

REZANA

penelitian **HUTAN** tanaman

Vol. 23 No. 1, Juni 2026

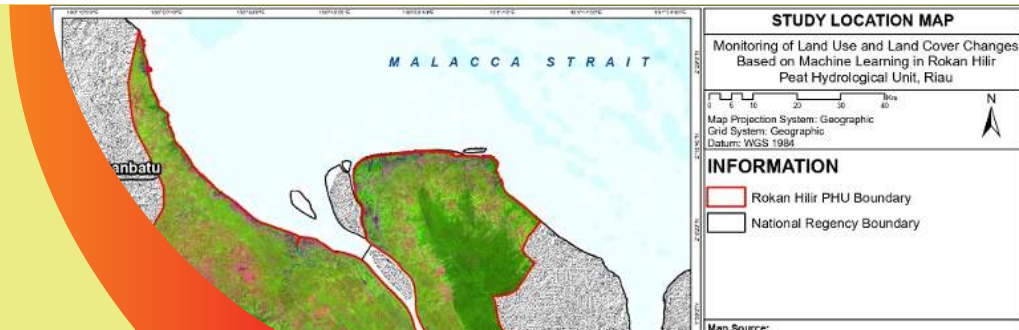
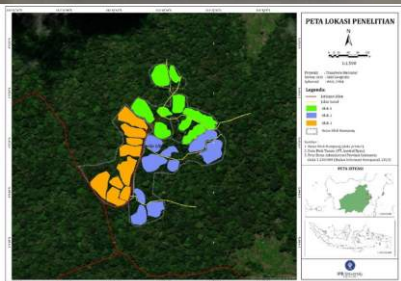
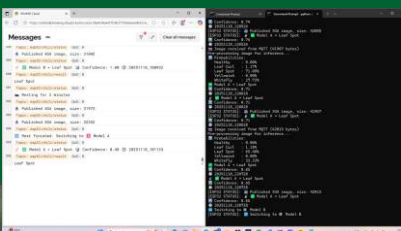
Early Detection of Chili Leaf Diseases in AI-Based Agroforestry Systems Using Convolutional Neural Networks

Monitoring of Land Use and Land Cover Changes Based on Machine Learning in Rokan Hilir Peat Hydrological Unit, Riau

Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Tingkat Bahaya Erosi sebagai Dasar Pengelolaan Agroforestry di Perhutanan Sosial

Simpanan Karbon pada Tegakan *Rubroshorea selanica* di Hutan Penelitian Gunung Dahu, Kabupaten Bogor

Intensitas Pemanenan dan Karakteristik Rumpang pada Hutan Alam Bekas Tebangan



Asosiasi Peneliti dan Teknisi Kehutanan dan Lingkungan Hidup Indonesia
Association of Indonesian Forestry and Environment Researchers and Technicians

Terakreditasi
 Surat Keputusan Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi
 No: 158/E/KPT/2021

JURNAL PENELITIAN HUTAN TANAMAN

Vol. 23 No. 1, Juni 2026

DAFTAR ISI

1. **Early Detection of Chili Leaf Diseases in AI-Based Agroforestry Systems Using Convolutional Neural Networks**
(Deteksi Dini Penyakit Daun Cabai pada Sistem Agroforestri Berbasis Kecerdasan Buatan Menggunakan Jaringan Saraf Konvolusional)
Zharifah Puspita Candini, Dyah Aruming Tyas, and/dan Erianto Indra Putra _____ **1-12**
2. **Monitoring of Land Use and Land Cover Changes Based on Machine Learning in Rokan Hilir Peat Hydrological Unit, Riau**
(Monitoring Perubahan Tutupan dan Penggunaan Lahan Berbasis Machine Learning di Kesatuan Hidrologis Gambut Rokan Hilir, Riau)
Hanum Resti Saputri, Erianto Indra Putra, dan/and Yudi Setiawan _____ **13-31**
3. **Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Tingkat Bahaya Erosi sebagai Dasar Pengelolaan Agroforestry di Perhutanan Sosial**
(Land Suitability Evaluation and Erosion Hazard Level as a Basis for Agroforestry Management Social Forestry)
Nur Faras Radya Ismaya, Sukma Arty Purwa Aditya, Desi Nurmallasari, Alfaro Catya Wahyu Raka Wardana, Febri Arif Cahyo Wibowo, dan/and Nugroho Tri Waskitho _____ **33-46**
4. **Simpanan Karbon pada Tegakan *Rubroshorea selanica* di Hutan Penelitian Gunung Dahu, Kabupaten Bogor**
*(Carbon Storage in *Rubroshorea selanica* Stands at the Gunung Dahu Research Forest, Bogor)*
Maharani Putri Banestia, Prijanto Pamoengkas, dan/and Wahyu Catur Adinugroho _____ **47-66**
5. **Intensitas Pemanenan dan Karakteristik Rumpang pada Hutan Alam Bekas Tebangan**
(Logging Intensity and Canopy Gap Characteristics in Logged-Over Natural Forests)
Rosita Dewi, Prijanto Pamoengkas, Darwo, dan /and Ika Heriansyah _____ **67-80**

Early Detection of Chili Leaf Diseases in AI-Based Agroforestry Systems Using Convolutional Neural Networks

Deteksi Dini Penyakit Daun Cabai pada Sistem Agroforestri Berbasis Kecerdasan Buatan Menggunakan Jaringan Saraf Konvolusional

Zharifah Puspita Candini¹, Dyah Aruming Tyas^{2*}, and/dan Erianto Indra Putra³

¹Undergraduate Program in Electronics and Instrumentation, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara Bulaksumur, Yogyakarta, Indonesia, 55281

²Department of Computer Science and Electronics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara Bulaksumur, Yogyakarta, Indonesia, 55281

³Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Environment IPB University Jl. Ulin Kampus IPB Darmaga, Jawa Barat, Indonesia, 16680

* E-mail: dyah.aruming.t@ugm.ac.id

Tanggal diterima: 27 November 2025; Tanggal disetujui: 24 Desember 2025; Tanggal direvisi: 29 Januari 2026

Abstract

Early detection of diseases in chili plants is crucial to prevent yield reduction. However, its implementation in the field still faces challenges, particularly related to variations in lighting, leaf orientation, and the limitations of low-cost camera devices. This study proposes an integrated detection framework that combines image acquisition with an ESP32-CAM, transmission via MQTT, and real-time inference in Python using a fine-tuned ResNet-18 model specifically tailored to withstand noise in real-world conditions. The primary objective of this research is to evaluate how domain-aligned fine-tuning can enhance the model's generalization compared to an older, unoptimized model, especially when tested across variations in texture, pigmentation, and leaf angles. Observational evaluations over four days using two different leaf subsets demonstrate that the fine-tuned model consistently outperformed the older model in overall accuracy, inter-class stability, and resilience against leaf position changes. Real-time implementation using the Telegram Bot API successfully delivered swift classification notifications and images, demonstrating the system's viability for remote plant health monitoring. These results underscore the importance of targeted fine-tuning in bridging the gap between laboratory-based CNN models and field-ready disease detection systems. Furthermore, given that chili is widely cultivated in agroforestry systems in Indonesia, the developed early disease detection framework offers significant benefits in maintaining productivity under challenging microclimate conditions that complicate manual diagnosis.

Keywords: Agriculture, CNN, disease detection, ESP32-CAM, ResNet-18

Abstrak

Deteksi dini penyakit pada tanaman cabai sangat penting untuk mencegah penurunan hasil panen. Namun, implementasinya di lapangan masih terkendala oleh variasi pencahayaan, orientasi daun, dan keterbatasan perangkat kamera murah. Penelitian ini mengusulkan kerangka deteksi terpadu yang memanfaatkan ESP32-CAM untuk akuisisi citra, penggunaan MQTT untuk transmisi, dan inferensi real-time dengan Python menggunakan model ResNet-18 yang telah disesuaikan agar tahan terhadap noise dalam kondisi nyata. Tujuan utama adalah untuk mengevaluasi sejauh mana fine-tuning yang sesuai dengan domain dapat meningkatkan kemampuan generalisasi model dibandingkan model lama yang tidak dioptimasi, terutama dalam menghadapi variasi tekstur, pigmentasi, dan sudut pandang daun. Evaluasi selama empat hari dengan dua subset daun menunjukkan bahwa model fine-tuned consistently lebih akurat dan lebih stabil dalam mengklasifikasikan jenis penyakit. Implementasi

dengan Telegram Bot API menyediakan notifikasi klasifikasi dan gambar cepat, membuktikan kelayakan sistem untuk pemantauan kesehatan tanaman jarak jauh. Hasil ini menegaskan bahwa fine-tuning yang tepat sangat penting untuk menciptakan sistem deteksi penyakit yang efektif di lapangan, terutama dalam sistem agroforestri di Indonesia.

Kata kunci: CNN, deteksi penyakit, ESP32-CAM, pertanian, ResNet-18

1. Introduction

Indonesia's agriculture is highly diverse and considered as an agricultural country, where agriculture has long been the backbone of its economy (Syuaib, 2016). Of the 56.5 million hectares of agricultural land, there is approximately 22.4 million hectares used for estate plantations, including chili plantations. Chili cultivation in Indonesia is also widely practiced within agroforestry systems and intercropped with multipurpose tree species such as mention some examples with supporting references. These systems enhance microclimate stability and soil fertility but introduce variability in shading and humidity that makes it difficult for manual disease detection. Successful chili-based agroforestry practices demonstrate increased income diversification but also highlight persistent vulnerability to foliar diseases such as yellowing, leaf curl, leaf spot, and whitefly infestation. Variations in the factors and symptoms causing chili plant diseases lead to false detections by farmers. To minimize the lack of distinguishability, integrating machine learning and artificial intelligence (AI) will enable early disease detection. Early detection supported by AI-based systems thus becomes essential for sustaining productivity in these heterogeneous environments

A major limitation in previous chili disease detection studies is that most proposed CNN-based models remain largely theoretical, with limited validation through hardware-based implementation in real agricultural environments. Existing research predominantly emphasizes algorithmic development while

overlooking practical deployment constraints on embedded platforms, leaving many models unverified under field conditions (Mim et al., 2024; Karna et al., 2024). In addition, CNN-based classification of chili leaf diseases remains challenging due to strong visual similarities among crumpled, yellowish, and healthy leaves. Similar difficulties in distinguishing disease symptoms have long been reported in plant pathology studies, where overlapping visual characteristics and environmental influences complicate disease identification (Asmaliyah, 2015; Lelana et al., 2015). Recent computer-vision-based studies further confirm this issue, showing frequent misclassification of yellowing and leaf curl symptoms due to similarities in color and texture (Hasbollah et al., 2020; Li et al., 2024). These challenges are further exacerbated in agroforestry-based chili cultivation systems, where variable shading, diffuse illumination, and fluctuating humidity increase visual ambiguity, underscoring the need for a robust, deployable deep learning-based detection system capable of reliable operation under real-world field conditions.

1.1. Research Objectives

To support chili production within agroforestry systems, this study aims to ensure that the detection model remains reliable under complex field microclimates where illumination, leaf orientation, and background conditions vary widely. The objectives of this research are the following:

1. To evaluate the performance of the ResNet-18 model, specifically

analyzing its effectiveness in reducing misclassification between chili plant leaf diseases.

2. To develop a model on an ESP32-CAM microcontroller with Telegram Bot API for real-time monitoring.

1.2. Literature Review

Recent literature emphasizes that chili cultivation within agroforestry systems presents unique challenges and opportunities for disease dynamics. Agroforestry microclimates characterized by heterogeneous light distribution, elevated humidity under tree canopies, and multilayered vegetation structure can intensify foliar pathogen development while simultaneously reducing pest pressure through enhanced biodiversity (Hairiah et al., 2011; Roshetko et al., 2013). Studies show that Begomovirus-driven leaf curl disease and whitefly populations tend to increase in shaded, humid environments, whereas fungal leaf spots caused by *Alternaria* and *Cercospora* spp. spread more rapidly under prolonged leaf wetness. Conversely, agroforestry systems often support higher natural enemy abundance, which can suppress whitefly and other insect vectors. This dual ecological effect makes disease surveillance more complex and increases the need for automated, sensor-assisted detection frameworks. Furthermore, previous deep learning-based models for chili disease detection, while promising, often rely on homogeneous datasets lacking representation of agroforestry-related environmental variability, limiting their real-world applicability. Recent advances in CNN architectures, transfer learning, and domain-specific fine-tuning have been shown to significantly improve robustness under field conditions (Aminuddin et al., 2022; Pandey et al., 2024). Yet only a few studies have examined their performance in heterogeneous environments such as agroforestry systems, highlighting the importance of developing AI-driven

detection tools capable of coping with real-world microclimatic variability.

Rahman (2025) proposed work on ResNet-18 with transfer learning for general plant disease detection across various species. This study uses the Kaggle Plant Disease Classification Merged Dataset by Aline Doborovsky, consisting of 14 sub-datasets and 88 classes with over 17,000 images. The model uses a learning rate value of 0.001, a batch size of 400 images, and several epochs. The study highlights that transfer learning from large datasets significantly reduces overfitting when training on limited datasets. The output of this study reports an accuracy of 96% with a validation loss of 4.54%.

Aminuddin et al. (2022) presented research to examine a data augmentation method known as a geometric transformation on a small chili dataset. The augmented and original images are fed into two deep learning models, Convolutional Neural Network (CNN) and Residual Network (ResNet-18). The chili leaf dataset consists of 1200 images, divided into 600 healthy chili leaves and 600 diseased chili leaves. The hyperparameters used consist of a 32 batch size, 0.0001 learning rate, 30 maximum epochs, 50 testing frequency, and Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM) optimizer. The average accuracy from the original dataset is 95.8%, and the average from the original with augmented datasets using geometric transformation is 97%.

Pandey et al. (2024) proposed IoT-based crop health monitoring research. This study aims to enhance agricultural productivity and sustainability by integrating machine learning for precision agriculture techniques. They also implement a CNN for disease prediction using ESP32-CAM. The ESP32-CAM tracks the development of crops, sending all collected information wirelessly to the cloud for in-depth examination. The image is captured using the ESP32-CAM, and this information is kept in the device dataset for later analysis, which employs the CNN

algorithm. The process starts by generating the data in the ESP32 microcontroller, encoding the picture data, and sending it wirelessly over a Wi-Fi network. The dataset used for the CNN is from the Kaggle dataset, consisting of five classes: healthy, leaf curl, leaf spot, whitefly, and yellowing. The model gives out the highest 63% accuracy over 100 epochs.

2. Methodology

This study adopts a systematic approach to design and evaluates a Convolutional Neural Network (CNN) model based on the ResNet-18 architecture, with four models evaluated with batch normalization and augmentation to reduce misclassification in early chili plant disease detection. This research also adopts an end-to-end machine learning and embedded system approach, combining deep learning-based image classification with real-time IoT deployment.

2.1. Research Location

This research is located in Sindangbarang, Bogor, West Java. Dataset collection was conducted for fine-tuning the ResNet-18 model at Pacet, Cianjur, West Java, and Ciherang, Bogor, West Java.

2.2. Methods

2.2.1. Research Design

This study employs a modular research design combining hardware engineering, dataset acquisition, deep learning model development, and system development. Datasets are taken from both public datasets and manually using the ESP32-CAM setup. These chili leaf images are then preprocessed through labeling, augmentation, and dataset splitting. A ResNet-18 Convolutional Neural Network (CNN) is trained using the processed dataset and optimized through regularization, validation, and fine-tuning.

The model is then integrated into an ESP32-CAM Python inference pipeline and MQTT for device-to-device messaging, enabling real-time classification. Detection outputs are delivered to users via the Telegram Bot API.

2.2.2. Hardware Design and System Setup

Hardware development for the real-time disease monitoring system focuses on a controlled hardware environment to ensure consistent image capture. A black box container is assembled with dimensions of 17.5 cm x 17 cm, and the ESP32-CAM is placed inside a 3D-printed box with dimensions of 7.3 cm x 5 cm x 2.4 cm. The ESP32-CAM box is mounted right on top of the black box container, with a height of 10.5 cm above the container. The ESP32-CAM mount is positioned at 80°, with a slight 11° curvature at the tip. The ESP32-Cam is powered by a 10.0 Ah, 38.5 Wh, 3.85 V power bank.

The observation is done with a 4-day schedule to systematically compare fine-tuned and non-fine-tuned models under identical image-capture conditions. Two independent leaf batches were used: the first, consisting of five leaves per class, was used on Days 1-2, and the second, with five different leaves per class, was used on Days 3-4. Each day consisted of four 60-minute cycles, each representing a leaf position. Each cycle produced 50 captures (five classes × five leaves × two model pipelines), yielding 200 images per day.

Across all four days, the total captures will be 800 with 50 different leaves (10 per class), and 80 leaf-position combinations per batch (20 combinations x 5 classes x 5 leaves). Fine-tuned versions of Model A (augmentation) and Model B (augmentation with batch normalization) were evaluated on Days 1 and 3, while non-fine-tuned versions of the same models were observed on Days 2 and 4

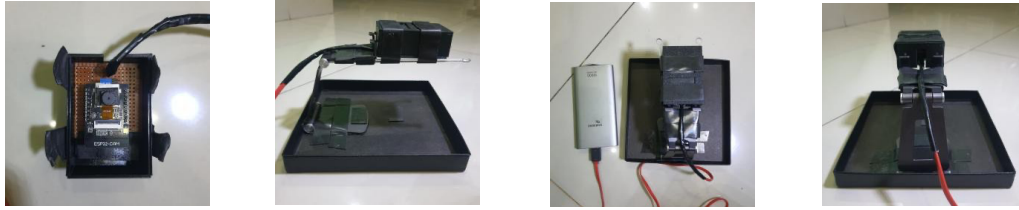


Figure (Gambar) 1. ESP32-CAM hardware ((a) ESP32-CAM 3D-printed box, (b) side view, © top view, and (d) back view) (*ESP32-CAM hardware ((a) Kotak 3D print ESP32-CAM, (b) tampak samping, (c) tampak atas, dan (d) tampak belakang*)

Table (Tabel) 1. Experimental duration, data capture summary, and leaf sampling configuration (*Durasi penelitian, ringkasan pengambilan data, dan konfigurasi sampel daun*)

Experimental duration (<i>Durasi penelitian</i>)	
Total day	4 days
Total time per day	4 hours
Total cycle per day (1 cycle = 1 leaf position)	4 cycles
Total cycle overall	16 cycles
Total time per leaf	1 minute
Total time per model	5 minutes
Total time per cycle	~ 60 minutes
Data capture summary (<i>Ringkasan pengambilan data</i>)	
Total capture taken per cycle	50 captures per cycle
Total capture taken per day	200 captures
Total capture overall	800 captures
Leaf Sampling configuration (<i>Konfigurasi sampel daun</i>)	
Total leaf per class per day	5 leaves
Total leaf per day	25 leaves/day
Total leaf per class overall	10 leaves
Total leaf overall	50 leaves
Total leaf position combination	20 leaf position combinations
Total combinations per day	100 combinations/day
Total combinations overall	800 combinations

2.2.3. Data Acquisition

The dataset used in this research was collected from several open-source platforms, primarily from Kaggle and Roboflow. One of the primary sources was the Chili Plant Disease Dataset by Dheni Dwi Prakoso on Kaggle, distributed evenly across five categories: healthy, leaf curl, leaf spot, whitefly, and yellowish. In addition, four datasets from Roboflow were used to enrich image diversity and the representation of chili plant diseases. Each

dataset provides annotated images of common chili plant diseases under various conditions, lighting, and angles, offering a more general and robust dataset for training and evaluation. In total, the combined datasets yielded the following numbers of images per class: Healthy: 365; Leaf Curl: 398; Leaf Spot: 397; Whitefly: 334; and Yellowish: 338. The overall number of images collected from all sources are 1,832 images.

Chili leaf images are also collected manually using the ESP32-Cam under the configured setup, with only a single leaf placed on a black box container. The acquisition process captures leaves from multiple orientations, producing a diverse dataset. The manual collected dataset is used only for fine-tuning the ResNet-18 models. The total for the manually collected dataset is: Healthy: 629; Leaf Curl: 201; Leaf Spot: 436; Whitefly: 623; and Yellowish: 62. The overall number of manually collected images is 1,951.

2.2.4. Data Preprocessing and Analysis

The preprocessing pipeline made sure all images were standardized before model training, keeping the manually collected ESP32-CAM images consistent with the open-source dataset. Every image was resized to 224 x 224 pixels, rescaled by 1/255, and sorted by disease class. Manually collected images needed to be labeled, while the open-source ones already had labels.

Augmentation is applied during training. The augmentation configuration included: rotation ($\pm 30^\circ$), width and height shifts (0.2), shear transformations (0.2), zoom range (0.2), horizontal flipping, and

nearest-pixel fill mode. These operations simulate illumination changes, leaf orientation variability, and camera misalignment, typically observed in ESP32-CAM field acquisition.

Dataset splitting followed 70% training, 15% validation, and 15% testing structure to balance learning stability and evaluation reliability. The performance analysis incorporated multiple quantitative indicators, including validation accuracy, test accuracy, class-level accuracy, and error distribution patterns as observed in the confusion matrix. Graphs of training accuracy and loss were also used to identify signals of overfitting and to evaluate the effects of augmentation strategies.

2.2.5. ResNet-18 Model Development

Eighteen versions of the ResNet-18 architecture were built to determine the optimal configuration for classifying chili diseases. All models were trained on an Acer Nitro 5 AN515-57 (Intel Core i9, NVIDIA RTX 3060) with Visual Studio Code. Different hyperparameters were tested and compared to see how they affected results. Table 2 lists the hyperparameter variations used.



Figure (Gambar) 2. Manual chili dataset samples ((a) healthy chili leaves, (b) leaf curl disease, (c) leaf spot disease, and (d) yellowish disease (*Sampel dataset cabai secara manual*((a) *daun cabai sehat*, (b) *penyakit keriting*, (c) *penyakit bintik*, (d) *penyakit kutu putih*, dan (e) *penyakit menguning*))

Table (Tabel) 2. Hyperparameter tuning (*Penyetelan hiperparameter*)

Parameter (Parameter)	Values (Nilai)
Batch Size	32 and 64
Initial Learning Rate	0.001; 0.01; and 0.1
Maximum Epoch	80; 40; and 10

Each hyperparameter combination was tested under four preprocessing conditions: raw, raw with batch normalization, augmented, and augmented with batch normalization. This resulted in a structured experimental grid that enabled direct comparison of augmentation effects and normalization strategies. During training, the optimizer behavior, learning curves, and early-epoch stability were monitored to identify underfitting.

All conditions will use the same ResNet18 backbone, which included a Conv-BN-ReLu stem, four residual stages with 64, 128, 256, and 512 channels (each with two basic blocks), and a two-layer classification head with global average pooling, a dense layer of 256 units, and a dense softmax layer. The training process used helper functions such as ReduceLROnPlateau scheduling, early stopping, model checkpointing, categorical cross-entropy, class weighting, L2 regularization, and optional batch normalization in the head.

The performance of the trained ResNet-18 model is evaluated using several consecutive metrics to ensure both classification effectiveness and deployment feasibility on the ESP32-CAM. The evaluation metrics include validation accuracy, test accuracy, precision, recall, F1-score, and per-class accuracy, along with confusion matrix analysis. Models were also compared using accuracy and loss curves to assess consistency between training and validation trajectories.

From the 72 trained models (generated from 18 hyperparameter configurations x 4 preprocessing variants), the two models with the highest overall test performance were selected. These best-performing models were then used as fine-tuning benchmarks for real-world deployment in manual image acquisition on the ESP32-CAM.

2.2.6. System Integration

The system uses a distributed processing setup in which the ESP32-CAM

serves only as an image publisher. It sends each captured frame to an MQTT broker (HiveMQ), keeping communication light and reducing the microcontroller's workload. A Python-based subscriber then collects the images, runs TensorFlow Lite inference, and handles all further processing, such as classification, confidence scoring, and logging. This setup keeps all computation within the Python environment.

2.2.7. Real-Time Detection via Telegram Bot API

A telegram bot is created using BotFather, connected with a unique bot token and chat ID, and added to the inference pipeline to provide real-time notifications. After each prediction, the Python module sends the predicted disease class, confidence score, and timestamp to the Telegram Bot API. This automated reporting system helps monitor plant health remotely and provides users with immediate updates on chili leaf diseases.

In agroforestry systems, the fine-tuned model's robustness to variation in illumination, leaf angles, and background noise is particularly important. Tree canopy structures create heterogeneous lighting that complicates visual assessment. The model's strong performance across these conditions suggests high applicability for chili farmers practicing agroforestry. Early detection of yellowish, leaf curl, leaf spot, and whitefly symptoms supports timely management actions such as nutrient adjustment, vector control, and canopy pruning—helping preserve productivity in diversified land-use systems. (Hairiah et al., 2011; Roshetko et al., 2013; Abdoellah et al., 2006; Sanjaya et al., 2020; Rahman et al., 2016).

3. Results and Discussion

3.1. Results

Seventy-two different ResNet-18 models were created to study how preprocessing methods and hyperparameter

settings affect early chili leaf disease recognition. Out of the seventy-two different models, the best model was the Augmented variant, achieving 96.74% validation accuracy and 97.83% test accuracy. The second-best model, the

Augmented plus Batch Normalization reached 97.47% test accuracy. Both models showed strong per-class accuracy, addressing previously observed misclassification patterns (model performances in Table 3 through Table 6).

Table (Tabel) 3. Best model performance evaluation (*Evaluasi kinerja model terbaik*)

Model Scenarios (Skenario model)	Batch Size	LR	Max Epoch	Val Acc (%)	Test Acc (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
Augmented (best)	64	0.001	80	96.74	97.83	97.84	97.83	97.83
Augmented + BN	64	0.001	80	96.74	97.47	97.59	97.47	97.49

Table (Tabel) 4. Augmented model evaluation (*Evaluasi model augmented*)

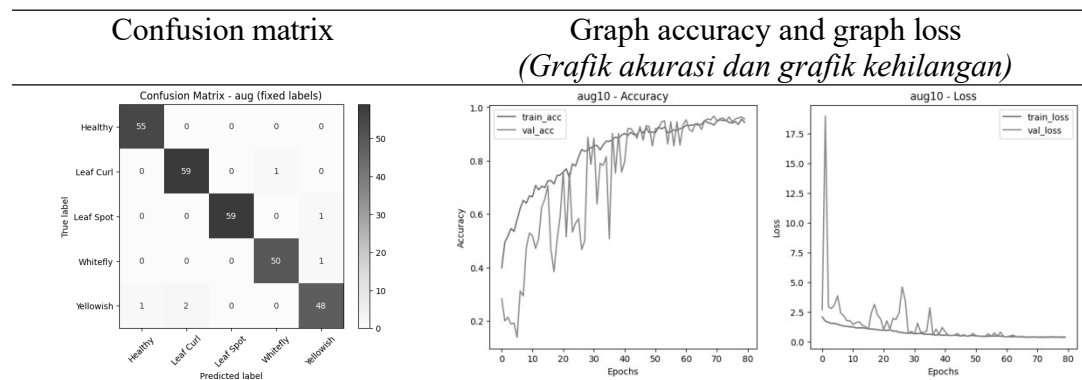


Table (Tabel) 5. Augmented with batch normalization model evaluation (*Evaluasi model augmented dengan batch normalisasi*)

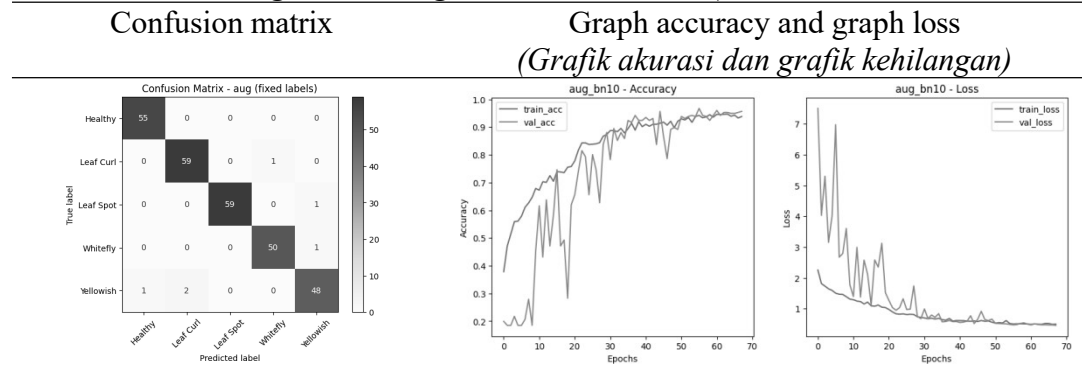


Table (Tabel) 6. Per-class accuracy result (*Hasil akurasi per kelas*)

Model scenarios	Per-class accuracy (<i>Akurasi per kelas</i>)				
(<i>Skenario model</i>)	Healthy (<i>Sehat</i>)	Leaf curl (<i>Keriting</i>)	Leaf spot (<i>Bintik</i>)	Whitefly (<i>Kutu putih</i>)	Yellowish (<i>Kuning</i>)
Augmented	1.0000	0.9833	0.9833	0.9804	0.9412
Augmented with batch normalization	1.0000	0.9333	0.9833	0.9804	0.9804

When tested in real-world conditions on the ESP32-CAM, both legacy models that were trained only on public datasets made many mistakes. This difference between lab and real-world results is due to a distribution shift. To address the distribution shift, a dedicated manual ESP32-CAM dataset was collected using single-leaf images against a uniform black background. This dataset, acquired at XGA resolution (1024 x 768), aimed to minimize background interference and force the model to focus on leaf morphology rather than contextual noise. Building on this, both top models were fine-tuned using the new dataset. These results are tabulated in Table 7.

During a four-day evaluation, fine-tuned and non-fine-tuned ResNet-18

models were compared in a controlled setting to separate model improvements from sample bias. On Day 1 and 2, the same leaf samples were used. On Day 3 and 4, a different set was used. The fine-tuned models consistently outperformed their older counterparts, achieving 83.00–85.00% accuracy on the first leaf set and up to 98.00% on the second. In contrast, the non-fine-tuned models showed a significant drop in performance, with accuracy ranging from 20.00% to 30.30% and complete failures across several classes.

Results from all four days, as shown in Table 8, indicate that fine-tuned models consistently outperform older models, regardless of leaf samples, disease types, or tested angles.

Table (Tabel) 7. Two best fine-tuned models' evaluation (*Evaluasi dua model fine-tune terbaik*)

Model	Dataset	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Augmented	Train	0.969941	0.971092	0.969941	0.970023
Augmented	Val	0.986254	0.987155	0.986254	0.986450
Augmented	Test	0.969595	0.971699	0.969595	0.970083
Augmented with BN	Train	0.989003	0.989298	0.989003	0.989055
Augmented with BN	Val	0.986254	0.986598	0.986254	0.986335
Augmented with BN	Test	0.979730	0.981193	0.979730	0.980124

Table (Tabel) 8. Data results on all models (*Hasil data dari semua model*)

	Model A-FT		Model B-FT		Model A-Old		Model B-Old	
	Day 1	Day 3	Day 1	Day 3	Day 2	Day 4	Day 2	Day 4
Upward 0°	84%	96%	88%	100%	33%	36%	28%	24%
Sideways 90°	96%	88%	88%	96%	24%	24%	32%	20%
Downward 180°	84%	88%	84%	96%	32%	16%	28%	16%
Sideways 270°	76%	88%	72%	100%	32%	44%	16%	20%
Healthy	85%	90%	75%	100%	0%	0%	0%	0%
Leaf Curl	100%	95%	95%	95%	0%	10%	0%	0%
Leaf Spot	45%	65%	55%	95%	65%	65%	85%	95%
Whitefly	100%	100%	90%	100%	89%	55%	45%	5%
Yellowish	100%	100%	95%	100%	0%	15%	0%	0%

3.2. Discussion

The observed performance improvements are primarily attributed to better alignment between the training process and real-world acquisition variability, including viewing angles, illumination fluctuations, and disease-feature uniformity. Models trained on augmented or batch-normalized datasets consistently outperformed their non-augmented counterparts. This confirms that data augmentation improves generalization by exposing CNNs to a variety of geometric and photometric transformations (Shorten & Khoshgoftaar, 2019). Batch normalization enhanced performance by stabilizing feature distributions and expediting convergence, thereby fortifying discriminative feature learning (Ioffe & Szegedy, 2015). However, despite high accuracy in the lab, the first time it was used in the real world, there were many misclassifications. This suggests that there was a distribution shift driven by uncontrolled factors such as uneven lighting, background complexity, and sensor noise.

Fine-tuning the models with field samples helped bridge the gap between the two domains, enabling higher-level feature representations to perform better in the

target deployment environment. This process allowed the models to keep low-level visual features while adjusting class-discriminative patterns. This made them much more stable and better able to generalize when data were collected in the real world (Pan & Yang, 2010). Consequently, the proposed methodology significantly reduced misclassification between yellowing and leaf curl diseases, which have been identified as a persistent issue in previous research, thereby directly addressing the research gap related to class ambiguity and insufficient real-world validation. The results show that fine-tuning is an important step for moving CNN-based disease detection systems from controlled lab settings to reliable use in the real world.

In agroforestry-based chili cultivation systems characterized by heterogeneous microclimatic conditions, including variable shading, diffuse illumination, and fluctuating humidity, the enhanced robustness of the fine-tuned models is especially important. The reliable identification of yellowing, leaf curl, leaf spot, and whitefly indicators in these circumstances underscores the practical significance of the proposed framework for enabling prompt interventions and

maintaining chili productivity across varied, environmentally dynamic agroforestry settings.

4. Conclusion and Recommendations

4.1. Conclusion

This research demonstrates that fine-tuning a ResNet-18 model for ESP32-CAM images enables reliable early detection of chili plant diseases. Over four days of real-world testing, fine-tuned models consistently outperformed non-fine-tuned models in accuracy, prediction stability, and adaptability to changes in light and viewpoint. The results underscore the need to match training data to sensor-specific noise for effective CNN-based detection systems outside the lab. The combined ESP32-CAM, MQTT, and Python framework performed well, supporting its use for continuous field monitoring.

4.2. Recommendations

Future research should test more agroforestry settings and extend real-world trials to improve reliability in changing conditions. Researchers should also use adaptive learning strategies and lighter on-device inference models to improve scalability and long-term usability.

Acknowledgments

The authors express sincere gratitude to Pak Odo, chili farmer at Pacet, Cianjur West Java and to Evi Oktaviana, nursery practitioner whose cooperation enabled the data collection. Their contributions as technical, practical, and substantive were essential to the completion of this research. This work was supported by the Department of Computer Science and Electronics, Universitas Gadjah Mada under the Publication Funding Year 2026.

References

Abdoellah, O.S., Hadikusumah, H.Y., Takeuchi, K., Okubo, S. (2006). Home

gardens in West Java, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 68, 1-23.

Aminuddin, N.F., Tukiran, Z., Joret, A., Tomari, R., & Morsin, M. (2022). An improved deep learning model of chili disease recognition with small dataset. In *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(7), 407-412.
www.ijacsa.thesai.org

Asmaliyah. (2015). Penyakit-penyakit penting pada tanaman hutan rakyat dan alternatif pengendaliannya. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 12(2), 141-150.

Ioffe, S., & Szegedy, C. (2015). *Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift*.

Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F. (2011). *Agroforestry dan Perubahan Iklim*. World Agroforestry Centre (ICRAF).

Islam, M.T.M., Fahim, I.A., Islam, M.N., Rahman, M., Rahman, Y., Rouf, N., Anowar, T.I., & Mondal, S. (2024). IoT-based agriculture farm monitoring system and development of plant leaf disease detection using deep neural network. In *2024 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTaIS)*. IEEE.

Karna, N., Kelikualiq, R., Aditya, B., Paramartha Putra, M.A., Rahyuni, D., & Hertiana, S.N. (2024). Health monitoring system in smart greenbox for chili plant using convolutional neural network. *Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems, IoTaIS 2024*, 38-43.
<https://doi.org/10.1109/IoTaIS64014.2024.10799433>

Lelana, N.E., Anggraeni, I., & Mindawati, S. (2015). Uji antagonis *Aspergillus* sp. dan *Trichoderma* spp. terhadap *Fusarium* sp., penyebab penyakit rebah kecambah pada sengon. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 12(1), 23–28.

- Pan, S.J., & Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345-1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>
- Pandey, V., Patil, Y., Kanagaraj, R., Dabhilkar, K., Darade, R., & Patil, H. (2024). CHMP-CNN: To implement the IoT based crops health monitoring and prediction using deep learning. *2024 International Conference on Advances in Computing Research on Science Engineering and Technology, ACROSET* 2024. <https://doi.org/10.1109/ACROSET62108.2024.10743388>
- Rahman, R. (2025). *Using Machine Learning to Identify Crop Diseases with ResNet-18*. 311-315. <https://doi.org/10.5220/0013123500003911>
- Rahman, S.A., Sunderland, T., Roshetko, J.M. (2016). Tree-crop interactions in agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 142, 49-57.
- Roshetko, J.M., Nugraha, E., Mulyoutami, E. (2013). Smallholder agroforestry systems in Indonesia. *Agroforestry Systems*, 87, 729-742.
- Sanjaya, Y., Kholil, A., & Dewi, R. (2020). Productivity of chili in agroforestry systems in Garut, Indonesia. *Jurnal Agroforestri Indonesia*, 3(2), 55-63.
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T.M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>
- Syuaib, M.F. (2016). Sustainable agriculture in Indonesia: Facts and challenges to keep growing in harmony with environment. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(2), 170-184.

**Monitoring of Land Use and Land Cover Changes Based on Machine Learning in
Rokan Hilir Peat Hydrological Unit, Riau**
*(Monitoring Perubahan Tutupan dan Penggunaan Lahan Berbasis Machine Learning di
Kesatuan Hidrologis Gambut Rokan Hilir, Riau)*

Hanum Resti Saputri¹, Erianto Indra Putra^{2*}, dan/and Yudi Setiawan³

¹ Tropical Silviculture Master Study Program, Graduate School, IPB University,
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

² Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Environment, IPB University,
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

³ Department of Forest Resources Conservation and Ecotourism, Faculty of Forestry and Environment, IPB
University, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

* E-mail: eriantopu@apps.ipb.ac.id

Tanggal diterima: 6 Februari 2026; Tanggal disetujui: 4 Juni 2026; Tanggal direvisi: 11 Juni 2026

Abstract

The Peat Hydrological Unit (PHU) of Rokan Hilir Regency is one of the peatland areas in Riau Province experiencing extensive peatland conversion. This conversion can lead to degradation of peat ecosystems and increase the risk of forest and land fires. However, the limited availability of long-term spatial data on land cover and land-use dynamics in the Rokan Hilir PHU remains a major constraint on sustainable peatland management. This study aims to analyze the land cover and land use classes that experienced the most significant changes and to estimate their magnitude during the 2005-2023 period. Land cover and land use classification were conducted using the Random Forest algorithm with 12 indices as input variables. The land cover and land use were classified into six classes: water bodies, built-up, bare land, oil palm plantations, natural forests, and plantation forests. The results showed that during 2005-2023, the largest decreases occurred in natural forest (119,186.3 ha) and plantation forest (72,135.6 ha). Meanwhile, the largest increases were observed in oil palm plantation (146,384.7 ha) and built-up (22,101.2 ha).

Keywords: *Degradation, land use-land cover, peatland, random forest*

Abstrak

Kesatuan Hidrologis Gambut (KHG) Kabupaten Rokan Hilir merupakan salah satu kawasan di Provinsi Riau yang mengalami konversi lahan gambut tinggi. Konversi tersebut berpotensi menyebabkan degradasi ekosistem gambut serta meningkatkan risiko kebakaran hutan dan lahan. Namun, keterbatasan data spasial jangka panjang mengenai dinamika perubahan tutupan dan penggunaan lahan di KHG Kabupaten Rokan Hilir masih menjadi hambatan dalam mendukung pengelolaan gambut yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelas tutupan dan penggunaan lahan yang paling banyak mengalami perubahan serta mengestimasi luas perubahannya pada periode 2005-2023. Klasifikasi dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* dengan 12 indeks sebagai variabel *input*. Tutupan dan penggunaan lahan diklasifikasikan menjadi enam kelas, yaitu badan air, lahan terbangun, lahan terbuka, perkebunan sawit, hutan alam, dan hutan tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama periode 2005-2023, kelas yang mengalami penurunan luas terbesar adalah hutan alam sebesar 119.186,3 ha dan hutan tanaman sebesar 72.135,6 ha. Sementara itu, peningkatan luas terbesar terjadi pada perkebunan sawit sebesar 146.384,7 ha dan lahan terbangun sebesar 22.101,2 ha.

Kata kunci: Degradasi, gambut, *random forest*, tutupan dan penggunaan lahan

1. Introduction

Indonesia is among the countries with the largest proportion of tropical peatlands, accounting for approximately 36% of the world's tropical peatland area (Warren et al., 2017). The total peatland area in Indonesia covers 14,905,600 ha, concentrated on three major islands: Kalimantan (28-32% of Indonesia's total peatland area), Sumatra (34-43%), and Papua (25-38%) (Harrison et al., 2020). Riau Province has a tropical peatland area of 6.5 million ha, distributed across several districts in the form of Peat Hydrological Units (PHU) (Khaira et al., 2020). According to Turmudi et al. (2021), the Government of Indonesia has designated peatland areas within the framework of PHU.

A PHU is a peatland area that is hydrologically interconnected and serves as an instrument to ensure the sustainability of peatlands. Its boundaries are typically defined by natural features such as rivers, coastlines, or mineral topographic divides, where surface and groundwater within the peat are interconnected in a single system. Peatlands remain sustainable when they are permanently or seasonally water-saturated (Harun et al., 2020). Conversely, they are prone to degradation if disruptions occur in their hydrological cycle, as this cycle plays a vital role in peatland persistence.

Rokan Hilir is one of the regencies in Riau Province, covering a total area of 888.159 ha, including both peatland and non-peatland areas. The peatlands in this regency form the Rokan Hilir KHG, covering approximately 592,730.2 ha of its total area (Mubekti, 2011). However, a significant proportion of these peatlands has undergone land-use conversion. Large-scale peatland expansion has been driven primarily by the plantation sector, along with industrial and residential development (Awal et al., 2023). According to Masganti et al. (2014), peatland degradation in Riau Province currently covers around 2,313,561

ha or 59.54% of its total peatland area. Of this 1,037,020 ha are utilized by local communities for oil palm cultivation, food crops, and horticulture (Wahyunto et al., 2013). Land-cover and land-use change has significantly contributed to peatland fires in Rokan Hilir Regency. In 2015, approximately 189,491 ha of peatland in the regency were burned (Harnanda, 2021). Activities that increase peat fire vulnerability include canal construction, the use of fire for land clearing in plantation areas, and forest encroachment (Fesyuk et al., 2020).

Sustainable peatland ecosystem protection is crucial, given its vital role for human well-being. Monitoring land use land cover change is necessary to serve as a basis for evaluating land use and formulating policies to protect peatlands vulnerable to degradation. Initially, land cover monitoring was conducted through field surveys and manual visual interpretation. However, these methods are inefficient as they require substantial time and resources (Feng et al., 2022). Currently, land cover monitoring can be carried out indirectly through remote sensing techniques. Google Earth Engine (GEE) is one such platform capable of performing land cover classification. According to Feng et al. (2022), GEE is a cloud-based geospatial processing platform used for preprocessing and acquiring multitemporal imagery that has been filtered. This monitoring process utilizes multispectral sensors from satellite imagery, along with various band algorithms and the processing of vegetation, water, and built-up indices (Firmansyah et al., 2022).

This study aims to analyze the land cover and land use types that have undergone the most significant changes and to estimate the area of land cover and land use with the greatest changes in the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit (PHU) from 2005 to 2023.

2. Methodology

2.1. Research Location

This study was conducted from September 2024 to January 2025, utilizing secondary data obtained through remote sensing in the Rokan Hilir Peatland Hydrological Unit (PHU), Riau Province. Data processing and interpretation were carried out at the Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Environment, IPB University. The study area focused on the Rokan Hilir PHU, which has been identified as an area frequently experiencing land-cover and land-use changes in Riau Province (Figure 1). Geographically, the regency is located between 1°14'-2°45' N and 100°17'-101°21' E.

The tools used in this study included stationery, GEE, Google Drive, Microsoft Excel 2021, Microsoft Word 2021, ArcGIS 10.8, Google Earth Pro, and RStudio software for data visualization. The materials used comprised shapefiles of the Rokan Hilir PHU, district boundaries, regency boundaries, and provincial

boundaries, as well as Landsat Landsat imagery.

2.2. Methods

2.2.1. Data Acquisition and Sample Collection

This study used secondary data consisting of Landsat satellite imagery and administrative boundary data. Landsat imagery was obtained from the GEE platform, including Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 8 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), and Landsat 9 Operational Land Imager-2/Thermal Infrared Sensor-2 (OLI-2/TIRS-2). The imagery used in this study was Landsat Collection 2 Level-2 Surface Reflectance. The data were selected to represent three observation periods, namely 2005, 2015, and 2023, within the boundary of the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit (PHU). Sample collection was conducted through visual interpretation and digitization of points/polygons to generate training and validation datasets. The samples were categorized into six land

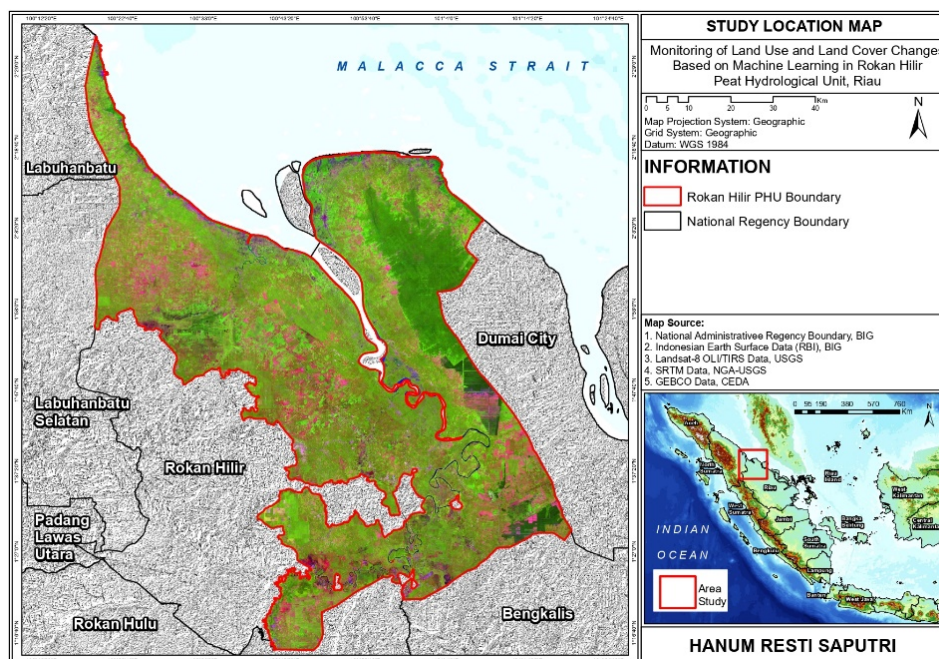


Figure (Gambar) 1. Research location (Lokasi penelitian)

Use/land cover (LULC) classes water body, built-up, bare land, oil palm plantation, natural forest, and plantation forest (Table 1). Sampling was performed in areas considered stable during the 2005–2023 period to ensure consistency of reference data across all observation years. The samples were subsequently verified using high-resolution imagery from Google Earth Pro to confirm the accuracy of class interpretation. The sample dataset was then divided into 70% training data and 30% validation data, where the training data were used for model development and the validation data were used for accuracy assessment.

2.2.2. Research Procedures

The study was conducted through several stages, including data inventory, sampling, image preprocessing, land use/land cover (LULC) classification using the Random Forest (RF) machine learning algorithm, and accuracy assessment. The overall research workflow is presented in Figure 2. Image preprocessing was performed to improve data quality prior to the classification process. This stage

included image clipping based on the area of interest (AOI), cloud and cloud-shadow masking, and the generation of annual composite images to obtain cleaner and more stable representations for each observation year. Subsequently, spectral band calculations and derived spectral indices were generated to enhance class separability among land cover and land use types. A total of 12 spectral indices were used as input variables for classification, including vegetation indices, water indices, and built-up indices. The list of indices is presented in Table 2.

LULC classification was conducted using the RF algorithm. RF is an ensemble-based machine learning method that constructs multiple decision trees to improve prediction accuracy and model stability. This algorithm is considered effective for remote sensing classification due to its ability to handle high-dimensional data and reduce bias in classification results (Breiman, 2001). The classification outputs produced LULC maps for 2005, 2015, and 2023, which were subsequently used to analyze changes in the area of each class within the study region.

Table (Tabel) 1. Land use land cover classification system (*Sistem klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan*)

Class (<i>Kelas</i>)	Description (<i>Deskripsi</i>)
Water Body	All types of water body, dominated by natural and artificial waters such as rivers, lakes, ponds, and seas. Includes canals or artificially constructed channels with a linear water width > 30 m (Feng et al., 2022).
Built-up	Includes urban areas, rural settlements, and industrial lands that are strongly influenced by human activities (Saijow et al., 2016).
Bare Land	Areas without vegetation cover, including plantations and industrial timber estates (ITE) in post-harvest conditions (Iskandar et al., 2023).
Oil Palm Plantation	Areas with non-woody vegetation cover, specifically planted with oil palm trees (Permen 2021)
Natural Forest	Areas with natural vegetation cover dominated by broadleaf trees with a canopy cover greater than 60% (Feng et al., 2022)
Plantation Forest	Areas with monoculture vegetation cover cultivated for industrial purposes, such as Industrial Timber Estates (ITE) (Permen, 2021)

Monitoring of Land Use and Land Cover Changes Based on Machine Learning in Rokan Hilir Peat Hydrological Unit, Riau
Hanum Resti Saputri, Erianto Indra Putra, & Yudi Setiawan

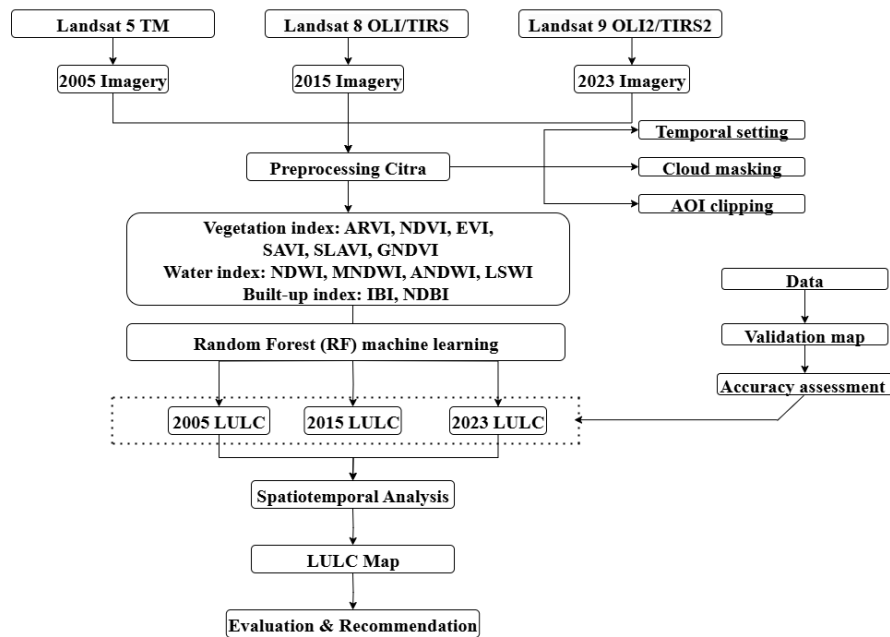


Figure (Gambar) 2. Diagram flow chart (Diagram alir penelitian)

Table (Tabel) 2. List of indices used (Daftar indeks yang digunakan)

No	Method (Metode)	Formula (Rumus)	Reference (Pustaka)
1.	Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$ARVI = (NIR - (Red - (Blue - Red))) / NIR + (Red - (Blue - Red)))$	Kaufman & Tenre (1992)
2.	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	Rouse jr et al., (1974)
3.	Enhanced Vegetation Index (EVI)	$EVI = G ((NIR - Red) / (NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L))$	Huete et al., (2002)
4.	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = 1.5 (NIR - Red) / (NIR + Red + 0.5)$	Huete (1988)
5.	Specific Leaf Area Vegetation Index (SLAVI)	$SLAVI = NIR / (Red + SWIR)$	Lymburner et al., (2000)
6.	Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$	Gitelson et al., (1996)
7.	Normalized Difference Water Index (NDWI)	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	McFeeters (1996)
8.	Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	$MNDWI = (Green - SWIR1) / (Green + SWIR1)$	Xu (2006)
9.	Normalized Difference Water Index (ANDWI)	$ANDWI = (Blue + Green + Red - NIR - SWIR1 - SWIR2) / (Blue + Green + Red + NIR + SWIR1 + SWIR2)$	Rad et al., (2021)
10.	Land Surface Water Index (LSWI)	$LSWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Xiao et al., (2002)
11.	Index- Based Built- up Index (IBI)	$IBI = ((NIR)/NIR + Red)) + ((Green)/Green + SWIR1))$	Xu (2008)
12.	Normalized Difference Built-up Index (NDBI)	$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$	Zha et al., (2003)

2.2.3. Accuracy Assessment

Accuracy assessment was conducted to evaluate the reliability of the land use/land cover (LULC) classification results. The validation dataset was used as reference data and compared with the classified LULC maps for each observation year. Classification accuracy was evaluated using a confusion matrix, which represents the agreement between the reference classes and the predicted classes produced by the model. Based on the confusion matrix, several accuracy metrics were calculated, including overall accuracy (OA), producer accuracy (PA), user accuracy (UA), and the kappa statistic (KS). Overall accuracy represents the proportion of correctly classified samples relative to the total validation samples. Producer accuracy indicates the probability that a reference sample is correctly classified, while user accuracy reflects the probability that a sample classified into a given category truly represents that category on the ground. The kappa statistic was used to measure the level of agreement between the classification results and reference data beyond chance agreement (Novianti, 2021; Muhammad et al., 2016). The equations for OA, PA, UA, and KS are presented in the following formulas.

$$OA = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^r X_{ii} \times 100\%$$

$$KS = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \times 100\%$$

$$UA = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100\%$$

$$PA = \frac{X_{ii}}{X_i} \times 100\%$$

Notes:

OA : Overall Accuracy

KS : Kappa Statistic

UA : User Accuracy

PA : Producer Accuracy

r : Number of rows and columns in the confusion matrix

N : Total number of observations (pixels)

X_{ii} : Observations in the corresponding row and column

X + 1 : Total column margin

X_i : Total row margin

3. Results and Discussion

3.1. Results

RF classification is used to observe the pattern of land cover and use changes in the Rokan Hilir KHG, Riau Province. Land cover and use classification is carried out in 6 different classes from 2005 to 2023. Changes in land cover and use of an area over time are seen in Figures 3, 4, and 5.

The water body, built-up, bare land, oil palm plantation, natural forest, and plantation forest in the Rokan Hilir PHU experienced significant increases and decreases in area. The conversion area and direction of LULC change from 2005 to 2023 are shown in Table 3. Changes in LULC at this location are also depicted in the form of a percentage area graph (Figure 6).

Monitoring of Land Use and Land Cover Changes Based on Machine Learning in Rokan Hilir Peat Hydrological Unit, Riau Hanum Resti Saputri, Erianto Indra Putra, & Yudi Setiawan

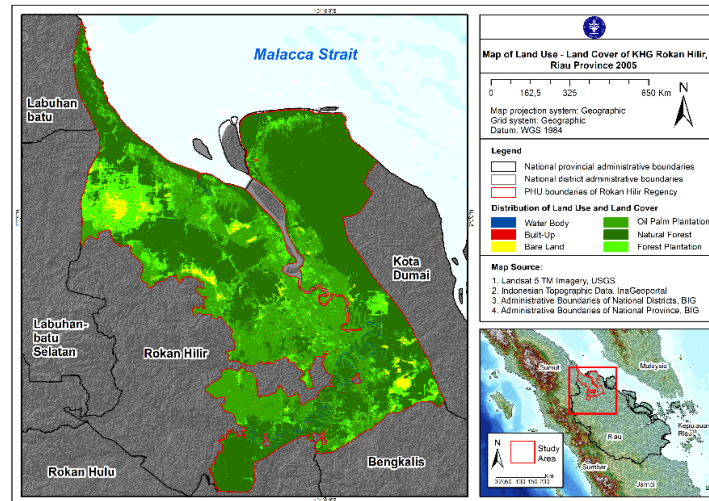


Figure (Gambar) 3. LULC of PHU Rokan Hilir on 2005 (Tutupan dan penggunaan lahan KHG Rokan Hilir tahun 2005)

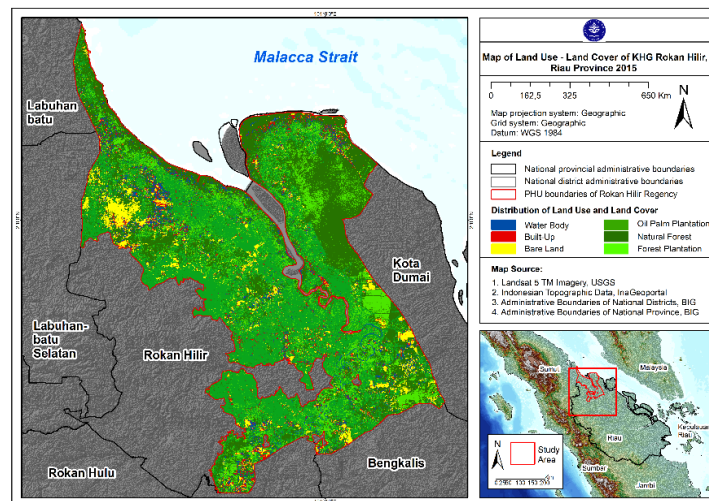


Figure (Gambar) 4. LULC of PHU Rokan Hilir on 2015 (Tutupan dan penggunaan lahan KHG Rokan Hilir tahun 2015)

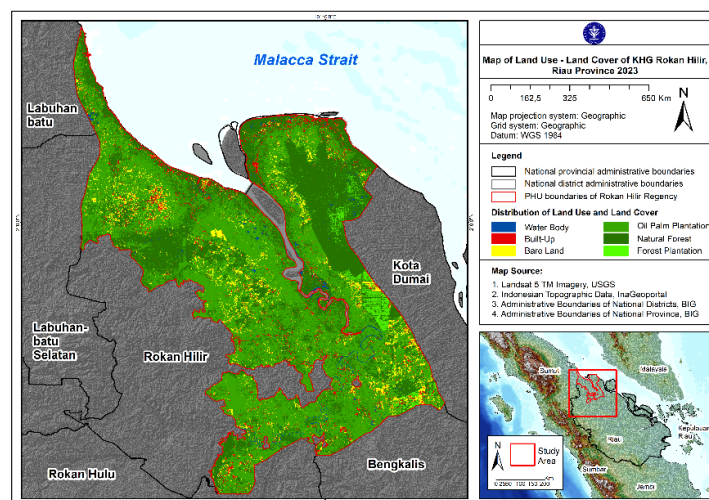


Figure (Gambar) 5. LULC of PHU Rokan Hilir on 2023 (Tutupan dan penggunaan lahan KHG Rokan Hilir tahun 2023)

Table (Tabel) 3. Extent and direction of LULC change from 2005-2023 (Luas dan arah perubahan LULC tahun 2005-2023)

Year (Tahun)	Water body/Badan air (ha)	Built- up/Lahan terbangun (ha)	Bare land/Lahan terbuka (ha)	Oil palm plantation/ Perkebunan sawit (ha)	Natural forest/ Hutan alam (ha)	Plantation forest/ Hutan tanaman (ha)
2005	3,520.0	1,038.8	13,469.8	194,331.4	341,770.1	85,573.6
2015	29,354.3	18,826.6	37,552.1	256,566.6	211,393.0	85,996.1
2023	6,367.0	23,140.0	33,438.2	340,716.1	222,583.8	13,438.0
Difference between 2005 to 2023	+2.847,0	+22.101,2	+19.968,4	+146.384,7	-119.186,3	-72.135,6

(+) increases, (-) decreases

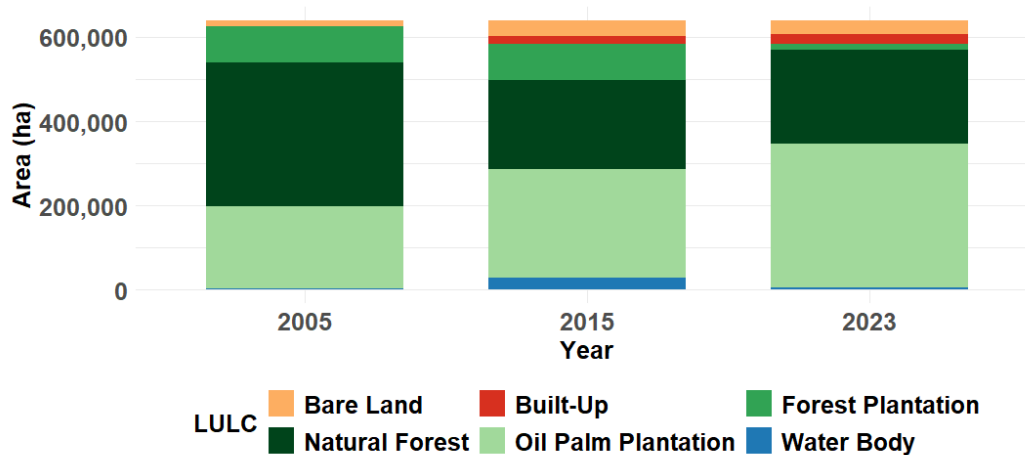


Figure (Gambar) 6. Classification area in KHG Rokan Hilir 2005-2023 (Luas klasifikasi di KHG Rokan Hilir tahun 2005-2023)

Land use land cover class that experienced the greatest expansion was oil palm plantation. The largest decrease in area occurred in natural forest and plantation forest, which were converted into other land-use classes. The extent LULC change matrix during 2005-2015 and 2015-2023 are presented in Tables 4 and 5.

The classification process in GEE has limited performance if it is not supported by the use of spectral indices. These indices are applied to assist decision-making within the RF classification algorithm. The contribution of each index is evaluated using the Variable Importance (VI) method. Madinu et al., (2024) reported that, in satellite image classification using the GEE

platform, the VI feature represents a major advantage, as it identifies the most influential input variables. Spectral indices ranked by VI serve as critical inputs for the RF machine learning algorithm during the classification process. Classification accuracy strongly depends on the algorithm's ability to discriminate reflectance values among different land use land cover types. Therefore, the selection of spectral index algorithms that are sensitive to a wide range of land-cover types is crucial. The use of less sensitive indices has a high potential to introduce errors in the final classification results. A total of 12 spectral indices were used to classify six highly heterogeneous LULC classes (Figure 7).

Table (Tabel) 4. LULC change matrix for 2005-2015 (Matriks perubahan LULC tahun 2005-2015)

	Water body/ Badan air (ha)	Natural forest/ Hutan alam (ha)	Forest plantation /Hutan tanaman (ha)	Built-up/ Lahan terbangun (ha)	Bare land/ Lahan terbuka (ha)	Oil palm plantation/ Perkebunan sawit (ha)	Changes in area/ Luas perubahan (ha)
Water body (ha)	2,740	577	71	16	29	56	3,488
Natural forest (ha)	15,704	160,155	53,381	10,298	19,219	82,932	341,689
Forest plantation (ha)	5,860	23,100	9,521	4,452	10,389	32,230	85,553
Built-up (ha)	72	114	35	415	281	121	1,038
Bare land (ha)	411	3,098	754	267	3,704	5,236	13,469
Oil palm plantation (ha)	4,521	24,296	22,221	3,373	3,924	135,936	194,272
Change in area 2015 (ha)	29,307	211,340	85,984	18,820	37,546	256,511	639,509

Table (Tabel) 5. LULC change matrix for 2015-2023(Matriks perubahan LULC tahun 2015-2023)

	Water body/ Badan air (ha)	Natural forest/ Hutan alam (ha)	Forest plantation/ Hutan tanaman (ha)	Built-up/ Lahan terbangun (ha)	Bare land/ Lahan terbuka (ha)	Oil palm plantation/ Perkebunan sawit (ha)	Changes in area/ Luas perubahan (ha)
Water body (ha)	3,228	6,593	109	2,381	2,073	14,931	29,316
Natural forest (ha)	1,708	115,915	5,245	8,520	11,692	68,261	211,340
Forest plantation (ha)	387	28,248	6,446	2,637	4,325	43,941	85,983
Built-up (ha)	217	4,446	177	3,581	1,266	9,134	18,821
Bare land (ha)	203	9,721	929	2,256	3,595	20,842	37,545
Oil palm plantation (ha)	589	57,603	530	3,759	10,483	183,530	256,495
Changes in Area 2023 (ha)	6,333	222,525	13,435	23,134	33,433	340,640	639,500

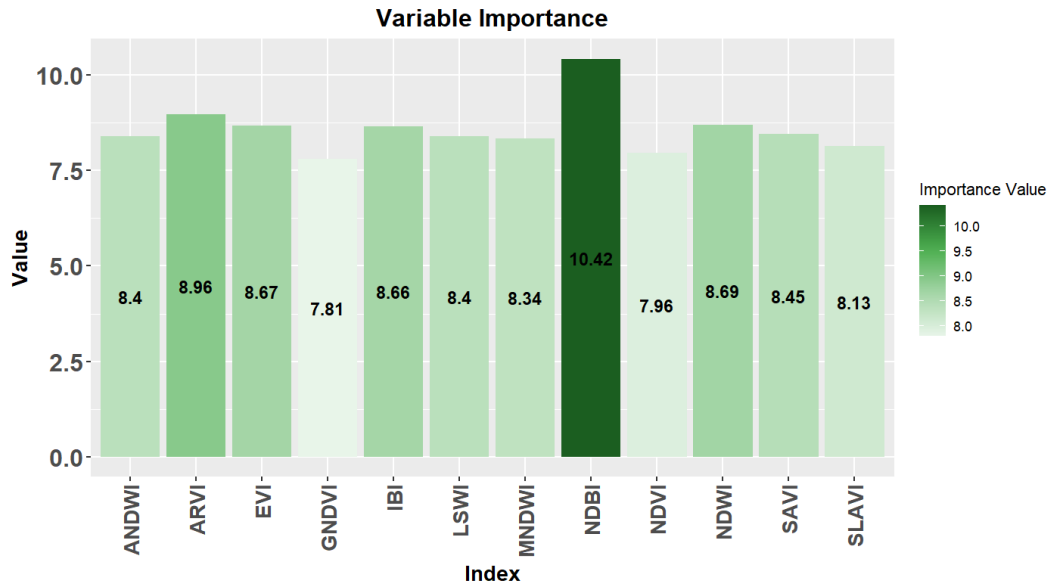


Figure (*Gambar*) 7. Important variables index (Indeks variabel penting)

After the land cover and land use change analysis was completed, the data were organized into confusion matrices presented in Tables 6, 7, and 8. These matrices provide information on the number of correctly and incorrectly classified training samples, the allocation of classification errors, and the evaluation of classification accuracy for the years 2005–2023. From these matrices, user accuracy, overall accuracy, producer accuracy, and the kappa statistic can be calculated.

Overall accuracy represents the proportion of pixels correctly classified according to their true class, producer accuracy assesses how well pixels are classified into the designated categories, and user accuracy indicates the potential classification error (Duan et al., 2019). Furthermore, the results of the user accuracy (UA), producer accuracy (PA), kappa statistic (KS), and overall accuracy (OA) calculations are presented in graphical form in Figures 8 and 9.

Table (*Tabel*) 6. Matrix confusion 2005 (Konfusi matriks tahun 2005)

		Actual (<i>Aktual</i>)					
2005		Water body/Badan air	Built-up/Lahan terbangun	Bare land/Lahan terbuka	Oil palm plantation/Perkebunan sawit	Natural forest/Hutan alam	Plantation forest/Hutan tanaman
Predictions	Water body	479	0	0	0	0	0
	Built-up	0	26	0	0	0	0
	Bare land	0	0	564	0	0	34
	Oil palm plantation	0	0	0	522	0	5
	Natural forest	3	0	0	6	218	532
	Plantation forest	7	2	5	0	1	1942

Table (Tabel) 7. Matrix confusion 2015 (Konfusi matriks tahun 2015)

		Actual (<i>Aktual</i>)					
2015		Water body/Badan air	Built-up/Lahan terbangun	Bare land/Lahan terbuka	Oil palm plantation/Perkebunan sawit	Natural forest/Hutan alam	Plantation forest/Hutan tanaman
			n				
Predictions	Water Body	47	4	0	0	0	0
	Built-Up	0	20	0	0	0	0
	Bare Land	0	0	805	0	0	0
	Oil Palm Plantation	0	0	0	353	71	2
	Natural Forest	1	3	0	25	306	524
	Plantation Forest	0	0	0	138	19	1575

Table (Tabel) 8. Matrix confusion 2023 (Konfusi matriks tahun 2023)

		Actual (<i>Aktual</i>)					
2023		Water body/Badan air	Built-up/Lahan terbangun	Bare land/Lahan terbuka	Oil palm plantation/Perkebunan sawit	Natural forest/Hutan alam	Plantation forest/Hutan tanaman
Predictions	Water Body	174	0	0	0	1	0
	Built-up	0	105	8	4	6	3
	Bare Land	0	44	367	0	0	32
	Oil Palm Plantation	0	0	0	331	64	3
	Natural Forest	0	0	0	19	371	0
	Plantation forest	0	3	3	15	78	265

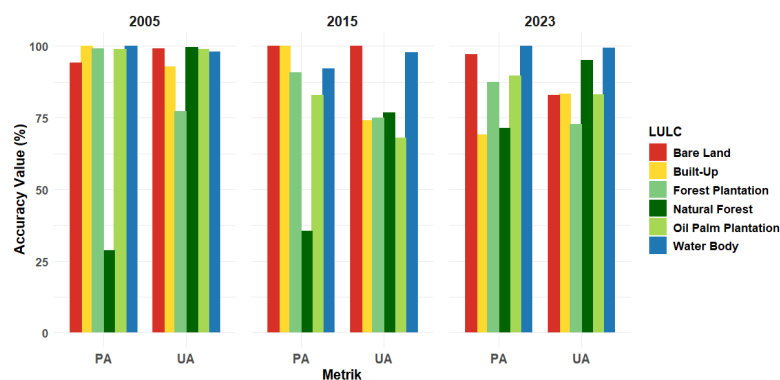


Figure (Gambar) 8. Comparison of UA and PA values of RF (Perbandingan nilai UA dan PA dari RF)

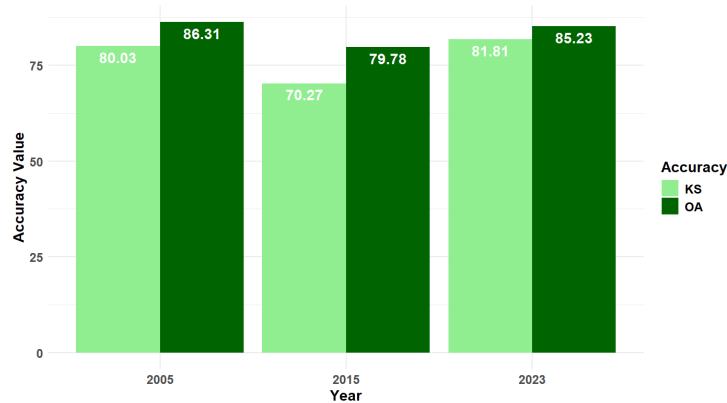


Figure (Gambar) 9. Comparison of Overall Accuracy (OA) and Kappa Statistic (KS) values of RF (Perbandingan nilai Overall Accuracy (OA) dan Kappa Statistic (KS) dari RF)

Table (Tabel) 9. OA and KS values from the classification results (Nilai OA dan KS dari hasil klasifikasi)

Observation year/ <i>Tahun pengamatan</i>	Kappa statistic/ <i>Statistik Kappa (KS) (%)</i>	Overall accuracy/ <i>Akurasi keseluruhan (OA) (%)</i>
2005	80.03	86.31
2015	70.27	79.78
2023	81.81	85.23

Based on Figure 9 and Table 9, the RF machine learning algorithm demonstrated varying classification accuracy performance across the observation years. In 2005, the classification achieved its highest accuracy level, with an OA value of 86.31% and a kappa reaching 80.03%. However, a decline in accuracy performance occurred in 2015, where the OA dropped to 79.78% and the KS decreased to 70.27%. This decline represents the lowest accuracy point among the three analyzed observation periods, resulting from high spectral overlapping among several land cover classes during that year. The classification accuracy then recovered in 2023, recording an OA value of 85.23% and a KS of 81.81%. This resurgence in accuracy during the final observation year indicates that the utilization of a 12-spectral-index combination within the GEE platform successfully optimized the separation of land cover object characteristics.

3.2. Discussion

3.2.1. Land Use Land Cover Change

Land use and land cover concepts that are often used interchangeably, but they have fundamental differences. Cihlar & Jansen (2001) briefly define land cover as the natural state of the land, while land use is human activity that alters or utilizes that natural state. Furthermore, Montalván-Burbano et al., (2021) define land use as related to land management, and refers to humans utilizing land, water, and plants for their own benefit. Land cover describes the characteristics of the Earth's surface landscape. Land use relates to how humans utilize the land, such as for agriculture, settlements, or industry. On the other hand, land cover refers to everything that covers the land surface, be it vegetation, buildings, water, or other types of land cover.

The changes observed in the study area during the 2005-2023 period reflect the

dynamics and trends of physical regional development. Land cover and land use changes in the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit (KHG) were identified by comparing the area of each land use type between 2005 and 2023, providing an overview of spatial distribution patterns, including both increases and decreases in each land cover and land use category. The monitoring results indicate a decrease in the extent of natural forest and plantation forest, amounting to 119,186.3 ha and 72,135.6 ha, respectively. In contrast, there were increases in water body (2,847.0 ha), built-up (22,101.2 ha), bare land (19,968.4 ha), and oil palm plantation (146,384.7 ha) (Table 3). The magnitude of these changes indicates a clear trend, where the decline in natural and plantation forest alongside the expansion of oil palm plantation and built-up land suggests that landscape transformation did not occur sporadically, but rather consistently over time. This pattern demonstrates that the dominant direction of change in the peatland landscape within the study area tends toward forest conversion into cultivated land and built-up.

This condition is consistent with findings that Riau Province, particularly Rokan Hilir Regency, experienced forest loss and plantation expansion between 1999 and 2020, much of which occurred on peatlands (Numata et al., 2022). The most rapidly developed plantation type was oil palm. Forest reduction due to the expansion of oil palm plantation, especially on peatlands, is associated with the limited availability of suitable land on mineral soils (Numata et al., 2022). Increasing demand for plantation land has placed significant pressure on natural forest cover types (Obeidat et al., 2019). Plantation activities also require good accessibility for transportation and mobility, thereby driving the expansion of built-up such as roads, often at the expense of vegetation. According to Syahza (2019), the development of oil palm plantation in Riau has been very rapid, which aligns with the

results of this study. The rapid growth of oil palm plantation in Riau is driven by several key factors, including favorable physical and environmental conditions for cultivation, a strategic geographical location that facilitates access to international markets, and Riau's involvement in regional economic growth zones that provide broader and more profitable market opportunities. In addition, income from oil palm has been proven to be higher than that from other plantation commodities, attracting farmers to expand oil palm cultivation (Purba & Sipayung, 2017).

The expansion of built-up land has occurred alongside the growth of oil palm plantation and has shown a consistent increase over the years. This rise in built-up is closely related to population growth in Rokan Hilir Regency, Riau. According to the Regional Regulation (Perda, 2017), the population of Rokan Hilir reached 644,680 in 2015, with an average annual growth rate of 4.58% during the 2000–2010 period. This high growth rate is influenced by demographic dynamics such as birth rates, mortality rates, and migration patterns (Sakti & Ikhwan, 2019). Population growth increases land demand for residential areas, commercial activities, and industrial development (Manakane et al., 2023). The expansion of built-up land is also closely linked to the rapid development of oil palm plantation, as the dominance of oil palm reflects the growth of palm oil industries in the study area. Population growth and intensified plantation-related activities have driven the need for additional space to support settlements and related infrastructure. Therefore, the spatiotemporal dynamics of land use and land cover (LULC) patterns must be interpreted carefully, as they are influenced by both natural factors and human activities that drive changes in land use and land cover (Tesfaye et al., 2024). Fluctuations in land cover area during the 2005–2023 period indicate significant changes in land

use and land cover within the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit.

Based on the intersection analysis of LULC classification results for the 2005–2015 period, natural forest experienced the largest conversion into oil palm plantation, covering an area of 82,932 ha, while the conversion from oil palm plantation back to natural forest amounted to only 24,296 ha. The greatest decrease in classification occurred in plantation forest, which were converted into oil palm plantation over an area of 32,230 ha, whereas the reverse conversion from oil palm plantation into plantation forest covered only 22,221 ha. In addition, natural forest were also substantially converted into built-up land, with an affected area of 10,298 ha. During the subsequent period (2015–2023), a similar conversion pattern persisted. Natural forest were again converted into oil palm plantation over an area of 68,261 ha, while conversion from oil palm plantation into natural forest reached 57,603 ha. The largest classification decrease also occurred in plantation forest, which were converted into oil palm plantation across 43,941 ha, whereas the reverse conversion from oil palm plantation into plantation forest was extremely limited, amounting to only 530 ha. These findings confirm that forest conversion into oil palm plantation has been the dominant driver of land cover change in the study area and further indicate that development pressure and cultivation activities have continued intensively within the Rokan Hilir peatland ecosystem.

3.2.2. Land Use Land Cover Change

The variable importance (VI) values of the spectral indices contributing to the classification of land use and land cover (LULC) classes in the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit (PHU) are presented in Figure 7. The Normalized Difference Built-up Index (NDBI) showed the highest VI contribution (10.42%), whereas the Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) exhibited the lowest contribution

(7.81%). This pattern is noteworthy, as NDBI ranked as the most influential index despite the study area being located within a peat hydrological unit, which is typically characterized by waterlogged soils and is generally dominated by vegetation and surface water. The high contribution of NDBI can be explained by its strong sensitivity to dense built-up surfaces and exposed soil, suggesting that substantial portions of the Rokan Hilir PHU have been converted into built-up areas and bare land.

Nevertheless, several indices exhibited relatively similar spectral responses across multiple LULC classes, particularly between plantation forest and natural forest, as well as between bare land and built-up areas, which contributed to classification errors. Asy'Ari et al. (2023) reported that land cover classification performance may be affected by inappropriate index selection and limitations in the quantity and quality of training data. Furthermore, classification of heterogeneous land cover classes remains challenging, as emphasized by Ghemire et al. (2010), due to high intra-class variability and complex landscape artifacts. Therefore, careful consideration of index sensitivity and discriminative capability based on pixel-level values is essential to improve class separability prior to conducting LULC classification.

The classification results indicate that the highest error rates occurred in the oil palm plantation, plantation forest, and natural forest classes. Misclassification frequently occurred among these three land cover types, where pixels classified as natural forest were often incorrectly identified as oil palm plantation or plantation forest, and vice versa. This reflects substantial spectral overlap among vegetated classes, causing the classification model to struggle in distinguishing land cover types with similar canopy structure and vegetation density. In contrast, classes such as water bodies, built-up areas, and bare land exhibited relatively fewer classification errors due to their more

distinct spectral characteristics compared to vegetated land cover types. The difficulty in differentiating vegetated classes such as forests and oil palm plantations is primarily attributed to the similarity and overlap of spectral index values across these land cover types (Rivai, 2023).

Based on the user accuracy (UA) and producer accuracy (PA) results (Figure 8), the highest classification accuracy was achieved for the water body class, with UA and PA values ranging from 95% to 100%. This indicates that water bodies exhibit clear and consistent spectral characteristics, allowing them to be reliably identified by the classification model. Conversely, the natural forest class showed the lowest accuracy, with UA and PA values displaying a wide range from 25% to 99%. This substantial variation suggests that classification performance for natural forest was strongly influenced by the limitations of the algorithm in discriminating reflectance among vegetated classes, as well as by landscape complexity that increases variability in spectral index values within the same class. In addition, lower UA and PA values may also be influenced by the quality of reference data used for training and accuracy assessment. Errors or inconsistencies in reference data may propagate through the classification process and contribute to reduced classification accuracy.

Overall classification performance was further evaluated using Overall Accuracy (OA) and the Kappa Statistic (KS) (Figure 9). The results indicate that spatial information on annual LULC patterns was obtained with relatively high accuracy. The highest KS value was recorded in 2023, while the highest OA value was achieved in 2005, with values of 81.81% and 86.31%, respectively. The resulting Kappa values fall within the almost perfect agreement category, indicating a strong level of agreement between classification results and reference data, and confirming that the classification outputs are reliable for spatiotemporal land

cover change analysis. The application of geospatial technology using the Random Forest (RF) algorithm produced satisfactory classification performance, although some misclassification remained, particularly among vegetated land cover classes. The integration of spectral index algorithms and RF-based machine learning within the Google Earth Engine (GEE) platform plays an important role in filtering pixels from multi-temporal image collections within each year, thereby improving the consistency and reliability of classification results (Wandani et al., 2022).

Classification uncertainty may propagate into LULC change estimation, particularly for transitions among spectrally similar vegetated classes. Consequently, some detected changes may reflect classification noise rather than actual land cover conversion. This indicates that change detection accuracy is strongly dependent on the classification accuracy of each year. However, the consistently high OA and KS values across the study period suggest that the main spatiotemporal change trends remain reliable for landscape-scale interpretation. Overall, the accuracy assessment confirms that LULC mapping in the Rokan Hilir PHU achieved good reliability at the landscape scale and can be used to analyze spatiotemporal land cover change dynamics. However, interpretation of changes among vegetated classes such as natural forest, plantation forest, and oil palm plantations should be conducted cautiously due to the potential for misclassification arising from spectral similarity and vegetation heterogeneity.

4. Conclusion and Recommendations

4.1. Conclusion

The greatest area declines in the Rokan Hilir Peat Hydrological Unit (PHU) during the 2005–2023 period occurred in natural forest and plantation forest, which were primarily converted into oil palm plantation and built-up. Natural forest and

plantation forest cover in the Rokan Hilir PHU decreased by 119,186.3 ha and 72,135.6 ha, respectively, between 2005 and 2023. In contrast, land-use classes represented by oil palm plantation and built-up increased by 146,384.7 ha and 22,101.2 ha, respectively, over the same period.

4.2. Recommendations

Studies on land-use and land-cover change using remote sensing technology remain essential, as they facilitate and accelerate data acquisition over large spatial extents in a time-efficient manner. Nevertheless, field-based ground checks are strongly recommended as a validation step to ensure data accuracy and to capture on-site conditions that may not be fully detected by satellite imagery. The interpretation results derived from remote sensing can then be compared with field observations to assess their consistency and to enhance the reliability of the analysis outcomes.

References

- Asy'Ari, R., A. Ranti, A.D. Rahmawati, M. Zulfajrin, L.L. Nurazizah, M.C.A. Putra, Z.N. Khairunnisa, F.A. Prameswari, R. Pramulya, dan N.P. Zamani, et al. (2023). High heterogeneity LULC classification in Ujung Kulon National Park, Indonesia: A study testing 11 indices, random forest, Sentinel-2 MSI, and GEE-based cloud computing. *Celebes Agricultural*, 3(2), 82–99.
- Awal, E.E., I.S. Sitanggang, and L. Syaufina. (2023). Model prediksi perubahan tutupan lahan pada area kebakaran lahan gambut menggunakan model cellular automata Markov. *Jurnal Informatika dan Teknologi Informasi*, 1(2), 142–153.
- Breiman, L. (2001). Random forest. *Machine Learning*, 45, 5–32.
- Cihlar, J., & Jansen, L.J.M. (2001). From land cover to land use: A methodology for efficient land use mapping over large areas. *The Professional Geographer*, 53(2), 275-289.
- Duan, Q., Tan, M., Guo, Y., Wang, X., Xin, L. 2019. Understanding the spatial distribution of urban forests in China using Sentinel-2 images with Google Earth Engine. *Forest*, 10(729),1-15. Doi: 10.3390/f10090729.
- Feng, S., Li, W., Xu, J., Liang, T., Ma, X., Wang, W., & Yu, H. (2022). Land use/land cover mapping based on GEE for the monitoring of changes in ecosystem types in the Upper Yellow River Basin over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 14, 5361, 1-25.
- Fesyuk, V.O., Moroz, I.A., Chyzhevskaya, L.T., Karpiuk, Z.K., & Polianskyi, S.V. (2020). Burned peatlands within the Volyn region: State, dynamics, threats, ways of further use. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(3), 483-494.
- Firmansyah, A., Hamzah, & Achmad, E. (2022). Pemodelan penginderaan jauh untuk estimasi simpanan karbon di Blok 1 PT Alam Bukit Tigapuluh. *Journal of Science and Applicative Technology*, 6(2), 98-107.
- Ghimire, B., Rogan, J., & Miller, J. (2010). Contextual land-cover classification: Incorporating spatial dependence in land-cover classification models using random forests and the Getis statistic. *Remote Sensing Letters*, 1(1), 45-54.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298.
- Harnanda, I.T. (2021). Peran badan penanggulangan bencana daerah

- dalam pengendalian kebakaran hutan di Provinsi Riau (studi Kabupaten Rokan Hilir) [Tesis]. Riau: Universitas Islam Riau.
- Harrison, M.E., Ottay, J.B., D'Arcy, L.J., Cheyne, S.M., Anggodo, Belcher, C., Cole, L., Dohong, A., Ermiasi, Y., Feldpausch, T. et al. (2020). Tropical forest and peatland conservation in Indonesia: Challenges and directions. *People and Nature*, 2, 4-28.
- Harun, M.K., Anwar, S., Putri, E.I.K., & Arifin, H.S. (2020). Sifat kimia dan tinggi muka air tanah gambut pada tiga tipe penggunaan lahan di fisiografi Kubah Gambut dan Rawa Belakang KHG Kahayan-Sebangau. *Jurnal Hutan Tropis*, 8(3), 315-327.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Iskandar, W., Hendrayanto, Jung, M.N.Z., & Jung, Y. (2023). Tingkat bahaya erosi dan status kesuburan lahan di area konsesi hutan tanaman industri di Kalimantan Tengah. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 25(2), 46-55.
- Kaufman, Y.J., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 261-270.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2021 tentang Tata Hutan dan Penyusunan Rencana Pengelolaan Hutan, serta Pemanfaatan Hutan di Hutan Lindung dan Hutan Produksi*. Jakarta: KLHK.
- Khaira, U., Alfalah, M., Gulo, P.C.S., & Purnomo, R. (2020). Prediksi kemunculan titik panas di lahan gambut Provinsi Riau menggunakan long short term memory. *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT*, 5(3), 77-82.
- Lymburner, L., Beggs, P.J., & Jacobson, P.C.S. (2000). Estimation of canopy-average surface specific leaf area using Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 183-192.
- Madinu, A.M.A., Jouhary, N.A., Ulfa, A., Rahmadhanti, I.N., Pudjawati, N.H., Asy'Ari, R., Zamani, N.P., Pramulya, R., & Setiawan, Y. (2024). Monitoring of coastal dynamics at Subang Regency using Landsat collection data and cloud computing-based approach. *Bio Web of Conferences*, 106, 04005.
- Manakane, S.E., Latue, P.C., & Rakuasa, H. (2023). Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis untuk identifikasi perubahan tutupan lahan di DAS Marikurubu, Kota Ternate. *Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 1(2), 51-60.
- Masganti, Anwar, K., & Susanti, M.A. (2017). Potensi dan pemanfaatan lahan gambut dangkal untuk pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 43-52.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Montalván-Burbano, N., Velastegui-Montoya, J., Gurumendi-Noriega, L., Morante-Carballo, F., & Adami, M. (2021). Worldwide research on land

- use and land cover in the Amazon Region. *Sustainability*, 13(11), 6039.
- Mubekti. (2011). Studi pewilayahan dalam rangka pengelolaan lahan gambut berkelanjutan Provinsi Riau. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 13(2), 88-94.
- Muhammad, A.M., Rombang, J.A., & Saroinsong, F.B. (2016). Identifikasi jenis tutupan lahan di kawasan KPHP Poigar dengan metode maximum likelihood. *Cocos*, 7(2), 1-9.
- Novianti, T.C. (2021). Klasifikasi citra Landsat 8 OLI untuk tutupan lahan di Kota Palembang menggunakan Google Earth Engine. *Jurnal Swarnabhumi*, 6(1), 75-85.
- Numata, I., Elmore, A.J., Cochrane, M.A., Wang, C., Zhao, J., & Zhang, X. (2022). Deforestation, plantation-related land cover dynamics and oil palm age-structure change during 1990–2020 in Riau Province, Indonesia. *Environmental Research Letters*, 17, 1-11.
- Obeidat, M., Awawdeh, M., & Lababneh, A.. (2019). Assessment of land use/land cover change and its environmental impacts using remote sensing and GIS techniques in the Yarmouk River Basin, North Jordan. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-15.
- Pemerintah Kabupaten Rokan Hilir. (2017). *Peraturan Daerah Kabupaten Rokan Hilir Nomor 02 Tahun 2017 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kabupaten Rokan Hilir Tahun 2016–2021*. Rokan Hilir.
- Purba, J.H.V., & Sipayung, T. (2017). Perkebunan kelapa sawit Indonesia dalam perspektif pembangunan berkelanjutan. *Masyarakat Indonesia*, 43(1), 81-94.
- Rad, A.M., Kreitler, J., & Sadegh, M. (2021). Augmented normalized difference water index for improved surface water monitoring. *Environmental Modelling and Software*, 140, 105030.
- Rivai, F.A. (2023). *Deteksi perubahan penggunaan dan penutupan lahan di Kecamatan Sukajaya menggunakan machine learning pada Google Earth Engine* [Skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rouse, J.W.J., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309-317.
- Sajow, H.S.C., Rondonuwu, D.M., & Makainas, I. (2016). Perubahan fungsi lahan di Koridor Segitiga Mapanget–Talawaan. *Spasial*, 3(2), 40-48.
- Sakti, B., & Ikhwan, J. (2019). Model sistem dinamik ketersediaan lahan terbangun di Provinsi Bengkulu. *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Publik*, 2(2), 1-12.
- Syahza, A. (2019). The potential of environmental impact as a result of the development of palm oil plantation. *Management of Environmental Quality*, 30(5), 1072–1094.
- Tesfaye, W., Elias, E., Warkineh, B., Tekalign, M., & Abebe, G. (2024). Modeling of land use and land cover changes using Google Earth Engine and machine learning approach: Implications for landscape management. *Environmental Systems Research*, 13, 31.
- Turmudi, Y. Suwarno, Munajati, S.L., & Suryanta, J. (2021). Spatial modeling in sustainable peat land management based on peat hydrological units (KHG). *Journal of Natural Resources*

- and Environment Management*, 11(4), 613–620.
- Wahyunto, A. Dariah, Pitono, D., & Sarwani, M. (2013). Prospek pemanfaatan lahan gambut untuk perkebunan kelapa sawit di Indonesia. *Perspektif*, 12(1), 11-12.
- Wandani, R.A., Asy'Ari, R., Setiawan, Y., & Anggodo. (2022). Deteksi ekspansi padi lanskap hutan di Taman Nasional Ujung Kulon, Indonesia menggunakan algoritma random forest dan Sentinel-2 multispectral instrument. *National Multidisciplinary Science*, 1(2), 235-245.
- Warren, M., Hergoualc'h, K., Kaufman, J.B., Murdiyarso, D., & Kolka, R. (2017). An appraisal of Indonesia's immense peat carbon stock using national peatland maps: Uncertainties and potential losses from conversion. *Carbon Balance and Management*, 12(12). Doi:10.1186/s13021-017-0080-2.
- Xiao, X., Boles, S., Froking, S., Salas, W., Moore III, M.N.Z, Li, C., He, L., & Zhao, R. (2002). Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using vegetation sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3009–3022.
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025–3033.
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276.
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 583–594.

Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Tingkat Bahaya Erosi sebagai Dasar Pengelolaan Agroforestry di Perhutanan Sosial

(Land Suitability Evaluation and Erosion Hazard Level as a Basis for Agroforestry Management Social Forestry)

Nur Faras Radya Ismaya¹, Sukma Arty Purwa Aditya², Desi Nurmalasari³, Alfaro Catya Wahyu Raka Wardana⁴,
Febri Arif Cahyo Wibowo⁵, dan/and Nugroho Tri Waskitho⁶

Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian Peternakan, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya
Tlogomas 246, Malang, 65144

*E-mail: febriarif14@umm.ac.id

Tanggal diterima: 9 April 2026; Tanggal disetujui: 11 Juni 2026; Tanggal direvisi: 19 Juni 2026

Abstract

Agroforestry-based coffee development requires information on land suitability and erosion hazard levels to support productivity and sustainable land management. This study aimed to evaluate land suitability and predict erosion hazard levels in the KHDPK LPHD Tlekung area, Batu City, as a basis for sustainable agroforestry planning and management. Land suitability was assessed by matching land characteristics to coffee growth requirements according to FAO criteria, and erosion predicted was using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The results showed that the protected forest area had an actual land suitability class of S2f, with base saturation as the limiting factor, and it has the potential to improve to S1 following land improvement measures. The production forest area was classified as S3fm, with base saturation and slope gradient as the main limiting factors, and it could potentially improve to S2 through liming and terrace implementation. Most land characteristics, including temperature, humidity, soil texture, effective soil depth, cation exchange capacity, soil pH, and organic carbon content, were classified as suitable to highly suitable for coffee cultivation. The erosion prediction indicated a very slight erosion hazard level in the protected forest (0.01 tons ha⁻¹ year⁻¹) and a slight erosion hazard level in the production forest (0.16 tons ha⁻¹ year⁻¹). The low erosion rates were influenced by relatively stable soil conditions, good vegetation cover, and the implementation of soil conservation practices. Overall, the KHDPK LPHD Tlekung area shows strong potential for agroforestry development while supporting the sustainable conservation of soil, water, and ecosystem services.

Keywords: Coffee agroforestry, erosion, ecosystem services, land suitability, soil conservation

Abstrak

Pengembangan kopi berbasis agroforestri memerlukan informasi kesesuaian lahan dan tingkat bahaya erosi untuk mendukung produktivitas serta keberlanjutan pengelolaan lahan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kesesuaian lahan dan memprediksi tingkat bahaya erosi pada kawasan KHDPK LPHD Tlekung, Kota Batu sebagai dasar dalam perencanaan dan pengelolaan agroforestri yang berkelanjutan. Evaluasi kesesuaian lahan dilakukan menggunakan metode pencocokan karakteristik lahan dengan persyaratan tumbuh kopi berdasarkan kriteria FAO, sedangkan prediksi erosi dilakukan menggunakan metode USLE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hutan lindung memiliki kelas kesesuaian lahan aktual S2f dengan faktor pembatas kejenuhan basa dan berpotensi meningkat menjadi S1 setelah perbaikan lahan. Hutan produksi memiliki kelas kesesuaian lahan aktual S3fm dengan faktor pembatas kejenuhan basa dan kemiringan lereng, serta berpotensi meningkat menjadi S2 melalui pengapuran dan penerapan terasering. Sebagian besar karakteristik lahan, seperti suhu, kelembapan, tekstur tanah, kedalaman efektif tanah, kapasitas tukar kation, pH, dan kandungan C-organik, tergolong sesuai hingga sangat sesuai untuk kopi. Prediksi erosi menunjukkan tingkat bahaya erosi sangat ringan pada hutan

lindung (0,01 ton/ha/tahun) dan ringan pada hutan produksi (0,16 ton/ha/tahun). Rendahnya laju erosi dipengaruhi oleh stabilitas tanah, tutupan vegetasi yang baik, serta penerapan konservasi tanah. Secara keseluruhan KHDPK LPHD Tlekung berpotensi untuk pengembangan agroforestri sekaligus mendukung konservasi tanah, air dan jasa ekosistem secara berkelanjutan.

Kata kunci: Agroforestri kopi, erosi, jasa ekosistem, kesesuaian lahan, konservasi tanah

1. Pendahuluan

Pengelolaan kawasan hutan memerlukan peran dari berbagai pihak. Masyarakat diharapkan dapat berperan sebagai aktor utama dalam pengelolaan hutan untuk meningkatkan keberhasilan pengelolaan sumber daya hutan (Kartika et al., 2025). Salah satu program pemerintah untuk meningkatkan peran masyarakat melalui program perhutanan sosial (PS). Program ini diharapkan dapat meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan masyarakat lokal (Aqilla, 2024), sehingga dapat menjaga keberlangsungan fungsi ekosistem hutan sekaligus memberikan manfaat bagi kesejahteraan masyarakat. Salah satu lokasi PS di Desa Tlekung, Kecamatan Junrejo, Kota Batu. Perhutanan sosial yang diterapkan di Desa Tlekung ini menggunakan sistem agroforestri tanaman kopi. Agroforestri bertujuan untuk meningkatkan produktivitas lahan serta mempertahankan kelestarian lingkungan. Agroforestri merupakan sistem tata guna lahan yang terdiri dari jenis tanaman kehutanan dengan tanaman pertanian dalam satu lahan (Octavia et al., 2023). Tanaman kopi sesuai untuk pola agroforestri ini karena tanaman kopi dapat tumbuh di bawah tegakan tanaman hutan dengan intensitas cahaya matahari yang rendah serta dapat ditanam dari dataran rendah hingga dataran tinggi. Pada program PS penggunaan pola agroforestri ini merupakan bagian dari konservasi lahan untuk menjaga kestabilan tanah serta mengurangi risiko erosi dan mencegah terjadinya kerusakan hutan lebih lanjut.

Kendala utama dalam pelaksanaan perhutanan sosial di Tlekung, yakni penanaman kopi pada lahan yang berlereng

dengan upaya konservasi tanah yang terbatas. Pemilihan jenis tanaman dan teknik budidaya pertanian yang tidak sesuai dapat menurunkan kualitas lahan. Sejalan dengan pendapat (Pasaribu, (2024) yang mengemukakan bahwa penggunaan lahan yang tidak sesuai dapat menyebabkan kerusakan lahan. Pemanfaatan lahan pada perhutanan sosial di Tlekung masih belum mempertimbangkan kesesuaian lahan. Kesesuaian lahan merujuk pada sejauh mana suatu lahan sesuai untuk penggunaan tertentu (Manurung & Elias, 2025). Erosi dapat terjadi akibat dari pemanfaatan lahan yang tidak sesuai dengan kemampuan tanah. Erosi tanah adalah bentuk degradasi lahan yang paling signifikan, terutama di wilayah-wilayah dengan penggunaan lahan intensif dan topografi yang bervariasi (Kurniasih et al., 2025). Erosi mengakibatkan lapisan tanah bagian atas (*topsoil*) yang kaya akan unsur hara dan bahan organik hanyut terbawa air sehingga menyebabkan menurunnya kualitas tanah. Erosi menyebabkan penurunan kesuburan dan produktivitas tanah dan peningkatan luas lahan kritis (Asrul et al., 2025). Tanah tererosi akan mengalami penurunan kualitas dalam menahan air dan mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Erosi yang dibiarkan secara terus menerus tanpa adanya upaya pengendalian dapat merusak struktur tanah serta terjadi ketidakseimbangan dalam sifat tanah dan proses di dalam tanah (Usman et al., 2025). Kesesuaian lahan potensial dapat ditingkatkan dengan melakukan perbaikan faktor penghambat (Yamani et al., 2025). Teknik konservasi tanah menggunakan vegetasi penutup dan terasering dapat mengurangi erosi (Gumilang et al., 2025).

Permasalahan yang ditemukan dalam praktik PS, antara lain belum terdapat

analisis kesesuaian lahan sebelum dilakukan penanaman, praktik konservasi tanah yang minim serta rendahnya kapasitas masyarakat dalam pengelolaan lahan agroforestri. Penelitian ini berperan sebagai dasar ilmiah untuk strategi konservasi tanah dan air untuk mendukung PS, sehingga memiliki nilai ekonomi dan ekologi yang tinggi. Tujuan penelitian ini untuk mengevaluasi kesesuaian lahan dan tingkat bahaya erosi pada kawasan perhutanan sosial di Tlekung sebagai dasar pengembangan agroforestri kopi berkelanjutan.

2. Metodologi

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kawasan Hutan Dengan Pengelolaan Khusus Lembaga Pengelola Hutan Desa Sumber Makmur Sembada yang berlokasi di Desa Tlekung, Kecamatan Junrejo, Kota Batu, Provinsi Jawa. Penelitian berlangsung pada bulan Januari sampai Mei 2025. Analisis Tanah dilaksanakan di laboratorium tanah Universitas Negeri Islam Malang.

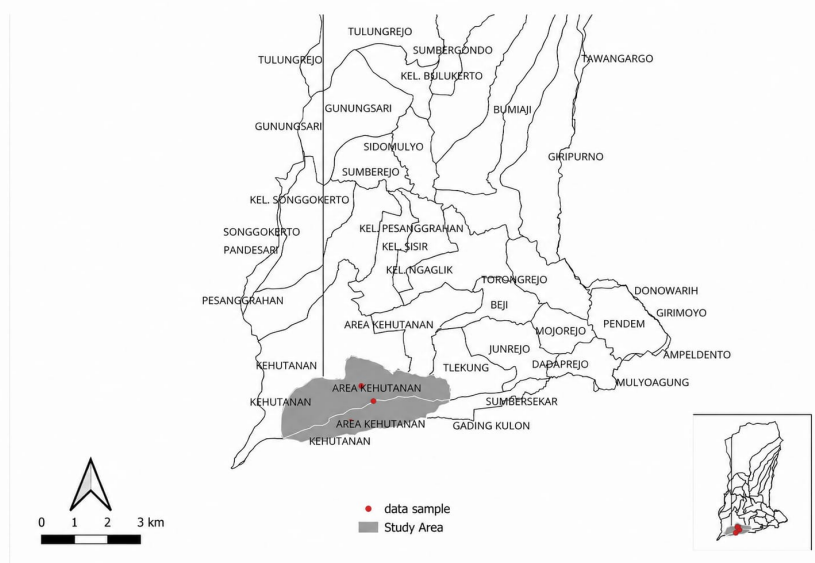
2.2. Metode

2.2.1. Survey Lokasi

Survey lokasi bertujuan untuk memperoleh informasi dan memahami kondisi nyata di lokasi yang akan dilaksanakan kegiatan, sehingga dapat dilakukan perencanaan dan pelaksanaan kegiatan yang efisien dan akurat. Tahapan survey: pembuatan peta lokasi penelitian KHDPK LPHD Tlekung, penentuan jalur mobilitas menuju lokasi pengambilan sampel, peninjauan titik lokasi pengambilan sampel.

2.2.2. Pengambilan Sampel Tanah

Aplikasi *avenza maps* digunakan untuk menentukan titik atau lokasi pengambilan sampel. Sampel tanah diambil dengan metode (*purposive random sampling*) atau secara acak pada 2 lokasi, yakni hutan lindung dan hutan produksi. Pengambilan sampel menggunakan bor tanah dengan kedalaman 30 cm, dimana setiap titik diambil 3 sampel, kemudian dikompositkan dan diambil sebanyak 1 kg untuk dilakukan pengujian sifat kimia tanah.



Gambar (Figure) 1. Peta lokasi penelitian (*Research location map*)

2.2.3. Pengamatan dan Pengukuran

Pengukuran kemiringan lereng menggunakan clinometer, panjang lereng diukur menggunakan roll meter serta suhu tanah diukur menggunakan thermometer tanah. Pengamatan secara langsung dilapang untuk mengetahui penggunaan lahan, konservasi, bahaya erosi, bahaya banjir dan batuan permukaan.

2.2.4. Proses Analisis Laboratorium

Proses analisis kimia tanah menggunakan ph meter untuk mengukur ph, C-organik dengan metode walkley dan black (%), KTK (cmol) dan KB (%) menggunakan teknik ekstraktor NH₄OAc. Analisis sifat fisik tanah dilakukan di laboratorium untuk mengetahui permeabilitas, tekstur, porositas dan berat volume (Nurhartanto et al., 2022). Analisis sifat fisik tanah menggunakan metode analisis pipet untuk uji tekstur, metode Walkley dan Black untuk kadar bahan organik tanah, metode analisis *Hulkum Darcy* untuk permeabilitas dan pengamatan lapang untuk struktur tanah.

2.2.5. Analisis Data

Penentuan kesesuaian lahan aktual (*current suitability*) dari setiap satuan lahan dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan metode perbandingan (*matching*) antara kualitas lahan dengan syarat tumbuh tanaman tanpa ada perbaikan terhadap faktor pembatas (Hartati et al., 2018). Hasil penelitian dianalisis menggunakan analisis spasial metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*) untuk memperkirakan laju erosi tanah rata-rata pertahun pada suatu lahan (Sahido et al., 2025).

Persamaan USLE (*Universal Soil Loss Equation*) digunakan untuk memprediksi erosi (Wischmeier & Smith, 1978) yaitu:

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa hasil perhitungan curah hujan 1 tahun terakhir dihitung dari bulan januari sampai desember 2025 yang diperoleh dari data BMKG Karangploso Malang. Data hujan digunakan untuk mengukur erosivitas pada wilayah sekitar lahan hutan produksi di Desa Tlekung Kecamatan Junrejo serta melakukan kajian literature dari berbagai sumber terkait (Wibowo et al., 2020)

2.2.5.1. Erosivitas Hujan (R)

Data curah hujan 1 tahun terakhir yang dihitung dari bulan januari sampai desember 2025 di peroleh dari data BMKG Stasiun Klimatologi Jawa Timur. Data ini digunakan dalam perhitungan Faktor erosivitas hujan. Perhitungan faktor erosivitas hujan ditentukan dengan menggunakan formula yang dikemukakan oleh Lenvein (1989), yaitu:

$$R = 2,21 \times (\text{Rain})_m^{1,36}$$

Keterangan:

R = Erosivitas hujan

Rain = Curah hujan tahunan (mm)

2.2.5.2. Erodibilitas Tanah (K)

Erodibilitas tanah merupakan kepekaan tanah untuk tererosi, semakin tinggi nilai erodibilitas suatu tanah semakin mudah tanah tersebut tererosi (Muamalah et al., 2024). Nilai erodibilitas dapat dihitung dengan persamaan:

$$100 K = 1,292 [2,1 M^{1,14} (10 - 4) (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5 (c - 3)]$$

Keterangan:

K : Faktor erodibilitas tanah

M : % debu + pasir halus x (100 - %klei)

A : Persentase bahan organik (1,724 x %C)

b : Kode klasifikasi struktur tanah

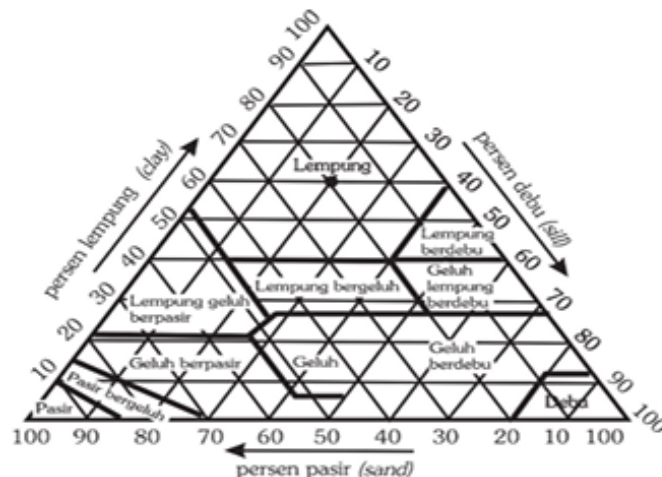
c : Kelas permeabilitas

**Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Tingkat Bahaya Erosi
sebagai Dasar Pengelolaan Agroforestry di Perhutanan Sosial**
Nur Faras Radya Ismaya, Sukma Arty Purwa Aditya, Desi Nurmalasari,
Alfaro Catya Wahyu Raka Wardana, Febri Arif Cahyo Wibowo, & Nugroho Tri Waskitho

Tabel (Table) 1. Pembagian kelas tekstur tanah (*Distribution of soil texture classes*)

Nama (Name)	Tekstur (Texture)	Kelas dan tekstur (Classes and texture)
Tanah berpasir	Kasar	Berpasir
Tanah berlempung	Agak sedang	Pasir berlempung
		Lempung berpasir
		Lempung berpasir halus
	Sedang	Lempung perpasir sangat halus
		Lempung
Tanah berliat	Agak halus	Lempung berdebu
		Debu
		Lempung berliat
	Halus	Lempung liat berpasir
		Lempung liat berdebu
		Liat berpasir
		Liat berdebu
		Liat

Sumber (Source): Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA), (1938)



Sumber (Source): Indarto, 2013

Gambar (Figure) 2. Diagram flow chart (*Diagram alir penelitian*)

Tabel (Table) 2. Kelas struktur tanah (*Soil structure classes*)

Kelas struktur tanah (<i>Soil structure class</i>)	Ukuran diameter (<i>Diameter size</i>)	Kelas (<i>Class</i>)
Granula sangat halus	< 1 mm	1
Granula halus	1 – 2 mm	2
Granula sedang sampai kasar	2 – 10 mm	3
Berbentuk balok, plat dan massif	> 10 mm	4

Nilai C-organik dan nilai permeabilitas didapat dari hasil analisis laboratorium yang kemudian diklasifikasikan pada Tabel 3 untuk nilai C-organik dan Tabel 4 untuk nilai

permeabilitas. Hasil klasifikasi tekstur, struktur, bahan organik dan permabilitas kemudian dimasukan ke dalam rumus perhitungan nilai K untuk mengetahui tingkat kepekaan tanah terhadap erosi.

Tabel (Table) 3. Kelas C-organik (*Class C-organic*)

Kelas (<i>Class</i>)	C-organik (<i>C-organic</i>)	Nilai (<i>Value</i>)
Sangat rendah	<1	0
Rendah	1-2	1
Sedang	2,1-3	2
Tinggi	3,1-5	3
Sangat tinggi	>5 (gambut)	4

Sumber (*Source*): Puslitanak, (2005)

Tabel (Table) 4. Kelas permeabilitas tanah (*Soil permeability classes*)

Kelas permeabilitas (<i>Permeability classes</i>)	Kecepatan (cm/jam) (<i>Speed</i>) (<i>cm/hours</i>)	Kelas (<i>Classes</i>)
Sangat lambat	< 0,5	6
Lambat	0,5 – 2,0	5
Lambat sampai sedang	2,0 – 6,3	4
Sedang	6,3 – 12,7	3
Sedang sampai cepat	12,7 – 25,4	2
Cepat	>25,4	1

Sumber (*Source*): Hardjoamidjojo & Sukartaatmadja, (2008)

Tabel (Table) 5. Klasifikasi nilai K tanah (*Classification of soil K values*)

Kelas (<i>Classes</i>)	Nilai K (<i>K-value</i>)	Nilai (<i>Value</i>)
1	0,00 – 0,10	Sangat rendah
2	0,11 – 0,21	Rendah
3	0,22 – 0,32	Sedang
4	0,33 – 0,44	Agak tinggi
5	0,45 – 0,55	Tinggi
6	0,56 – 0,64	Sangat tinggi

Sumber (*Source*): Wischeier & Smith, (1978)

2.2.5.3. Panjang dan kemiringan lereng (LS)

Panjang dan kemiringan lereng (LS) menurut (Schwab, 1981), diperoleh rumus sebagai berikut:

$$LS = \frac{1}{2} X (0,0138 + 0,00965 S + 0,00138 S^2)$$

Keterangan:

X = panjang lereng (m)

S = kemiringan lereng (%)

2.2.5.4. Penutupan vegetasi

Dalam memperkirakan nilai C dengan mengidentifikasi jenis tanaman

yang ditanam di lahan tersebut. Vegetasi memiliki peran penting dalam memperkuat efektivitas struktur penahan tanah (Prandono, 2025).

2.2.5.5. Praktik konservasi lahan

Praktik konservasi lahan dipengaruhi oleh tanaman yang ditanam di lokasi serta tindakan konservasi yang dilakukan.

2.2.5.6. Tingkat bahaya erosi

Berdasarkan pedoman *United States Department of Agriculture* (USDA) tingkat bahaya erosi dapat diklasifikasikan pada Tabel 8.

**Evaluasi Kesesuaian Lahan dan Tingkat Bahaya Erosi
sebagai Dasar Pengelolaan Agroforestry di Perhutanan Sosial**
Nur Faras Radya Ismaya, Sukma Arty Purwa Aditya, Desi Nurmalasari,
Alfaro Catya Wahyu Raka Wardana, Febri Arif Cahyo Wibowo, & Nugroho Tri Waskitho

Tabel (Table) 6. Tabel nilai C untuk berbagai bentuk tutupan lahan (*Table of C values for various types of land cover*)

No	Tutupan lahan (<i>Land cover</i>)	Nilai C (<i>C-value</i>)	Sumber (<i>Sources</i>)
1	Hutan lahan kering primer	0,001	Asdak (1995)
2	Hutan lahan kering sekunder	0,005	Sinaga et al. (2014)
3	Belukar	0,300	Isma et al. (2016)
4	Pemukiman	1,000	Asdak (1995)
5	Tanah terbuka	1,000	
6	Badan air	0,010	
7	Pertanian lahan kering	0,190	
8	Pertanian lahan kering campur	0,280	Isma et al. (2016)
9	sawah	0,010	

Tabel (Table) 7. Tabel nilai C untuk berbagai bentuk tutupan lahan (*Table of C values for various types of land cover*)

No	Tindakan konservasi (<i>Conservation measures</i>)	Nilai P (<i>P value</i>)
1	Teras bangku	
	Konstruksi baik	0,04
	Konstruksi sedang	0,15
	Konstruksi kurang baik	0,35
2	Teras tradisional	0,40
3	Strip tanaman rumput bahia	0,40
	Pengelolaan tanah dan penanaman menurut garis kontur	
	Kemiringan 0-8%	0,50
	Kemiringan 9-20%	0,75
	Kemiringan lebih dari 20%	0,90
4	Tanpa tindakan konservasi	1,00

Tabel (Table) 8. Klasifikasi tingkat bahaya erosi (*Classification of erosion hazard level*)

Tingkat bahaya erosi (<i>Erosion hazard level</i>)	Laju erosi (<i>Erosion rate</i>) (ton/ha/tahun) (<i>ton/ha/years</i>)	Keterangan (<i>Remarks</i>)
I	<15	Sangat ringan
II	12 – 60	Ringan
III	60 – 180	Sedang
IV	180 – 480	Berat
V	>480	Sangat Berat

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

3.1.1. Evaluasi kesesuaian lahan di KHPDK LPHD Tlekung

Penelitian ini menghasilkan tabel kesesuaian lahan bagi tanaman kopi pada

KHPDK LPHD Tlekung yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam perencanaan dan pengambilan keputusan serta optimalisasi produktivitas tanaman kopi berbasis pola agroforestri.

Tabel (Table) 9. Evaluasi kesesuaian lahan di hutan lindung dan hutan produksi KHDPK LPHD Tlekung (*Land suitability evaluation in the KHDPK LPHD Tlekung protected forest and production forest*)

No	Kualitas lahan (<i>Land quality</i>)	Karakteristik (<i>Characteristic</i>)	Hutan Lindung/Kesesuaian lahan aktual/Lahan potensial (<i>Protected forest/Actual land suitability/Potensial land</i>)	Hutan Produksi/Kesesuaian lahan aktual/Lahan potensial (<i>Production Forest/Actual land suitability/Potential land</i>)
1	Suhu (t)	Suhu rerata	20 / S1 / S1	21 / S1 / S1
2	Ketersediaan air	Bulan kering Curah hujan Kelembaban	4 / S1 / S1 2.501 / S2 / S1 (Drainase) 81% / S1 / S1	4 / S1 / S1 2.501 / S2 / S1 (Drainase) 81% / S1 / S1
3	Media perakaran	Drainase tanah Tekstur tanah Kedalaman tanah	Baik / S1 / S1 SL / S1 / S1 >100 cm / S1 / S1	Cukup baik / S2 / S1 SL / S1 / S1 >100 cm / S1 / S1
4	Retensi tanah	KTK/KPK pH Kejenuhan basa C-organik	35.17 / S1 / S1 6.4 / S1 / S1 3.47 / S3 / S2 (Pengapuran) 5.19 / S1 / S1	34.40 / S1 / S1 5.6 / S1 / S1 3.59 / S3 / S2 (Pengapuran) 4.32 / S1 / S1
5	Terrain	Lereng Batu permukaan	10% / S2 / S1 (Terasering) <5% / S1 / S1	25% / S3 / S2 (Terasering) <5% / S1 / S1
6	Bahaya banjir	Banjir	Tidak pernah / S1 / S1	Tidak pernah / S1 / S1
7	Erosi	Erosi	Sangat rendah / S1 / S1	Sangat rendah / S1 / S1

3.1.2. Prediksi erosi dengan USLE

3.1.2.1. Erosivitas (R)

Data curah hujan diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan

Geofisika (BMKG) Jawa Timur dari Januari - Desember 2025 dengan kurun waktu 1 tahun memiliki rata-rata curah hujan tahunan 2.501,1 mm/tahun.

3.1.2.2. Erodibilitas (K)

Tabel (Table) 10. Erodibilitas tanah (K) di KHDPK LPHD Tlekung (*Soil erodibility (K) at KHDPK LPHD Tlekung*)

Lokasi (<i>Location</i>)	%P	%D	%L	M	a	b	c	Tekstur (<i>Texture</i>)	K	Tingkat erodibilitas (<i>Erodibility level</i>)
Hutan lindung	5,16	13,2	11,6	1.623,02	8,89	3	1	SL	0,01	Sangat rendah
Hutan produksi	68,4	23,2	8,4	8.399,72	4,82	3	3	SL	0,20	Rendah

3.1.2.3. Panjang dan kemiringan lereng (LS)

Pengukuran langsung dilapangan pada hutan lindung dan hutan produksi

dilakukan untuk mengetahui panjang dan kemiringan lereng. Nilai LS pada lokasi riset dipaparkan pada Tabel 11.

Tabel (Table) 11. Panjang dan kemiringan lereng (LS) di KHDPK LPHD Tlekung (*Length and slope of the slope (LS) in KHDPK LPHD Tlekung*)

Lokasi (<i>Location</i>)	L	S	LS
Hutan Lindung	27 m	10%	0.57
Hutan Produksi	42 m	25%	1.20

3.1.2.4. Penutupan vegetasi dan pengelolaan lahan

Tabel (Table) 12. Penutupan vegetasi dan pengelolaan lahan (CP) di KHDPK LPHD Tlekung (*Vegetation cover and land management (CP) in KHDPK LPHD Tlekung*)

Lokasi (<i>Location</i>)	Penggunaan lahan (<i>Land use</i>)	Nilai C (<i>C value</i>)	Pengelolaan (<i>Management</i>)	Nilai P (<i>P value</i>)
Hutan Lindung	Hutan lahan kering primer	0.001	Tanpa tindakan konservasi	1.00
Hutan Produksi	Agroforestry kopi	0.55	Teras kontur	0.4

3.1.2.5. Penutupan vegetasi dan pengelolaan lahan

Tabel (Table) 13. Tingkat bahaya erosi (*Erosion hazard level*)

Lokasi/ <i>Location</i>	A (ton/ha/tahun) <i>A (ton/ha/year)</i>	Kelas Erosi (<i>Erosion class</i>)	Tingkat bahaya erosi (<i>Erosion hazard level</i>)
Hutan lindung	0,01	I	Sangat ringan
Hutan produksi	0,16	II	Ringan

3.2. Pembahasan

Kawasan hutan lindung dengan suhu 20°C dan Suhu tanah pada kawasan hutan produksi dengan suhu 21°C dan dapat dikategorikan dalam kelas lahan S1 atau sesuai. Menurut (Regassa, 2024) suhu rata-rata ideal tanaman kopi berada antara 18 - 21°C. Menurut (Oktaviani et al., 2024) Suhu udara 15-25°C, kelembapan udara 70-89%, ketinggian tempat 1.000-2.000 mdpl serta curah hujan 1.250-2.500 mm/tahun merupakan kondisi iklim yang ideal bagi tanaman kopi. Kelembaban di KHDPK LPHD Tlekung, yakni 81% yang termasuk kategori S1 menunjukkan kelembaban yang sesuai untuk tanaman kopi sedangkan curah hujan termasuk kategori S2 (2.501 mm/tahun). Drainase tanah pada hutan lindung menunjukkan nilai baik yang masuk dalam ketegori S1 sedangkan pada hutan produksi menunjukkan nilai cukup baik yang masuk dalam ketegori S2 dan perlu dilakukan perbaikan drainase dengan

menambahkan bahan organik. Tekstur tanah pada lokasi yakni lempung berpasir yang termasuk kategori S1 (Sholikah et al., 2024). Tekstur tanah lempung berpasir memiliki kelas kesesuaian lahan S1 atau sangat sesuai untuk tanaman kopi (Riyanto et al., 2024) Struktur tanah yang baik menandakan drainase dan aerasi yang optimal sehingga akar tanaman dapat menembus dan menyerap hara dan air (Ristanti & Edi, 2023). Nilai KTK pada hutan lindung menunjukkan nilai 35,17 dan 34,40 pada hutan produksi sehingga dapat dikategorikan sebagai S1 atau sesuai. KTK merupakan sifat kimia tanah yang sangat erat hubungannya dengan tanah yang subur memiliki kemampuan menyerap dan menyediakan unsur hara tanaman yang berkaitan dengan sifat kimia tanah, yakni KTK (Wibowo et al., 2024). Nilai Ph di lokasi penelitian menunjukkan nilai 6,4 dan 5,6 yang dikategorikan sebagai S1. Keasaman tanah yang rendah dapat

mengurangi ketersediaan unsur hara dan meningkatkan kelarutan logam beracun, yang dapat memberikan tekanan pada sistem akar dan meningkatkan penyakit (Nguyen et al., 2026). Nilai kejenuhan basa menunjukkan nilai 3,47 dan 3,59 sehingga dikategorikan sebagai S3 serta perlu dilakukan perbaikan. Menurut penelitian (Dugalic et al., 2025) pengaplikasian kapur dengan pupuk organik dapat menurunkan keasaman tanah dan dapat meningkatkan kejenuhan basa. Nilai c-organik menunjukkan nilai 5,19 dan 4,32 yang dikategorikan S1 atau sesuai bagi tanaman kopi. Bahan organik dalam tanah mempengaruhi keberadaan unsur hara dalam tanah (Purnamasari et al., 2024). Bahan organik dalam tanah merupakan hasil dekomposisi dari sisa tanaman. Kualitas tanah yang baik ditandai dengan tingginya kandungan C-organik (Kamisa & Kartika, 2024). Berdasarkan hasil pencocokan kelas kelerengan diketahui kawasan hutan lindung KHD PK LPHD Tlekung berada pada kelerengan 10% dengan tingkat bahaya banjir rendah/tidak ada dan erosi sangat rendah serta singkapan batuan permukaan <5 sedangkan pada hutan produksi berada pada kelerengan 25% dengan tingkat bahaya banjir tidak pernah dan erosi sangat rendah serta batuan permukaan kurang dari 5. Kelerengan 25% dikategorikan S3 sehingga perlu dilakukan perbaikan dengan pembuatan terasering dengan memotong lereng yang panjang. Teras-teras ini membantu menurunkan laju aliran air dan mendorong infiltrasi air serta pengendapan sedimen. Pembuatan penghalang fisik dapat meningkatkan akumulasi bahan organik dan pembentukan vegetasi, sehingga semakin memperkuat ketahanan tanah terhadap erosi (Ame et al., 2025). Berdasarkan kelas kesesuaian FAO lahan hutan lindung dikategorikan aktual namun terdapat pembatas S2f yang berarti terdapat pembatas pada faktor retensi hara yang berkaitan dengan kesuburan tanah dimana kejenuhan basa perlu dilakukan perbaikan kelas kesesuaian lahan. Berdasarkan kelas kesesuaian lahan FAO

dan SYS pada lahan hutan produksi dikategorikan aktual namun terdapat pembatas S3fm yang cukup potensial sehingga perlu dilakukan perbaikan pada faktor pembatas, yakni retensi tanah dan potensi mekanisasi. Pemberian kapur dapat meningkatkan pH tanah, kadar Ca dan kejenuhan basa serta mampu menurunkan kadar Al (Aminah & Nuraeni, 2024). Faktor potensi mekanisasi dapat diperbaiki dengan pembuatan terasering. Menurut (Hamdhan et al., 2023) pembuatan terasering berguna meminimalkan risiko erosi oleh air karena minimnya limpasan air pada permukaan sehingga infiltrasi meningkat.

Curah hujan dapat mempengaruhi terjadinya erosi dimana air hujan menghasilkan energi sehingga terjadi pelepasan serta pengangkutan partikel tanah. Erosi dapat dipengaruhi tingginya aktivitas curah hujan (Musakkir et al., 2024). Vegetasi dapat meredam tetesan air hujan, sehingga meminimalisir degradasi pada permukaan dan perpindahan sedimen tanah (Judijanto & Suparwata, 2025). Berdasarkan tabel erodibilitas tanah menunjukkan erodibilitas pada hutan lindung dengan nilai 0,01 (sangat rendah) dibandingkan hutan produksi 0,20 (sedang). Hutan lindung persentase kemiringan lereng menunjukkan nilai 10% nilai tersebut lebih rendah dibandingkan dengan hutan produksi menunjukkan nilai 25%. Kemiringan lereng agak curam dapat berpotensi untuk terjadi erosi laju air permukaan lebih cepat dan laju infiltrasi yang rendah akibat permukaan yang miring. Kemiringan lereng berbanding lurus dengan erosi (Wijaya et al., 2024). Permeabilitas pada hutan lindung lebih rendah dimana nilai tersebut mempengaruhi nilai erodibilitas tanah. Permeabilitas tanah mampu mengurangi limpasan permukaan sehingga mengurangi energi aliran air yang mengangkut partikel tanah sehingga mampu menurunkan nilai erodibilitas tanah. Nilai erodibilitas tanah yang rendah pada hutan lindung dipengaruhi oleh struktur tanah yang baik

yang mempengaruhi infiltrasi, sehingga mengurangi limpasan permukaan. Berdasarkan data pada tabel diperoleh nilai C pada hutan produksi lebih tinggi dibandingkan dengan hutan lindung. Vegetasi berperan dalam menahan dispersi air hujan terhadap tanah (Yuliana et al., 2025). Nilai P pada hutan lindung lebih tinggi dibandingkan dengan hutan produksi karena pada lahan hutan lindung tidak terdapat tindakan konservasi sedangkan pada hutan produksi terdapat tindakan pembuatan teras kontur, sehingga efektivitas pengendalian aliran lebih rendah. Tingkat bahaya erosi pada hutan lindung 0,01 ton/ha/thn (Sangat rendah) dan hutan produksi 0,16 ton/ha/thn (Ringan). Nilai tingkat bahaya erosi pada kedua lokasi penelitian menunjukkan bahwa perbedaan pengelolaan lahan mempengaruhi nilai erosi pada kedua lokasi. Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan penggunaan lahan pada kawasan hutan masih sesuai dengan kemampuan fisik lahan, namun tetap perlu dilakukan upaya pengelolaan lahan berbasis konservasi sebagai upaya pencegahan peningkatan laju erosi di masa mendatang.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi kesesuaian lahan di areal perhutanan sosial yang termasuk kawasan hutan lindung diperoleh kelas S2f sedangkan hutan produksi diperoleh kelas S3fm. Faktor pembatas pada tanaman kopi meliputi retensi tanah dan terrain/potensi mekanisasi. Tingkat bahaya erosi pada hutan lindung tergolong sangat rendah sedangkan hutan produksi tergolong rendah. Nilai erosi pada hutan lindung 0,01 ton/ha/thn sedangkan pada hutan produksi 0,16 ton/ha/thn. Perencanaan konservasi menggunakan konservasi mekanik dengan memperbaiki pengelolaan lahan (P) dengan membuat teras kontur pada hutan produksi.

4.2. Saran

Pengelolaan agroforestri kopi perlu menerapkan praktik konservasi tanah dengan pembuatan terasering untuk menekan laju erosi. Perbaikan sifat kimia pada tanah dapat dilakukan dengan pengapuran dan penambahan bahan organik pada tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan pengindraan jauh dengan memanfaatkan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk memetakan kesesuaian lahan dan tingkat bahaya erosi di KHDPK LPHD Tlekung.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada kelompok tani KHDPK LPHD Tlekung yang telah memberikan izin serta bantuan selama pengambilan data lapangan, sehingga memperlancar penelitian ini. Terima kasih kepada rekan-rekan penelitian atas bantuan serta kerja samanya selama kegiatan penelitian.

Daftar Pustaka

- Ame, M.A., Wei, W., Zhang, S., Liu, W., & Chen, L. (2025). The effects of rainfall and terracing – mulch combinations on soil erosion in a loess hilly area , china : insights from plot simulations and WEPP Modeling. *Land*, 14(1), 1–18.
- Aminah, & Nuraeni. (2024). Efektivitas pengolahan tanah dan pengapuran terhadap pertumbuhan dan produksi kacang merah (*Phaseolus vulgaris* L) The effectiveness of soil management and liming on the growth and production of red beans (*Phaseolus vulgaris* L). *Jurnal Galung Tropika*, 13(1), 11–18.

- Aqilla, A.R. (2024). Perhutanan sosial: memberdayakan masyarakat lokal dalam pengelolaan hutan yang berkelanjutan. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 2(6), 437–440.
- Asrul, A., Merlin, M., Rahim, M.R., Rejki, M., & Zakaria, Z. (2025). Dampak erosi terhadap peningkatan risiko banjir di daerah aliran sungai lomaya Kabupaten Bone Bolango. *Jurnal Geografi, Lingkungan & Kesehatan*, 3(1), 1–6.
- Dugalic, M., Bošković, L.R., Latkovic, D., Rajicic, V., Terzic, D., & Zivotic, L. (2025). Effect of lime , mineral fertilizer and manure on soil characteristics and yield of four maize hybrids. *Agronomy*, 15(3), 1–19.
- Gumilang, D., Rahman, F.A., Yuhardi, E., & Supriyadi, S. (2025). Evaluasi kesesuaian lahan komoditas padi sawah tadah hujan di Kabupaten Bangkalan. *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan Dan Pendidikan Vokasi Pertanian*, 1139–1152.
- Hamdhan, I.N., Anugrah, R.F.V., Hulwun, S., Awalia, A. (2023). Terracing slope stability analysis using bio-engineering soil reinforcement with 3D model approach. *International Journal of GEOMATE*, 25(110), 235–242.
- Hartati, T.M., Sunarminto, B.H., & Nurudin, M. (2018). Evaluasi kesesuaian lahan untuk tanaman perkebunan di wilayah Galela, Kabupaten Halmahera Utara, Propinsi Maluku Utara. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 33(1), 68–77.
- Judijanto, L., & Suparwata, D.O. (2025). Peran vegetasi dalam mengurangi risiko pergerakan tanah di musim hujan. *Jurnal Geosains West Science*, 3(01), 21–27.
- Kamisa, & Kartika, T. (2024). Analisis penentuan C-organik pada sampel tanah secara spektrofotometer UV-Vis. *Jurnal Indobiosains*, 6(2), 74–80.
- Kartika, I., Putra, P., Aqil, G., Putri, D., Kusumanegara, H., Linardi, P., Nasrullah, Z., Winara, I., Sri, N., Prasetyo, F., Akbar, M., Pase, A., Aprianti, A., Palewoi, N., Ridwan, M., & Ulhusna, N. (2025). Analisis stakeholder dalam pengelolaan hutan rakyat lestari. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 22(2), 77–89.
- Kurniasih, M., Azhari, D.F., Hudzwah, R.A., Rohmat, D., & Handayani, T. (2025). Pemetaan sebaran tingkat bahaya dan laju erosi di DAS Brantas Tahun 2025 menggunakan metode RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, 8(2), 105–123. <https://doi.org/10.14710/jgt.8.2.2025.105-123>
- Manurung, K.G., & Elias. (2025). Evaluasi kesesuaian lahan agroforestri berbasis tanaman hortikultura di Desa Karyasari, Kecamatan Leuwiliang, Kabupaten Bogor. *Jurnal ForestIndo*, 2(1), 237–248.
- Muamalah, A.S. Al, Tjoneng, A., & Syarif, M.M. (2024). Penentuan nilai erodibilitas tanah pada kemiringan lereng di atas 15% pada DAS Jenelata Kabupaten Gowa Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal AGrotekMAS*, 5(1), 100–108.
- Musakkir., Tjoneng, A., & Syarif, M. (2024). Menentukan nilai erodibilitas tanah (K) pada jenis tanah di Sub Das

- Jenelata. *Jurnal AGrotekMAS*, 5(2), 203–213.
- Nguyen, V.L., Laetitia, H., Thao, L.D., Chung, N.V., Aydin, E., Lambert, B., & Didier, L. (2026). Soil properties influence the prevalence of soilborne pathogens in Robusta coffee and black pepper systems in Vietnam ' s Central Highlands. *Ecological Frontiers*, 46(1), 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2025.09.007>
- Nurhartanto, N., Zulkarnain, Z., & Wicaksono, A.A. (2022). Analisis beberapa sifat fisik tanah sebagai indikator kerusakan tanah pada lahan kering. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 4(2), 107–112. <https://doi.org/10.35941/jatl.4.2.2022.7001.107-112>
- Octavia, A., Gunardi, D.W., Iswandaru, D., & Setiawan, A. (2023). Potensi agroforestri untuk mendukung biorospekting. *Jurnal Hutan Lestari*, 11(4), 1068–1079.
- Oktaviani, N., Suriadikusumah, A., & Arifin, M. (2024). Perubahan iklim mikro dan produksi kopi arabika (*Coffea arabica* L .) pada daerah aktivitas geothermal PLTP Kamojang di Kabupaten Bandung. *Jurnal Agrikultura*, 35(3), 400–412.
- Pasaribu, P.H.P. (2024). Analisis kelerengan , jenis tanah dan curah hujan untuk arahan penggunaan lahan di Desa Merdeka. *Prosiding Seminar Nasional Biologi*, 3, 30–35.
- Prandono, T. (2025). Perbandingan kinerja interlocking stone sebagai penahan tanah dengan perlindungan vegetasi dan non-vegetasi terhadap laju erosi. *Jurnal Sosial Dan Teknologi (SOSTECH)*, 5(10), 4128–4139.
- Purnamasari, I., Sanjaya, R.I., Rachman, F., Setyo, B., & Priyono, E. (2024). Kajian distribusi C organik dan kadar air tahan di lahan kopi robusta Kabupaten Jember dengan ketinggian berbeda pada akhir musim penghujan. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 135–142. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.15>
- Regassa, M.D. (2024). Impression of the effects of climate change on genetic resources and coffee (*Coffea arabica* L.) production. *American Journal of Life Sciences*, 12(6), 157–163.
- Ristanti, D., & Edi, P. (2023). Sifat fisika tanah pada tipe penggunaan lahan yang berbeda di Kecamatan Pujon, Jawa Timur, Indonesia. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(1), 27–33.
- Riyanto, I.A., Hendrayana, H., Sambodo, A.P., Widyaningsih, Yu., & Jayanto, G.D. (2024). Kesesuaian lahan untuk tanaman kopi pinggiran di daerah tangkapan pemetaan mobilitas penduduk di kawasan Kota Bandung Air (DTA) Danau Toba. *Makalah Geografi Indonesia*, 38(2), 90–104. <https://doi.org/10.22146/mgi.70636>
- Sahido, W.P.M., Rahim, Y., Dude, S., & Rahman, R. (2025). Prediksi erosi menggunakan metode USLE (Universal Soil Loss Equation) Dan Sistem Informasi Geografis (SIG) Di Kecamatan Bolaang Uki Kabupaten Bolaang Mongondow Selatan. *Jurnal Agrotek*, 9(1), 92–103. <https://doi.org/10.33096/agrotek.v9i1.715>

- Sholikah, D.H., Salsabila, S., Husada, A.J., Naufal, R., & Wicaksono, K.S. (2024). Studi karakteristik fisika tanah zona perakaran dan produksi tanaman kopi (*Coffea sp.*) di Kecamatan Wajak , Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 731–742. <https://doi.org/10.14710/jil.22.3.731-742>
- Usman, S., Amana, S., & Jayeoba, J. (2025). Evaluation of surface soil quality and land suitability for agricultural soils affected by soil erosion. *Discover Soil*, 2(6), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00031-w>
- Wibowo, F.A.C., Triwanto, J., Kurniawan, E.T., & Muttaqin, T. (2020). Strategi perbaikan sistem agroforestri dan konservasi lahan di Desa Pondokagung, Kecamatan Kasembon, Kabupaten Malang. *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*, 15(1), 36–47. <https://doi.org/10.31849/forestra.v15i1.3651>
- Wibowo, F.A.C., Waskith, N.T., Prasetyo, B., & Wahidiah, T. (2024). Dampak pasca kebakaran hutan terhadap sifat fisik dan sifat kimia tanah di Gunung Panderman. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 21(1), 1–16.
- Wijaya, Y.G., Budiyo, S., & Purbajanti, E.D. (2024). Evaluasi kesesuaian lahan sebagai upaya peningkatan produksi tanaman di Kecamatan Kasihan Kabupaten Bantul. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 233–245. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.25>
- Yamani, A., Rudy, G.S., Agustina, A., & Rosidah. (2025). Analisis kesesuaian lahan tanaman agroforestry di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Universitas Lambung Mangkurat. *Jurnal Hutan Tropis*, 13(1), 118–130.
- Yuliana, Aji, I.M.L., & Sari, D.P. (2025). Prediksi erosi dengan metode Universal Soil Loss Equation (USLE) di DAS Kerandangan Kabupaten Lombok Barat. *Jurnal Hutan Tropis*, 9(1), 60–73.

Simpanan Karbon pada Tegakan *Rubroshorea selanica* di Hutan Penelitian Gunung Dahu, Kabupaten Bogor
(*Carbon Storage in Rubroshorea selanica Stands at the Gunung Dahu Research Forest, Bogor*)

Maharani Putri Banestia^{1*}, Prijanto Pamoengkas², dan/and Wahyu Catur Adinugroho³

^{1,2}Departemen Silvikultur Tropika, IPB University (Jawa Barat, Indonesia), Jl. Lingkar Akademik Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680; Telp: 0251-8626886; Fax: 0251-8626886

³Badan Riset dan Inovasi Nasional (Jawa Barat, Indonesia), Jl. Raya Jakarta-Bogor No.32, Pakansari, Kec. Cibinong, Kabupaten Bogor 16915; Telp: 0811-1933-3601

*E-mail :13maharani@apps.ipb.ac.id

Tanggal diterima: 22 April 2026; Tanggal disetujui: 12 Juni 2026; Tanggal direvisi: 15 Juni 2026

Abstract

Differences in propagation techniques for the same tree species are presumed to influence stand growth, biomass, and carbon stocks, raising questions regarding the effectiveness of planting material sources in supporting the forest's function as a carbon sink. This study aimed to analyze biomass and carbon storage in Rubroshorea selanica stands, based on differences in reproductive methods, at the Gunung Dahu Research Forest, Bogor Regency. Data were collected using a purposive sampling method on plots with 2 m × 2 m spacing in age stands 27 and 28 years. Biomass was estimated non-destructively using allometric equations, whereas understory vegetation and litter were analyzed destructively. The results showed that the standing biomass from cuttings was 259.66 ± 33 tons/ha, and from seed was 224.86 ± 24.68 tons/ha. Carbon storage in both seed sources was high and dominated by aboveground components. Stands derived from cuttings (120.82 tons/ha) had higher carbon storage than stands derived from seeds (102.86 tons/ha), although the difference was not statistically significant. Correlation analysis indicated that seed source had no significant effect on carbon storage, while canopy density had a positive and significant effect. The carbon storage is more strongly influenced by diameter than by seed source.

Keywords: Biomass, carbon stock, seed, cuttings

Abstrak

Perbedaan teknik perbanyakan pada jenis pohon yang sama diduga dapat memengaruhi pertumbuhan tegakan, biomassa, dan simpanan karbon yang dihasilkan, sehingga menimbulkan pertanyaan mengenai efektivitas sumber bibit dalam mendukung fungsi hutan sebagai penyerap karbon. Penelitian ini bertujuan menganalisis biomassa dan simpanan karbon pada tegakan *Rubroshorea selanica* berdasarkan perbedaan sumber bibit di Hutan Penelitian Gunung Dahu, Kabupaten Bogor. Pengambilan data dilakukan dengan metode *purposive sampling* pada plot berjarak tanam 2 m × 2 m di tegakan dengan umur 27 dan 28 tahun. Pendugaan biomassa dilakukan secara *non-destructive* menggunakan persamaan alometrik, sedangkan tumbuhan bawah dan serasah dianalisis secara destruktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa tegakan dengan sumber bibit dari stek sebesar 259,66 ± 33 ton/ha dan yang berasal bibit *seed* sebesar 224,86 ± 24,68 ton/ha. Simpanan karbon pada kedua sumber bibit tergolong tinggi dan didominasi oleh komponen *aboveground*. Tegakan yang bibit stek memiliki simpanan karbon (120,82 ton/ha) lebih tinggi dibandingkan tegakan asal bibit *seed* (102,86 ton/ha), namun perbedaannya tidak signifikan. Sumber bibit tidak berpengaruh nyata terhadap simpanan karbon,

sedangkan kerapatan tajuk berpengaruh positif dan signifikan. Simpanan karbon lebih dipengaruhi oleh diameter dibandingkan sumber bibit.

Kata kunci: Biomassa, simpanan karbon, benih, stek

1. Pendahuluan

Pemanasan global saat ini menjadi isu yang sedang hangat di berbagai negara, salah satunya Indonesia. Pemanasan global terjadi akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK) seperti metana (CH_4), *Chlorofluorocarbon* (CFC), Karbon dioksida (CO_2) dan lainnya. Gas-gas tersebut berkumpul di lapisan bawah atmosfer, menyerap cahaya yang dipantulkan dari bumi atau dikenal sebagai efek rumah kaca. Adanya efek rumah kaca ini berbahaya bagi kehidupan makhluk hidup terutama manusia. Menurut European Commission Joint Research Centre (2025), emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh Indonesia telah meningkat 38,77% dalam rentang tahun 2013 hingga tahun 2020. Pada tahun 2013 Indonesia memproduksi sebesar 864,85 mt $\text{CO}_2\text{eq/tahun}$. Pada tahun 2023 emisi gas rumah kaca di Indonesia meningkat ke angka 1200,20 mt $\text{CO}_2\text{eq/tahun}$. Gas rumah kaca dapat dihasilkan dari aktivitas manusia, seperti alih fungsi lahan dan hutan, pembakaran gas fosil seperti kendaraan, penggunaan sistem pendingin ruangan dan lainnya. Gas-gas yang dihasilkan salah satunya CO_2 menyebabkan suhu udara menjadi lebih panas dan menyebabkan adanya perubahan iklim dengan dampak-dampak seperti perubahan cuaca ekstrem, mencairnya es di kutub, kenaikan permukaan air laut, migrasi habitat sampai kepunahan spesies (Irma & Gusmira, 2024).

Aksi mitigasi perubahan iklim dapat dilakukan melalui penanaman pohon yang berperan dalam menyimpan dan menyerap karbon, memperbaiki kualitas lingkungan, dan mendukung keberlanjutan hutan. Vegetasi hutan mampu menyerap CO_2 melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa maupun

nekromassa (Karim et al., 2019). Hutan Penelitian Gunung Dahu (HPGD) merupakan salah satu model mitigasi iklim dengan luas 250 ha, yang dikembangkan melalui berbagai skenario penanaman. Pada blok penelitian, ditanam berbagai jenis meranti dengan variasi jarak tanam, salah satunya *Rubroshorea selanica* (DC.) P.S.Ashton & J.Heck yang memiliki potensi tinggi sebagai penyerap karbon dan jenis kayu komersial (Khairunnisa et al., 2022). Jenis ini juga memiliki batang lurus dan bernilai ekonomi tinggi (Solissa et al., 2023). Penanaman dilakukan menggunakan dua sumber bibit, yaitu *seed* (biji) dan stek.

Upaya perbanyakan secara vegetatif melalui stek ini sejalan dengan program rehabilitasi HPGD telah dirintis sejak 1997 yang bekerja sama dengan PT Komatsu. Penerapan teknologi KOFFCO (*Komatsu Forda Fog Cooling System*) dalam pengembangan Hutan Penelitian Gunung Dahu (HPGD) terbukti sukses mengatasi hambatan perbanyakan tanaman secara vegetatif yaitu melalui stek (Ferdianti et al., 2022). Teknik stek paling banyak diterapkan dan cukup efektif untuk perbanyakan beberapa spesies *Dipterocarpaceae*. Keberhasilan kegiatan penanaman juga dipengaruhi oleh metoda reproduksi, yang dalam beberapa kasus berpengaruh terhadap pertumbuhan tinggi tanaman (Harrison et al., 2023). Pada jenis-jenis dipterokarpa, perbedaan metoda reproduksi sering menimbulkan variasi dalam daya tumbuh dan kemampuan beradaptasi (Abadayan & Coraacero, 2024). Perbedaan tersebut pada akhirnya akan memengaruhi besarnya kapasitas pohon dalam menyerap dan menyimpan karbon. Salah satunya pada *R. selanica* di HPGD, keberhasilan pertumbuhannya tidak hanya memperlihatkan potensi pemulihan ekosistem terdegradasi, tetapi juga

memberi kontribusi besar dalam simpanan karbon. Oleh sebab itu, pengukuran dan perhitungan simpanan karbon dari berbagai metoda reproduksi sangat penting untuk menilai potensi dan distribusi biomassa dan simpanan karbon serta pengaruhnya sekaligus mendukung strategi pengelolaan hutan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis biomassa dan simpanan karbon pada tegakan *Rubroshorea selanica* berdasarkan perbedaan metoda reproduksi di Hutan Penelitian Gunung Dahu.

2. Metodologi

2.1. Lokasi Penelitian

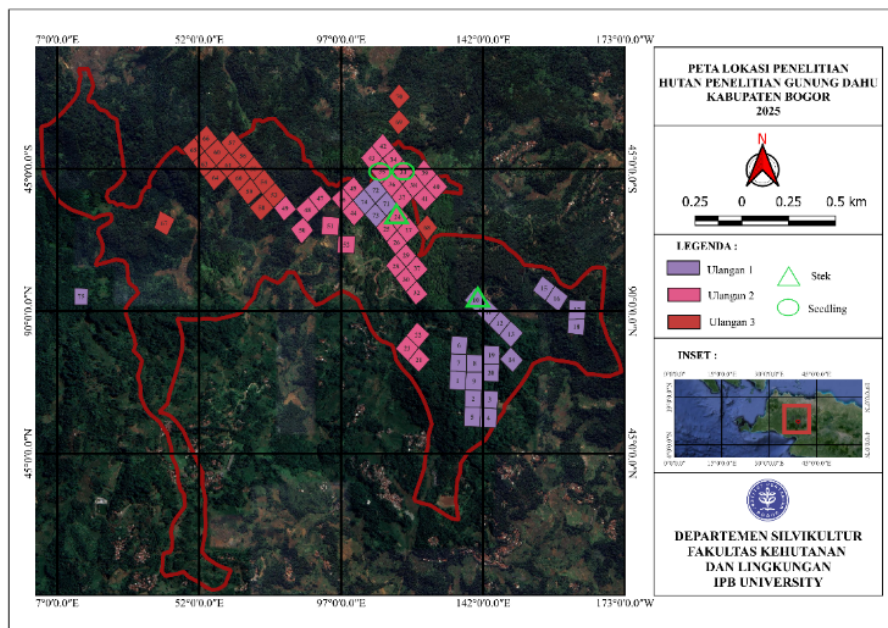
Penelitian dilaksanakan di Hutan Penelitian Gunung Dahu pada bulan Oktober -Desember 2025. Secara administrasi kehutanan berada di wilayah Perum Perhutani Unit III Jawa Barat dan Banten, KPH Bogor, BKPH Leuwiliang

(Gambar 1). Analisis data lanjutan di Departemen Silvikultur Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB University.

2.2. Metode

2.2.1. Pembuatan Petak Contoh dan Petak Analisis Pembuatan Vegetasi

Pengambilan data menggunakan *purposive sampling* pada blok dengan jarak tanam 2 m × 2 m dan pola tanam jalur. Ukuran blok tanam sebesar 1 ha yang mana pada penelitian ini menggunakan 2 blok pada blok 10 dan 24 bibit berasal dari stek serta 33 dan 35 bibit berasal dari *seed*. Setiap blok terdiri dari tiga plot 20 m × 20 m sebagai ulangan yang terletak dalam plot, dengan analisis vegetasi bertingkat 20 m × 20 m (pohon), 10 m × 10 m (tiang), 5 m × 5 m (pancang), dan 2 m × 2 m (semai/tumbuhan bawah) (SNI 7724: 2019).



Gambar (Figure) 1. Peta penelitian Hutan Penelitian Gunung Dahu (*Research map of the Gunung Dahu Research Forest*)

2.2.2. Pengambilan Data Vegetasi serta Parameter Biofisik dan Lingkungan

Pengukuran karbon dilakukan secara destruktif (semai, tumbuhan bawah, serasah) dan *non-destructive* (alometrik) pada tingkat pancang, tiang dan pohon. Vegetasi diklasifikasikan menjadi pancang, tiang, dan pohon dengan pengukuran diameter setinggi dada (dbh) dan tinggi total (Pratama et al., 2016). Biomassa tumbuhan bawah dan serasah diambil pada sub petak 2 m × 2 m. Kerapatan tajuk yang dapat dilihat klasifikasinya pada Tabel 1 diukur dengan kamera *fisheye* dan dianalisis menggunakan *Gap Light Analyzer* lalu nilainya dikategorikan berdasarkan nilai *Leaf Area Index* (LAI).

Data biofisik seperti suhu, kelembapan, ketinggian, pH dan suhu

tanah, serta kemiringan lahan. Klasifikasi lereng disajikan pada Tabel 2.

2.2.3. Pengeringan

Tumbuhan bawah dan serasah (± 300 g) dikeringkan pada 80°C selama 48 jam atau sampai beratnya stabil atau konstan (SNI 7724: 2019), lalu ditimbang untuk memperoleh berat kering menggunakan timbangan analitik.

2.3. Analisis Data

2.3.1. Perhitungan Potensi Biomassa Tegakan dan Nekromassa Pohon

Biomassa tegakan dihitung secara *non-destructive* menggunakan alometrik *Dipterocarpa* (Manuri et al., 2016) untuk pancang, tiang, dan pohon dengan menggunakan rumus seperti Tabel 3.

Tabel (Table) 1. Klasifikasi kerapatan tajuk pohon secara digital *hemispherical photography* (*Digital hemispherical photography classification of tree canopy density*)

Nomor (No)	Klasifikasi kerapatan tajuk (<i>Canopy density classification</i>)	Nilai LAI (<i>LAI Value</i>)
1	Sangat rapat (<i>Very dense</i>)	> 2,3
2	Rapat (<i>Dense</i>)	1,7 - 2,3
3	Tidak rapat (<i>Sparse</i>)	0,1 - 1,7

Sumber (Source): Ratnasih (2012)

Tabel (Table) 2 Klasifikasi lereng (*Slope classification*)

Kelas (Class)	Lereng (Slope)	Klasifikasi (Classification)
I	0 - 8	Datar (<i>Flat</i>)
II	8 - 15	Landai (<i>Gentle slope</i>)
III	15 - 25	Agak curam (<i>Moderateleely steep</i>)
IV	25 - 45	Curam (<i>Steep</i>)
V	> 45	Sangat curam (<i>Very steep</i>)

Sumber (Source): Kemenhut (2013)

Tabel (Table) 3 Rumus persamaan alometrik (*Allometric equation formula*)

Jenis pohon (<i>Tree species</i>)	Persamaan alometrik (<i>Allometric equation</i>)	Sumber (Source)
<i>R. selanica</i> ($D > 5$)	$B = 0.277 (D^2G)^{1.238}$	Manuri et al., (2016)
<i>R. selanica</i> ($D < 5$)	$B = 0.13868(D^2H)^{0.672652}$	Adinugroho et al., (2023)
Jenis lainnya (<i>Other species</i>)	$B = 0.088(D^2GH)^{0.954}$	Manuri et al., (2017)

Keterangan (Remarks): B = biomassa total (kg/pohon) (*total biomass (kg/tree)*), D = diameter batang (*stem diameter*) (cm), H = tinggi total pohon (*total tree height*) (m), G = kerapatan kayu (*wood density*) (g/cm³)

Nilai biomassa per pohon kemudian dijumlahkan sehingga menjadi total biomassa (kg/ha):

$$Y_{\text{total}} = \sum (BP1 + BP2 + \dots BPn)$$

Keterangan:

Y_{total} = Biomassa total (kg/ha),

BP1 = Biomassa pohon ke-1, dan

BPn = Biomassa pohon ke-n

Nekromassa diduga dari biomassa pohon yang dikalikan tingkat keutuhan pohon mati (BSN, 2011).

$$N_i = B_i \times f$$

Keterangan:

N_i = Nekromassa (kg),

B_i = Biomassa (kg),

F = Tingkat keutuhan pohon mati, nilai f menunjukkan tingkat keutuhan pohon mati, semakin kecil nilainya, semakin lapuk. Faktor koreksi mengacu pada Hidayat et al. (2019).

Kayu mati yang tumbang di permukaan tanah dihitung menggunakan persamaan sesuai SNI 7724:2019.

$$V_{\text{km}} = 0.25\pi \left(\frac{d_p + d_u}{2 \times 100} \right)^2 \times p$$

Keterangan:

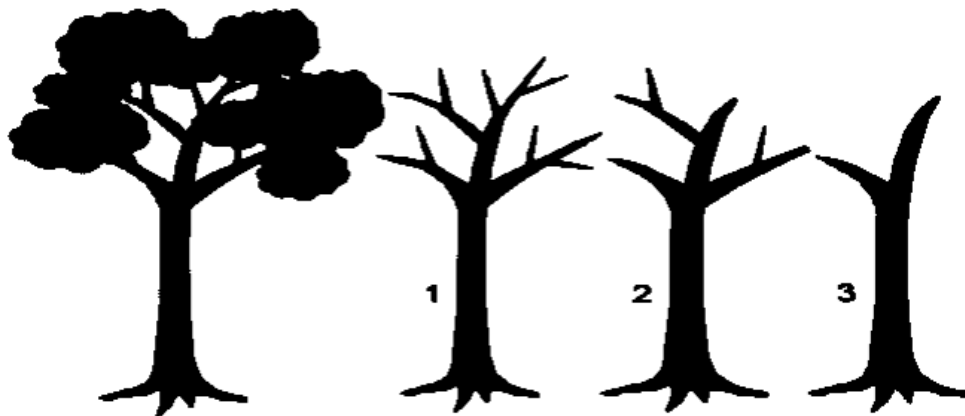
V_{km} = volume kayu mati (m^3),

d_p = diameter pangkal kayu mati (cm),

d_u = diameter ujung kayu mati (cm),

P = panjang kayu mati (m), dan

π = 22/7 atau 3,14



Sumber (Source): Hidayat et al. (2019)

Keterangan:

1 = Tingkat keutuhan pohon mati tanpa daun dengan faktor koreksi 0,9.

2 = Tingkat keutuhan pohon tanpa daun dan ranting dengan faktor koreksi 0,8.

3 = Tingkat keutuhan pohon tanpa daun, ranting, dan cabang dengan faktor koreksi 0,7

Gambar (Figure) 2. Tingkat keutuhan pohon mati (*Dead tree integrity level*)

2.3.2. Perhitungan Potensi Biomassa Tumbuhan Bawah, Semai, Serasah, Kayu Mati Kecil

Berat kering total (BKT) dihitung menggunakan rumus menurut Haygreen & Bowyer (1989) sebagai berikut:

$$BKT = \frac{BKC}{BBC} \times BBT$$

Keterangan:

BKT = Berat kering tanur/biomassa (g),

BKC = Berat kering contoh (g),

BBT = Berat basah total (g), dan

BBC = Berat basah contoh (g)

Biomassa *belowground* (akar) dihitung menggunakan rumus IPCC (2019) dengan nisbah pucuk-akar hutan hujan tropis.

BGB = Total AGB x Nisbah pucuk akar

Keterangan:

BGB = *Belowground* (g),

Total AGB = Total biomassa *aboveground*,

Nisbah pucuk akar = 0,325

2.3.3. Perhitungan Potensi Karbon

Estimasi karbon dilakukan dengan mengonversi biomassa dan nekromassa menggunakan faktor 0,47 (IPCC, 2006).

$$C = B \times C - \text{Organik}$$

Keterangan:

C = Karbon tersimpan (kg/pohon),

B = Biomassa (kg/pohon),

C-organik = 0,47 atau 47%

Hasil perhitungan karbon per pohon (kg/pohon) kemudian dikonversi ke dalam bentuk ton/ha menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{Y}{LH} \times 1000$$

Keterangan:

C = Simpanan karbon (ton/ha),

Y = Biomassa (kg),

LH = Luas lahan (ha),

1.000 = Nilai konversi kg ke ton.

2.3.4. Kondisi Tempat Tumbuh

Pengukuran parameter lingkungan pada lokasi penelitian, meliputi suhu udara, kelembapan udara, lereng, ketinggian tempat, pH tanah, dan suhu tanah. Suhu dan kelembapan udara diukur menggunakan *thermo-hygrometer*, sedangkan lereng diukur menggunakan *clinometer*. Ketinggian tempat diukur menggunakan GPS atau altimeter. Pengukuran pH tanah dilakukan menggunakan *soil pH meter*, sementara suhu tanah diukur menggunakan *soil thermometer*. Seluruh pengukuran dilakukan secara langsung di lapangan pada plot pengamatan untuk memperoleh data kondisi mikroklimat dan karakteristik lingkungan.

2.3.5. Analisis Statistik

Hasil pendugaan simpanan karbon dari berbagai sumber bibit dianalisis menggunakan uji ANOVA *oneway*. Jika nilai signifikansi < 0,05 maka terdapat pengaruh signifikan. Sebelumnya dilakukan uji normalitas untuk memastikan distribusi data. Selain itu, uji Spearman digunakan untuk melihat korelasi faktor lain terhadap simpanan karbon.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

Karakteristik lokasi penelitian dari dua sumber bibit stek dan *seed* dapat dilihat pada Tabel 4. Secara umum kedua kondisi lingkungan memiliki karakteristik tersendiri baik secara abiotik maupun biotik. Kondisi tempat tumbuh di tegakan sumber bibit stek dan *seed* tidak berbeda signifikan. Luas bidang dasar termasuk ke dalam kategori sedang dengan nilai berturut-turut 27,79 m²/ha dan 26,79 m²/ha. Hutan Penelitian Gunung Dahu memiliki ketinggian tempat bervariasi dan kondisi topografi yang beragam dengan rentang lereng antara 21-56%.

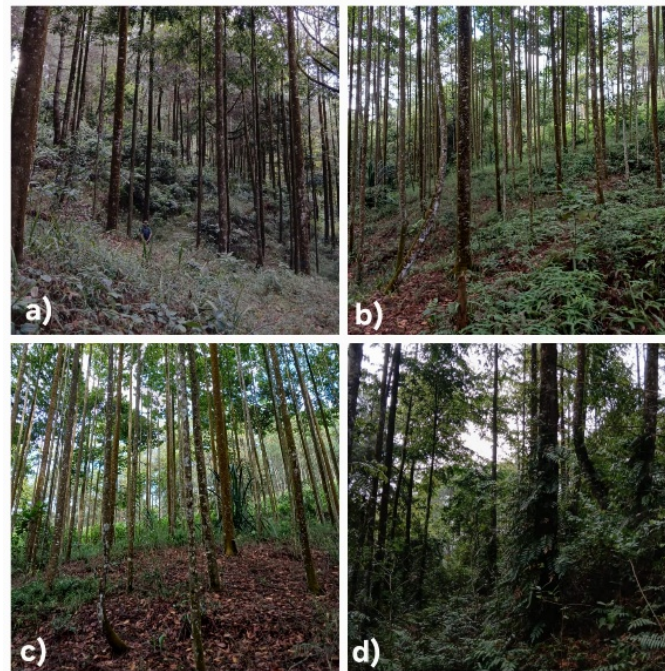
Pengambilan data dilakukan direntang waktu yang sama antara pagi sampai sore pada hari yang berbeda dengan 3 kali ulangan. Lokasi yang tegakannya dengan sumber bibit stek memiliki suhu rata-rata lebih rendah, yaitu 24,18°C dibandingkan tegakan sumber bibit *seed*, yaitu 26,18°C. Kondisi tanah di kedua lokasi cenderung lembap dan subur dikarenakan tingginya curah hujan. Keasaman tanah di kedua lokasi penelitian tersebut tergolong masam dengan pH tanah berkisar antara 6,01-

6,59. Suhu tanah di kedua lokasi relatif sama, yaitu 21,83°C. Tegakan yang asal bibit stek ditanam pada tahun 1997 dan 1998.

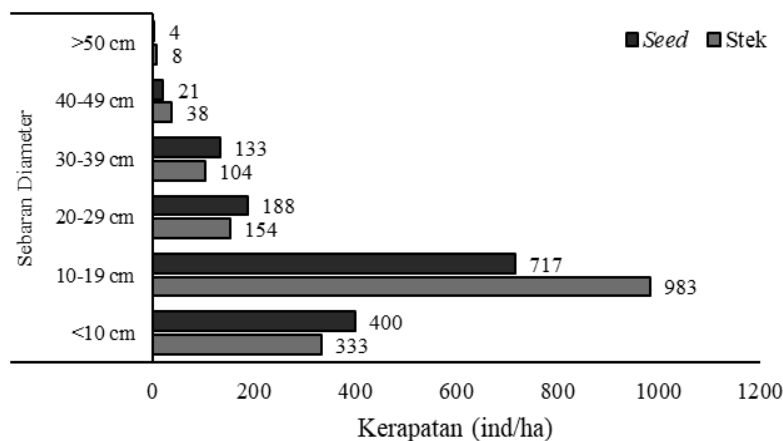
Kondisi tegakan pada petak pengamatan banyak ditumbuhi oleh jenis *R. selanica* baik pada plot dengan sumber bibit stek maupun *seed*. Selain itu terdapat jenis-jenis tegakan lain yang tumbuh seperti *Pinus merkusii*, *Hevea brasiliensis* tanaman kopi dan lainnya. Lokasi di semai dan tumbuhan bawah jenis yang ditemukan seperti: *R. selanica*, *P. merkusii*, *Cinnamomum* sp., *Schima wallichii*, *Clidemia hirta*, *Phlebodium aureum*, *H. brasiliensis*, *Dicranopteris linearis*, *Eleutherine palmifolia* dan lainnya. Keberadaan semai dan tumbuhan bawah tidak merata, terdapat petak pengamatan yang cenderung memiliki cukup banyak tumbuhan bawah dan semai, tetapi ada juga petak pengamatan yang cenderung memiliki semai dan tumbuhan bawah yang sedikit jumlahnya. Namun keberadaan tumbuhan bawah cenderung lebih banyak dibandingkan dengan keberadaan semai yang sangat sedikit di kedua petak pengamatan dengan sumber bibit yang berbeda.

Tabel (Table) 4. Kondisi tempat tumbuh petak pengamatan (*Growing site conditions of the observation plots*)

Parameter (<i>Parameter</i>)	Metoda reproduksi tanaman (<i>Plant reproductive methods</i>)	
	Stek (<i>Cutting</i>)	Biji (<i>Seed</i>)
1. Jarak tanam (<i>Planting distance</i>) (m)	2 x 2	2 x 2
2. Suhu (<i>Temperature</i>) (°C)	24,18	26,18
3. Kelempapan (<i>Humidity</i>) (%)	89,9	83,65
4. Tahun tanam (<i>Planting year</i>)	1997 dan 1998	1997
5. Lereng (<i>Slope</i>)	Curam-sangat curam (<i>Steep-very steep</i>)	Curam-sangat curam (<i>Steep-very steep</i>)
6. Ketinggian (<i>Altitude</i>) (mdpl)	755	776
7. pH tanah (<i>Soil pH</i>)	6,59	6,01
8. Suhu tanah (<i>Soil temperature</i>) (°C)	21,83	21,83
9. LBDS (<i>Base area</i>) (m ² /ha)	27,79	26,79



Gambar (Figure) 3. Kondisi tegakan *R. selanica* pada petak pengamatan (a) dan (b) plot asal bibit *seed*, dan (c) dan (d) plot asal bibit stek (*Condition of R. selanica stands in the observation plots (a) and (b) seed plots of origin, and (c) and (d) cutting plots of origin*)



Gambar (Figure) 4. Sebaran diameter berdasarkan sumber bibit pada petak pengamatan (*Diameter distribution based on seed source at the observation plots*)

Gambar 4 menunjukkan kelas diameter 10-19 cm mendominasi, diikuti 20-29 cm dan 30-39 cm, menunjukkan tegakan berada pada fase tiang menuju pohon. Diameter kecil (< 10 cm) relatif sedikit, sedangkan diameter besar

menurun. Tegakan stek dominan pada kelas 10-19 cm, sedangkan *seed* memiliki proporsi diameter besar lebih tinggi.

Tegakan *R. selanica* asal stek memiliki rata-rata diameter sebesar

22,73 ± 11,01 cm yang dapat dilihat pada Tabel 5, sedangkan untuk asal bibit *seed* sebesar 22,99 ± 9,68 cm. Pada kategori semua jenis, rata-rata diameter stek sebesar 22,71 ± 11,35 cm dan *seed* 23,93 ± 9,03 cm. Terlihat bahwa rata-rata diameter *seed* sedikit lebih besar.

Nilai biomassa dan nekromassa pada tegakan *R. selanica* menunjukkan variasi antar plot dan sumber bibit, baik pada komponen *aboveground* maupun *belowground*. Secara umum biomassa atas permukaan memiliki nilai yang jauh lebih besar dibandingkan biomassa bawah permukaan pada seluruh plot pengamatan. Pada sumber bibit *seed*,

biomassa *aboveground* sebesar 224,86 ± 24,68 ton/ha, sedangkan pada stek sebesar 259,66 ± 33,08 ton/ha. Biomassa *belowground* pada tegakan asal benih biji sebesar 76,91 ± 8,67 ton/ha dan pada tegakan asal benih stek sebesar 85,47 ± 10,89 ton/ha. Secara umum, nilai biomassa pada asal benih biji relatif stabil antar plot dan tidak menunjukkan fluktuasi setajam pada stek. Adapun distribusi biomassa dan nekromassa berdasarkan sumber bibit pada petak pengamatan didominasi oleh biomassa dengan nilai yang jauh lebih besar seperti yang terlihat pada Gambar 5.

Tabel (Table) 5. Hasil analisis statistik diameter tegakan pada petak pengamatan (*Statistical analysis results of stand diameter at the observation plots*)

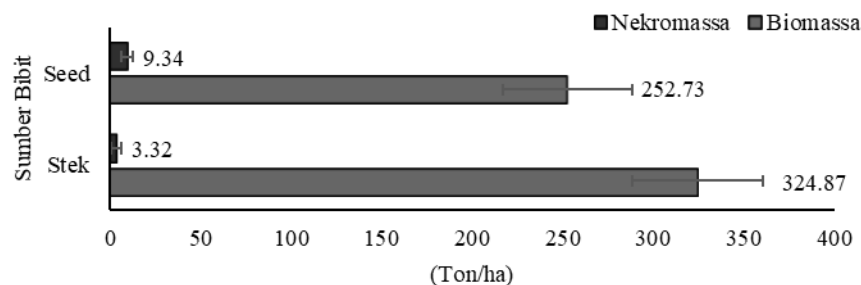
Tegakan asal bibit (<i>Stand of seed origin</i>)	N	Diameter (cm)	
		<i>Rubroshorea selanica</i>	Semua jenis (<i>All species</i>)
1. Stek (<i>Cutting</i>)	136	22,73 ± 11,01	22,71 ± 11,35
2. Biji (<i>Seed</i>)	133	22,99 ± 9,68	23,93 ± 9,03

Keterangan (Remark): *Mean* ± SD

Tabel (Table) 6. Nilai biomassa dan nekromassa (*Biomass and necromass values*)

Tegakan asal bibit (<i>Stand of seed origin</i>)	Biomassa (<i>Biomass</i>) (ton/ha)		Nekromassa (<i>Necromass</i>) (ton/ha)	Total (<i>Total</i>)
	Di atas permukaan (<i>Aboveground</i>)	Di bawah permukaan (<i>Belowground</i>)		
1. Stek (<i>Cutting</i>)	259,66 ± 33,08	85,47 ± 10,89	3,32 ± 1,47	348,45
2. Biji (<i>seed</i>)	224,86 ± 24,68	76,91 ± 8,67	11,8 ± 5,39	313,57

Keterangan (Remark): *Mean* ± SD



Gambar (Figure) 5. Distribusi biomassa dan nekromassa berdasarkan sumber bibit pada petak pengamatan (*Distribution of biomass and necromass based on seed source in the observation plots*)

Secara umum, biomassa pada seluruh blok penelitian didominasi oleh biomassa atas permukaan di kedua sumber bibit di atas 70%. Kontribusi biomassa bawah permukaan berada pada urutan kedua, sedangkan dengan kontribusi nekromassa dan serasah memberikan kontribusi yang relatif kecil dengan kontribusi di bawah 0,2%. Pola ini menunjukkan bahwa sebagian besar karbon tersimpan pada vegetasi hidup dan konsisten pada seluruh blok, baik pada sumber bibit stek maupun *seed* hal ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Sumber bibit stek simpanan karbon tingkat pohon berkisar antara 91,83 tonC/ha yang dapat dilihat pada Tabel 7. Tingkat tiang pada tegakan yang berasal dari sumber bibit stek berkisar 28,17 tonC/ha, sedangkan pancang umumnya tergolong rendah yang mana hanya bernilai 0,82 tonC/ha. Pada sumber bibit *seed*, karbon untuk tingkat pohon sebesar 68,34 tonC/ha, tingkat tiang 29,43 tonC/ha, dan pancang relatif kecil sekitar 2,09 tonC/ha.

Tabel (Table) 7. Potensi simpanan karbon pada blok *R. selanica* (Carbon storage potential at the *R. selanica* block)

Pool karbon (<i>Pool carbon</i>)	Stek (<i>Cutting</i>) ton/ha	Kontribusi (<i>contribution</i>) (%)	Biji (<i>Seed</i>) ton/ha	Kontribusi (<i>contribution</i>) %
1. Biomassa di atas permukaan (<i>Aboveground biomass</i>)	260,05 ± 33,36	74,66	225,15 ± 24,78	72,36
2. Biomassa di atas permukaan (<i>lowground biomass</i>)	85,47 ± 10,89	24,54	76,91 ± 8,67	24,72
3. Nekromas (<i>Deadwood</i>)	2,37 ± 1,45	0,68	8,78 ± 7,99	2,82
4. Serasah (<i>Litter</i>)	0,41 ± 0,28	0,11	0,31 ± 0,19	0,10
5. Karbon tanah (<i>Soil organic carbon</i>)	-	-	-	-
Total	348,3 ± 45,98		311,15 ± 41,63	

Tabel (Table) 8. Potensi simpanan karbon pada blok *R. selanica* (Carbon storage potential at the *R. selanica* block)

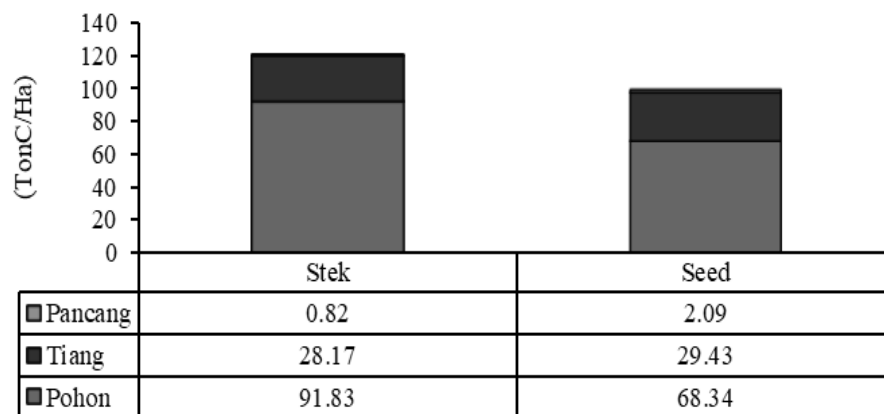
Tegakan asal bibit (<i>Stand of seeding origin</i>)	Simpanan karbon (<i>Carbon stock</i>) (tonC/ha)				
	Di atas permukaan (<i>Above ground</i>)				Di bawah permukaan (<i>Below ground</i>)
	Pohon (<i>Tree</i>)	Tiang (<i>Pole</i>)	Pancang (<i>Sapling</i>)	Tumbuhan bawah dan semai (<i>Understory vegetation and seed</i>)	
1. Stek (<i>Cutting</i>)	91,83 ± 15,00	28,17 ± 8,32	0,82 ± 0,71	1,21 ± 0,31	40,17 ± 5,12
2. Biji (<i>Seed</i>)	68,34 ± 5,27	29,43 ± 7,43	2,09 ± 1,37	0,93 ± 0,09	35,98 ± 4,16

Simpanan karbon pada tegakan *R. selanica* menunjukkan bahwa karbon terbesar tersimpan pada tingkat pohon, kemudian tiang, sedangkan pancang memberikan kontribusi paling kecil bisa dilihat pada Gambar 6.

Secara umum, asal bibit *seed* memiliki nekromassa lebih tinggi pada pohon mati, sedangkan asal bibit stek sedikit lebih tinggi pada ranting mati. Pada serasah, kedua sumber bibit menunjukkan nilai yang relatif sama, hal ini dapat dilihat pada Tabel 9.

Dominasi jenis utama (*Shorea*) sangat menentukan besarnya simpanan karbon pada kedua sumber bibit. Namun, keberadaan jenis *non-Shorea* pada

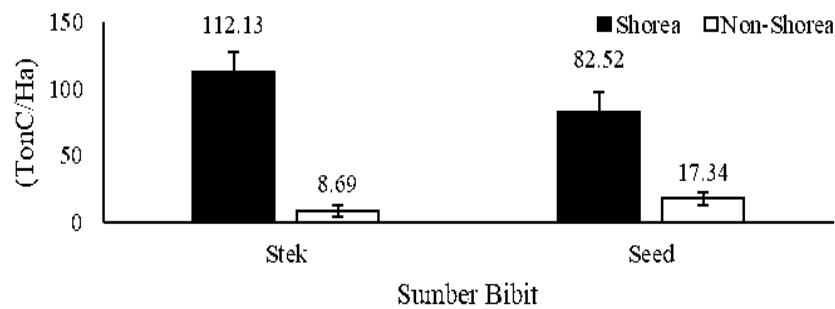
tegakan asal bibit biji memberikan tambahan kontribusi terhadap total karbon, meskipun tetap lebih kecil dibandingkan *Shorea* (Gambar 7). Jenis *Shorea* yang bibitnya stek memiliki nilai simpanan karbon sebesar 112,13 tonC/ha dan jenis *non-Shorea* sebesar 8,69 tonC/ha. Untuk sumber bibit asal biji memiliki nilai pada jenis *Shorea* 82,52 tonC/ha dan *non Shorea* sebesar 17,34 tonC/ha. Secara keseluruhan sumber bibit stek memiliki nilai simpanan karbon sebesar 120,82 tonC/ha, sedangkan nilai simpanan karbon pada sumber bibit dari biji sebesar 99,86 tonC/ha.



Gambar (Figure) 6. Distribusi simpanan karbon berdasarkan sumber bibit pertingkat pertumbuhan (*Carbon storage distribution based on seed source by growth stage*)

Tabel (Table) 9. Potensi Nekromassa pada blok *R. selanica* (*Necromass potential at the R. selanica block*)

Tegakan asal bibit (<i>Stand of seed origin</i>)	Nekromassa (<i>Necromass</i>) (tonC/ha)			
	Pohon mati (<i>Dead tree</i>)	Ranting mati (<i>Dead branch</i>)	Serasah (<i>Litter</i>)	Kayu mati (<i>Dead wood</i>)
1. Stek (<i>Cutting</i>)	1,57 ± 3,29	0,68 ± 0,36	1,07 ± 0,77	-
2. Biji (<i>Seed</i>)	10,45 ± 5,41	0,42 ± 0,05	0,92 ± 0,19	-



Gambar (Figure) 7. Simpanan karbon pada jenis *shorea* dan non-*shorea* (Carbon storage at *Shorea* and non-*Shorea* species)

Hasil analisis statistik menggunakan uji ANOVA terhadap simpanan karbon berdasarkan jenis vegetasi. Pada kelompok *Shorea*, diperoleh nilai F sebesar 0,867 dengan nilai signifikansi (*sig. 2-tailed*) sebesar 0,374, yang lebih besar dari taraf nyata 0,05 ($\alpha = 5\%$), sehingga menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada simpanan karbon dalam kelompok tersebut. Sementara itu, pada kelompok gabungan *Shorea* dan non-*Shorea*, diperoleh nilai F sebesar 0,770 dengan nilai signifikansi sebesar 0,401, yang juga lebih besar dari 0,05, sehingga menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada kelompok gabungan tersebut (Tabel 10).

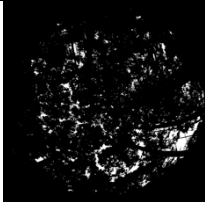
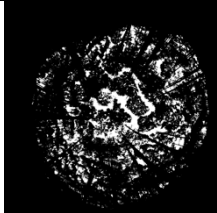
Nilai LAI pada tegakan dengan bibit dari stek memiliki nilai yang tinggi, yaitu 2,07 (sangat rapat), sedangkan pada tegakan dengan bibit dari biji memiliki nilai yang lebih kecil yaitu 1,83 (rapat).

Hasil korelasi Spearman menunjukkanutupan tajuk berhubungan positif dan signifikan dengan simpanan karbon ($r = 0,622$; *Sig. < 0,05*) (Tabel 12), sehingga semakin besarutupan tajuk, maka simpanan karbon meningkat. Sebaliknya, kemiringan lahan memiliki hubungan negatif yang sangat lemah dan tidak signifikan. Pada petak penelitian, kondisi lereng termasuk kategori curam-sangat curam. Hasil korelasi Spearman hanya dilakukan pada tegakan asal bibit biji karena memenuhi untuk diuji secara statistik. Hasil menunjukkan hubungan antara kemiringan lahan dan variabel yang diamati sangat lemah ($r = -0,098$) dan tidak signifikan (*Sig. = 0,0854*). Arah negatif mengindikasikan kecenderungan penurunan nilai pada lereng lebih curam, namun pengaruhnya kecil dan tidak bermakna.

Tabel (Table) 10. Hasil analisis statistik pada simpanan karbon (Statistical analysis results of carbon stocks)

Vegetasi (Vegetation)	F-hitung (F-value)	Sig. 2-tailed
1. <i>R. Selanica</i>	0,867	0,374
2. <i>R. Selanica</i> dan non- <i>Shorea</i>	0,770	0,401

Tabel (Table) 11 Perbandingan hasil pengukuran LAI (*Comparison of LAI measurement results*)

Parameter	Tegakan asal bibit (<i>Stand of seed origin</i>)	
	Stek (<i>Cutting</i>)	Biji (<i>Seed</i>)
1. Hasil analisis (<i>Analysis results</i>)		
2. Rata-rata nilai LAI (<i>Average LAI result</i>)	2,07	1,83
3. Klasifikasi (<i>Clasification</i>)	Sangat rapat (<i>Very dense</i>)	Rapat (<i>Dense</i>)

Tabel (Table) 12. Hasil analisis korelasi faktor lain terhadap simpanan karbon (*Statistical analysis results of carbon stocks*)

Faktor (<i>Factor</i>)	F-hitung (<i>F-value</i>)	Sig. 2-tailed
1. Kanopi (<i>Canopy</i>)	0,622	0,031
2. Kelereng (<i>Slope</i>)	-0,098	0,085

3.2. Pembahasan

Jenis tanah pada HPGD adalah latosol yang umumnya memiliki struktur remah dan gembur, drainase baik, dengan warna coklat kemerahan (Widyastuti et al., 2024). Warna tanah sering kali dikaitkan dengan sifat tanah. Misalnya, warna tanah gelap mencirikan kandungan bahan organik tinggi karena memiliki C-organik yang tinggi (Fitriani et al., 2022). KLHK (2013) menyebutkan bahwa areal penelitian memiliki curah hujan 2.500-2.700 mm/tahun dan tipe iklim B menurut klasifikasi Schmidt dan Ferguson. Berdasarkan karakteristik kondisi tapak dan iklimnya tergolong sesuai dan mendukung pertumbuhan *R. selanica*, karena masih berada dalam kisaran optimal pertumbuhan *Dipterocarpaceae* yang umumnya berkembang baik pada tanah masam dengan drainase baik dan curah hujan tinggi. Namun jarak perbedaan jarak waktu penanaman

kurang dari 6 bulan yang artinya tidak terlalu signifikan berbeda. Pada tegakan dengan metoda perbanyakan biji semua petak pengamatan ditanam di tahun yang sama, yaitu 1997. Pada lokasi penelitian di Gunung Dahu, tegakan dengan jarak tanam 2 m × 2 m menunjukkan kondisi tegakan yang relatif paling baik dibandingkan dengan variasi jarak tanam lainnya pada jenis yang sama. Oleh karena itu, jarak tanam tersebut dipilih sebagai dasar pengambilan data karena dianggap paling representatif dalam menggambarkan karakteristik pertumbuhan dan kondisi tegakan.

Kelas diameter menengah memiliki jumlah individu tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar tegakan berada pada fase pertumbuhan tiang hingga menuju pohon, yang artinya struktur tegakan sedang dalam fase berkembang. Jumlah individu pada kelas diameter kecil (< 10 cm) relatif rendah, menunjukkan bahwa

regenerasi atau individu berdiameter sangat kecil tidak mendominasi struktur tegakan saat ini. Sementara itu, jumlah pohon semakin menurun pada kelas diameter besar. Pola penurunan jumlah individu seiring bertambahnya diameter merupakan karakteristik umum tegakan hutan karena hanya sebagian pohon yang mampu bertahan dan terus tumbuh akibat adanya kompetisi ruang, cahaya, dan unsur hara. Kalima (2008) menjelaskan bahwa adanya variasi sebaran kelas diameter terbentuk oleh komposisi dan susunan pohon dalam suatu tegakan hutan yang mengalami dinamika perubahan struktur. Perubahan tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan kemampuan tiap pohon dalam memanfaatkan unsur hara makro dan mikro, energi cahaya matahari, serta air, termasuk perbedaan tingkat kompetisi antar individu dalam tegakan. Sementara itu, tegakan dari stek lebih mendominasi pada kelas 10-19 cm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa tegakan asal bibit biji memiliki proporsi pohon berdiameter lebih besar yang relatif lebih tinggi, sehingga berpotensi memberikan kontribusi biomassa dan cadangan karbon yang lebih besar dibandingkan tegakan asal bibit stek. Sribianti et al. (2022) menyatakan bahwa nilai biomassa dipengaruhi oleh besarnya diameter pohon. Hal ini dikarenakan semakin besar diameter suatu pohon, maka nilai biomasanya juga akan semakin besar.

Keberadaan semai dan tumbuhan bawah dipengaruhi oleh tutupan tajuk yang memengaruhi masuknya cahaya matahari ke dalam hutan. Menurut Widyastuti et al. (2024), tumbuhan bawah merupakan jenis vegetasi yang mampu tumbuh dan berkembang dengan optimal pada kondisi lingkungan terbuka, terutama pada areal yang tidak ternaungi dan menerima intensitas cahaya matahari yang relatif tinggi. Keberadaan

semai dengan jenis utama *R. selanica* pun memiliki jumlah yang relatif sedikit. *R. selanica* pada fase semai memerlukan naungan ringan untuk mendukung pertumbuhan awalnya, namun tidak toleran terhadap penutupan tajuk yang terlalu rapat (Panjaitan et al., 2011). Meningkatnya fase pertumbuhan, maka kebutuhan cahaya menjadi lebih tinggi sehingga pertumbuhan optimal dicapai pada kondisi dengan intensitas cahaya yang lebih besar atau adanya celah tajuk.

Baik tegakan asal bibit stek maupun biji menunjukkan pola distribusi yang sama, yaitu dominasi biomassa pada komponen *aboveground* dengan proporsi sekitar tiga kali lebih besar dibandingkan *belowground*. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar akumulasi bahan organik tersimpan pada bagian vegetatif di atas permukaan tanah. Prayitno (2016) menjelaskan bahwa adanya perbedaan nilai biomassa dapat dipengaruhi oleh kerapatan dan diameter, jenis pohon, tinggi pohon, kesuburan tanah dan berat jenis kayu. Secara keseluruhan kedua sumber bibit memiliki potensi biomassa yang relatif sebanding, dengan variasi yang lebih dipengaruhi oleh kondisi lokal tegakan dibandingkan oleh asal bibit itu sendiri. Selain biomassa, perhitungan karbon dalam hutan juga dipengaruhi oleh nekromassa (Ramadhanti et al., 2023).

Sebagian besar simpanan karbon pada tegakan masih tersimpan dalam vegetasi hidup, sedangkan kontribusi bahan organik mati relatif kecil. Pada tegakan asal bibit stek menghasilkan total biomassa lebih tinggi dibandingkan tegakan asal bibit biji, hal ini menunjukkan bahwa akumulasi bahan organik hidup pada tegakan asal bibit stek relatif lebih besar yang mencerminkan pertumbuhan diameter dan tinggi pohon yang cukup baik pada beberapa plot. Sementara itu, tegakan asal bibit biji juga menunjukkan nilai

biomassa yang besar, namun secara total masih berada di bawah tegakan asal bibit stek. Perbedaan ini menggambarkan adanya variasi produktivitas tegakan antar sumber bibit, meskipun selisihnya tidak terlalu jauh berbeda. Komponen nekromassa pada kedua sumber bibit memiliki nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan biomassa. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kematian pohon atau akumulasi kayu mati di lokasi penelitian relatif rendah. Rendahnya nekromassa dapat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan yang akan memengaruhi berat basah yang dimiliki (Suryani et al., 2024). Nilai biomassa berbanding lurus dengan nilai simpanan karbon. Biomassa memiliki hubungan dengan simpanan karbon. Jumlah cadangan karbon pada suatu tanaman, maka akan diperoleh gambaran banyaknya CO₂ yang disimpan dan diserap oleh tanaman (Bhaskara et al., 2018). Jika nilai biomassa tinggi, maka nilai cadangan karbonnya juga akan tinggi. Sebaliknya jika nilai biomassanya rendah, maka cadangan karbonnya juga akan rendah. Nilai cadangan karbon dapat dilihat dari biomassa tegakan yang ada (Heriyanto & Gunawan, 2020).

Dominasi kelas pohon ini menunjukkan bahwa struktur tegakan berada pada fase pertumbuhan menengah hingga lanjut, di mana sebagian besar biomassa terakumulasi pada strata tajuk atas. Pohon dengan diameter dan tinggi lebih besar memiliki biomassa yang jauh lebih tinggi dibandingkan fase pertumbuhan dibawahnya. Nainawa et al., (2023) menegaskan bahwa setiap wilayah memiliki simpanan karbon yang berbeda-beda. Simpanan karbon akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya usia pohon karena terjadinya perubahan terhadap dimensi

pohon, yaitu diameter dan tinggi, terutama peningkatan diameter (Köhl et al., 2017). Suryani et al. (2024) menjelaskan nilai simpanan karbon dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kerapatan individu, keanekaragaman, berat jenis tanaman, usia pohon, kualitas lingkungan dan genetik. Dalam hal ini keanekaragaman pada blok *R. selanica* dengan sumber bibit dipengaruhi oleh adanya keanekaragaman jenis sehingga nilai total simpanan karbonnya mendekati nilai pada sumber bibit stek. Apabila dibandingkan antara kedua sumber bibit secara keseluruhan, tegakan yang asal bibit dari stek cenderung menunjukkan nilai simpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan tegakan asal bibit biji, terutama pada tingkat pohon. Namun, apabila ditinjau secara keseluruhan nilai total simpanan karbon di kedua sumber bibit tidak berbeda signifikan, artinya sumber bibit bukan merupakan faktor utama dalam meningkatkan nilai simpanan karbon.

Kanopi berhubungan erat dengan produktivitas primer karena daun merupakan organ utama fotosintesis, sehingga semakin luas permukaan daun dan rapat tajuk, maka semakin besar pula potensi penyerapan CO₂. Menurut Tambaru et al. (2023), serapan hara tanaman dapat memengaruhi fotosintesis yang terlihat dari luas daun. Kondisi kanopi dapat diukur melalui *Leaf Area Index* (LAI), yang menunjukkan kemampuan tanaman dalam menyerap radiasi untuk fotosintesis, pertumbuhan hutan, dan proses ekofisiologi. Dibandingkan tegakan yang berasal bibit biji, maka tegakan asal bibit stek menunjukkan tajuk yang lebih rapat pada beberapa plot, sehingga kemampuan mengintersepsi cahaya matahari dan fotosintesis lebih optimal. Sebaliknya, tegakan yang berasal bibit biji masih didominasi kategori tidak rapat hingga

rapat, yang menunjukkan penutupan tajuk belum berkembang sepenuhnya. Putra et al. (2022) menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai LAI, maka semakin besar radiasi matahari yang dapat diintersepsi tumbuhan. Selain itu, plot dengan LAI tinggi cenderung memiliki biomassa dan simpanan karbon lebih besar, sehingga tegakan dengan asal bibit stek dengan kerapatan tajuk lebih tinggi cenderung memiliki biomassa dan simpanan karbon yang lebih besar. Namun, secara statistik sumber bibit tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap simpanan karbon.

Secara teoritis kelerengan memengaruhi pertumbuhan tegakan dan akumulasi biomassa melalui proses erosi, aliran permukaan, serta distribusi unsur hara dan kelembapan tanah. Namun, pada penelitian ini kemiringan lahan tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap simpanan karbon. Menurut Banjarnahor et al. (2018), penggerusan tanah oleh air pada daerah berlereng mengakibatkan tanah terkikis dan terangkut, sehingga produktivitas tanah menurun dan memengaruhi pertumbuhan vegetasi. Secara ekologis dapat membatasi pertumbuhan diameter dan tinggi pohon memengaruhi nilai simpanan karbon. Kemiringan lahan diketahui memengaruhi pertumbuhan vegetasi dimana vegetasi yang tumbuh pada lereng datar (8%) memiliki pertumbuhan yang lebih bagus dibandingkan pada kemiringan lahan 28% dan 35% (Khairani, 2019). Artinya semakin curam lahan, maka pertumbuhan akan terganggu sehingga nilai simpanan karbonnya juga semakin sedikit. Secara ekologis, lereng dapat memengaruhi kondisi tanah seperti kedalaman solum, erosi, dan ketersediaan air. Tetapi pada areal penelitian ini diduga terdapat faktor lain yang lebih dominan, seperti struktur

tegakan, diameter pohon, kerapatan tanaman, atau kondisi kesuburan tanah.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Tegakan *R. Selanica* dengan sumber bibit stek cenderung menunjukkan nilai simpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan tegakan yang bibitnya dari biji, terutama pada tingkat pohon. Namun, sumber bibit tidak berpengaruh nyata terhadap simpanan karbon tetapi lebih dipengaruhi oleh faktor lain seperti diameter. Nilai kerapatan tajuk di kedua sumber bibit termasuk dalam kategori sedang hingga cukup rapat, yang menunjukkan struktur tegakan yang baik. Tegakan dengan kerapatan tajuk yang lebih rapat cenderung memiliki nilai simpanan karbon yang lebih tinggi, meskipun pengaruh tersebut tidak selalu signifikan secara statistik. Dimana semakin rapat kerapatan tajuk maka semakin tinggi nilai simpanan karbonnya. Faktor kemiringan lahan tidak berpengaruh terhadap besarnya simpanan karbon.

4.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan jumlah sampel yang lebih besar serta mempertimbangkan variabel lingkungan seperti sifat tanah, kelembapan, dan intensitas cahaya guna memperoleh gambaran yang lebih baik mengenai faktor-faktor yang memengaruhi simpanan karbon. Selain itu, perlu dilakukan pengamatan jangka panjang untuk mengetahui dinamika pertumbuhan dan akumulasi biomassa secara periodik sehingga estimasi simpanan karbon dapat dilakukan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Kepala Pusat Pengembangan Hutan Berkelanjutan yang telah memberikan ijin untuk melakukan penelitian, dan kepada staf Hutan Penelitian Gunung Dahu yang telah membantu kegiatan di lapangan.

Daftar Pustaka

- Abadayan, J., & Coraacero, E. (2024). Seed Growth And Survival Of The Endangered *Pterocarpus Indicus* Willd. (Fabaceae) As Affected By Provenances And Biofertilizer Amendments. *Forestist*, 74(2), 166–174.
<https://doi.org/10.5152/forestist.2024.23010>
- Adinugroho, W.C., Krisnawati, H., Imanuddin, R., Siregar, C.A., Weston, C.J., & Volkova, L. (2023). Developing Biomass Allometric Equations For Small Trees In Mixed-Species Forests Of Tropical Rainforest Ecozone. *Trees, Forests and People*, 13(August), 100425.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100425>
- Banjarnahor, N., Hindarto, K.S., & Fahrurrozi. (2018). Hubungan Kelerengan Dengan Kadar Air Tanah, Ph Tanah, Dan Penampilan Jeruk Gerga di Kabupaten Lebong. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(1), 13–18.
<https://doi.org/10.31186/jipi.20.1.13-18>
- Bhaskara, D.R., Qurniati, R., Duryat, & Banuwa, I.S. (2018). Karbon Tersimpan Pada Repong Damar Pekon Pahmungan, Kecamatan Pesisir Tengah, Kabupaten Pesisir Barat. *Jurnal Sylva Lestari*, 6(2), 32.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Pengukuran Dan Penghitungan Cadangan Karbon: Pengukuran Lapangan Untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (Groundbased Forest Carbon Accounting)*. Badan Standardisasi Nasional.
- European Commission Joint Research Centre. (2025). *GHG Emissions Of All World Countries: 2024 report* (Number October). Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2760/173513>
- Ferdianti, W., Wasis, B., & Lisnawati, Y. (2022). Dampak revegetasi Hutan Dengan Tegakan Meranti di Hutan Penelitian Gunung Dahu (HPGD) Bogor Jawa Barat Terhadap Karakteristik Dan Kesuburan Tanah. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*, 19(1), 49–67.
- Fitriani, D.A., Mahrup, M., Yasin, I., & Bakti, L.A.A. (2022). Kecenderungan Warna Tanah Dan Status Bahan Organik Pada Lahan Pertanian Yang Mengalami Penutupan Awan Rendah Berbasis Peta Terra MODIS di Pulau Lombok. *Journal of Soil Quality*, 1(1), 1–6.
<https://jsqm.unram.ac.id/index.php/jsqm>
- Harrison, M.E., Sintes, P.B., Kusin, K., Katoppo, D.R., Marchant, N.C., Morrogh-Bernard, H.C., Nasir, D., Capilla, R., Salahudin, Suppan, L., Veen, F., & Smith, S. W. (2023). Accounting For Seedling Performance From Nursery To Outplanting When Reforesting

- Degraded Tropical Peatlands. *Restoration Ecology*, 31(8), 1–12. <https://doi.org/10.1111/rec.13984>
- Heriyanto, N.M., & Gunawan, H. (2020). Keanekaragaman Jenis Pohon Dan Potensi Serapan Karbon Taman Kehati Bumi Patra, Indramayu, Jawa Barat. *Buletin Kebun Raya*, 23(3), 210–219. <https://doi.org/10.14203/bkr.v23i3.668>
- Hidayat, M.T., Aatiani, D., & Dewantara, I. (2019). Estimasi Stok Karbon Pada Vegetasi Hutan Rawa Gambut Di Kawasan Lindung IUPHHK-HTI PT Muara Sungai Landak Kabupaten Mempawah Provinsi Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*, 7(1), 551–558.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies.
- Irma, M.F., & Gusmira, E. (2024). Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Gas Rumah Kaca di Indonesia. *JSSIT: Jurnal Sains Dan Sains Terapan*, 2(1), 26–32.
- Kalima, T. (2008). Profil Keragaman Dan Keberadaan Spesies Dari Suku Dipterocarpaceae di Taman Nasional Meru Betiri, Jember. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*, 5(2), 175–191.
- Karim, M.A., Purwiyanto, A.I.S., & Agustriani, F. (2019). Analysis Of Carbon Content (C) Production Rate Of Mangrove Litter At Pulau Payung, Banyuasin District. *Marine Science Research Journal*, 11(1), 1–8.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2013). *Peraturan Direktur Jenderal Bina Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Perhutanan Sosial Nomor 3 Tahun 2013 tentang Pedoman Identifikasi Karakteristik Daerah Aliran Sungai*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Khairani, K.I. (2019). *Pengaruh Lereng Terhadap Karakteristik Tanah, Pertumbuhan Dan Kadar Hara Daun Tanaman Jati (Tectona grandis L.f) di Sukamakmur, Kabupaten Bogor*. [Skripsi, Institut Pertanian Bogor].
- Khairunnisa, S., Pamoengkas, P., & Hartoyo, A.P.P. (2022). Diameter Growth Performance And Estimated Carbon Stock Of *Shorea* spp. at KHDTK Haurbentes, Bogor. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 12(3), 501–510. <https://doi.org/10.29244/jpsl.12.3.501-510>
- Köhl, M., Neupane, P.R., & Lotfiomran, N. (2017). The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A Retrospective Analysis Using Tree Ring Data Of Three Tropical Tree Species Grown In Natural Forests Of Suriname. *Plos One*, 12(8), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>
- Manuri, S., Brack, C., Noor'an, F., Rusolono, T., Anggraini, S. M., Dotzauer, H., & Kumara, I. (2016). Improved Allometric Equations For Tree Aboveground Biomass Estimation In Tropical Dipterocarp Forests Of Kalimantan, Indonesia.

- Forest Ecosystems*, 3(1).
<https://doi.org/10.1186/s40663-016-0087-2>
- Manuri, S., Brack, C., Rusolono, T., Noor'an, F., Verchot, L., Maulana, S.I., Adinugroho, W.C., Kurniawan, H., Sukisno, D.W., Kusuma, G.A., Budiman, A., Anggono, R.S., Siregar, C.A., Onrizal, O., Yuniati, D., & Soraya, E. (2017). Effect Of Species Grouping And Site Variables On Aboveground Biomass Models For Lowland Tropical Forests Of The Indo-Malay region. *Annals of Forest Science*, 74(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s13595-017-0618-1>
- Nainawa, R.S., Rusdiana, O., & Mindawati, N. (2023). Potensi Karbon Tanah Pada Hutan Tanaman Tegakan Campuran *Schima wallichii* dan *Acacia mangium*. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 20(2), 115–129.
<https://doi.org/10.59465/jpht.v20i2.171>
- Panjaitan, S., Wahyuningtyas, R.S., & Ambarwati, D. (2011). Pengaruh naungan terhadap proses ekofisiologis dan pertumbuhan semai *Rubroshorea selanica* (DC.) Blume di persemaian. *Jurnal Penelitian Dipterokarpa*, 5(2), 73–82.
<https://doi.org/10.20886/jped.2011.5.2.73-82>
- Pratama, R., Sribudiani, E., & Sulaeman, R. (2016). Pendugaan Kandungan Karbon Di Atas Permukaan Tanah Pada Kawasan Arboretum Universitas Riau. *Jurnal Jom Faperta*, 3(1), 1–5.
- Prayitno, J. (2016). Pola Pertumbuhan Dan Pemanenan Biomassa Dalam Fotobioreaktor Mikroalga Untuk Penangkapan Karbon. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 17(1), 45–52.
- Putra, B.U., Krisnandika, A.A., & Dharmadiatmika, I.M. (2022). Pengaruh Kombinasi Kerapatan Kanopi Pohon Terhadap Kenyamanan Termal di Lapangan Puputan Margarana, Denpasar. *Jurnal Lanskap Indonesia*, 14(1), 16–21.
- Ramadhanti, S., Wasis, B., & Hilwan, I. (2023). Pendugaan Simpanan Karbon Pada Bagian Atas Dan Bawah Permukaan Tanah di Taman Hutan Raya Banten. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 20(1), 19–36.
- [SNI] Standar Nasional Indonesia. (2019). *Pengukuran dan perhitungan cadangan karbon hutan (groundbased forest carbon accounting)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Solissa, R., Siahaya, L., & Haponno, H.S. (2023). Studi Habitat Meranti Merah (*Rubroshorea selanica* B.L.) di Desa Oki Lama Kecamatan Namrole Kabupaten Buru Selatan. *Makila*, 17(1), 68–82.
<https://doi.org/10.30598/makila.v17i1.8946>
- Sribianti, I., Sultan, Muthaminah, Daud, M., Nirwana, Abdullah, A.A., & Sardiawan, A. (2022). Estimasi Biomassa, Cadangan Karbon, Produksi O₂ Dan Nilai Jasa Lingkungan Serapan CO₂ Tegakan Hutan di Taman Hutan Raya Abdul Latief. *Jurnal Hutan Dan*

Masyarakat, 14(1), 12–26.
<https://doi.org/10.24259/jhm.v14i1.18022>

Suryani, A.A.W., Tito, S.I., & Prasetyo, H.D. (2024). Penghitungan Berat Nekromassa Dan Cadangan Karbon di Coban Putri dan Hutan Kota Malabar Malang. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Sains Unisma Malang*, 2(2), 51–60.
<https://doi.org/10.33474/jimsum.v2i2.23749>

Tambaru, E., Bachtiar, B., Ura, R., & Tuwo, M. (2023). The Effects Morpho-Anatomical Characters Leaves *Tectona*

grandis and *Gmelina arborea* as carbon dioxide absorption in Unhas Urban Forest. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(4), 1290–1296.

Widyastuti, E., Istomo, & Rachmat, H.H. (2024). Hubungan Kerapatan Tajuk Menggunakan NDVI Dengan Keanekaragaman Jenis Invasif Tumbuhan Bawah di Hutan Penelitian Gunung Dahu (HPGD). *Jurnal Silvikultur Tropika*, 15(2), 153–161.

Intensitas Pemanenan dan Karakteristik Rumpang pada Hutan Alam Bekas Tebangan (Logging Intensity and Canopy Gap Characteristics in Logged-Over Natural Forests)

Rosita Dewi^{1,2*}, Prijanto Pamoengkas¹, Darwo², dan /and Ika Heriansyah²

¹Program Studi Silvikultur Tropika, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University, Jl. Lingkar Akademik Kampus IPB Dramaga Bogor, Jawa Barat, Indonesia 16680, Telp: 0251-8626886, fax: 0251-8626886

²Pusat Riset Ekologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan Sains dan Teknologi Soekarno, Jalan Raya Jakarta-Bogor KM 46, Cibinong, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, Indonesia.

*E-mail : rositadewi@apps.ipb.ac.id; rosi015@brin.go.id

Tanggal diterima: 10 Juni 2026; Tanggal disetujui: 22 Juni 2026; Tanggal direvisi: 30 Juni 2026

Abstract

Gap formation due to timber harvesting is a critical factor influencing environmental and stand dynamics in tropical forests. This study aims to analyze the effect of gap size on microclimatic parameters and identify factors influencing gap area in a natural production forest. The study was conducted on harvested gaps, grouped into three size classes: small (≤ 0.14 ha), medium (0.15–0.24 ha), and large (0.25–0.34 ha). Observed parameters included humidity, temperature, leaf area index (LAI), diameter at breast height, branch-free height, number of trees felled, and volume of trees felled. Data were subjected to statistical analysis (analysis of variance, follow-up tests, and multiple linear regression). The results showed that gap size had no significant effect on air humidity, air temperature, LAI, DBH, and branch-free height. Conversely, the number and total volume of trees felled increased significantly as gap size increased. Regression analysis showed that the number of trees felled was the main factor influencing the gap area, with the best model being $\ln(LR) = -2.441 + 0.1723X_1$, yielding an Adjusted R^2 of 61.90%. This study indicates that the gap area is determined more by harvesting intensity than by the characteristics of the individual trees felled.

Keywords: Tropical natural forest, harvesting intensity, microclimate, and gaps.

Abstrak

Pembentukan rumpang akibat pemanenan kayu merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kondisi lingkungan dan dinamika tegakan pada hutan alam tropis. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh ukuran rumpang terhadap parameter mikroklimat serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi luas rumpang pada areal hutan produksi alam. Penelitian dilakukan pada rumpang hasil pemanenan yang dikelompokkan menjadi tiga kelas ukuran, yaitu kecil ($\leq 0,14$ ha), sedang (0,15–0,24 ha), dan besar (0,25–0,34 ha). Parameter yang diamati, meliputi kelembapan udara, temperatur udara, *leaf area index* (LAI), diameter setinggi dada, tinggi bebas cabang, jumlah pohon ditebang, dan volume pohon ditebang. Data dianalisis statistika (analisis ragam, uji lanjut, dan regresi linear berganda). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran rumpang tidak berpengaruh nyata terhadap kelembapan udara, temperatur udara, LAI, Dbh, dan tinggi bebas cabang. Sebaliknya, ukuran rumpang bertambah secara signifikan seiring dengan penambahan jumlah dan total volume pohon yang ditebang. Analisis regresi menunjukkan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan faktor utama yang memengaruhi luas rumpang dengan model terbaik $\ln(LR) = -2,441 + 0,1723X_1$ dan nilai Adjusted R^2 sebesar 61,90%. Penelitian ini menunjukkan bahwa luas rumpang lebih ditentukan oleh intensitas pemanenan dibandingkan karakteristik individu pohon yang ditebang.

Kata kunci: Hutan alam tropis, intensitas pemanenan, mikroklimat, dan rumpang

1. Pendahuluan

Hutan hujan tropis merupakan salah satu ekosistem terestrial paling kompleks di dunia yang berperan penting dalam menjaga keanekaragaman hayati, siklus karbon, siklus hidrologi, dan stabilitas iklim global. Struktur tegakan yang berlapis-lapis dan kanopi yang rapat memungkinkan terbentuknya kondisi mikroklimat yang relatif stabil sehingga mendukung keberlangsungan berbagai proses ekologis di dalam hutan (Nakamura et al., 2021). Namun, aktivitas pemanenan kayu pada hutan produksi dapat mengubah struktur tegakan dan menciptakan gangguan pada kanopi yang berdampak terhadap kondisi lingkungan bawah tajuk, regenerasi alami, serta fungsi ekosistem secara keseluruhan. Perubahan struktur kanopi akibat penebangan telah terbukti memengaruhi distribusi cahaya, suhu, kelembapan, dan dinamika vegetasi pada hutan tropis (Wahyudi, 2019). Keterbukaan rumpang akan mempengaruhi iklim suhu dan kelembapan dan aktivitas biologis tanah (Lenk et al., 2024). Kanopi berfungsi sebagai filter cahaya. Saat kanopi terbuka, intensitas cahaya di lantai hutan meningkat drastis, akibatnya species tumbuhan yang terbiasa dengan kondisi ternaungi akan terganggu, sementara spesies pionir yang toleran terhadap cahaya mendominasi. Pembukaan kanopi akan meningkatkan suhu permukaan tanah, karena adanya paparan langsung sinar matahari, kelembapan menurun akibat penguapan lebih cepat dan menciptakan kondisi kering yang tidak stabil. Hilangnya kanopi mengurangi kemampuan tanah menyerap air hujan, sehingga pola basah-kering menjadi singkat dan tidak stabil, demikian pula dengan pergerakan angin meningkat karena tidak ada lagi penghalang alami dan menyebabkan distribusi uap air tidak merata. Terkait dinamika vegetasi dan keanekaragaman hayati, fragmentasi habitat akan memutus hubungan ekologis antar organisme, populasi species endemik dan sensitif akan menurun karena

kehilangan perlindungan kanopi, dan vegetasi berubah. Dimana species pionir mendominasi sementara tumbuhan khas hutan tropis akan berkurang (Lestari, 2025).

Salah satu bentuk gangguan yang paling umum terjadi pada hutan alam tropis adalah kegiatan penebangan dalam pembentukan rumpang (*canopy gap*). Rumpang merupakan ruang terbuka pada tajuk hutan yang terbentuk akibat kematian pohon secara alami maupun aktivitas penebangan. Dalam teori *gap dynamics*, rumpang dipandang sebagai mekanisme utama yang mengendalikan regenerasi, suksesi, dan pergantian tegakan pada hutan tropis (Denslow, 1987; (Brokaw, 1985). Pembentukan rumpang meningkatkan penetrasi cahaya ke lantai hutan sehingga menciptakan kondisi lingkungan yang berbeda dari areal bertajuk tertutup. Variasi ukuran rumpang dapat menghasilkan perbedaan tingkat keterbukaan tajuk, suhu, kelembapan, serta ketersediaan sumber daya yang selanjutnya memengaruhi pertumbuhan dan komposisi regenerasi alami.

Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian mengenai dinamika rumpang menunjukkan bahwa dampak ekologis pembukaan tajuk tidak hanya ditentukan oleh keberadaan rumpang, tetapi juga oleh ukuran, konfigurasi spasial, dan intensitas gangguan yang membentuknya (Stanturf, 2004; Pamudyanti, 2016). Penelitian di hutan tropis Amazon menunjukkan bahwa aktivitas penebangan meninggalkan jejak yang jelas terhadap jumlah, ukuran, bentuk, dan distribusi spasial rumpang, yang kemudian memengaruhi proses pemulihan tegakan dan dinamika regenerasi jangka panjang (Zhang et al., 2023). Selain itu, dinamika rumpang pasca penebangan bersifat sangat dinamis dan tidak berada dalam kondisi keseimbangan karena terus dipengaruhi oleh kematian pohon, pembentukan rumpang baru, serta proses penutupan tajuk yang berlangsung secara simultan (Gorgens et al., 2023).

Perubahan struktur tajuk akibat pembentukan rumpang juga berimplikasi

terhadap kondisi mikroklimat hutan. Gangguan kanopi dapat menurunkan kemampuan hutan dalam meredam fluktuasi suhu, sehingga suhu bawah tajuk menjadi lebih sensitif terhadap kondisi atmosfer eksternal (Senior et al., 2024). Bahkan, penelitian terbaru menunjukkan bahwa kemampuan hutan tropis dalam mempertahankan mikroklimat sangat dipengaruhi oleh tingkat gangguan kanopi dan penutupan tajuk yang tersisa. Hutan dengan penutupan kanopi yang tinggi mampu mempertahankan kondisi mikroklimat yang relatif stabil, sedangkan gangguan tajuk yang lebih besar dapat meningkatkan suhu bawah tajuk secara signifikan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara ukuran rumpang dan kondisi mikroklimat menjadi penting dalam pengelolaan hutan alam produksi yang berkelanjutan.

Di sisi lain, pembentukan rumpang juga memiliki peran penting dalam mendukung regenerasi alami. Faktor biofisik seperti suhu, kelembapan, intensitas cahaya, kelerengan, dan kerapatan tajuk turut mendukung keberadaan permudaan (Dewi & Pamoengkas, 2025). Bukaan tajuk dapat menyediakan ruang tumbuh dan cahaya yang diperlukan oleh semai dan pancang, terutama bagi spesies yang membutuhkan intensitas cahaya lebih tinggi. Komposisi jenis pada petak rumpang bekas tebangan sering didominasi oleh permudaan tingkat semai dan pancang dari famili *Dipterocarpaceae* seperti jenis *Shorea parvifolia* dan *Dryobalanops lanceolata* (Dewi et al., 2025). Namun, respon regenerasi tidak selalu berbanding lurus dengan ukuran rumpang. Penelitian Chao et al. (2022) menunjukkan bahwa pembukaan tajuk berulang dapat meningkatkan peluang tumbuh spesies intoleran naungan, regenerasi pada hutan tropis tetap didominasi oleh spesies toleran naungan apabila ukuran rumpang relatif kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh rumpang terhadap regenerasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik gangguan

yang terjadi (Pamudyanti, 2016). Gangguan kecil dan sporadis akan memberikan cahaya tambahan yang terbatas, sehingga species toleran naungan tetap unggul, sementara gangguan berulang dan lebih luas akan meningkatkan intensitas cahaya dan membuka ruang bagi species pionir/intoleran naungan, dan gangguan antropogenik seperti penebangan berulang akan memperbesar peluang perubahan komposisi vegetasi, fragmentasi habitat, dan ketidakstabilan regenerasi (Fitriandhini & Putra, 2022).

Dalam konteks pengelolaan hutan produksi di Indonesia, konsep rumpang telah menjadi bagian penting dari berbagai sistem silvikultur. Peraturan Menteri Kehutanan Nomor P.11/Menhut-II/2009 menetapkan bahwa pengelolaan hutan produksi dapat menerapkan berbagai sistem silvikultur, antara lain Tebang Pilih Tanam Indonesia (TPTI), Tebang Pilih Tanam Jalur (TPTJ), Tebang Jalur Tanam Indonesia (TJTI), dan Tebang Rumpang (TR), sesuai dengan kondisi sumber daya hutan dan tujuan pengelolannya. Sistem Tebang Rumpang secara khusus menjadikan rumpang sebagai unit perlakuan silvikultur untuk menciptakan ruang tumbuh yang optimal bagi regenerasi dan meningkatkan produktivitas tegakan tidak seumur.

Meskipun demikian, informasi mengenai hubungan antara ukuran rumpang, kondisi mikroklimat, dan karakteristik pemanenan pada hutan produksi tropis di Indonesia masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih banyak menitikberatkan pada aspek regenerasi atau dampak penebangan terhadap tegakan tinggal, sementara faktor-faktor yang menentukan pembentukan rumpang dan implikasinya terhadap kondisi lingkungan pasca penebangan belum banyak dikaji secara kuantitatif. Padahal, informasi tersebut sangat penting untuk mendukung implementasi sistem silvikultur adaptif, *Reduced Impact Logging* (RIL), serta pengelolaan PBPH yang berkelanjutan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ukuran rumpang terhadap parameter mikroklimat serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi luas rumpang pada hutan produksi alam tropis. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengelolaan pemanenan yang lebih efektif dalam mengendalikan pembentukan rumpang, menjaga stabilitas mikroklimat, mendukung regenerasi alami, dan meningkatkan keberlanjutan pengelolaan hutan produksi di Indonesia.

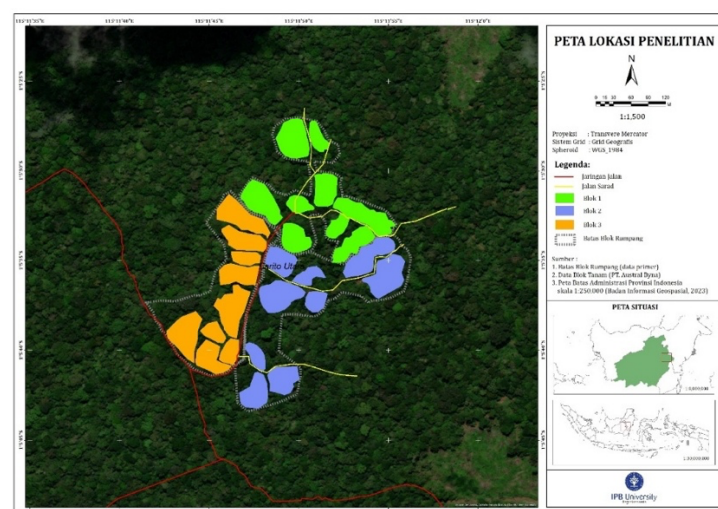
2. Metodologi

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada areal hutan produksi alam bekas tebangan yang dikelola oleh Pemegang Perizinan Berusaha Pemanfaatan Hutan (PBPH) PT Aural Byna di Kabupaten Barito Utara, Provinsi Kalimantan Tengah yang menerapkan sistem pemanenan kayu dengan prinsip tebang pilih. Pengambilan data dilakukan pada areal bekas tebangan yang memiliki variasi ukuran rumpang akibat kegiatan pemanenan. Pengamatan lapangan dilaksanakan pada bulan Juli-Desember Tahun 2023 pada kondisi yang relatif representatif terhadap kondisi iklim

setempat untuk meminimalkan pengaruh variasi cuaca terhadap pengukuran parameter mikroklimat. Lokasi penelitian berada di hutan alam bekas tebangan tahun 2022 pada Petak BA 43 dan BA 44. Lokasinya di koordinat 01°05'27"-01°05'42" Lintang Utara dan 115°11'54"-115°11'42" Bujur Timur, termasuk tipe hutan hujan tropis lahan kering, curah hujan tahunan 8.033 mm/tahun, ketinggian tempat 65-131 m dpl, dan jenis tanah Podsolik Merah Kuning.

Lokasi penelitian dipilih secara purposif dengan mempertimbangkan keberadaan rumpang alami hasil penebangan yang mewakili tiga kelas ukuran, yaitu rumpang kecil ($\leq 0,14$ ha), rumpang sedang (0,15-0,24 ha), dan rumpang besar (0,25-0,34 ha). Pengelompokan ukuran rumpang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh intensitas gangguan tajuk terhadap kondisi mikroklimat dan karakteristik tegakan yang ditebang. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *gap dynamics* yang menyatakan bahwa ukuran bukaan tajuk merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kondisi lingkungan dan proses regenerasi pada hutan tropis (Brokaw, 1985; Denslow, 1987).



Gambar (Figure) 1. Peta lokasi penelitian (Research location map)

2.2. Metode Penelitian

2.2.1. Prosedur Kerja

Penelitian diawali dengan identifikasi dan pemetaan rumpang hasil penebangan menggunakan data operasional pemanenan dan verifikasi lapangan. Setiap rumpang yang teridentifikasi kemudian dikelompokkan ke dalam kelas ukuran kecil, sedang, dan besar. Pada masing-masing rumpang dilakukan pengukuran parameter mikroklimat, karakteristik tegakan yang ditebang, serta luas rumpang. Pengukuran kelembapan udara, temperature udara, dan Leaf Area Index (LAI) dilakukan di 5 titik, yaitu di sudut arah utara, selatan, timur, barat dan tengah rumpang (Gambar 2).

Pengukuran kelembapan dan temperatur udara menggunakan thermo-hygrometer digital. Pengukuran mikroklimat tersebut dilakukan pada waktu siang antara pukul 11.00-12.00, relatif sama untuk seluruh lokasi pengamatan. Kondisi keterbukaan tajuk diukur menggunakan metode *Leaf Area Index* (LAI) menggunakan alat kamera lensa fish eye pada rumpang (Nakamura et al., 2021). Jumlah rumpang yang dibuat untuk setiap rumpang kecil, sedang dan besar masing-masing sebanyak 9 rumpang sehingga total rumpang yang dibuat sebanyak 27

rumpang. Data pemanenan diperoleh dari inventarisasi pohon yang ditebang pada masing-masing rumpang. Parameter yang dicatat, meliputi jumlah pohon yang ditebang, diameter setinggi dada (*diameter at breast height* atau Dbh), tinggi bebas cabang, dan volume pohon yang ditebang dengan rumus:

$$\text{Volume pohon} = \frac{1}{4}\pi D^2 T f k$$

Dimana: $\pi = 3,14$;

D = Diameter setinggi dada;

T = Tinggi bebas cabang, dan

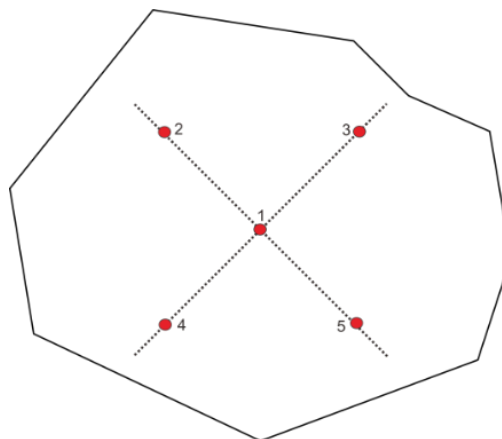
k = Faktor bentuk pohon (0,7)

Volume kayu hasil tebangan = Volume pohon x factor keamanan x factor eksploitasi

Dimana: F = Faktor keamanan (0,8);
dan

E = Faktor eksploitasi (0,7).

Luas rumpang diukur berdasarkan batas terluar bukaan tajuk yang terbentuk akibat kegiatan penebangan sesuai prinsip pengukuran rumpang yang umum digunakan dalam kajian dinamika tajuk hutan tropis (Zhang et al., 2023; Winstanley et al., 2024).



Gambar (Figure) 2. Titik pengambilan data mikroklimat dan LAI (*Microclimate and LAI data collection points*)

2.2.2. Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan rancangan observasional dengan pendekatan komparatif berdasarkan tiga kelas ukuran rumpang sebagai perlakuan, yaitu:

1. Rumpang kecil ($\leq 0,14$ ha),
2. Rumpang sedang (0,15-0,24 ha),
3. Rumpang besar (0,25-0,34 ha).

Setiap rumpang yang memenuhi kriteria dijadikan satuan pengamatan. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah ukuran rumpang, sedangkan variabel respon meliputi kelembapan udara, temperatur udara, LAI, rata-rata diameter setinggi dada pohon yang ditebang, rata-rata tinggi bebas cabang, jumlah pohon yang ditebang, dan total volume pohon yang ditebang.

Selain itu, dilakukan analisis hubungan antara luas rumpang dengan karakteristik pohon yang ditebang untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh terhadap pembentukan rumpang. Variabel prediktor yang digunakan meliputi jumlah pohon yang ditebang, diameter setinggi dada (Dbh), dan tinggi bebas cabang (Tbc). Parameter yang diamati dalam penelitian (Tabel 1).

Parameter mikroklimat digunakan untuk menggambarkan kondisi lingkungan yang terbentuk akibat variasi ukuran rumpang, sedangkan parameter pemanenan digunakan untuk menjelaskan faktor-faktor

yang mempengaruhi pembentukan luas rumpang.

2.2.3. Analisis Data

Data dianalisis menggunakan nilai rata-rata dan standar deviasi untuk menggambarkan karakteristik setiap parameter pada masing-masing kelas ukuran rumpang. Pengaruh ukuran rumpang terhadap parameter mikroklimat dan karakteristik pohon yang ditebang dianalisis menggunakan analisis ragam (*Analysis of Variance* atau ANOVA) pada taraf kepercayaan 95%. Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan nyata, maka dilakukan uji lanjut Tukey *Honest Significant Difference* (HSD) untuk membandingkan perbedaan antar perlakuan (Gomez & Gomez, 1984).

Hubungan antara luas rumpang dan karakteristik pohon yang ditebang dianalisis menggunakan regresi linear berganda dengan model umum:

$$\ln (LR) = a + bX_1 + cX_2 + dX_3$$

Dimana:

- LR = Luas rumpang (ha),
 X_1 = Jumlah pohon yang ditebang,
 X_2 = Diameter setinggi dada (cm),
 X_3 = Tinggi bebas cabang (m),
a = Intersep,
b, c, d = Koefisien regresi.

Tabel (Table) 1. Parameter yang diamati (*Observed parameters*)

Kelompok parameter (<i>Parameter group</i>)	Variabel (<i>Variable</i>)	Satuan (<i>Unit</i>)
Mikroklimat	Temperatur udara	°C
Mikroklimat	Kelempapan udara	%
Struktur tajuk	<i>Leaf Area Index</i> (LAI)	-
Karakteristik pemanenan	Diameter setinggi dada (Dbh)	cm
Karakteristik pemanenan	Tinggi bebas cabang	m
Karakteristik pemanenan	Jumlah pohon ditebang	pohon
Karakteristik pemanenan	Total volume pohon ditebang	m ³
Ukuran rumpang	Luas rumpang	ha

Pemilihan model terbaik dilakukan berdasarkan nilai koefisien determinasi terkoreksi (*Adjusted R²*), galat baku, dan signifikansi parameter model pada taraf nyata 5%. Analisis regresi digunakan untuk mengidentifikasi faktor dominan yang memengaruhi pembentukan rumpang akibat kegiatan pemanenan. Selanjutnya dilakukan analisis *Stepwise* (regresi bertahap) untuk memilih variabel independen yang paling signifikan secara otomatis dan menyaring variabel yang tidak relevan, guna menghasilkan model yang terbaik. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam studi dinamika rumpang dan gangguan tajuk pada hutan tropis (Gorgens et al., 2023 ; Zhang et al., 2023). Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik yang sesuai untuk analisis ekologi dan kehutanan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

3.1.1. Pengaruh Ukuran Rumpang terhadap Kondisi Mikroklimat dan Karakteristik Pohon yang Ditebang

Hasil uji lanjut Tukey menunjukkan bahwa ukuran rumpang tidak memberikan pengaruh yang nyata ($p > 0,05$) terhadap kelembapan udara, temperatur udara, nilai leaf area index (LAI), diameter setinggi dada (DBH), dan tinggi bebas cabang (TBC) pohon yang ditebang (Tabel 2). Kelembapan udara berkisar antara 67,69-71,77%, sedangkan temperatur udara berkisar antara 31,40-32,88°C. Nilai LAI pada seluruh kelas rumpang relatif seragam dengan kisaran 1,70–2,03.

Tabel (Table) 2. Hasil uji Tukey beda rata-rata pengaruh ukuran rumpang terhadap parameter mikroklimat, diameter setinggi dada, tinggi bebas cabang pohon yang ditebang (*Tukey test results showed the difference in the average effect of gap size on agroclimatic parameters, diameter at breast height, and height of free branches of felled trees*)

No.	Parameter	Perlakuan ukuran rumpang (<i>Gap size treatment</i>)					
		Kecil (<i>Small</i>) (≤0,14 ha)		Sedang (<i>Medium</i>) (0,15-0,24 ha)		Besar (<i>Large</i>) (0,25-0,34 ha)	
		Rata-rata/ <i>Mean</i>	SD	Rata-rata/ <i>Mean</i>	SD	Rata-rata/ <i>Mean</i>	SD
1.	Kelembapan (%)	68,15 ^a	10,70	67,69 ^a	9,53	71,77 ^a	8,38
2.	Temperatur (°C)	32,55 ^a	2,96	32,88 ^a	3,25	31,40 ^a	1,61
3.	<i>Leaf area index</i> s	1,99 ^a	0,51	1,70 ^a	0,45	2,03 ^a	0,05
4.	Rata-rata diameter setinggi dada (cm)	57,54 ^a	5,14	61,60 ^a	4,85	59,29 ^a	5,00
5.	Rata-rata tinggi bebas cabang (m)	18,04 ^a	3,20	18,72 ^a	1,89	19,43 ^a	1,28
6.	Total volume pohon ditebang (Pohon)	3,91 ^b	1,70	10,28 ^a	4,05	13,36 ^a	5,57
7.	Jumlah pohon ditebang (Pohon)	2,11 ^b	0,78	4,44 ^a	1,33	6,00 ^a	1,94

Keterangan (*Remarks*): SD = Standard deviasi. Huruf yang sama pada baris yang sama menunjukkan hasil uji Tukey yang tidak berbeda nyata pada tingkat kepercayaan 95% (*SD = Standard deviation. The same letters in the same row indicate Tukey test results that are not significantly different at the 95% confidence level*)

Diameter setinggi dada pohon yang ditebang berkisar antara 57,54-61,60 cm,

sedangkan tinggi bebas cabang berkisar antara 18,04-19,43 m. Hasil ini

menunjukkan bahwa karakteristik tegakan yang dipanen relatif homogen pada seluruh kelas ukuran rumpang. Sebaliknya, ukuran rumpang dipengaruhi secara nyata oleh total volume pohon yang ditebang dan jumlah pohon yang ditebang ($p < 0,05$). Rumpang kecil memiliki volume tebangan rata-rata sebesar $3,91 \text{ m}^3$ dan jumlah pohon ditebang sebanyak 2,11 pohon, yang secara nyata lebih rendah dibandingkan rumpang sedang dan besar. Pada rumpang sedang dan besar, volume tebangan masing-masing mencapai $10,28 \text{ m}^3$ dan $13,36 \text{ m}^3$, sedangkan jumlah pohon ditebang mencapai 4,44 dan 6,00 pohon. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah pohon yang ditebang maka semakin besar luas rumpang yang terbentuk.

3.1.2. Hubungan Luas Rumpang dengan Karakteristik Pohon yang Ditebang

Analisis regresi menunjukkan bahwa luas rumpang (LR) memiliki hubungan yang signifikan dengan jumlah pohon yang ditebang, diameter setinggi dada, dan tinggi bebas cabang (Tabel 3). Model regresi berganda yang diperoleh adalah:

$$\ln(\text{LR}) = -2,4940 + 0,1735X_1 - 0,0092X_2 + 0,0318X_3$$

Dimana: X_1 = Jumlah pohon ditebang,
 X_2 = Dbh (diameter setinggi dada), dan
 X_3 = Tbc (tinggi bebas cabang).

Model tersebut signifikan ($p < 0,001$) dengan nilai adjusted R^2 sebesar 62,26%, yang menunjukkan bahwa sekitar 62% variasi luas rumpang dapat dijelaskan oleh ketiga variabel tersebut secara simultan. Namun demikian, berdasarkan nilai signifikansi masing-masing parameter, hanya jumlah pohon yang ditebang yang berpengaruh nyata terhadap luas rumpang ($p < 0,001$), sedangkan Dbh ($p = 0,427$) dan Tbc ($p = 0,217$) tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan (Tabel 3). Selanjutnya dilakukan analisis **regresi Stepwise** untuk memilih variabel independen (prediktor) terbaik ke dalam model. Dengan demikian, model yang lebih sederhana diperoleh sebagai berikut:

$$\ln(\text{LR}) = -2,441 + 0,1723X_1$$

Tabel (Table) 3. Hubungan luas rumpang alami dengan jumlah pohon ditebang, Dbh dan Tbc (*The relationship between the area of natural gaps and the number of trees felled, Dbh and Tbc*)

No.	Persamaan	a	b	c	d	P-value	s	$R^2(\text{adj})$
1.	$\ln(\text{LR}) = a + bX_1 + cX_2 + dX_3$	-2,4940	0,1735	-0,0092	0,0318	0,000	0,2833	62,26%
			p-value = 0,000	p-value = 0,427	p-value = 0,217			
2.	$\ln(\text{LR}) = a + bX_1$	-2,441	0,1723	-	-	0,000	0,2847	61,90%

Keterangan (Remarks): LR = Luas rumpang (*Gap area*), X_1 = jumlah pohon ditebang (*number of trees felled*), X_2 = diameter setinggi dada (*diameter at breast height*), X_3 = tinggi bebas cabang (*branch-free height*), a = konstanta (*constant*), b, c, d = koefisien regresi (*regression coefficient*), s = simpangan baku (*standard deviation*), $R^2(\text{adj})$ = koefisien determinasi disesuaikan (*adjusted coefficient of determination*)

Model tersebut tetap signifikan ($p < 0,001$) dengan adjusted R^2 sebesar 61,90%, hampir sama dengan model regresi berganda. Hasil ini menunjukkan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan faktor utama yang menentukan luas rumpang yang terbentuk.

3.2. Pembahasan

Pembentukan rumpang merupakan proses ekologis yang berperan penting dalam dinamika hutan tropis karena mengatur regenerasi, suksesi, struktur tegakan, dan distribusi spesies. Teori *gap dynamics* menjelaskan bahwa bukaan tajuk akibat kematian pohon atau gangguan lainnya menciptakan heterogenitas lingkungan yang menjadi pendorong utama regenerasi alami dan pergantian tegakan (Brokaw, 1985; Denslow, 1987). Sebagian besar dinamika hutan hujan tropis berlangsung melalui pembentukan rumpang berukuran kecil hingga sedang yang memungkinkan masuknya cahaya ke lantai hutan tanpa mengubah kondisi ekosistem secara drastis. Konsep ini menjadi landasan ekologis berbagai sistem silvikultur pada hutan alam tropis, termasuk Tebang Pilih Tanam Indonesia (TPTI), Tebang Pilih Tanam Jalur (TPTJ), Silvikultur Intensif (SILIN), dan Tebang Rumpang (TR).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran rumpang dari 0,1 sampai 3,4 ha tidak memberikan pengaruh nyata terhadap kelembapan udara, temperatur udara, maupun nilai *leaf area index* (LAI). Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi ukuran rumpang yang terbentuk sampai 0,34 ha belum cukup besar untuk menghasilkan perubahan mikroklimat yang signifikan. Dalam perspektif *gap dynamics*, kondisi tersebut menunjukkan bahwa fungsi penyangga mikroklimat oleh tegakan di sekitar rumpang masih berjalan efektif

sehingga suhu dan kelembapan relatif stabil. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Chao et al., 2023) yang menunjukkan bahwa pembukaan tajuk berulang tidak selalu mengubah kondisi lingkungan secara ekstrem maupun menggeser dominasi regenerasi ke arah spesies intoleran naungan. Bahkan pada hutan yang sering mengalami gangguan, spesies toleran naungan tetap mendominasi regenerasi karena ukuran rumpang yang terbentuk belum cukup besar untuk menciptakan kondisi lingkungan yang sangat berbeda.

Tidak adanya perbedaan nyata pada temperatur, kelembapan, dan LAI juga menunjukkan bahwa perubahan mikroklimat lebih dipengaruhi oleh konfigurasi struktur tajuk dibandingkan luas bukaan tajuk semata. Nakamura et al. (2021) menegaskan bahwa kanopi hutan merupakan komponen utama yang mengendalikan distribusi cahaya, suhu, kelembapan, serta berbagai proses ekologis lainnya di hutan tropis. Meskipun demikian, perubahan struktur tajuk akibat penebangan tetap berpotensi menurunkan kapasitas *thermal buffering* hutan. Senior et al. (2024) melaporkan bahwa gangguan tajuk akibat penebangan selektif menyebabkan suhu bawah tajuk menjadi lebih sensitif terhadap kondisi atmosfer eksternal. Namun, besarnya perubahan tersebut sangat dipengaruhi oleh intensitas gangguan dan kecepatan pemulihan tajuk setelah pemanenan.

Keseragaman nilai LAI antar kelas rumpang mengindikasikan bahwa proses pemulihan tajuk (*canopy recovery*) kemungkinan telah berlangsung secara aktif. Winstanley et al. (2024) menunjukkan bahwa sekitar 90% luas rumpang hasil penebangan selektif di Amazon dapat tertutup kembali dalam waktu enam tahun melalui kombinasi pertumbuhan lateral tajuk pohon tepi dan pertumbuhan vertikal vegetasi

regenerasi. Campoe et al. (2022) juga melaporkan bahwa pemulihan struktur tajuk merupakan salah satu proses yang berlangsung paling cepat setelah pemanenan dibandingkan pemulihan biomassa atau komposisi tegakan. Dengan demikian, tidak adanya perbedaan nyata pada parameter mikroklimat dalam penelitian ini kemungkinan mencerminkan berlangsungnya proses penutupan tajuk yang relatif efektif sehingga kondisi mikroklimat antar rumpang menjadi semakin homogen.

Meskipun tidak ditemukan perbedaan nyata pada parameter mikroklimat, hasil penelitian menunjukkan bahwa total volume pohon yang ditebang dan jumlah pohon yang ditebang meningkat secara signifikan seiring bertambahnya ukuran rumpang. Sebaliknya, diameter setinggi dada (Dbh) dan tinggi bebas cabang pohon yang ditebang tidak berbeda nyata antar kelas rumpang. Analisis regresi menunjukkan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan satu-satunya faktor yang berpengaruh signifikan terhadap luas rumpang. Temuan ini menunjukkan bahwa luas rumpang lebih ditentukan oleh intensitas pemanenan dibandingkan ukuran individu pohon yang ditebang. Setiap tambahan pohon yang ditebang tidak hanya menghilangkan tajuk pohon tersebut, tetapi juga meningkatkan kemungkinan kerusakan tegakan di sekitarnya akibat rebah pohon, patahan cabang, dan aktivitas penyaradan sehingga memperluas bukaan tajuk yang terbentuk.

Temuan tersebut konsisten dengan penelitian Zhang et al. (2023) yang menunjukkan bahwa aktivitas penebangan meninggalkan jejak yang jelas terhadap jumlah, ukuran, bentuk, dan konfigurasi spasial rumpang pada hutan tropis. Semakin tinggi intensitas penebangan, semakin besar ukuran dan

kompleksitas rumpang yang terbentuk. Demikian pula, Gorgens et al. (2023) menunjukkan bahwa dinamika rumpang pasca penebangan tidak berada dalam kondisi keseimbangan (*steady state*), melainkan terus berubah akibat interaksi antara pembentukan rumpang baru, kematian pohon, dan proses penutupan tajuk. Oleh karena itu, luas rumpang yang diamati pada suatu waktu mencerminkan akumulasi berbagai proses gangguan dan pemulihan yang berlangsung secara simultan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi ukuran rumpang yang diamati belum cukup untuk mengubah mikroklimat secara signifikan, sehingga kondisi lingkungan diduga masih relatif sesuai bagi regenerasi spesies khas hutan hujan tropis.

Dari perspektif silvikultur, hasil penelitian ini sangat relevan dengan penerapan sistem TPTI, TPTJ, SILIN, dan Tebang Rumpang sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Kehutanan Nomor P.11/Menhut-II/2009. Pada sistem TPTI, pembentukan rumpang terjadi secara tersebar mengikuti distribusi pohon yang memenuhi kriteria tebang sehingga menghasilkan bukaan tajuk yang relatif kecil dan menyerupai gangguan alami. Sebaliknya, sistem TPTJ dan SILIN memanfaatkan bukaan tajuk yang lebih besar untuk meningkatkan intensitas cahaya bagi pertumbuhan jenis target, khususnya Dipterocarpaceae. Dalam sistem Tebang Rumpang, rumpang secara eksplisit dijadikan unit pengelolaan untuk menciptakan ruang tumbuh yang optimal bagi regenerasi dan pertumbuhan tegakan tidak seumur.

Hasil penelitian ini juga mendukung prinsip dasar SILIN dan Tebang Rumpang yang menempatkan ukuran rumpang sebagai instrumen penting dalam pengaturan lingkungan tumbuh. Martins et al. (2021)

menunjukkan bahwa ukuran rumpang menentukan arah perkembangan tegakan pasca gangguan. Rumpang yang terlalu kecil cenderung mempertahankan dominasi spesies toleran naungan, sedangkan rumpang yang lebih besar meningkatkan peluang pertumbuhan spesies pionir dan intoleran naungan. Oleh karena itu, pengaturan intensitas penebangan menjadi faktor kunci dalam mengendalikan ukuran rumpang dan keberhasilan penerapan sistem silvikultur tersebut.

Hasil penelitian ini juga memiliki implikasi penting terhadap penerapan *Reduced Impact Logging* (RIL). Prinsip utama RIL adalah meminimalkan kerusakan tegakan tinggal dan mengurangi pembentukan rumpang yang tidak diperlukan melalui pengaturan arah rebah pohon, perencanaan jalur sarad, dan pengendalian intensitas pemanenan. Temuan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan faktor utama yang menentukan luas rumpang menunjukkan bahwa pengendalian intensitas pemanenan merupakan instrumen paling efektif untuk mengurangi dampak ekologis kegiatan penebangan. Martins et al. (2021) menunjukkan bahwa pengelolaan intensitas tebang yang baik dapat mempercepat pemulihan biomassa dan fungsi ekosistem pasca pemanenan dibandingkan praktik penebangan konvensional.

Ukuran rumpang mempengaruhi fungsi ekosistem seperti siklus karbon, air, dan hara. Martins et al. (2021) menunjukkan bahwa pemulihan stok karbon berlangsung lebih lambat dibandingkan pemulihan tajuk, sedangkan Montero & Ellis (2023) melaporkan bahwa regenerasi pohon memainkan peran penting dalam pemulihan cadangan karbon pada dekade pertama setelah penebangan. Schwartz et al. (2021) juga menunjukkan

bahwa pemulihan struktur dan fungsi hutan tropis dapat berlangsung selama puluhan tahun tergantung pada intensitas gangguan yang terjadi. Oleh karena itu, pengendalian jumlah pohon yang ditebang tidak hanya penting untuk mengatur luas rumpang tetapi juga berkontribusi terhadap pemeliharaan cadangan karbon dan keberlanjutan pengelolaan PBPH.

Di sisi lain, pembentukan rumpang turut mempengaruhi fungsi hidrologi hutan. Pang et al. (2024) menemukan bahwa penebangan selektif pada hutan hujan Kalimantan meningkatkan kandungan air tanah akibat berkurangnya transpirasi tegakan. Perubahan tersebut dapat mempengaruhi dekomposisi bahan organik, siklus hara, dan pertumbuhan regenerasi pada fase awal pasca pemanenan. Dengan demikian, pengelolaan ukuran rumpang yang tepat tidak hanya penting untuk menjaga regenerasi dan produktivitas tegakan, tetapi juga untuk mempertahankan fungsi ekosistem yang lebih luas.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan faktor utama yang mengendalikan luas rumpang, sedangkan perbedaan ukuran rumpang yang diamati belum menyebabkan perubahan mikroklimat yang signifikan. Hasil ini memperkuat konsep bahwa intensitas pemanenan merupakan pengendali utama dinamika rumpang pada hutan alam tropis. Dalam konteks pengelolaan PBPH di Indonesia, hasil penelitian mendukung penerapan sistem silvikultur adaptif yang mengintegrasikan prinsip *gap dynamics*, SILIN, Tebang Rumpang, dan *Reduced Impact Logging* untuk mencapai keseimbangan antara produktivitas kayu, keberhasilan regenerasi alami, konservasi keanekaragaman hayati,

pemulihan karbon, serta keberlanjutan fungsi ekosistem hutan.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran rumpang hasil pemanenan tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap kelembapan udara, temperatur udara, dan *leaf area index* (LAI). Kondisi ini mengindikasikan bahwa fungsi penyangga mikroklimat oleh tegakan di sekitar rumpang masih mampu mempertahankan stabilitas lingkungan meskipun terjadi variasi ukuran bukaan tajuk. Selain itu, diameter setinggi dada (Dbh) dan tinggi bebas cabang pohon yang ditebang tidak berbeda sampai pada ukuran rumpang 0,34 ha. Sebaliknya, jumlah pohon yang ditebang dan total volume pohon yang ditebang berkorelasi positif secara signifikan dengan ukuran rumpang yang terbentuk. Analisis regresi menunjukkan bahwa jumlah pohon yang ditebang merupakan faktor utama yang memengaruhi luas rumpang, sedangkan Dbh dan tinggi bebas cabang tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa luas rumpang lebih ditentukan oleh intensitas pemanenan dibandingkan karakteristik individu pohon yang dipanen. Secara ekologis, hasil penelitian mendukung konsep *gap dynamics* yang menyatakan bahwa gangguan tajuk pada tingkat rendah hingga sedang masih mampu mempertahankan kondisi mikroklimat yang mendukung regenerasi alami. Dalam konteks pengelolaan hutan produksi, pengendalian jumlah pohon yang ditebang menjadi instrumen penting untuk mengatur pembentukan rumpang, menjaga stabilitas ekosistem, dan mendukung penerapan sistem silvikultur berkelanjutan.

4.2. Saran

Pengelolaan pemanenan pada areal PBPH perlu mengendalikan jumlah pohon yang ditebang dan menerapkan prinsip *Reduced Impact Logging* (RIL) secara konsisten untuk mengatur pembentukan rumpang, meminimalkan kerusakan tegakan tinggal, serta menjaga stabilitas mikroklimat dan fungsi ekosistem hutan. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran rumpang terhadap regenerasi alami, keanekaragaman hayati, dinamika karbon, dan pemulihan tegakan pasca pemanenan melalui pemantauan jangka panjang yang didukung teknologi penginderaan jauh seperti UAV atau LiDAR.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pimpinan PT Austral Byna yang arealnya diizinkan untuk penelitian. Ucapan terima kasih kepada *Manager Camp Sikui* yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian di lapangan.

Daftar Pustaka

- Brokaw, N. V. . (1985). Gap-phase regeneration in a tropical forest. *Ecology*, 66(3), 682–687.
- Campoe, O. C., Stape, J. L., Mendes, J. C. T., & Ryan, M. G. (2022). Forest canopy recovery and stand dynamics after selective logging in tropical production forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(8), 1132–1145.
- Chao, W. C., Lin, K. C., Song, G. Z. M., Hsieh, C. F., & Chen, Y. Y. (2023). Multiple Canopy Opening Effects On Recruited Saplings In A Typhoon-Disturbed Tropical Rainforest. *Biotropica*, 55(2), 396–407.
- Denslow, J. S. (1987). Tropical Rainforest Gaps And Tree Species Diversity. *Annual Review of Ecology and*

- Systematics*, 18, 431–451.
- Dewi, R., & Pamoengkas, P. (2025). Sebaran Dan Potensi Regenerasi Alami Jenis *Schima wallichii* (DC.) Korth. di Hutan Pendidikan Gunung Walat. *JPHT*, 22(2), 91–106.
- Dewi, R., Pamoengkas, P., Darwo, & Heriansyah, I. (2025). Komposisi Jenis Dan Potensi Tegakan Pada Rumpang Pasca Tebangan di Kalimantan Tengah. *JPHT*, 22(1), 28–46.
- Fitriandhini, D., & Putra, A. (2022). Dampak Kerusakan Ekosistem Hutan Oleh Aktivitas Manusia: Tinjauan Terhadap Keseimbangan Lingkungan Dan Keanekaragaman Hayati. *Jurnal Kependudukan Dan Pembangunan Lingkungan*, 03(03), 217–226.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical Procedures For Agricultural Research* (2nd Editio). John Wiley & Sons.
- Gorgens, E. B., Keller, M., Jackson, T., Marra, D. M., Reis, C. R., Almeida, D.R.A. Coomes, D. A., & Ometto, J. P. H. B. (2023). Out Of Steady State: Tracking Canopy Gap Dynamics Across Brazilian Amazon. *Biotropica*, 55(4), 1032–1046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/btp.13226>
- Lenk, A., Richter, R., Kretz, L., & Wirth, C. (2024). Effects Of Canopy Gaps On Microclimate, Soil Biological Activity And Their Relationship In a European Mixed Floodplain Forest. *Science of the Total Environment*, 941(May), 173572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173572>
- Lestari. (2025). Dampak Penebangan Hutan Terhadap Dinamika Keanekaragaman Hayati: Studi Pada Ekosistem Hutan Tropis. *Jurnal Multisiplin Indonesia*, 1(2), 44–48.
- Martins, S. V., Rodrigues, R. R., Gandolfi, S., & Calegari, L. (2021). Gap Size Influences Forest Restoration Trajectories In Tropical Forests. *Trees*, 35(6), 1753–1766.
- Montero, S. A., & Ellis, E. A. (2023). Carbon Stock Recovery From Tree Regeneration Following Selective Logging In Tropical Forests Of The Yucatán Peninsula. *Carbon Management*, 14(1), 2238672.
- Nakamura, A., Kitching, R. L., Cao, M., Creedy, T. J., Fayle, T. M., Freiberg, M., Hewitt, C. N., Itioka, T., Koh, L. P., Ma, K., Malhi, Y., Mitchell, A., Novotny, V., Ozanne, C. M. P., Song, L., Wang, H., & Ashton, L. A. (2021). Forests And Their Canopies: Achievements And Horizons In Canopy Science. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(11), 1015–1028.
- Pamudyanti, A. . (2016). *Pemodelan spasial sebaran gangguan ekosistem di hutan pendidikan Wanagama I*. Universitas Gadjah Mada.
- Pang, J., Kho, L. K., Riutta, T., Saner, P., Nilus, R., & Reynolds, G. (2024). Soil Wetting Triggered By Selective Logging In Bornean Lowland Tropical Rainforests. *Forest Ecology and Management*, 569, 122181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco>
- Schwartz, N. ., Uriarte, M., DeFries, R., Gutierrez-Velez, V., & Pinedo-Vasquez, M. Baethgen, W. (2021). Long-Term Forest Recovery Following Selective Logging In Tropical Forests. *Forest Ecology and Management*, 496, 119404.
- Senior, R. A., Hill, J. K., González del Pliego, P. Goode, L. K., & Edwards, D. P. (2024). Structural Changes Caused By Selective Logging Undermine The Thermal Buffering Capacity Of Tropical Forests. *J.Agrformet*, 348, 109912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/.2024.109912>
- Stanturf, J. A. (2004). Disturbance Dynamics Of Forested Ecosystem. *Proceedings of the International Conference Tartu, Estonia*.

- Wahyudi. (2019). Tingkat Pembukaan Kanopi Akibat Pemanenan Pada Sistem Silvikultur Tebang Pilih Tanam Indonesia. *Jurnal Hutan Tropika*, *XIV*(1), 10–17.
- Winstanley, P., Dalagnol, R., Mendiratta, S., Braga, D., Galvão, L. S., & Bispo, P. C. (2024). Post-Logging Canopy Gap Dynamics And Forest Regeneration Assessed Using Airborne Lidar Time Series In The Brazilian Amazon With Attribution To Gap Types And Origins. *Remote Sensing*, *16*(13), 2319.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs16132319>
- Zhang, B., Fischer, F. J., Coomes, D. A., & Jucker, T. (2023). Logging Leaves A Fingerprint On The Number, Size, Spatial Configuration And Geometry Of Tropical Forest Canopy Gaps. *Biotropica*, *55*(2), <https://doi.org/10.1111/btp.13190>.

