0,05	0	0	Formatif	0,217	0,411
H'po	0	0	0	0	0	0,608	0	Formatif	0,155	<0,001
H'se	0	0	0	0	0	0,608	0	Formatif	0,155	<0,001
LHdp	0	0	0	0	0	0	0,8	Formatif	0,137	<0,001
Diamt	0	0	0	0	0	0	0,8	Formatif	0,137	<0,001

Lampiran 7. Sertifikat Bebas Plagiasi Naskah Disertasi

plagiarism-detector
Cutting-edge class tool for plagiarism detection and prevention





**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
PROGRAM PASCASARJANA**

21 0067 D



Nomor: 854/UN10.F40/PN/2021
Sertifikat ini diberikan kepada:

Nama	: Muhammad Yusuf
NIM	: 177090100011001
Program Studi	: Program Doktor Biologi
Fakultas	: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas	: Universitas Brawijaya

Dengan Judul **Disertasi**

Analisis Degradasi Lingkungan dan Pertumbuhan Tanaman Penghijauan Dalam Program Restorasi Pasca Alih Fungsi Hutan Lindung di UB Forest, Malang

Telah dideteksi tingkat plagiasinya secara online pada tanggal **30 Juni 2021**
dan dinyatakan **bebas plagiasi** dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$.


 Direktur
 Prof. Dr. Marjono, M.Phil
 NIP. 196211161988031004

Malang, 30 Juni 2021
Ketua Badan Penerbitan Jurnal


 Indah Yanti, S.Si., M.Si.
 NIP. 19791129 200501 2 002

