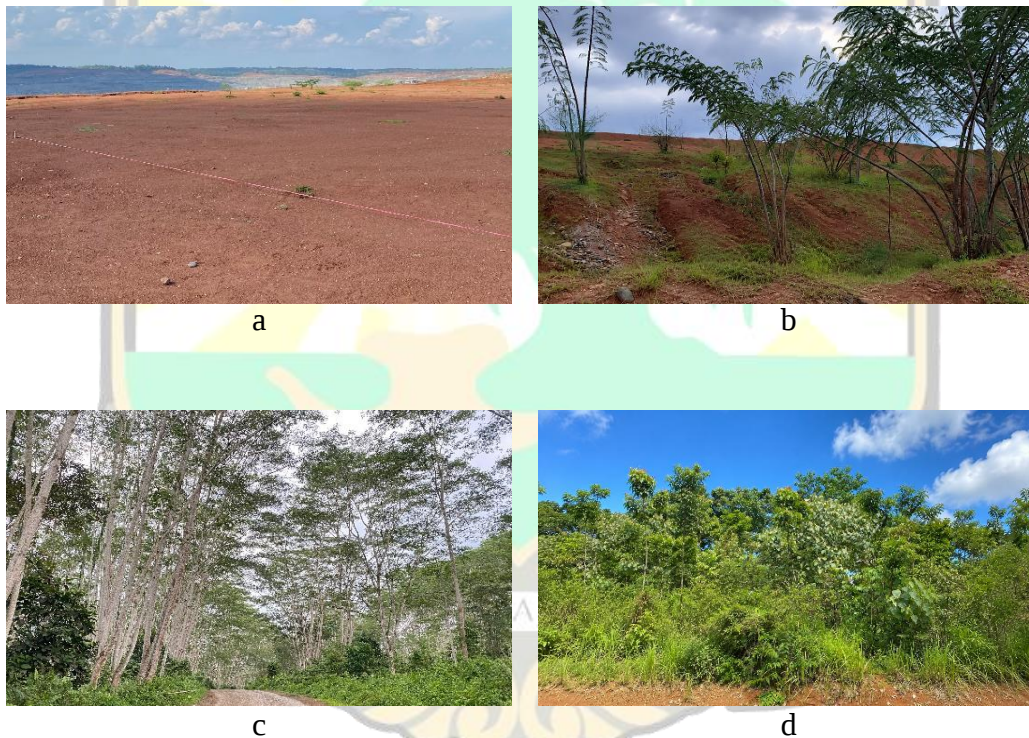


BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area pascatambang batubara PT Kuansing Inti Makmur yang berlokasi di Desa Tanjung Belit, Kecamatan Jujuhan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. Lokasi penelitian terdiri atas empat tipe penggunaan lahan, yaitu lahan sedang ditambang, lahan revegetasi umur 4 tahun, lahan revegetasi umur 12 tahun dan lahan hutan sekunder. Seluruh lokasi penelitian berada pada jenis tanah yang sama yaitu tanah Oxisol. Kondisi lingkungan penelitian pada setiap jenis lahan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel tanah pada beberapa jenis lahan, a. sedang ditambang, b. revegetasi 4 tahun, c. revegetasi 12 tahun, d. hutan sekunder

Tanah Oxisol merupakan jenis tanah yang terbentuk melalui proses pelapukan intensif dan umumnya dijumpai pada wilayah beriklim tropis basah. Tingkat kesuburan tanah Oxisol umumnya relatif rendah akibat tingginya pencucian unsur hara sehingga keberadaan bahan organik menjadi faktor penting dalam mempertahankan kualitas tanah dan aktivitas biologi di dalamnya. Hal ini

didukung oleh temuan Anda dan Kurnia (2010) yang melaporkan bahwa rehabilitasi Oxisol melalui penambahan bahan organik mampu meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Karena seluruh lokasi penelitian memiliki jenis tanah yang sama, perbedaan kondisi habitat dan komunitas makrofauna tanah diduga lebih dipengaruhi oleh variasi vegetasi, penutupan tajuk, dan akumulasi serasah pada setiap tipe lahan.

Lahan sedang ditambang pada penelitian ini merupakan bagian dari kawasan operasi penambangan aktif. Titik pengambilan sampel berada pada area yang telah selesai ditambang dan ditimbun kembali menggunakan topsoil, namun belum direvegetasi. Lahan ini menunjukkan kondisi lingkungan yang paling terdegradasi dibandingkan tipe lahan lainnya. Permukaan tanah yang masih terbuka dengan tutupan vegetasi yang sangat terbatas menyebabkan intensitas cahaya matahari tinggi, akumulasi serasah rendah, serta lingkungan lebih rentan terhadap peningkatan suhu dan kehilangan air melalui evaporasi. Kondisi tersebut mengurangi pembentukan mikrohabitat yang sesuai bagi organisme tanah sehingga diperkirakan kurang mendukung perkembangan komunitas makrofauna. Keterbatasan tutupan vegetasi juga mengurangi pembentukan mikrohabitat yang mampu mendukung keberadaan organisme tanah, sehingga kondisi lahan ini diperkirakan kurang sesuai bagi perkembangan komunitas makrofauna tanah. Pernyataan tersebut didukung Sheoran *et al.* (2010) yang melaporkan bahwa lahan pascatambang yang belum direvegetasi umumnya masih mengalami degradasi kualitas tanah sehingga kurang mendukung perkembangan komunitas organisme tanah.

Berbeda dengan lahan sedang ditambang, lahan revegetasi umur 4 tahun menunjukkan bahwa proses pemulihan mulai berlangsung melalui penanaman sengon (*Falcataria moluccana*). Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, tanaman sengon pada lokasi penelitian masih memiliki tinggi sekitar ± 2 m sehingga penutupan tajuk belum terbentuk secara optimal. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian permukaan tanah masih terbuka, meskipun di sekitar tegakan telah mulai ditumbuhi vegetasi bawah berupa rerumputan. Kehadiran vegetasi bawah menunjukkan bahwa proses kolonisasi tumbuhan telah berlangsung, namun akumulasi serasah yang dihasilkan masih relatif sedikit sehingga kemampuan

vegetasi dalam memperbaiki kondisi mikroklimat dan kualitas habitat tanah belum optimal. Dengan demikian, lahan revegetasi umur 4 tahun masih merepresentasikan fase transisi pemulihan ekosistem yang berada di antara lahan sedang ditambang dan lahan revegetasi umur 12 tahun. Kondisi ini diduga memengaruhi suhu, kelembapan, serta kandungan bahan organik yang berkontribusi terhadap terbentuknya komposisi komunitas dan keanekaragaman makrofauna tanah. Sejalan dengan itu, Maiti (2013) menyatakan bahwa pada tahap awal revegetasi, fungsi ekologis lahan belum pulih sepenuhnya karena perkembangan vegetasi, pembentukan tajuk, dan akumulasi bahan organik masih berlangsung secara bertahap.

Lahan revegetasi umur 12 tahun menunjukkan tingkat pemulihan yang lebih lanjut dibandingkan lahan revegetasi umur 4 tahun. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, tanaman sengon (*Falcataria moluccana*) telah berkembang dengan baik, ditandai oleh ukuran pohon yang lebih besar serta tajuk yang saling bertumpang tindih sehingga mampu menutupi sebagian besar permukaan lahan. Berbeda dengan lahan revegetasi umur 4 tahun yang masih didominasi vegetasi bawah berupa rerumputan, pada lahan revegetasi umur 12 tahun vegetasi bawah telah berkembang menjadi tegakan pohon-pohon kecil disertai berbagai jenis gulma. Kondisi tersebut diikuti oleh akumulasi serasah yang lebih banyak akibat guguran daun dan bagian tanaman lainnya. Produksi serasah yang tinggi pada tegakan sengon berperan sebagai sumber utama bahan organik tanah. Junaidi *et al.* (2026) melaporkan bahwa tegakan sengon (*Falcataria moluccana*) mampu menghasilkan serasah hingga sekitar 7,5 ton ha⁻¹ tahun⁻¹. Produksi serasah tersebut dipengaruhi oleh kondisi lokasi, terutama elevasi dan jarak tanam. Melimpahnya serasah yang dihasilkan tegakan sengon, disertai penutupan tajuk yang lebih rapat, diduga menciptakan kondisi tanah yang lebih baik melalui peningkatan kandungan bahan organik serta terbentuknya mikroklimat yang lebih stabil sehingga mampu mendukung kehidupan makrofauna tanah. Kondisi tersebut menyediakan sumber pakan dan habitat yang lebih sesuai bagi makrofauna tanah. Hasil yang diperoleh sejalan dengan laporan Trimanto *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa bertambahnya umur reklamasi diikuti oleh perkembangan struktur vegetasi dan berlangsungnya proses suksesi menuju kondisi

yang lebih mendekati ekosistem alami. Selain itu, Yuan *et al.* (2023) melaporkan bahwa revegetasi secara signifikan meningkatkan kandungan karbon organik, nitrogen, dan berbagai sifat tanah lainnya pada lahan pascatambang sehingga mendukung proses pemulihan fungsi ekologis tanah.

Sementara itu, lahan hutan sekunder digunakan sebagai kontrol positif karena merupakan kawasan perusahaan yang tidak mengalami aktivitas penambangan dan memiliki tutupan vegetasi alami. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan, kawasan ini memiliki struktur vegetasi yang lebih kompleks, ditandai dengan keberadaan berbagai jenis pohon, vegetasi bawah yang berkembang secara alami, serta akumulasi serasah yang tinggi akibat guguran daun dari berbagai jenis vegetasi yang tumbuh secara alami. Kondisi tersebut diduga menciptakan habitat yang lebih sesuai bagi berbagai kelompok makrofauna tanah melalui masukan bahan organik dari serasah, ketersediaan sumber pakan, dan kondisi iklim mikro yang lebih stabil. Oleh karena itu, hutan sekunder digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi tingkat pemulihan habitat dan komunitas makrofauna tanah pada lahan revegetasi. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil penelitian Sofo *et al.* (2020) yang menyebutkan bahwa ekosistem dengan masukan bahan organik yang tinggi cenderung memiliki aktivitas biologi tanah yang lebih intensif karena serasah menyediakan sumber energi, habitat, dan tempat hidup bagi fauna tanah yang berkontribusi dalam penguraian material organik dan daur hara.

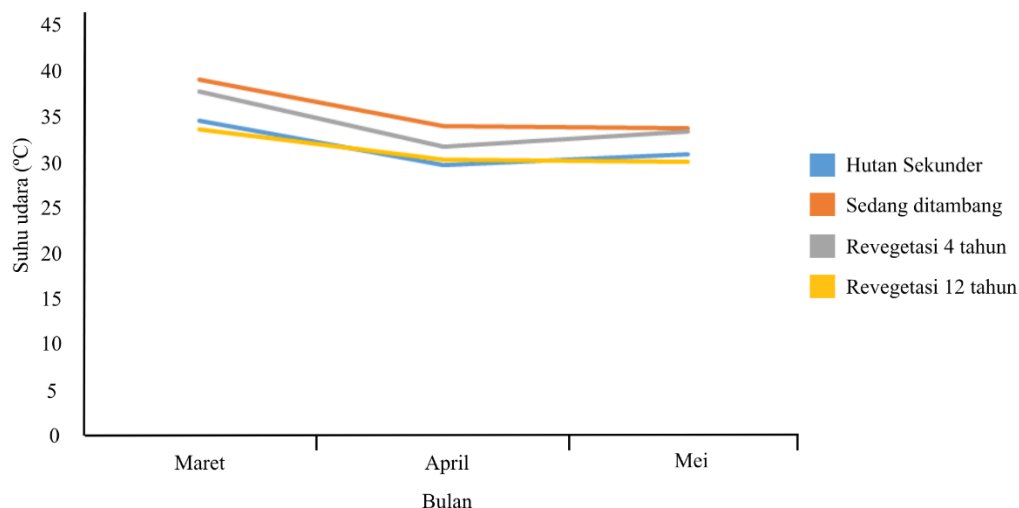
Secara umum, keempat tipe lahan membentuk gradien kondisi lingkungan, mulai dari lahan yang paling terdegradasi hingga lahan yang mendekati kondisi alami. Lahan sedang ditambang merepresentasikan kondisi dengan tingkat gangguan tertinggi, sedangkan lahan hutan sekunder menunjukkan kondisi lingkungan yang paling stabil. Sementara itu, lahan revegetasi umur 4 tahun dan 12 tahun menggambarkan tahapan pemulihan ekosistem yang ditandai oleh peningkatan perkembangan vegetasi yang semakin baik. Perbedaan karakteristik tersebut diduga memengaruhi kondisi faktor abiotik dan selanjutnya berpotensi memengaruhi komposisi serta keanekaragaman makrofauna tanah pada setiap tipe lahan.

B. Pengamatan Kondisi Faktor Abiotik Lingkungan

Pengukuran faktor abiotik dilakukan untuk menggambarkan kondisi lingkungan pada setiap tipe lahan selama penelitian. Variabel pengamatan meliputi

suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya, dan curah hujan yang berperan dalam membentuk kondisi habitat makrofauna tanah. Perbedaan faktor abiotik antar tipe lahan diduga memengaruhi aktivitas, distribusi, dan keanekaragaman makrofauna tanah, sehingga pengukuran faktor-faktor tersebut diperlukan untuk mendukung interpretasi hasil penelitian.

1. Suhu Udara



Gambar 2. Suhu udara pada empat tipe lahan selama tiga kali pengamatan (Maret–Mei 2026). Pengukuran dilakukan pada pukul 16.00–17.00 WIB

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rata-rata suhu udara pada seluruh tipe lahan berkisar antara 31,44–35,67°C. Suhu tertinggi tercatat pada lahan sedang ditambang (35,67°C), dan suhu terendah ditemukan pada lahan revegetasi umur 12 tahun (31,44°C). Adapun rata-rata suhu udara pada lahan hutan sekunder dan lahan revegetasi umur 4 tahun masing-masing sebesar 31,83°C dan 34,38°C. Perbedaan suhu antar tipe lahan diduga dipengaruhi oleh tingkat penutupan tajuk dan kondisi vegetasi yang memengaruhi intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah.

Lahan sedang ditambang memiliki suhu udara yang paling tinggi karena minimnya tutupan vegetasi sehingga radiasi matahari mencapai permukaan tanah secara langsung. Kondisi lahan yang terbuka menyebabkan permukaan tanah lebih cepat menyerap dan melepaskan panas sehingga suhu udara menjadi lebih tinggi dibandingkan tipe lahan lainnya. Ketidadaan tajuk vegetasi juga mengakibatkan kemampuan lahan dalam memodifikasi iklim menjadi sangat terbatas. Hasil

ini mengonfirmasi hasil penelitian Zhao *et al.* (2015) yang melaporkan bahwa perkembangan tutupan vegetasi pada lahan reklamasi tambang batubara menurunkan suhu udara melalui pembentukan naungan yang mengurangi radiasi matahari yang mencapai permukaan lahan.

Lahan revegetasi umur 4 tahun menunjukkan pertumbuhan tanaman sengan (*Falcataria moluccana*) telah mulai memberikan efek naungan, namun berdasarkan hasil pengamatan di lapangan tinggi tanaman masih sekitar ± 2 m sehingga penutupan tajuk belum terbentuk secara optimal. Vegetasi bawah berupa rerumputan telah mulai berkembang, tetapi sebagian permukaan tanah masih terbuka sehingga radiasi matahari masih dapat menembus hingga ke permukaan tanah. Akibatnya, kemampuan vegetasi dalam menurunkan suhu udara masih terbatas. Menurut Maiti (2013), pada tahap awal revegetasi perkembangan vegetasi masih berlangsung sehingga pemulihan fungsi ekologis, termasuk pengaturan mikroklimat, terjadi secara bertahap.

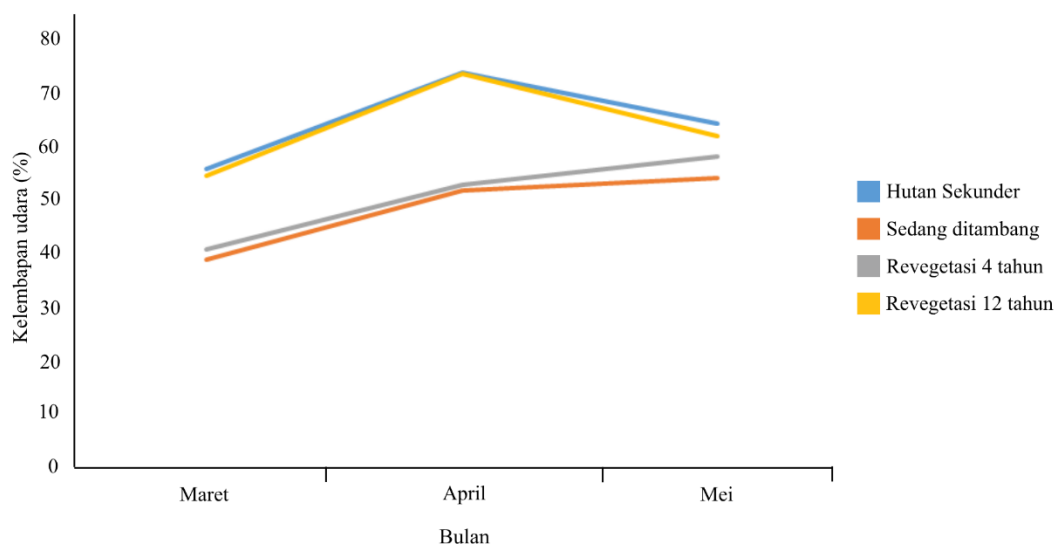
Berbeda dengan revegetasi umur 4 tahun, pada revegetasi umur 12 tahun tegakan sengan telah berkembang dengan baik sehingga tajuk antarpohon saling bertumpang tindih dan menutupi sebagian besar permukaan lahan. Selain itu, telah berkembang vegetasi bawah berupa pohon-pohon kecil dan gulma serta terbentuk akumulasi serasah yang lebih banyak. Terbentuknya naungan yang lebih optimal mengurangi paparan sinar matahari ke permukaan tanah, sehingga suhu udara menjadi lebih sejuk. Karyati *et al.* (2018) menyatakan bahwa peningkatan tutupan vegetasi pada lahan revegetasi berperan dalam menurunkan suhu lingkungan melalui pengurangan radiasi matahari dan peningkatan efek naungan.

Hutan sekunder, keberadaan berbagai jenis pohon dengan vegetasi bawah yang berkembang secara alami serta akumulasi serasah membentuk mikroklimat yang relatif stabil. Kompleksitas struktur vegetasi meningkatkan efek peneduhan sehingga paparan radiasi matahari ke permukaan tanah berkurang dan suhu udara tetap relatif rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa vegetasi alami berperan penting dalam menjaga kestabilan suhu melalui pembentukan naungan oleh tajuk vegetasi. Temuan ini didukung oleh Karyati *et al.* (2020) yang melaporkan bahwa hutan sekunder memiliki suhu udara lebih rendah dibandingkan lahan terbuka

karena tutupan vegetasi mengurangi intensitas cahaya matahari yang mencapai permukaan lahan.

Secara keseluruhan, perbedaan suhu antar tipe lahan menunjukkan bahwa perkembangan vegetasi, terutama peningkatan penutupan tajuk, berperan penting dalam membentuk mikroklimat. Semakin rapat tajuk vegetasi, semakin kecil radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah sehingga suhu udara cenderung lebih rendah. Kondisi mikroklimat yang lebih stabil diduga lebih mendukung aktivitas makrofauna tanah karena sebagian besar makrofauna memerlukan suhu yang sesuai untuk menunjang aktivitas fisiologis, pergerakan, dan reproduksinya (Bardgett & van der Putten, 2014).

2. Kelembapan Udara



Gambar 3. Kelembapan udara pada empat tipe lahan selama tiga kali pengamatan (Maret–Mei 2026). Pengukuran dilakukan pada pukul 16.00–17.00 WIB

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rata-rata kelembapan udara pada seluruh tipe lahan berkisar antara 48,44–64,78%. Kelembapan udara tertinggi ditemukan pada lahan hutan sekunder (64,78%), diikuti oleh lahan revegetasi umur 12 tahun (63,45%). Sementara itu, kelembapan udara pada lahan revegetasi umur 4 tahun dan lahan sedang ditambang masing-masing sebesar 50,78% dan 48,44%, dengan nilai terendah terdapat pada lahan sedang ditambang.

Lahan sedang ditambang memiliki kelembapan udara paling rendah karena minimnya tutupan vegetasi yang menyebabkan peningkatan laju evaporasi sehingga kandungan uap air di sekitar permukaan lahan menjadi lebih rendah.

Tidak adanya vegetasi menyebabkan proses penahanan uap air di bawah tajuk hampir tidak terjadi sehingga udara menjadi lebih kering. Selain itu, ketiadaan serasah mengakibatkan permukaan tanah tidak memiliki lapisan pelindung yang dapat membantu mempertahankan kandungan air di sekitar permukaan tanah. Kondisi tersebut menyebabkan mikroklimat pada lahan sedang ditambang menjadi kurang mendukung terbentuknya kelembapan udara yang tinggi. Hasil tersebut memperkuat temuan Putri *et al.* (2018) yang mengemukakan bahwa kelembapan udara meningkat seiring berkembangnya vegetasi pada lahan revegetasi.

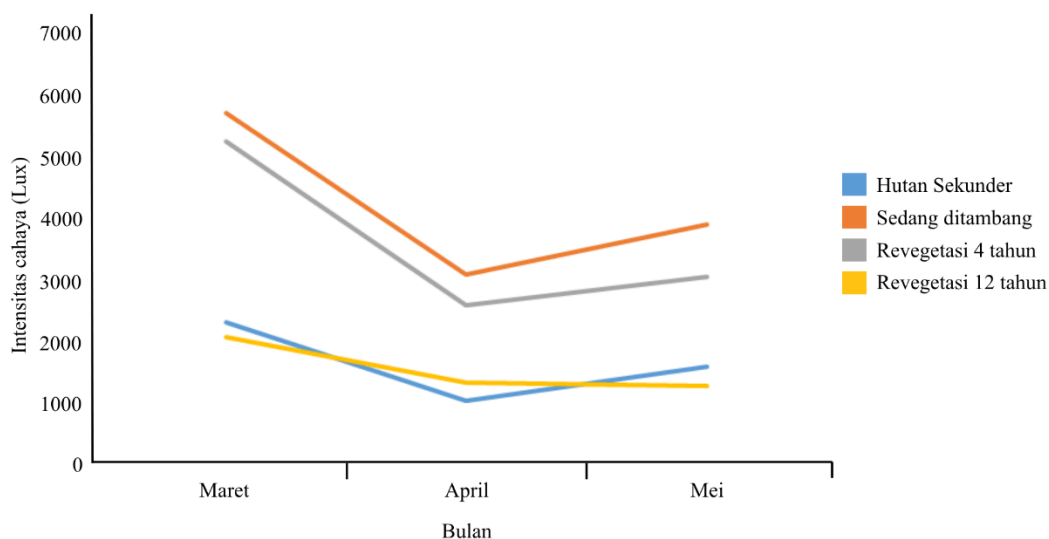
Lahan revegetasi umur 4 tahun, tegakan sengon (*Falcataria moluccana*) mulai berperan dalam membentuk kondisi mikroklimat, namun pengaruhnya belum optimal. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, sengon masih berukuran relatif kecil dengan tajuk yang belum saling menutupi, vegetasi bawah didominasi rerumputan, serta akumulasi serasah masih relatif sedikit. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan vegetasi dalam mempertahankan kelembapan udara masih terbatas karena struktur tegakan dan penutupan tajuk belum berkembang secara optimal. Menurut Maiti (2013), pada tahap awal revegetasi proses pemulihan struktur vegetasi dan fungsi ekologi berlangsung secara bertahap sehingga kondisi lingkungan belum sepenuhnya stabil.

Berbeda dengan lahan revegetasi umur 4 tahun, pada revegetasi umur 12 tahun tegakan sengon (*Falcataria moluccana*) telah berkembang lebih baik, yang ditandai dengan tajuk yang lebih rapat serta akumulasi serasah yang lebih banyak di permukaan tanah. Guguran daun dan bagian tanaman lainnya membentuk lapisan penutup permukaan tanah yang membantu mempertahankan kadar air serta memperlambat kehilangan kelembapan dari permukaan tanah. Selain itu, keberadaan pohon-pohon kecil dan vegetasi bawah yang lebih beragam turut menciptakan lingkungan yang lebih lembap di bawah tegakan. Kondisi tersebut menyebabkan kelembapan udara pada lahan revegetasi umur 12 tahun mendekati kondisi hutan sekunder. Menurut Junaidi *et al.* (2026), tegakan sengon menghasilkan masukan serasah yang berkontribusi terhadap perbaikan kondisi permukaan tanah serta mendukung terbentuknya lingkungan mikro yang lebih sesuai bagi proses pemulihan ekosistem.

Hutan sekunder menunjukkan keberadaan berbagai jenis pohon, vegetasi bawah, dan serasah yang terakumulasi secara alami membentuk kondisi mikroklimat yang lebih lembap dibandingkan tipe lahan lainnya. Tutupan vegetasi yang lebih kompleks mampu mempertahankan kelembapan udara sehingga kondisi lingkungan menjadi lebih stabil. Kondisi tersebut selaras dengan temuan Karyati *et al.* (2020) yang mengindikasikan bahwa hutan sekunder memiliki kelembapan udara lebih tinggi dibandingkan lahan terbuka karena pengaruh tutupan vegetasi yang lebih rapat.

Secara keseluruhan, perbedaan kelembapan udara antar tipe lahan menunjukkan bahwa pemulihan vegetasi tidak hanya meningkatkan penutupan tajuk, tetapi juga mendorong terbentuknya vegetasi bawah dan akumulasi serasah yang berkontribusi dalam mempertahankan kelembapan lingkungan. Semakin berkembang struktur vegetasi, semakin besar kemampuan ekosistem menjaga kondisi mikroklimat yang lembap sehingga menyediakan habitat yang lebih sesuai bagi makrofauna tanah. Kondisi tersebut penting karena kelembapan lingkungan merupakan faktor yang menentukan aktivitas, persebaran, dan kelimpahan organisme tanah. (Lavelle *et al.*, 2006).

3. Intensitas Cahaya



Gambar 4. Intensitas cahaya pada empat tipe lahan selama tiga kali pengamatan (Maret–Mei 2026). Pengukuran dilakukan pada pukul 16.00-17.00 WIB

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rata-rata intensitas cahaya pada seluruh tipe lahan berkisar antara 1.568,11–4.241,00 lux. Intensitas cahaya tertinggi

ditemukan pada lahan sedang ditambang sebesar 4.241,00 lux, diikuti oleh lahan revegetasi umur 4 tahun sebesar 3.637,67 lux. Sementara itu, intensitas cahaya pada lahan hutan sekunder dan revegetasi umur 12 tahun masing-masing sebesar 1.654,67 lux dan 1.568,11 lux, dengan nilai terendah terdapat pada lahan revegetasi umur 12 tahun.

Lahan sedang ditambang, intensitas cahaya yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar radiasi matahari mencapai permukaan tanah secara langsung akibat tidak adanya tutupan vegetasi. Kondisi tersebut menyebabkan proses intersepsi cahaya hampir tidak terjadi sehingga permukaan lahan menerima penyinaran matahari secara penuh. Tingginya intensitas cahaya pada lahan ini mencerminkan karakteristik lahan terbuka yang belum memiliki vegetasi sebagai pembentuk naungan.

Revegetasi umur 4 tahun menunjukkan penanaman sengon (*Falcataria moluccana*) mulai mengurangi intensitas cahaya yang mencapai permukaan tanah. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, tegakan sengon masih memiliki tingkat penutupan kanopi yang rendah sehingga sebagian besar penyinaran matahari masih dapat menembus celah antar tajuk. Akibatnya, kemampuan vegetasi dalam membentuk naungan masih terbatas dan intensitas cahaya yang diterima permukaan lahan masih relatif tinggi. Menurut Maiti (2013), pada tahap awal revegetasi perkembangan vegetasi berlangsung secara bertahap sehingga fungsi ekologis, termasuk pembentukan mikroklimat, belum pulih secara optimal.

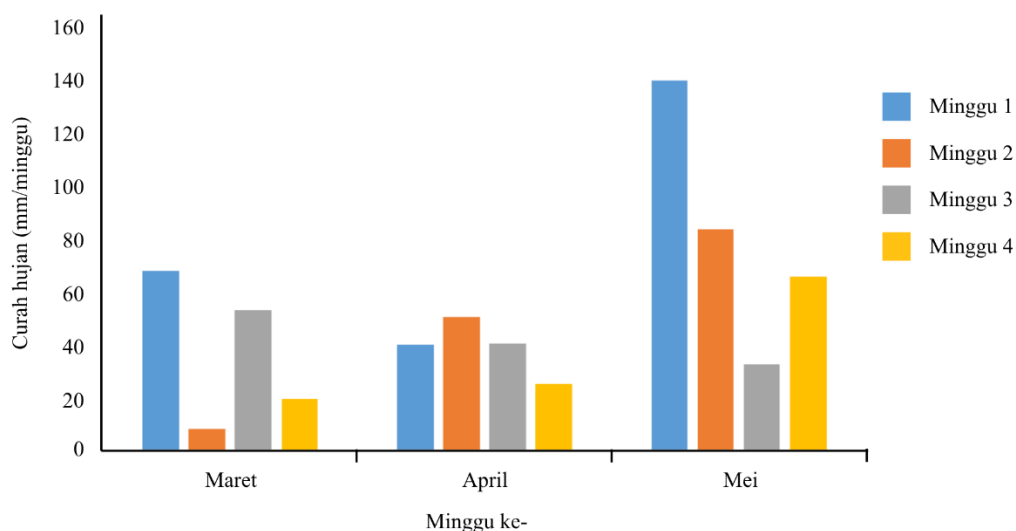
Perbedaan kondisi terlihat pada lahan revegetasi berumur 12 tahun yang menunjukkan bahwa tegakan sengon telah berkembang dengan tajuk yang lebih rapat dan saling bertumpang tindih sehingga mampu mengintersepsi sebagian besar radiasi matahari sebelum mencapai permukaan tanah. Selain itu, keberadaan vegetasi bawah turut memperkuat efek penaungan sehingga intensitas cahaya di bawah tegakan menjadi lebih rendah. Iskandar *et al.* (2022) mendukung pernyataan ini melalui penelitian yang melaporkan bahwa bertambahnya umur revegetasi diikuti oleh perkembangan tajuk vegetasi yang meningkatkan efek penaungan sehingga intensitas cahaya yang mencapai permukaan tanah semakin berkurang.

Hutan sekunder memiliki intensitas cahaya yang rendah menunjukkan bahwa struktur vegetasi yang lebih kompleks mampu menghambat masuknya

radiasi matahari ke lantai hutan. Keberadaan berbagai jenis pohon dengan lapisan tajuk yang saling menutupi menyebabkan hanya sebagian kecil cahaya yang dapat mencapai permukaan tanah. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan dengan intensitas cahaya yang relatif rendah dan lebih stabil dibandingkan lahan yang memiliki tutupan vegetasi lebih sederhana. Hasil penelitian ini memperkuat temuan Karyati *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa hutan sekunder memiliki intensitas cahaya lebih rendah dibandingkan lahan terbuka karena tutupan vegetasi yang lebih rapat membatasi masuknya radiasi matahari.

Secara keseluruhan, perbedaan intensitas cahaya antar tipe lahan menunjukkan bahwa perkembangan vegetasi berkontribusi dalam mengendalikan besarnya radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah. Semakin berkembang struktur vegetasi dan semakin rapat penutupan tajuk, semakin besar kemampuan lahan mengintersepsi cahaya sehingga kondisi mikroklimat menjadi lebih stabil. Pola tersebut juga terlihat pada penelitian ini, di mana lahan dengan intensitas cahaya yang lebih rendah diikuti oleh penurunan suhu udara dan peningkatan kelembapan udara. Hasil penelitian ini mendukung temuan Terschanski *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa struktur vegetasi mengatur kondisi mikroklimat melalui mekanisme penauangan, evapotranspirasi, dan pengurangan radiasi matahari sehingga menciptakan lingkungan yang lebih stabil bagi berbagai organisme.

4. Curah Hujan



Gambar 5. Curah hujan harian pada lokasi penelitian selama tiga bulan (Maret–Mei 2026), disusun berdasarkan data curah hujan harian BMKG Stasiun Klimatologi Jambi (2026)

Berdasarkan data BMKG Stasiun Klimatologi Jambi, curah hujan selama periode penelitian bervariasi antarbulan. Curah hujan meningkat dari 152,1 mm pada bulan Maret menjadi 158,8 mm pada bulan April, kemudian meningkat secara signifikan menjadi 370,7 mm pada bulan Mei. Peningkatan curah hujan pada bulan Mei menunjukkan bahwa selama periode tersebut ketersediaan air di lingkungan lebih tinggi dibandingkan bulan-bulan sebelumnya. Variasi curah hujan tersebut menggambarkan perubahan kondisi iklim selama periode penelitian yang berpotensi memengaruhi kelembapan tanah dan mendukung berlangsungnya berbagai proses ekologis di dalam tanah.

Curah hujan menjadi salah satu komponen iklim yang menentukan ketersediaan air di suatu lingkungan. Curah hujan yang lebih tinggi umumnya membantu mempertahankan kelembapan tanah sehingga mendukung aktivitas organisme dekomposer dan mempercepat proses dekomposisi serasah. Sebaliknya, curah hujan yang rendah dapat menyebabkan tanah menjadi lebih kering sehingga aktivitas biologis dalam tanah cenderung menurun. Sejalan dengan hasil tersebut Kemppinen *et al.* (2024) menjelaskan bahwa perubahan pola curah hujan dan ketersediaan air merupakan komponen utama pembentuk mikroklimat yang secara langsung memengaruhi kondisi habitat organisme serta dinamika komunitas biota tanah.

Penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh tipe lahan berada pada kawasan yang sama sehingga menerima curah hujan yang relatif seragam selama periode pengamatan. Oleh karena itu, perbedaan kondisi lingkungan dan komunitas makrofauna tanah antar tipe lahan diduga lebih dipengaruhi oleh karakteristik vegetasi, penutupan tajuk, dan kondisi mikroklimat. Meskipun demikian, peningkatan curah hujan pada bulan Mei diduga turut membantu mempertahankan kelembapan lingkungan yang mendukung aktivitas biologis tanah. Fenomena yang diperoleh dalam penelitian ini juga dilaporkan oleh Terschanski *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa struktur vegetasi berperan penting dalam membentuk mikroklimat melalui efek naungan, evapotranspirasi, dan pengurangan radiasi matahari sehingga menciptakan habitat yang lebih sesuai bagi organisme tanah. Data curah hujan Kabupaten Muaro Bungo bulan Maret 2026-Mei 2026 dapat dilihat pada lampiran 9.

C. Sifat Kimia Tanah

Sifat kimia tanah dianalisis untuk menggambarkan kondisi kesuburan tanah pada setiap tipe lahan serta menjelaskan keterkaitannya dengan keberadaan makrofauna tanah. Sifat kimia tanah berperan penting dalam menentukan kualitas habitat karena berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara, akumulasi bahan organik, dan aktivitas biologis di dalam tanah. Pada penelitian ini, parameter yang diukur yaitu, tingkat kemasaman tanah (pH), kandungan karbon organik (C-organik), nitrogen total (N-total), dan rasio C/N. Hasil analisis sifat kimia tanah pada masing-masing tipe lahan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis sifat kimia tanah di masing-masing tipe lahan pengamatan di PT Kuansing Inti Makmur

Jenis Lahan	Parameter			
	pH H ₂ O	C-organik	N-total	Rasio C/N
Sedang ditambang	4,32 (SM)	0,19 (SR)	0,07 (SR)	2,84 (SR)
4 tahun revegetasi	4,23 (SM)	0,44 (SR)	0,11 (R)	3,9 (SR)
12 tahun revegetasi	4,19 (SM)	1,1 (R)	0,17 (R)	6,59 (R)
Hutan sekunder	4,25 (SM)	1,11 (R)	0,12 (R)	9,3 (R)

Keterangan: Kriteria penilaian hasil analisis tanah merujuk pada Eviati *et al.* (2023), SM (Sangat Masam), R (Rendah), SR (Sangat Rendah)

Hasil analisis memperlihatkan bahwa pH tanah pada seluruh tipe lahan berada pada kisaran 4,19–4,32 dan seluruhnya termasuk dalam kriteria sangat masam. Nilai pH tertinggi ditemukan pada lahan sedang ditambang (4,32), diikuti oleh lahan hutan sekunder (4,25) dan lahan revegetasi umur 4 tahun (4,23), sedangkan nilai terendah terdapat pada lahan revegetasi umur 12 tahun (4,19). Meskipun lahan sedang ditambang memiliki nilai pH sedikit lebih tinggi dibandingkan tipe lahan lainnya, selisih nilai pH antar tipe lahan relatif kecil sehingga secara umum seluruh lokasi penelitian memiliki tingkat kemasaman yang tidak berbeda nyata. Perbedaan kecil tersebut diduga mencerminkan variasi alami kondisi tanah di lapangan dan menunjukkan bahwa perbedaan penggunaan lahan belum memberikan perubahan yang berarti terhadap pH tanah.

Nilai pH tanah yang relatif rendah pada seluruh lokasi penelitian diduga dipengaruhi oleh karakteristik tanah Oxisol yang telah mengalami pelapukan lanjut dan pencucian kation-kation basa secara intensif akibat tingginya curah hujan di wilayah tropis. Proses tersebut menyebabkan tanah kehilangan sebagian besar unsur-unsur basa sehingga tetap memiliki tingkat kemasaman yang tinggi. Kondisi tersebut serupa dengan yang dilaporkan Fageria dan Nascente (2014) bahwa Oxisol merupakan tanah yang bersifat masam dan memiliki tingkat kesuburan yang rendah.

Tidak adanya perbedaan pH yang mencolok menunjukkan bahwa proses revegetasi belum memberikan perubahan yang signifikan terhadap tingkat kemasaman tanah. Perubahan pH tanah umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan peningkatan kandungan bahan organik karena dipengaruhi oleh kapasitas penyangga (*buffering capacity*), sifat mineral penyusun tanah, serta proses pelapukan yang berlangsung dalam jangka panjang. Hasil ini mengindikasikan bahwa sifat dasar tanah masih menjadi faktor utama yang mengendalikan pH pada seluruh lokasi penelitian. Yuningsih dan Ibrahim (2021) melaporkan bahwa revegetasi pada lahan pascatambang lebih berperan dalam meningkatkan kualitas vegetasi dan bahan organik tanah dibandingkan mengubah pH tanah secara langsung.

Kondisi tanah yang sangat masam pada seluruh tipe lahan diduga memengaruhi kesesuaian habitat bagi makrofauna tanah karena pH memengaruhi aktivitas mikroorganisme dekomposer, laju dekomposisi bahan organik, serta ketersediaan unsur hara yang mendukung kehidupan organisme tanah. Handayanto dan Hairiah (2009) menyebutkan sebagian besar organisme tanah berkembang lebih baik pada kondisi pH mendekati netral, meskipun beberapa kelompok memiliki toleransi terhadap tanah yang bersifat masam. Namun, karena seluruh tipe lahan memiliki pH yang relatif seragam dan sama-sama berada pada kategori sangat masam, pH diduga bukan merupakan faktor utama yang membedakan komunitas makrofauna tanah antar tipe lahan. Variasi komunitas makrofauna tanah antar tipe lahan diduga lebih dipengaruhi oleh perbedaan kandungan bahan organik, perkembangan vegetasi, dan kondisi mikrohabitat pada masing-masing tipe lahan.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kandungan C-organik tanah pada seluruh tipe lahan berkisar antara 0,19–1,11%. Lahan hutan sekunder memiliki

kandungan C-organik tertinggi sebesar 1,11%, disusul lahan revegetasi umur 12 tahun sebesar 1,10%. Sementara itu, kandungan C-organik pada lahan revegetasi umur 4 tahun sebesar 0,44%, sedangkan lahan sedang ditambang menunjukkan nilai terendah sebesar 0,19%. Pola tersebut menunjukkan bahwa kandungan C-organik meningkat seiring bertambahnya umur revegetasi, sehingga nilai pada lahan revegetasi umur 12 tahun telah mendekati kondisi lahan hutan sekunder.

Kandungan C-organik yang rendah pada lahan sedang ditambang diduga dipengaruhi oleh minimnya masukan bahan organik akibat tidak adanya vegetasi yang menghasilkan serasah. Kondisi tersebut menyebabkan akumulasi karbon organik di dalam tanah berlangsung lebih lambat sehingga kandungan C-organik tetap sangat rendah. Sheoran *et al.* (2010) melaporkan hal serupa yang mana kegiatan penambangan menyebabkan terganggunya siklus bahan organik akibat hilangnya vegetasi dan berkurangnya masukan serasah ke dalam tanah.

Lahan revegetasi umur 4 tahun memiliki kandungan C-organik mulai mengalami peningkatan dibandingkan lahan sedang ditambang. Peningkatan tersebut diduga berasal dari mulai berkembangnya vegetasi sengon yang menghasilkan serasah sebagai sumber bahan organik tanah. Namun, umur revegetasi yang masih relatif muda menyebabkan akumulasi bahan organik belum berlangsung secara optimal sehingga kandungan C-organik masih lebih rendah dibandingkan lahan revegetasi umur 12 tahun maupun hutan sekunder. Hijrah *et al.* (2024) juga mengungkapkan hal serupa, bahwa revegetasi pada lahan bekas tambang batubara merupakan upaya yang memberikan masukan bahan organik yang bersumber dari biomassa tanaman, sehingga kandungan C-organik yang ada di lahan revegetasi lebih baik daripada lahan yang belum direvegetasi.

Revegetasi umur 12 tahun, kandungan C-organik meningkat dan hampir sama dengan lahan hutan sekunder. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh akumulasi serasah yang berlangsung lebih lama, perkembangan sistem perakaran, serta peningkatan biomassa vegetasi selama proses revegetasi. Masukan bahan organik secara terus-menerus meningkatkan cadangan karbon organik tanah sehingga kualitas tanah secara bertahap mendekati kondisi alami. Hal ini memperkuat temuan yang dilaporkan oleh Cahyono *et al.* (2014) yang menyebutkan bahwa penggunaan tanaman pionir yang tumbuh cepat, seperti sengon, dalam kegiatan

revegetasi mampu meningkatkan kandungan C-organik tanah. Selain itu, revegetasi yang telah berlangsung lebih dari lima tahun mampu mengembalikan sifat kimia tanah hingga setara atau bahkan lebih baik dibandingkan kondisi sebelum penambangan terbuka.

Lahan hutan sekunder, tingginya kandungan C-organik diduga dipengaruhi oleh berlangsungnya siklus alami serasah yang berlangsung secara terus-menerus serta keberadaan vegetasi yang beragam sehingga masukan bahan organik ke dalam tanah relatif stabil. Kondisi tersebut menyebabkan akumulasi bahan organik berlangsung lebih lama dan mendukung terbentuknya cadangan karbon organik tanah yang lebih tinggi. Brady dan Weil (2017) melaporkan bahwa bahan organik merupakan salah satu komponen utama yang mengendalikan aktivitas biologis tanah karena berfungsi sebagai penyedia energi bagi biota tanah.

C-organik yang terkandung pada lahan revegetasi umur 12 tahun yang relatif sama dengan lahan sekunder menunjukkan bahwa proses revegetasi menggunakan sengon (*Falcataria moluccana*) telah mampu memulihkan kandungan bahan organik tanah hingga mendekati kondisi alami. Hal ini diduga dipengaruhi oleh akumulasi serasah yang berlangsung secara berkelanjutan serta perkembangan sistem perakaran selama proses revegetasi. Kondisi tersebut menyediakan pasokan energi yang lebih besar untuk organisme tanah sehingga mendukung terbentuknya habitat yang lebih baik bagi makrofauna tanah.

Kandungan N-total tanah pada seluruh tipe lahan tercatat pada rentang 0,07–0,17% dan termasuk dalam kategori sangat rendah hingga rendah. Nilai N-total tertinggi ditemukan pada lahan revegetasi umur 12 tahun (0,17%), diikuti oleh lahan hutan sekunder (0,12%) dan lahan revegetasi umur 4 tahun (0,11%), sedangkan nilai terendah terdapat pada lahan sedang ditambang (0,07%). Secara umum, kandungan N-total menunjukkan kecenderungan meningkat pada lahan yang telah direvegetasi, dengan nilai tertinggi ditemukan pada revegetasi umur 12 tahun.

Rendahnya kandungan N-total pada lahan sedang ditambang diduga disebabkan oleh minimnya masukan bahan organik akibat tidak adanya vegetasi yang menghasilkan serasah. Kondisi tersebut menyebabkan cadangan nitrogen tanah tetap rendah karena sebagian besar nitrogen tanah berasal dari bahan organik

yang mengalami dekomposisi dan mineralisasi sebelum tersedia bagi tanaman. Hardjowigeno (2015) menyatakan bahwa sebagian besar nitrogen tanah umumnya tersimpan dalam bentuk senyawa organik sehingga kandungannya sangat dipengaruhi oleh jumlah bahan organik tanah.

Revegetasi umur 4 tahun, kandungan N-total mulai meningkat dibandingkan lahan sedang ditambang. Peningkatan ini diduga berkaitan dengan mulai berkembangnya tegakan sengon (*Falcataria moluccana*) yang menghasilkan serasah serta mulai terbentuknya masukan bahan organik ke dalam tanah. Namun, tajuk yang belum menutup sempurna dan jumlah serasah yang masih relatif sedikit menyebabkan akumulasi nitrogen tanah belum berlangsung secara optimal, sehingga kandungan N-total masih lebih rendah dibandingkan lahan revegetasi umur 12 tahun dan hutan sekunder.

Lahan revegetasi umur 12 tahun, kandungan N-total merupakan yang tertinggi di antara seluruh tipe lahan. Kondisi ini diduga berkaitan dengan dominasi sengon sebagai tanaman revegetasi yang termasuk leguminosa dan mampu bersimbiosis dengan bakteri penambat nitrogen sehingga berkontribusi terhadap penambahan nitrogen tanah. Selain itu, tegakan sengon yang telah berkembang dengan tajuk lebih rapat, serasah yang lebih melimpah, serta vegetasi bawah yang mulai berkembang memberikan masukan bahan organik secara berkelanjutan sehingga cadangan nitrogen tanah semakin meningkat. Kondisi ini didukung oleh temuan Krisnawati *et al.* (2011) yang menyebutkan bahwa sengon memiliki kemampuan meningkatkan kandungan nitrogen tanah melalui asosiasi dengan bakteri penambat nitrogen.

Hutan sekunder memiliki kandungan N-total juga relatif tinggi karena didukung oleh vegetasi yang beragam serta siklus serasah yang berlangsung secara alami dan berkesinambungan. Masukan bahan organik yang terus-menerus dari guguran daun, ranting, dan bagian tumbuhan lainnya berkontribusi terhadap ketersediaan nitrogen di dalam tanah melalui proses penguraian dan mineralisasi.

Nitrogen berperan sebagai unsur hara yang diperlukan tanaman untuk mendukung pertumbuhan vegetasi dan produktivitas biomassa. Kandungan N-total yang lebih tinggi pada lahan revegetasi umur 12 tahun diduga meningkatkan pertumbuhan vegetasi dan akumulasi serasah sehingga menyediakan masukan

bahan organik yang lebih besar ke dalam tanah. Kondisi tersebut secara tidak langsung memperbaiki kualitas habitat melalui peningkatan ketersediaan sumber makanan dan aktivitas organisme dekomposer, sehingga membentuk kondisi habitat yang lebih sesuai bagi makrofauna tanah. Sejalan dengan itu, Brady dan Weil (2017) menyatakan bahwa nitrogen berperan sebagai salah satu hara utama yang mendukung pertumbuhan vegetative tanaman dan produktivitas biomassa, sehingga berperan penting dalam mempertahankan siklus bahan organik dan aktivitas biologi tanah.

Nilai rasio C/N tanah pada lokasi penelitian berkisar antara 2,84–9,30. Hutan sekunder memiliki rasio C/N tertinggi, yaitu 9,30, sedangkan lahan sedang ditambang menunjukkan nilai terendah sebesar 2,84. Pada lahan revegetasi, rasio C/N meningkat dari 3,90 pada umur 4 tahun menjadi 6,59 pada umur 12 tahun. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses revegetasi secara bertahap memperbaiki keseimbangan karbon dan nitrogen di dalam tanah sehingga kondisi pada revegetasi umur 12 tahun semakin mendekati hutan sekunder.

Rasio C/N yang rendah pada lahan sedang ditambang diduga berkaitan dengan rendahnya kandungan C-organik akibat minimnya masukan serasah dan bahan organik karena belum adanya penutupan vegetasi. Nitrogen tanah umumnya tersimpan sebagai senyawa organik sehingga rendahnya bahan organik menyebabkan keseimbangan karbon dan nitrogen belum berkembang secara optimal. Brady dan Weil (2017) menyatakan bahwa rasio C/N mencerminkan komposisi karbon dan nitrogen dalam bahan organik tanah serta dapat digunakan sebagai indikator perkembangan bahan organik selama proses pemulihan lahan.

Lahan revegetasi umur 4 tahun, rasio C/N mulai meningkat seiring bertambahnya masukan serasah dari tegakan sengon (*Falcataria moluccana*). Namun, tajuk yang belum menutup secara optimal serta akumulasi serasah yang masih relatif terbatas menyebabkan rasio C/N belum meningkat secara maksimal. Seiring bertambahnya umur revegetasi menjadi 12 tahun, akumulasi serasah berlangsung lebih lama sehingga rasio C/N semakin meningkat. Meskipun demikian, nilainya masih lebih rendah dibandingkan hutan sekunder, yang menunjukkan bahwa proses pemulihan kualitas tanah masih terus berlangsung. Hardjowigeno (2015) menjelaskan bahwa masukan serasah dengan jumlah dan

kualitas yang baik berperan penting dalam meningkatkan kandungan bahan organik serta memperbaiki kesuburan tanah.

Pada lahan hutan sekunder, rasio C/N tertinggi diduga dipengaruhi oleh vegetasi yang beragam sehingga menghasilkan masukan serasah secara terus-menerus ke permukaan tanah. Serasah tersebut merupakan komponen penting dalam siklus hara karena berperan dalam akumulasi bahan organik tanah, pengembalian unsur hara, serta menjaga berlangsungnya proses dekomposisi di ekosistem hutan. Giweta (2020) menyatakan bahwa produksi serasah dan proses dekomposisinya merupakan komponen utama siklus hara yang mengatur akumulasi bahan organik tanah, masukan dan pelepasan unsur hara, serta mendukung berbagai fungsi ekosistem hutan. Oleh karena itu, rasio C/N yang tinggi pada hutan sekunder menunjukkan kondisi tanah yang memiliki keseimbangan karbon dan nitrogen lebih baik dibandingkan lahan revegetasi maupun lahan sedang ditambang.

Secara ekologis, rasio C/N menggambarkan kualitas bahan organik yang tersedia di dalam tanah. Keseimbangan karbon dan nitrogen memengaruhi proses dekomposisi dan mineralisasi oleh mikroorganisme, yang selanjutnya menentukan pelepasan unsur hara bagi pertumbuhan vegetasi. Siklus hara yang berlangsung lebih baik juga meningkatkan ketersediaan sumber makanan bagi organisme tanah dan mendukung terbentuknya habitat yang lebih sesuai bagi makrofauna. Oleh karena itu, peningkatan rasio C/N selama proses revegetasi mencerminkan perbaikan kualitas tanah yang berpotensi mendukung pemulihan komunitas makrofauna.

D. Komposisi dan Kelimpahan Makrofauna Tanah

Komposisi dan kelimpahan makrofauna tanah merupakan salah satu indikator biologis yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemulihan ekosistem pada lahan pascatambang. Keberadaan dan distribusi makrofauna dipengaruhi oleh kondisi habitat, ketersediaan bahan organik, tutupan vegetasi, kelembapan tanah, serta kualitas lingkungan secara keseluruhan. Semakin baik kondisi habitat suatu lahan, semakin tinggi pula keragaman dan kelimpahan makrofauna yang mampu berkolonisasi dan berkembang. Hasil identifikasi makrofauna tanah hingga tingkat morfospesies pada masing-masing tipe lahan

disajikan pada Tabel 2, sedangkan jumlah individu setiap ordo pada masing-masing tipe lahan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Identifikasi makrofauna tanah yang ditemukan pada lahan hutan sekunder, lahan sedang ditambang, lahan revegetasi 4 tahun dan lahan revegetasi 12 tahun

No.	Jenis Lahan	Filum	Kelas	Ordo	Famili	Morfospesies
1	Hutan sekunder	Arthropoda	Insecta	Blattodea	Blattidae	Blattidae sp.1
2		Arthropoda	Insecta	Blattodea	Ectobiidae	Ectobiidae sp.1
3		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Scarabaeidae	Scarabaeidae sp.1
4		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Brentidae	Brentidae sp.1
5		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elateridae	Elateridae sp.1
6		Arthropoda	Insecta	Dermaptera	Forficulidae	Forficulidae sp.1
7		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Miridae	Miridae sp.1
8		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.1
9		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.2
10		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.3
11		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.4
12		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.5
13		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.6
14		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.7
15		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.8
16		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.1
17		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Acrididae	Acrididae sp.1
18		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Lycosidae	Lycosidae sp. 1
19		Annelida	Oligochaeta	Megadrilacea	Megascolecidae	Megascolecidae sp.1
20	Sedang ditambang	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Carabidae	Carabidae sp.1
21		Arthropoda	Insecta	Dermaptera	Forficulidae	Forficulidae sp.1
22		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.1
23		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.2
24		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.3
25		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.4
26		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.8
27		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.9
28		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.10
29		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.11
30	Revegetasi 4 tahun	Arthropoda	Insecta	Blattodea	Blattidae	Blattidae sp.2
31		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Scarabaeidae	Scarabaeidae sp.1
32		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Coccinellidae	Coccinellidae sp.1
33		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Miridae	Miridae sp.1
34		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Pentatomidae	Pentatomidae sp.1
35		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Miridae	Miridae sp.2
36		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Reduviidae	Reduviidae sp.1

No.	Jenis Lahan	Filum	Kelas	Ordo	Famili	Morfospesies
37	Revegetasi 4 tahun (lanjutan)	Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.3
38		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.4
39		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.5
40		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.6
41		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.8
42		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.11
43		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.1
44		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.2
45		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Lycosidae	Lycosidae sp.1
46		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Araneidae	Araneidae sp.1
47		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Lycosidae	Lycosidae sp.2
48		Arthropoda	Insecta	Neuroptera	Chrysopidae	Chrysopidae sp.1
49		Arthropoda	Insecta	Blattodea	Termitidae	Termitidae sp.1
50		Arthropoda	Insecta	Blattodea	Ectobiidae	Ectobiidae sp.1
51		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Scarabaeidae	Scarabaeidae sp.1
52		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Scarabaeidae	Scarabaeidae sp.2
53		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Scarabaeidae	Scarabaeidae sp.3
54		Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilidae sp.1
55		Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Miridae	Miridae sp.1
56		Arthropoda	Insecta	Dermaptera	Forficulidae	Forficulidae sp.1
57		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.1
58		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.3
59		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.4
60	Revegetasi 12 tahun	Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.5
61		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.6
62		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.8
63		Arthropoda	Insecta	Hymenoptera	Formicidae	Formicidae sp.12
64		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.1
65		Arthropoda	Insecta	Orthoptera	Gryllidae	Gryllidae sp.2
66		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Lycosidae	Lycosidae sp.1
67		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Lycosidae	Lycosidae sp.3
68		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Sparassidae	Sparassidae sp.1
69		Arthropoda	Arachnida	Araneae	Linyphiidae	Linyphiidae sp.1
70		Arthropoda	Chilopoda	Geophilomorpha	Geophilidae	Geophilidae sp.1
71		Annelida	Oligochaeta	Megadrilacea	Megascolecidae	Megascolecidae sp.1

Hasil identifikasi makrofauna tanah pada empat tipe lahan menunjukkan bahwa spesimen yang diperoleh berasal dari dua filum, yaitu Arthropoda dan Annelida. Filum Arthropoda merupakan kelompok yang paling dominan dengan anggota yang termasuk ke dalam kelas Insecta, Arachnida, dan Chilopoda,

sedangkan filum Annelida hanya diwakili oleh kelas Oligochaeta. Berdasarkan hasil identifikasi, seluruh spesimen berhasil dikelompokkan ke dalam 10 ordo, yaitu Blattodea, Coleoptera, Dermaptera, Hemiptera, Hymenoptera, Orthoptera, Neuroptera, Araneae, Megadrilacea, dan Geophilomorpha. Selanjutnya seluruh spesimen berhasil diidentifikasi menjadi 23 famili, yaitu Blattidae, Ectobiidae, Termitidae, Scarabaeidae, Brentidae, Elateridae, Carabidae, Coccinellidae, Hydrophilidae, Forficulidae, Miridae, Pentatomidae, Reduviidae, Formicidae, Gryllidae, Acrididae, Chrysopidae, Lycosidae, Araneidae, Sparassidae, Linyphiidae, Megascolecidae, dan Geophilidae.

Dominasi filum Arthropoda menunjukkan bahwa kelompok ini memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi habitat, mulai dari hutan sekunder hingga lahan pascatambang dengan tingkat revegetasi yang berbeda. Keragaman bentuk tubuh, tipe pakan, serta strategi hidup menyebabkan Arthropoda mampu memanfaatkan berbagai relung ekologi pada setiap tipe lahan. Hal ini sejalan dengan Lavelle *et al.* (2006) yang menyatakan bahwa Arthropoda tanah memiliki peran ekologis yang beragam sebagai predator, detritivor, herbivor, maupun omnivor sehingga mampu beradaptasi pada berbagai kondisi lingkungan serta berkontribusi terhadap proses dekomposisi, siklus hara, dan pembentukan struktur tanah. Sebaliknya, filum Annelida hanya ditemukan pada lahan hutan sekunder dan revegetasi umur 12 tahun, yang mengindikasikan bahwa kelompok ini memerlukan kondisi tanah yang lebih stabil dengan kandungan bahan organik dan kelembapan yang lebih baik dibandingkan lahan yang masih mengalami gangguan. Curry dan Schmidt (2007) menjelaskan bahwa keberadaan cacing tanah sangat dipengaruhi oleh ketersediaan bahan organik sebagai sumber pakan serta kondisi fisik tanah, terutama kelembapan dan struktur tanah, yang mendukung aktivitas, pertumbuhan, dan kelangsungan hidupnya.

Di antara seluruh ordo yang ditemukan, Hymenoptera, khususnya famili Formicidae, merupakan kelompok dengan keragaman morfospesies tertinggi. Famili ini ditemukan pada seluruh tipe lahan dan berhasil dibedakan menjadi 12 morfospesies, yaitu Formicidae sp.1 hingga Formicidae sp.12. Banyaknya morfospesies Formicidae menunjukkan tingginya variasi morfologi semut pada lokasi penelitian sekaligus mengindikasikan kemampuan kelompok ini beradaptasi

pada berbagai kondisi habitat. Hal ini sejalan dengan Del Toro *et al.* (2012) yang menyatakan bahwa semut merupakan salah satu kelompok serangga dengan sebaran habitat yang luas serta berperan sebagai predator, pemulung (*scavenger*), penyebar biji (*seed disperser*), dan *ecosystem engineer* yang memberikan berbagai jasa ekosistem melalui aktivitasnya di dalam tanah.

Identifikasi pada penelitian ini dilakukan hingga tingkat morfospesies karena sebagian besar spesimen belum dapat diidentifikasi sampai tingkat spesies berdasarkan karakter morfologi eksternal yang tersedia. Penentuan morfospesies dilakukan dengan mengelompokkan individu-individu yang memiliki karakter morfologi serupa di dalam satu famili berdasarkan ukuran tubuh, bentuk kepala, tipe antena, bentuk pronotum, pola warna, bentuk sayap, struktur tungkai, dan karakter morfologi lainnya. Oleh karena itu, penamaan seperti Formicidae sp.1 hingga Formicidae sp.12 tidak menunjukkan spesies yang telah teridentifikasi secara taksonomi, tetapi merupakan kelompok morfologi yang berbeda dalam famili yang sama.

Distribusi famili pada setiap tipe lahan menunjukkan adanya perubahan komposisi komunitas seiring bertambahnya umur revegetasi. Hutan sekunder memiliki komposisi famili yang relatif beragam dengan ditemukannya famili Brentidae, Elateridae, Acrididae, serta Megascolecidae yang tidak dijumpai pada seluruh tipe lahan lainnya. Lahan sedang ditambang memiliki komposisi yang lebih sederhana dan didominasi oleh Formicidae, Carabidae, Gryllidae, dan Forficulidae. Pada revegetasi umur 4 tahun mulai muncul famili Coccinellidae, Pentatomidae, Reduviidae, Araneidae, dan Chrysopidae, sedangkan revegetasi umur 12 tahun menunjukkan komposisi yang paling beragam dengan ditemukannya Termitidae, Hydrophilidae, Sparassidae, Linyphiidae, Geophilidae, serta bertambahnya morfospesies Scarabaeidae dan Formicidae. Munculnya famili-famili tersebut menunjukkan bahwa perkembangan revegetasi menyediakan kondisi habitat yang semakin sesuai bagi kelompok makrofauna dengan kebutuhan ekologis yang lebih beragam.

Secara umum, hasil identifikasi menunjukkan bahwa komposisi makrofauna tanah berubah seiring bertambahnya umur revegetasi. Lahan revegetasi umur 12 tahun memiliki komposisi takson yang lebih beragam dibandingkan

revegetasi umur 4 tahun maupun lahan sedang ditambang, sedangkan hutan sekunder tetap mempertahankan beberapa takson yang tidak ditemukan pada lahan pascatambang. Pola tersebut menunjukkan bahwa revegetasi berperan dalam mendukung pemulihan komunitas makrofauna tanah melalui terbentuknya habitat yang lebih kompleks. Dengan demikian, perubahan komposisi makrofauna tanah dapat digunakan sebagai salah satu indikator biologis dalam mengevaluasi proses pemulihan ekosistem pada lahan pascatambang batubara.

Tabel 3. Jumlah individu makrofauna tanah berdasarkan ordo pada lahan hutan sekunder, sedang ditambang, revegetasi 4 tahun dan revegetasi 12 tahun

No	Ordo	Jenis Lahan				Total
		L0	L1	L2	L3	
1.	Blattodea	3	0	3	33	39
2.	Coleoptera	7	1	3	8	19
3.	Orthoptera	27	2	12	14	55
4.	Hymenoptera	125	36	77	131	369
5.	Hemiptera	2	0	4	1	7
6.	Neuroptera	0	0	5	0	5
7.	Dermaptera	1	1	0	1	3
8.	Araneae	3	0	18	24	45
9.	Megadrilacea	12	0	0	39	51
10.	Geophilomorpha	0	0	0	1	1
Total		180	40	122	252	594

Keterangan : L0 (hutan sekunder), L1 (sedang ditambang), L2 (revegetasi 4 tahun), L3 (revegetasi 12 tahun)

Berdasarkan Tabel 3, jumlah individu makrofauna tanah yang ditemukan pada seluruh lokasi penelitian sebanyak 594 individu yang terdiri atas 10 ordo. Jumlah individu tertinggi ditemukan pada lahan revegetasi umur 12 tahun, yaitu sebanyak 252 individu yang termasuk ke dalam 9 ordo. Selanjutnya, hutan sekunder memiliki 180 individu yang terdiri dari 8 ordo, diikuti lahan revegetasi umur 4 tahun dengan 122 individu terdiri dari 7 ordo. Sementara itu, jumlah individu terendah ditemukan pada lahan sedang ditambang, yaitu sebanyak 40 individu yang terdiri atas 4 ordo. Perbedaan kelimpahan tersebut menunjukkan bahwa perkembangan revegetasi berperan dalam meningkatkan populasi makrofauna tanah sehingga

komunitas yang terbentuk menjadi lebih melimpah dibandingkan lahan yang belum direvegetasi. Hasil ini sejalan dengan Sheoran *et al.* (2010) yang menyatakan bahwa revegetasi merupakan komponen utama dalam proses rehabilitasi lahan pascatambang karena mampu mempercepat pemulihan fungsi ekologis tanah.

Dari seluruh individu yang ditemukan, Hymenoptera merupakan ordo yang paling dominan dengan jumlah 369 individu atau 62,12% dari total seluruh makrofauna yang ditemukan selama penelitian. Hymenoptera juga merupakan ordo dengan jumlah individu terbanyak pada seluruh tipe lahan, yaitu 125 individu pada hutan sekunder, 36 individu pada lahan sedang ditambang, 77 individu pada revegetasi umur 4 tahun, dan 131 individu pada revegetasi umur 12 tahun. Dominasi Hymenoptera, yang pada penelitian ini didominasi oleh Famili Formicidae (semut), menunjukkan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi habitat, termasuk lahan yang masih mengalami gangguan akibat aktivitas penambangan. Kemampuan tersebut didukung oleh sistem koloni yang kuat, perilaku mencari makan yang fleksibel, serta perannya sebagai *ecosystem engineer* melalui bioturbasi, redistribusi bahan organik, dan peningkatan aerasi tanah. Temuan ini sejalan dengan Lavelle *et al.* (2006) yang menyatakan bahwa semut merupakan salah satu organisme tanah yang berperan penting dalam menjaga fungsi ekosistem melalui pembentukan struktur tanah, dekomposisi bahan organik, dan siklus hara.

Selain Hymenoptera, ordo yang memiliki kelimpahan relatif tinggi adalah Orthoptera (55 individu), Megadrilacea (51 individu), Araneae (45 individu), dan Blattodea (40 individu). Orthoptera ditemukan pada seluruh tipe lahan, meskipun jumlah individunya lebih tinggi pada hutan sekunder (27 individu) dan revegetasi umur 12 tahun (14 individu) dibandingkan lahan revegetasi umur 4 tahun (12 individu) dan lahan sedang ditambang (2 individu). Tingginya jumlah individu pada hutan sekunder diduga berkaitan dengan kondisi vegetasi yang lebih beragam sehingga menyediakan sumber pakan dan tempat berlindung yang optimal bagi kelompok herbivor ini. Jumlah individu Orthoptera menurun tajam pada lahan sedang ditambang akibat minimnya tutupan vegetasi dan tingginya tingkat gangguan habitat. Setelah dilakukan revegetasi, jumlah individunya kembali meningkat pada revegetasi umur 4 tahun dan terus bertambah pada revegetasi umur

12 tahun. Hal tersebut mengindikasikan bahwa perkembangan vegetasi selama proses revegetasi mulai memperbaiki kualitas habitat sehingga mampu mendukung keberadaan kelompok Orthoptera, meskipun jumlahnya masih lebih rendah dibandingkan hutan sekunder.

Blattodea ditemukan sebanyak 3 individu pada hutan sekunder, tidak ditemukan pada lahan sedang ditambang, 3 individu pada revegetasi umur 4 tahun, dan meningkat menjadi 33 individu pada revegetasi umur 12 tahun. Tidak ditemukannya Blattodea pada lahan sedang ditambang diduga berkaitan dengan kondisi habitat yang masih mengalami gangguan sehingga belum mampu mendukung keberadaan kelompok dekomposer tersebut. Sebaliknya, keberadaan Blattodea pada hutan sekunder, revegetasi umur 4 tahun, dan terutama revegetasi umur 12 tahun menunjukkan bahwa kelompok ini cenderung dijumpai pada habitat yang telah memiliki penutupan vegetasi. Perbedaan jumlah individu Blattodea antara hutan sekunder dan revegetasi umur 12 tahun menunjukkan bahwa selain faktor lingkungan yang diukur, kemungkinan terdapat factor habitat pada masing-masing lokasi yang turut memengaruhi keberadaan kelompok tersebut. Namun, faktor-faktor tersebut tidak diamati dalam penelitian ini sehingga penyebab perbedaan tersebut belum dapat dijelaskan secara pasti. Pola tersebut sejalan dengan Vasconcellos *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa meningkatnya umur pemulihan lahan umumnya diikuti oleh bertambahnya kelimpahan berbagai kelompok makrofauna sehingga komunitas tanah menjadi lebih kompleks.

Megadrilacea (cacing tanah) ditemukan sebanyak 12 individu pada hutan sekunder, tidak ditemukan pada lahan sedang ditambang maupun revegetasi umur 4 tahun, dan meningkat menjadi 39 individu pada revegetasi umur 12 tahun. Keberadaan Megadrilacea pada hutan sekunder menunjukkan bahwa habitat alami menyediakan kondisi yang sesuai bagi kehidupan cacing tanah. Sebaliknya, ketidakhadirannya pada lahan sedang ditambang diduga berkaitan dengan kondisi tanah yang masih terganggu akibat aktivitas penambangan, sedangkan pada revegetasi umur 4 tahun proses pemulihan habitat kemungkinan belum berlangsung optimal. Meningkatnya jumlah individu Megadrilacea pada revegetasi umur 12 tahun mengindikasikan adanya pemulihan kondisi habitat yang berkaitan dengan meningkatnya keberadaan cacing tanah. Kondisi tersebut sejalan dengan

meningkatnya kandungan C-organik dan N-total pada lahan revegetasi umur 12 tahun yang berpotensi mendukung aktivitas cacing tanah. Vidal *et al.* (2023) menyatakan bahwa keberadaan dan aktivitas cacing tanah sangat dipengaruhi oleh kualitas habitat, terutama kondisi fisik tanah, bahan organik, dan proses biologis yang berlangsung di dalam tanah. Meskipun hutan sekunder memiliki kondisi lingkungan yang juga mendukung bagi kehidupan cacing tanah, jumlah individu Megadrilacea lebih tinggi pada revegetasi umur 12 tahun. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa distribusi Megadrilacea diduga dipengaruhi oleh berbagai faktor habitat yang tidak seluruhnya terwakili oleh parameter lingkungan yang diukur pada penelitian ini.

Araneae ditemukan sebanyak 3 individu pada hutan sekunder, tidak ditemukan pada lahan sedang ditambang, kemudian meningkat menjadi 18 individu pada revegetasi umur 4 tahun dan 24 individu pada revegetasi umur 12 tahun. Ketidakhadirannya pada lahan sedang ditambang diduga berkaitan dengan kondisi habitat yang masih mengalami gangguan sehingga belum mampu mendukung keberadaan kelompok predator ini. Sebaliknya, peningkatan jumlah individu pada lahan revegetasi menunjukkan bahwa perkembangan vegetasi selama proses revegetasi berkaitan dengan terbentuknya habitat yang semakin mendukung keberadaan Araneae. Hal ini sejalan dengan Fardiansah *et al.* (2026) yang melaporkan bahwa kompleksitas struktur habitat dan meningkatnya ketersediaan mangsa berhubungan dengan meningkatnya kekayaan dan kelimpahan komunitas laba-laba, sehingga habitat dengan struktur vegetasi yang lebih kompleks cenderung mampu mendukung keberadaan Araneae.

Neuroptera hanya ditemukan pada lahan revegetasi umur 4 tahun sebanyak 5 individu, sedangkan pada hutan sekunder, lahan sedang ditambang, dan revegetasi umur 12 tahun tidak ditemukan. Jumlah individu yang relatif sedikit menunjukkan bahwa keberadaan Neuroptera pada penelitian ini belum membentuk pola distribusi yang jelas sehingga belum dapat digunakan untuk menjelaskan respons kelompok ini terhadap perbedaan umur revegetasi secara pasti. Menurut Engel *et al.* (2018), Neuroptera merupakan kelompok serangga predator yang keberadaannya dipengaruhi oleh kondisi habitat dan ketersediaan mangsa. Oleh karena itu, kemunculan Neuroptera yang terbatas pada penelitian ini diduga mencerminkan

variasi kondisi habitat selama waktu pengambilan sampel, namun belum dapat digunakan untuk menunjukkan preferensi terhadap umur revegetasi tertentu.

Geophilomorpha merupakan ordo dengan jumlah individu paling sedikit, yaitu hanya satu individu yang ditemukan pada revegetasi umur 12 tahun. Kelompok ini tidak ditemukan pada hutan sekunder, lahan sedang ditambang, maupun revegetasi umur 4 tahun. Rendahnya jumlah individu menunjukkan bahwa keberadaan Geophilomorpha pada penelitian ini masih sangat terbatas sehingga belum membentuk pola distribusi yang jelas. Oleh karena itu, ditemukannya satu individu pada revegetasi umur 12 tahun belum dapat diinterpretasikan sebagai bentuk preferensi terhadap umur revegetasi tertentu, sehingga keberadaannya pada penelitian ini belum dapat digunakan untuk menggambarkan pola distribusi Geophilomorpha pada masing-masing tipe lahan. Menurut Bonato *et al.* (2016), Geophilomorpha merupakan kelompok kelabang tanah yang hidup di dalam tanah dan serasah serta berperan sebagai predator avertebrata tanah, namun distribusinya dapat bervariasi antar habitat.

Sebaliknya, Coleoptera, Hemiptera, dan Dermaptera ditemukan dalam jumlah individu yang relatif sedikit pada seluruh tipe lahan. Coleoptera ditemukan pada seluruh tipe lahan, namun jumlah individunya paling rendah pada lahan sedang ditambang dan meningkat kembali pada kedua lahan revegetasi hingga mencapai jumlah tertinggi pada revegetasi umur 12 tahun. Hemiptera ditemukan pada hutan sekunder, revegetasi umur 4 tahun, dan revegetasi umur 12 tahun, tetapi tidak ditemukan pada lahan sedang ditambang, yang diduga berkaitan dengan minimnya vegetasi sebagai sumber makanan kelompok pengisap cairan tumbuhan. Dermaptera ditemukan masing-masing satu individu pada hutan sekunder, lahan sedang ditambang, dan revegetasi umur 12 tahun, sedangkan pada revegetasi umur 4 tahun tidak ditemukan. Jumlah individu yang sangat rendah pada ketiga kelompok tersebut menunjukkan bahwa keberadaannya kemungkinan lebih dipengaruhi oleh kondisi mikrohabitat lokal dibandingkan oleh perbedaan tipe lahan. Meskipun demikian, keberadaan kelompok-kelompok tersebut menunjukkan bahwa komunitas makrofauna tanah pada lahan revegetasi dan hutan sekunder telah tersusun atas berbagai kelompok fungsional, meliputi dekomposer, herbivor, maupun predator. Keberadaan berbagai kelompok tersebut mengindikasikan bahwa

komunitas makrofauna tanah pada lahan revegetasi telah tersusun atas beberapa kelompok fungsional yang berperan dalam dekomposisi, predasi, dan herbivori, sehingga menggambarkan mulai pulihnya fungsi ekologis tanah dibandingkan lahan yang masih aktif ditambang.

E. Keanekaragaman Makrofauna Tanah

Analisis keanekaragaman makrofauna tanah bertujuan untuk menggambarkan tingkat keanekaragaman, kekayaan ordo, dan pemerataan penyebaran individu makrofauna pada setiap tipe lahan pascatambang. Nilai keanekaragaman dihitung menggunakan indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H'), indeks kekayaan ordo Margalef (DMg), dan indeks pemerataan (E). Hasil analisis keanekaragaman makrofauna tanah pada masing-masing tipe lahan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Keanekaragaman makrofauna tanah pada berbagai tipe lahan pascatambang di PT Kuansing Inti Makmur

Ketinggian	S	N	H'	DMg	E
Hutan sekunder	8	180	1,063 (S)	1,348 (R)	0,511 (S)
Sedang ditambang	4	40	0,429 (R)	0,813 (R)	0,309 (R)
Revegetasi 4 Tahun	7	122	1,226 (S)	1,249 (R)	0,63 (S)
Revegetasi 12 Tahun	9	252	1,455 (S)	1,447 (R)	0,662 (S)

Keterangan: S: jumlah ordo makrofauna yang ditemukan, N: jumlah total individu seluruh ordo, H' : indeks keanekaragaman, DMg: indeks kekayaan ordo margalef, dan E: indeks pemerataan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai indeks keanekaragaman (H') tertinggi terdapat pada lahan revegetasi umur 12 tahun sebesar 1,455, diikuti revegetasi umur 4 tahun sebesar 1,226, hutan sekunder sebesar 1,063, sedangkan nilai terendah terdapat pada lahan sedang ditambang sebesar 0,429. Berdasarkan kriteria Shannon-Wiener, nilai tersebut menunjukkan bahwa komunitas makrofauna pada hutan sekunder serta kedua lahan revegetasi tergolong memiliki keanekaragaman sedang, sedangkan lahan sedang ditambang tergolong rendah. Pola tersebut menunjukkan adanya penurunan keanekaragaman akibat aktivitas penambangan, kemudian meningkat kembali seiring bertambahnya umur revegetasi.

Indeks keanekaragaman tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah individu, tetapi juga oleh jumlah ordo dan distribusi individu pada setiap ordo. Komunitas dengan jumlah ordo lebih banyak dan distribusi individu yang lebih merata akan memiliki nilai H' yang lebih tinggi, sedangkan dominasi oleh satu ordo menyebabkan nilai H' menjadi lebih rendah meskipun jumlah individunya besar (Magurran, 2004). Pada penelitian ini, lahan sedang ditambang hanya ditemukan 4 ordo dan didominasi oleh Hymenoptera sehingga memiliki nilai H' terendah. Setelah revegetasi dilakukan, nilai H' meningkat dari 0,429 pada lahan sedang ditambang menjadi 1,226 pada revegetasi umur 4 tahun dan kembali meningkat menjadi 1,455 pada revegetasi umur 12 tahun. Sementara itu, hutan sekunder memiliki nilai H' sebesar 1,063 dengan 8 ordo makrofauna. Nilai H' yang lebih tinggi pada revegetasi umur 12 tahun dibandingkan hutan sekunder menunjukkan bahwa keanekaragaman tidak hanya dipengaruhi oleh tipe habitat, tetapi juga oleh jumlah ordo dan distribusi individu yang terbentuk pada masing-masing lokasi penelitian.

Nilai indeks kekayaan Margalef (DMg) tertinggi terdapat pada lahan revegetasi umur 12 tahun sebesar 1,447, diikuti hutan sekunder sebesar 1,348, revegetasi umur 4 tahun sebesar 1,249, sedangkan nilai terendah terdapat pada lahan sedang ditambang sebesar 0,813. Menurut Magurran (2004), indeks kekayaan Margalef menggambarkan banyaknya ordo dalam suatu komunitas tanpa mempertimbangkan pemerataan jumlah individu. Rendahnya nilai DMg pada lahan sedang ditambang menunjukkan bahwa hanya sedikit ordo yang mampu bertahan pada habitat yang masih mengalami gangguan. Setelah revegetasi dilakukan, nilai DMg meningkat pada revegetasi umur 4 tahun dan kembali meningkat pada revegetasi umur 12 tahun, yang menunjukkan bertambahnya jumlah ordo makrofauna selama proses pemulihan habitat. Hutan sekunder juga memiliki nilai DMg yang tinggi karena mampu mendukung keberadaan berbagai ordo makrofauna. Secara keseluruhan, pola tersebut menunjukkan bahwa revegetasi berperan dalam meningkatkan kekayaan ordo dibandingkan lahan yang masih aktif ditambang.

Nilai indeks kemerataan (E) tertinggi ditemukan pada lahan revegetasi umur 12 tahun sebesar 0,662, diikuti revegetasi umur 4 tahun sebesar 0,630, hutan

sekunder sebesar 0,511, sedangkan nilai terendah terdapat pada lahan sedang ditambang sebesar 0,309. Menurut Magurran (2004), indeks kemerataan menggambarkan tingkat keseragaman distribusi individu antarordo dalam suatu komunitas. Nilai kemerataan yang rendah pada lahan sedang ditambang menunjukkan adanya dominasi Hymenoptera sehingga distribusi individu kurang seimbang. Sebaliknya, nilai kemerataan yang lebih tinggi pada revegetasi umur 4 tahun dan terutama revegetasi umur 12 tahun menunjukkan bahwa distribusi individu antarordo menjadi lebih merata seiring bertambahnya umur revegetasi. Hutan sekunder juga memiliki nilai kemerataan yang tergolong sedang, meskipun lebih rendah dibandingkan kedua lahan revegetasi, yang menunjukkan bahwa distribusi individu antarordo pada masing-masing tipe lahan dipengaruhi oleh struktur komunitas yang terbentuk di lokasi penelitian.

Secara umum, nilai indeks keanekaragaman, kekayaan ordo, dan kemerataan menunjukkan adanya gradien perubahan komunitas makrofauna tanah dari lahan sedang ditambang menuju lahan revegetasi. Lahan sedang ditambang memiliki nilai seluruh indeks terendah, sedangkan revegetasi umur 4 tahun menunjukkan adanya peningkatan sebagai indikasi awal pemulihan komunitas makrofauna. Peningkatan tersebut semakin nyata pada revegetasi umur 12 tahun yang memiliki nilai seluruh indeks tertinggi. Sementara itu, hutan sekunder tetap menunjukkan komunitas makrofauna yang beragam dan dapat dijadikan sebagai ekosistem acuan dalam menilai proses pemulihan lahan pascatambang. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa bertambahnya umur revegetasi berkaitan dengan meningkatnya keanekaragaman, kekayaan ordo, dan kemerataan makrofauna tanah.

F. Hubungan Keanekaragaman Makrofauna Tanah dengan Beberapa Sifat Kimia Tanah

Hubungan antara sifat kimia tanah dengan keanekaragaman makrofauna tanah dianalisis menggunakan uji korelasi Pearson untuk mengetahui arah dan tingkat keeratan hubungan antara sifat kimia tanah dengan indeks keanekaragaman makrofauna tanah. Pengujian dilakukan pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$), sehingga hubungan dinyatakan nyata apabila nilai $p < 0,05$ dan sangat nyata apabila

$p < 0,01$. Hasil analisis korelasi Pearson disajikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan dalam bentuk korelogram pada Gambar 2.

Tabel 5. Hasil analisis korelasi Pearson antara sifat kimia tanah dan keanekaragaman makrofauna tanah

	H'	DMg	E	pH	C-organik	N	C/N
H'	1						
DMg	0,938**	1					
E	0,815**	0,686*	1				
pH	-0,493	-0,349	-0,619*	1			
C-organik	0,680*	0,593*	0,387	-0,236	1		
N	0,791**	0,652*	0,627*	-0,512	0,742**	1	
C/N	0,347	0,333	0,094	0,077	0,789**	0,198	1

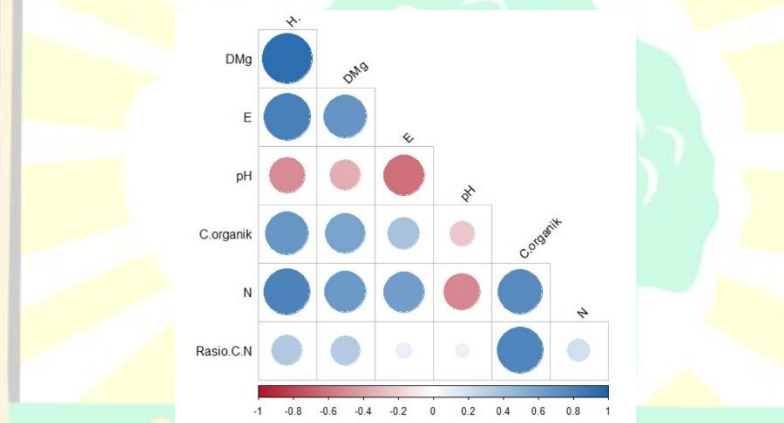
Keterangan: * = korelasi nyata pada taraf signifikansi 5% ($p < 0,05$); ** = korelasi sangat nyata pada taraf signifikansi 1% ($p < 0,01$), H' (indeks keanekaragaman), DMg (indeks kekayaan ordo margalef), dan E (indeks kemerataan).

Hasil uji korelasi Pearson pada Tabel 5 menunjukkan bahwa hubungan antara sifat kimia tanah dengan indeks keanekaragaman makrofauna berbeda pada setiap parameter yang diamati. Kandungan C-organik dan N-total berkorelasi positif signifikan hingga sangat signifikan dengan indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H'), indeks kekayaan Margalef (DMg), sedangkan N-total juga berkorelasi positif signifikan dengan indeks kemerataan (E). Sebaliknya, pH hanya menunjukkan korelasi negatif yang signifikan dengan indeks kemerataan (E), sementara rasio C/N tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan seluruh indeks keanekaragaman. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa C-organik berkaitan dengan keanekaragaman dan kekayaan makrofauna, sedangkan N-total berkaitan dengan keanekaragaman, kekayaan, dan kemerataan komunitas, sementara pH yang lebih tinggi cenderung berkaitan dengan penurunan kemerataan komunitas makrofauna.

Nilai koefisien korelasi (r) menunjukkan arah dan kekuatan hubungan antarvariabel. Hubungan positif terkuat ditemukan antara N-total dan indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H') ($r = 0,791$; $p < 0,01$), sedangkan hubungan positif terendah yang masih signifikan terdapat antara C-organik dengan indeks kekayaan Margalef (DMg) ($r = 0,593$; $p < 0,05$). Selain itu, N-total juga berkorelasi positif dengan indeks kemerataan (E) ($r = 0,627$; $p < 0,05$), sedangkan pH

berkorelasi negatif dengan indeks tersebut ($r = -0,619$; $p < 0,05$). Hasil ini sejalan dengan kondisi di lapangan, dimana lahan revegetasi umur 12 tahun memiliki kandungan N-total tertinggi sekaligus nilai H', DMg, dan E tertinggi dibandingkan lahan lainnya.

Secara keseluruhan, N-total merupakan sifat kimia tanah yang memiliki hubungan paling kuat dengan struktur komunitas makrofauna, diikuti oleh C-organik yang berkorelasi positif dengan keanekaragaman dan kekayaan. Sebaliknya, pH hanya berkorelasi dengan kemerataan dengan arah hubungan negatif, sedangkan rasio C/N tidak menunjukkan hubungan yang signifikan. Pola hubungan tersebut divisualisasikan lebih lanjut melalui korelogram pada Gambar 6 untuk memperjelas arah, kekuatan, dan tingkat signifikansi korelasi.



Gambar 6. Korelogram hubungan antar parameter sifat kimia dan keanekaragaman makrofauna tanah

Keterangan: Warna merah menunjukkan korelasi negatif, sedangkan warna biru menunjukkan korelasi positif. Ukuran lingkaran menunjukkan kekuatan hubungan (semakin besar lingkaran semakin kuat korelasinya). Skala korelasi ditunjukkan pada legenda warna dari -1 (negatif sempurna) hingga +1 (positif sempurna)

Korelogram pada Gambar 6 memberikan visualisasi yang lebih jelas mengenai arah dan kekuatan hubungan antara sifat kimia tanah dengan keanekaragaman makrofauna tanah. Warna biru menunjukkan korelasi positif, sedangkan warna merah menunjukkan korelasi negatif. Semakin besar ukuran lingkaran dan semakin pekat warnanya menunjukkan hubungan yang semakin kuat. Secara umum, korelogram memperlihatkan bahwa kandungan C-organik dan N-total memiliki hubungan positif yang relatif kuat dengan indeks keanekaragaman (H') dan indeks kekayaan Margalef (DMg). Selain itu, N-total juga menunjukkan hubungan positif dengan indeks kemerataan (E), sedangkan pH menunjukkan hubungan negatif dengan indeks tersebut. Di sisi lain, rasio C/N menunjukkan

hubungan yang relatif lemah dengan seluruh indeks keanekaragaman makrofauna tanah.

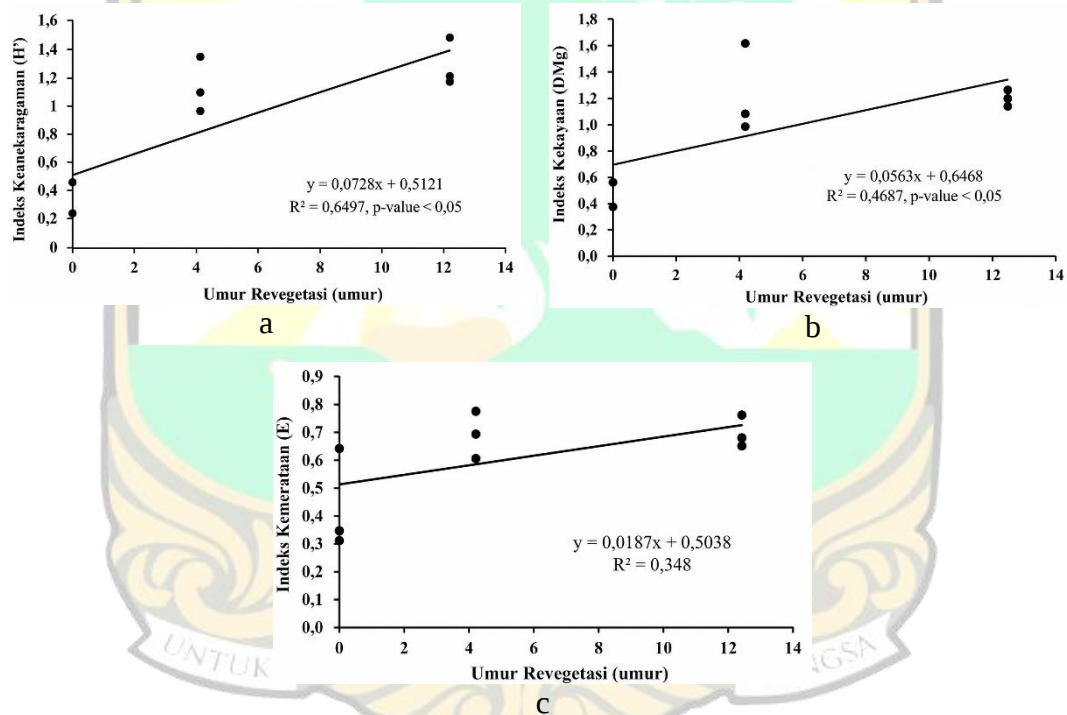
Hubungan positif antara kandungan C-organik dan N-total dengan indeks keanekaragaman (H') serta indeks kekayaan (DMg) menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut berkaitan dengan terbentuknya komunitas makrofauna yang lebih beragam dan kaya ordo. Kandungan C-organik berperan sebagai sumber energi bagi organisme tanah dan meningkatkan ketersediaan bahan organik, sedangkan nitrogen mendukung pertumbuhan vegetasi serta akumulasi serasah yang menyediakan sumber makanan dan habitat bagi makrofauna. Selain itu, korelasi positif antara N-total dan indeks kemerataan (E) menunjukkan bahwa lokasi dengan kandungan nitrogen yang lebih tinggi cenderung memiliki penyebaran individu antarordo yang lebih merata. Hasil ini sejalan dengan Wasis *et al.* (2025) yang melaporkan bahwa peningkatan kandungan bahan organik berkaitan dengan pemulihan komunitas fauna tanah pada lahan revegetasi pascatambang. Temuan tersebut juga didukung oleh Ayuke *et al.* (2009) yang menyatakan bahwa bahan organik merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi struktur komunitas fauna tanah melalui peningkatan ketersediaan sumber energi dan kompleksitas habitat.

Berbeda dengan C-organik dan N-total, pH menunjukkan kecenderungan hubungan negatif dengan indeks kemerataan (E), sedangkan hubungannya dengan indeks keanekaragaman dan kekayaan relatif lebih lemah. Kondisi tersebut diduga karena seluruh lokasi penelitian memiliki pH yang relatif seragam dan termasuk kategori sangat masam, sehingga variasi pH yang ada belum cukup besar untuk membedakan struktur komunitas makrofauna. Sementara itu, rasio C/N juga memperlihatkan hubungan yang lemah terhadap seluruh indeks keanekaragaman, sehingga pada penelitian ini belum tampak sebagai faktor yang berkaitan erat dengan struktur komunitas makrofauna tanah. Secara keseluruhan, korelogram memperjelas bahwa variasi kandungan N-total dan C-organik memiliki hubungan yang lebih kuat dengan struktur komunitas makrofauna dibandingkan pH maupun rasio C/N pada lahan pascatambang yang diteliti. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perbaikan kualitas tanah selama proses revegetasi, terutama melalui peningkatan bahan organik dan nitrogen, berkaitan dengan terbentuknya komunitas

makrofauna yang lebih beragam, kaya ordo dan lebih merata. Oleh karena itu, komunitas makrofauna tanah berpotensi digunakan sebagai salah satu indikator biologis dalam mengevaluasi keberhasilan revegetasi dan proses pemulihan kualitas habitat pada lahan pascatambang.

G. Analisis Regresi Linear antara Usia Revegetasi dengan Keanekaragaman Makrofauna Tanah

Analisis regresi linear dilakukan untuk mengetahui hubungan antara usia revegetasi dengan indeks keanekaragaman makrofauna tanah (H'), indeks kekayaan Margalef (DMg) dan indeks kemerataan (E). Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana peningkatan umur revegetasi berpengaruh terhadap perubahan tingkat keanekaragaman makrofauna tanah pada lahan pascatambang batubara. Hasil analisis regresi linear disajikan pada Gambar 14.



Gambar 7. Regresi linear sederhana yang menggambarkan hubungan antara umur revegetasi dengan indeks keanekaragaman, a. umur revegetasi dengan indeks keanekaragaman (H'), b. umur revegetasi dengan indeks kekayaan margalef (DMg), c. umur revegetasi dengan indeks kemerataan (E)

Analisis regresi linear dilakukan untuk mengetahui hubungan antara umur revegetasi dengan indeks keanekaragaman (H'), indeks kekayaan (DMg), dan indeks kemerataan (E) makrofauna tanah pada lahan pascatambang batubara. Hasil analisis menunjukkan bahwa umur revegetasi memiliki hubungan positif terhadap

ketiga indeks tersebut, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien regresi yang bernilai positif pada masing-masing model. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambah umur revegetasi, maka nilai indeks keanekaragaman, kekayaan, dan pemerataan makrofauna tanah cenderung meningkat. Namun demikian, hasil uji signifikansi menunjukkan bahwa hubungan tersebut hanya signifikan pada indeks keanekaragaman (H' ; $p = 0,0087$) dan indeks kekayaan (DMg ; $p = 0,0419$), sedangkan hubungan antara umur revegetasi dengan indeks pemerataan (E) tidak signifikan ($p = 0,0945$).

Persamaan regresi pada indeks keanekaragaman (H') adalah $y = 0,0728x + 0,5121$ dengan nilai $R^2 = 0,6497$, yang menunjukkan bahwa umur revegetasi mampu menjelaskan 64,97% variasi indeks keanekaragaman, sedangkan 35,03% sisanya diduga dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam model regresi. Hasil uji signifikansi menunjukkan bahwa hubungan tersebut signifikan ($p = 0,0087$), sehingga umur revegetasi berpengaruh nyata terhadap peningkatan indeks keanekaragaman makrofauna tanah. Pada indeks kekayaan (DMg), diperoleh persamaan regresi $y = 0,0563x + 0,6468$ dengan nilai $R^2 = 0,4687$, yang berarti umur revegetasi mampu menjelaskan 46,87% variasi indeks kekayaan. Hubungan ini juga signifikan ($p = 0,0419$), meskipun kemampuan model dalam menjelaskan variasi indeks kekayaan lebih rendah dibandingkan indeks keanekaragaman. Sementara itu, indeks pemerataan (E) memiliki persamaan regresi $y = 0,0187x + 0,5038$ dengan nilai $R^2 = 0,3480$, sehingga hanya 34,80% variasi indeks pemerataan yang dapat dijelaskan oleh umur revegetasi. Meskipun menunjukkan kecenderungan hubungan positif, hasil uji signifikansi menunjukkan bahwa model regresi tersebut tidak signifikan ($p = 0,0945$), sehingga umur revegetasi belum memberikan pengaruh yang nyata terhadap indeks pemerataan makrofauna tanah.

Peningkatan indeks keanekaragaman dan kekayaan seiring bertambahnya umur revegetasi menunjukkan bahwa proses revegetasi berperan dalam memperbaiki kondisi lingkungan sehingga semakin mendukung kehidupan makrofauna tanah. Pada penelitian ini, lahan revegetasi berumur 12 tahun memiliki nilai C-organik dan N-total yang lebih tinggi dibandingkan lahan revegetasi 4 tahun dan lahan sedang tambang. Selain itu, kondisi iklim mikro pada lahan revegetasi

yang lebih tua juga menunjukkan suhu udara yang lebih rendah, kelembapan yang lebih tinggi, dan intensitas cahaya yang lebih rendah dibandingkan lahan sedang tambang. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan yang lebih sesuai bagi kehidupan makrofauna tanah sehingga jumlah jenis yang mampu berkolonisasi meningkat, yang tercermin dari meningkatnya nilai indeks keanekaragaman dan indeks kekayaan. Temuan ini sejalan dengan Sheoran *et al.* (2010) yang menyatakan bahwa revegetasi merupakan tahapan penting dalam reklamasi lahan pascatambang karena mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga mendukung pemulihan komunitas organisme tanah.

Berbeda dengan indeks keanekaragaman dan kekayaan, hubungan antara umur revegetasi dengan indeks kemerataan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan ($p > 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa bertambahnya umur revegetasi belum mampu menghasilkan distribusi individu yang merata antarordo makrofauna tanah. Meskipun jumlah ordo cenderung meningkat pada lahan revegetasi yang lebih tua, ordo Hymenoptera, khususnya famili Formicidae, tetap mendominasi jumlah individu pada seluruh tipe lahan sehingga distribusi individu antarordo belum merata. Menurut Magurran (2004), nilai kemerataan dipengaruhi oleh distribusi individu antar takson dalam suatu komunitas, sehingga dominansi satu atau beberapa takson dapat menyebabkan nilai kemerataan tetap rendah meskipun jumlah takson meningkat.

Secara keseluruhan, hasil analisis regresi menunjukkan bahwa umur revegetasi berpengaruh nyata terhadap peningkatan keanekaragaman dan kekayaan makrofauna tanah, tetapi belum berpengaruh nyata terhadap kemerataan komunitas. Nilai koefisien determinasi menunjukkan bahwa umur revegetasi memiliki kemampuan terbesar dalam menjelaskan variasi indeks keanekaragaman ($R^2 = 0,6497$), diikuti indeks kekayaan ($R^2 = 0,4687$) dan indeks kemerataan ($R^2 = 0,3480$). Hal ini mengindikasikan bahwa semakin lama proses revegetasi berlangsung, semakin besar peluang terbentuknya habitat yang mampu mendukung keberadaan berbagai kelompok makrofauna tanah. Namun demikian, umur revegetasi bukan merupakan satu-satunya faktor yang memengaruhi struktur komunitas makrofauna tanah. Variasi ketiga indeks tersebut juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan lain yang diukur dalam penelitian ini, seperti kandungan C-

organik, N-total, pH tanah, suhu udara, kelembapan udara, dan intensitas cahaya, yang secara bersama-sama menentukan kualitas habitat bagi makrofauna tanah.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keanekaragaman makrofauna tanah berpotensi dimanfaatkan sebagai indikator biologis dalam mengevaluasi keberhasilan revegetasi lahan pascatambang batubara. Peningkatan umur revegetasi diikuti oleh meningkatnya keanekaragaman dan kelimpahan makrofauna tanah yang sejalan dengan tingginya kandungan C-organik dan N-total, sehingga menunjukkan bahwa proses pemulihan tanah tidak hanya tercermin dari pertumbuhan vegetasi, tetapi juga dari perkembangan komunitas organisme tanah.

Dominasi ordo Hymenoptera pada seluruh tipe lahan menunjukkan bahwa kelompok ini memiliki toleransi ekologis yang tinggi sehingga keberadaan maupun dominasinya belum dapat dijadikan indikator tunggal keberhasilan revegetasi. Sebaliknya, kemunculan ordo Megadrilacea (cacing tanah) hanya pada hutan sekunder dan revegetasi umur 12 tahun mengindikasikan bahwa kelompok tersebut cenderung dijumpai pada habitat dengan kondisi yang lebih baik. Oleh karena itu, evaluasi keberhasilan revegetasi sebaiknya didasarkan pada perubahan struktur komunitas makrofauna secara keseluruhan. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi PT Kuansing Inti Makmur untuk menjadikan keanekaragaman makrofauna sebagai parameter biologis pelengkap dalam program monitoring reklamasi, bersama dengan indikator pertumbuhan vegetasi.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil. Identifikasi makrofauna tanah hanya dilakukan hingga tingkat morfospesies sehingga belum menggambarkan keragaman pada tingkat spesies. Parameter sifat tanah yang dianalisis juga terbatas pada pH, C-organik, dan N-total, sehingga faktor lain yang memengaruhi keanekaragaman makrofauna tanah belum dievaluasi. Selain itu, penelitian hanya dilakukan pada satu perusahaan dengan empat tipe lahan, sehingga hasilnya merepresentasikan kondisi di PT Kuansing Inti Makmur, Kabupaten Bungo, Jambi, dan belum dapat digeneralisasikan pada lahan pascatambang batubara dengan karakteristik yang berbeda. Meskipun demikian, penelitian ini memberikan informasi mengenai pola perubahan keanekaragaman makrofauna tanah pada lahan pascatambang dengan umur revegetasi yang berbeda sebagai dasar bagi penelitian selanjutnya.