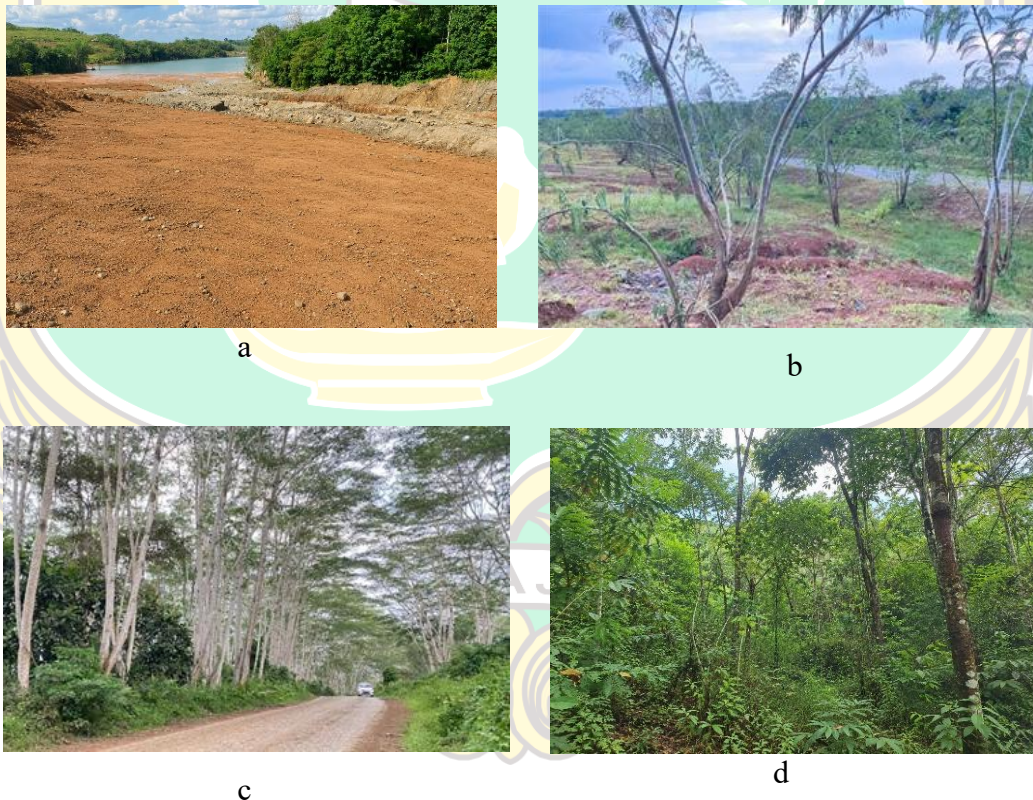


BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Area pertambangan batubara PT Kuansing Inti Makmur yang terletak di Desa Tanjung Belit, Kecamatan Jujuhan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi dipilih sebagai lokasi penelitian. Pradana (2022) menyatakan perusahaan ini memiliki luas Izin Usaha Pertambangan (IUP) sebesar 2.896 ha yang terbagi menjadi dua wilayah operasional, yaitu KIM *Block* Barat dan KIM *Block* Timur. Suhu udara yang diukur di lokasi menggunakan alat termohigrometer berkisar antara 30°C – 40°C. Lahan yang dijadikan lokasi pengambilan sampel meliputi lahan sedang ditambang, lahan revegetasi berusia 4 tahun, lahan revegetasi berusia 12 tahun dan hutan sekunder yang digunakan sebagai kontrol. Kondisi lingkungan penelitian pada setiap jenis lahan dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel tanah di lokasi penelitian a) Lahan sedang ditambang, b) Lahan revegetasi usia 4 tahun, c) Lahan revegetasi usia 12 tahun, d) Hutan sekunder.

Perbedaan kondisi vegetasi dan penutupan lahan pada masing-masing lokasi diduga memengaruhi sifat kimia tanah sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi proses pemulihan tanah pascatambang. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan pada Gambar 1, lahan sedang ditambang menunjukkan kondisi lahan yang masih terbuka. Permukaan lahan didominasi oleh material tanah penutup (*top soil*) yang telah dipindahkan selama kegiatan penambangan serta terdapat sejumlah fragmen batuan pada beberapa bagian permukaan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lahan masih berada pada tahap operasional penambangan dan belum mengalami revegetasi.

Pada lahan sedang ditambang gangguan fisik akibat kegiatan penambangan menyebabkan kondisi tanah menjadi kurang mendukung bagi pertumbuhan vegetasi. Menurut Chen *et al.* (2021) hilangnya tutupan vegetasi mengakibatkan permukaan tanah lebih rentan terhadap erosi, pencucian unsur hara, serta perubahan suhu dan kelembapan yang lebih ekstrem dibandingkan lahan yang telah direvegetasi. Menurut Fitriani *et al.* (2018) minimnya masukan bahan organik dari serasah tanaman menyebabkan proses pembentukan dan pemulihan kesuburan tanah berlangsung relatif lambat. Meskipun sampel tanah yang digunakan berasal dari tanah penutup yang dipindahkan selama proses penambangan, proses pemindahan, penimbunan, dan penataan kembali tanah dapat menyebabkan terjadinya degradasi kualitas tanah. Penurunan kandungan bahan organik, terganggunya struktur tanah, serta menurunnya aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam siklus hara diduga merupakan dampak dari aktivitas tersebut. Secara umum lahan sedang ditambang merepresentasikan kondisi awal lahan yang mengalami gangguan akibat aktivitas penambangan. Oleh karena itu lokasi ini digunakan sebagai pembanding untuk mengevaluasi perubahan karakteristik tanah yang terjadi selama proses revegetasi dan pemulihan ekosistem pada lahan pascatambang.

Pada gambar lahan revegetasi usia 4 tahun menunjukkan perkembangan vegetasi yang lebih baik dibandingkan lahan sedang ditambang. Pada lokasi ini telah tumbuh tanaman revegetasi yang didominasi oleh tanaman sengon (*Falcataria moluccana*) berusia muda yang tersebar di seluruh area pengamatan. Penutupan vegetasi mulai terbentuk, meskipun masih terdapat ruang terbuka di

antara tanaman sehingga tajuk belum menutupi permukaan lahan secara menyeluruh. Keberadaan vegetasi pada lahan ini mulai memberikan kontribusi terhadap perbaikan kondisi tanah melalui penambahan biomassa dan serasah tanaman. Tetapi pada usia revegetasi tanaman sengon yang masih relatif muda menyebabkan proses akumulasi bahan organik dan pemulihan kualitas tanah belum berlangsung secara optimal.

Lahan revegetasi usia 12 tahun menunjukkan kondisi vegetasi yang lebih berkembang dibandingkan lahan revegetasi usia 4 tahun, ditandai oleh tegakan pohon yang lebih rapat, ukuran tanaman yang lebih besar, dan tajuk yang mulai saling menutupi. Menurut Wang *et al.* (2020), penutupan tajuk yang semakin rapat membantu mengurangi dampak curah hujan terhadap permukaan tanah sehingga menekan risiko erosi. Selain itu, akumulasi serasah yang semakin banyak diduga menjadi salah satu faktor yang mendukung perbaikan sifat kimia tanah. Menurut Sudomo dan Widiyanto (2017) tanaman sengon (*Falcataria moluccana*) memiliki produktivitas serasah sekitar 800 kg ha⁻¹ bulan⁻¹. Pada lokasi penelitian, masukan serasah diduga tidak hanya berasal dari tanaman sengon sebagai tanaman revegetasi utama, tetapi juga dari tumbuhan bawah atau semak yang tumbuh secara alami di bawah tegakan sengon. Serasah dari kedua sumber vegetasi tersebut selanjutnya mengalami dekomposisi sehingga kandungan bahan organik dan unsur hara tanah menjadi lebih tinggi. Selain itu, perkembangan sistem perakaran vegetasi turut mendukung stabilitas tanah dan siklus hara. Kondisi tersebut kemudian dibandingkan dengan hutan sekunder sebagai pembanding untuk menggambarkan karakteristik tanah sebelum mengalami kegiatan penambangan.

Hutan sekunder yang digunakan sebagai kontrol merupakan area penghijauan perusahaan di sekitar lokasi penelitian yang belum pernah mengalami kegiatan penambangan. Area ini ditumbuhi vegetasi yang berkembang secara alami, didominasi oleh semak dan beberapa jenis pohon berdiameter relatif kecil hingga sedang dan tajuk yang belum membentuk penutupan kanopi yang belum rapat sempurna, hal tersebut menunjukkan karakteristik hutan sekunder. Lokasi ini dipilih sebagai pembanding karena memiliki jenis tanah yang serupa dan berada dalam kawasan lokasi penelitian, lalu dimanfaatkan sebagai dasar dalam

mengevaluasi perubahan sifat kimia tanah akibat aktivitas penambangan maupun proses revegetasi.

B. Karakteristik Sifat Kimia Tanah

1. pH H₂O

Penilaian terhadap sifat kimia tanah dilakukan melalui beberapa parameter, termasuk pengukuran pH H₂O tanah. Parameter ini dapat memberikan gambaran mengenai tingkat kesuburan tanah. Parameter ini juga dapat memberikan informasi mengenai perubahan sifat kimia tanah akibat pengelolaan maupun penggunaan lahan di PT Kuansing Inti Makmur, Bungo, Jambi. Hasil analisis sidik ragam pH H₂O tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. pH H₂O pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	pH	Kriteria
Sedang ditambang	4,32a	Sangat Masam
Revegetasi usia 4 tahun	4,23a	Sangat Masam
Revegetasi usia 12 tahun	4,19a	Sangat Masam
Hutan sekunder	4,25a	Sangat Masam

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 2, diketahui bahwa nilai pH H₂O tanah tidak berbeda nyata antar jenis lahan. Hasil analisis mengindikasikan bahwa pH tanah di seluruh lokasi tergolong sangat masam. Berdasarkan peta jenis tanah lokasi penelitian termasuk tanah Latosol yang setara dengan ordo Oxisol dalam sistem USDA *Soil Taxonomy*. Kondisi tersebut disebabkan oleh tanah Oxisol yang telah mengalami perkembangan pedogenik lanjut dengan tingkat pelapukan yang tinggi.

Menurut Saptiningsih *et al.* (2015) proses pelapukan dan pencucian yang berlangsung secara intensif mengakibatkan berkurangnya kation-kation basa dalam tanah, sementara senyawa besi oksida dan aluminium oksida terakumulasi dan kemudian akumulasi senyawa tersebut menyebabkan reaksi tanah menjadi lebih masam dan pH tanah Oxisol umumnya menjadi tergolong rendah. Gautama (2019) menyatakan selain faktor tanah, aktivitas penambangan batubara dapat

mempercepat pengasaman tanah karena selama proses oksidasi, mineral sulfida seperti pirit (FeS_2) melepaskan ion H^+ yang berkontribusi terhadap peningkatan keasaman tanah atau air yang berkontribusi terhadap penurunan pH tanah.

Kondisi tanah yang sangat masam pada lahan sedang ditambang diduga berkaitan dengan pengaruh aliran Air Asam Tambang (AAT) di sekitar lokasi penelitian. Pembentukan air asam tambang terjadi disebabkan oleh terbentuknya asam sulfat selama oksidasi mineral sulfida, proses tersebut meningkatkan konsentrasi ion H^+ sehingga pH tanah dan air di sekitar lokasi mengalami penurunan (Sari *et al.*, 2020). Penurunan pH tersebut disebabkan oleh peningkatan konsentrasi ion H^+ dalam larutan tanah menyebabkan reaksi tanah menjadi semakin asam.

Meskipun terdapat variasi nilai pH antar lahan, secara statistik perbedaan tersebut tidak berbeda nyata sehingga revegetasi hingga usia 12 tahun belum mampu mengubah tingkat kemasaman tanah secara signifikan. Meskipun telah dilakukan revegetasi selama 4 dan 12 tahun nilai pH tanah masih di kategori sangat masam. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pemulihan tanah berlangsung lambat terutama pada tanah Oxisol yang memiliki daya penyangga kemasaman cukup tinggi.

Tidak adanya perbedaan nyata menunjukkan bahwa proses revegetasi tanaman sengon hingga usia 12 tahun belum mampu mengubah reaksi tanah secara signifikan karena sifat kemasaman tanah lebih banyak dipengaruhi oleh bahan induk dan tingkat pelapukan tanah dibandingkan oleh perubahan tutupan vegetasi. Salah satu parameter yang dapat dijadikan untuk mengevaluasi tingkat pemulihan tanah adalah karbon organik. Kandungannya mencerminkan akumulasi bahan organik yang berperan penting dalam meningkatkan kesuburan serta kualitas tanah.

2. C-organik

Salah satu indikator digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kualitas tanah pada lahan pascatambang adalah kandungan C-organik tanah. Hasil analisis sidik ragam C-organik pada hutan sekunder, lahan sedang ditambang, serta lahan revegetasi usia 4 tahun dan 12 tahun dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. C-organik pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	C-organik (%)	Kriteria
Sedang ditambang	0,19b	Sangat Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	0,44b	Sangat Rendah
Revegetasi usia 12 tahun	1,10a	Rendah
Hutan sekunder	1,11a	Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 3, diketahui bahwa kandungan C-organik pada hutan sekunder sebesar 1,11% tidak berbeda nyata dengan lahan revegetasi usia 12 tahun sebesar 1,10% dan masuk dalam kriteria rendah. Sebaliknya, kedua lahan tersebut berbeda nyata dengan lahan yang sedang ditambang sebesar 0,19% dan lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 0,44% dan masuk kriteria sangat rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon selama 12 tahun mampu meningkatkan kandungan C-organik hingga mendekati kondisi hutan sekunder, sedangkan revegetasi tanaman sengon usia 4 tahun belum menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan lahan yang sedang ditambang.

Kandungan C-organik tanah sangat dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi sebagai sumber utama bahan organik. Vegetasi dari tanaman sengon menghasilkan serasah dan biomassa akar yang mengalami dekomposisi sehingga menyumbang karbon organik ke dalam tanah. Perbedaan tingkat tutupan vegetasi menyebabkan variasi kandungan C-organik, sehingga lahan dengan vegetasi yang berkembang lebih baik biasanya memiliki kandungan C-organik yang lebih baik dari pada lahan yang vegetasinya masih terbatas. Rendahnya kandungan C-organik pada lahan sedang ditambang menunjukkan bahwa aktivitas penambangan telah menyebabkan degradasi sifat tanah terutama melalui hilangnya lapisan tanah atas (*top soil*). Lapisan *top soil* merupakan bagian tanah yang umumnya mengandung akumulasi bahan organik tertinggi karena menjadi tempat penimbunan serasah, akar halus, dan aktivitas mikroorganisme. Menurut Erfandi (2017), kegiatan penambangan menyebabkan hilangnya lapisan tanah atas, kerusakan struktur tanah, penurunan aktivitas mikroba serta berkurangnya ketersediaan unsur hara yang pada akhirnya menurunkan kandungan bahan organik.

Selain itu, hilangnya tutupan vegetasi mengurangi masukan serasah dan biomassa yang berperan sebagai sumber karbon tanah. Peningkatan suhu permukaan tanah yang terjadi pada lahan terbuka diduga mempercepat proses dekomposisi bahan organik. Akibatnya sebagian karbon organik teroksidasi menjadi CO₂ dan dilepaskan ke atmosfer yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kandungan C-organik tanah. Brady dan Weil (2017) menjelaskan bahwa peningkatan suhu tanah dapat mempercepat dekomposisi bahan organik dan meningkatkan kehilangan karbon dari sistem tanah.

Meskipun kandungan C-organik pada hutan sekunder dan lahan revegetasi usia 12 tahun lebih tinggi dibandingkan lahan lainnya, keduanya masih berada pada kategori rendah. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh karakteristik tanah di lokasi penelitian yang termasuk Latosol atau setara dengan Oxisol dalam sistem USDA *Soil Taxonomy*. Kondisi curah hujan yang tinggi meningkatkan intensitas pelapukan mineral serta pencucian unsur hara dari lapisan tanah, sehingga tanah Oxisol berkembang sebagai tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut. Menurut Sutrisno *et al.* (2023), tingkat pelapukan yang tinggi pada tanah Oxisol dapat membatasi akumulasi bahan organik karena dekomposisi berlangsung relatif cepat dan proses pencucian terjadi secara intensif. Aktivitas dekomposer berlangsung lebih intensif pada wilayah beriklim tropis basah, sehingga proses penguraian bahan organik semakin cepat dan akumulasi karbon organik di dalam tanah menjadi relatif rendah.

Kandungan C-organik mulai terlihat meningkat pada lahan revegetasi usia 4 tahun jika dibandingkan dengan lahan yang sedang ditambang. Bertambahnya kandungan tersebut diduga berasal dari masukan bahan organik yang dihasilkan tanaman sengon, seperti guguran daun, ranting, akar mati, dan eksudat akar. Namun, menurut Iskandar *et al.* (2022) kandungan karbon organik yang masih sangat rendah mengindikasikan bahwa proses pemulihan pada tanah belum berkembang secara optimal. Hal ini karena pembentukan bahan organik tanah merupakan proses yang berlangsung secara bertahap, mulai dari produksi biomassa, penambahan serasah, dekomposisi, hingga terbentuknya humus.

Peningkatan yang lebih nyata terlihat pada lahan revegetasi usia 12 tahun dengan kandungan C-organik sebesar 1,10%. Nilai tersebut hampir sama dengan

kandungan C-organik pada hutan sekunder sebesar 1,11%. Hasil ini menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon yang berlangsung dalam jangka waktu lebih lama mampu memperbaiki kandungan bahan organik tanah secara signifikan. Maka diduga semakin lama usia revegetasi tanaman sengon semakin besar biomassa vegetasi yang dihasilkan dan semakin banyak serasah yang dikembalikan ke permukaan tanah. Akumulasi serasah tersebut menjadi sumber utama karbon organik yang selanjutnya diuraikan oleh mikroorganisme dan sebagian akan membentuk humus yang relatif stabil dalam tanah.

Keberhasilan reklamasi lahan dapat dinilai melalui kandungan bahan organik, karena komponen ini berkontribusi penting terhadap sifat kimia tanah. Pratiwi *et al.* (2018) selain meningkatkan struktur tanah, bahan organik juga berfungsi meningkatkan kapasitas menahan air, KTK, serta menjadi sumber energi bagi mikroorganisme yang hidup di dalam tanah. Kesamaan kandungan C-organik antara lahan revegetasi usia 12 tahun dan hutan sekunder memperlihatkan proses pemulihan akumulasi bahan organik tanah telah meningkat.

Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa kandungan C-organik pada hutan sekunder dan revegetasi usia 12 tahun masih berada pada kategori rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kemampuan tanah dalam mengakumulasi bahan organik masih terbatas. Rendahnya kandungan C-organik pada hutan sekunder menunjukkan bahwa faktor lingkungan setempat, seperti jenis tanah, tingkat pelapukan lanjut, curah hujan, dan laju dekomposisi yang cepat kemungkinan lebih berpengaruh dibandingkan penggunaan lahannya. Dengan demikian pada lokasi penelitian menunjukkan rendahnya kandungan C-organik yang tidak hanya disebabkan oleh aktivitas penambangan, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik alami tanah dan kondisi iklim yang mendukung percepatan siklus bahan organik.

Dinamika nitrogen tanah pada lahan revegetasi sengon dipengaruhi oleh peningkatan kandungan C-organik. Hal ini karena sebagian besar nitrogen di dalam tanah berada dalam bentuk organik yang berasosiasi dengan bahan organik tanah. Akibatnya, bertambahnya kandungan C-organik umumnya diikuti oleh peningkatan kandungan N-total. Havlin *et al.* (2014) menjelaskan bahwa lebih dari 90% nitrogen tanah tersimpan dalam bentuk organik yang terikat pada bahan

organik tanah. Dengan demikian, analisis N-total dapat digunakan sebagai indikator tambahan untuk mengetahui tingkat keberhasilan proses pemulihan kesuburan tanah pada area pascatamban.

3. N-total

N-total merupakan parameter yang menunjukkan jumlah keseluruhan kandungan nitrogen tanah yang meliputi senyawa organik maupun anorganik. Hasil analisis digunakan untuk menguji perbedaan kandungan N-total tanah pada dengan jenis lahan yang berbeda pada Tabel 4.

Tabel 4. N-total pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian.

Jenis Lahan	N-total (%)	Kriteria
Sedang ditambang	0,07b	Sangat Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	0,11ab	Rendah
Revegetasi usia 12 tahun	0,17a	Rendah
Hutan sekunder	0,12ab	Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 4, diketahui bahwa lahan revegetasi usia 12 tahun memiliki kandungan N-total tertinggi sebesar 0,17%, sedangkan lahan yang sedang ditambang memiliki N-total terendah sebesar 0,07%. Kedua jenis lahan berbeda nyata satu sama lain. Sementara itu, hutan sekunder sebesar 0,12% dan lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 0,11% tidak berbeda nyata baik dengan lahan revegetasi usia 12 tahun maupun lahan yang sedang ditambang. Berdasarkan kriteria kandungan N-total tergolong sangat rendah pada lahan yang sedang ditambang, sedangkan hutan sekunder serta lahan revegetasi usia 4 dan 12 tahun tergolong rendah.

Rendahnya kandungan N-total pada lahan yang sedang ditambang menunjukkan bahwa aktivitas penambangan menyebabkan berkurangnya cadangan nitrogen tanah. Kondisi ini terutama disebabkan oleh pengupasan lapisan *top soil*, yaitu lapisan tanah yang umumnya mengandung bahan organik dan nitrogen paling tinggi. Selain itu, minimnya tutupan vegetasi menyebabkan hampir tidak ada masukan serasah maupun biomassa tanaman yang dapat menjadi sumber nitrogen baru bagi tanah. Brady dan Weil (2017) bahwa kandungan N-

total tanah sangat dipengaruhi oleh keberadaan bahan organik, karena sebagian besar nitrogen tersimpan dalam bentuk organik.

Lahan revegetasi usia 4 tahun menunjukkan peningkatan kandungan N-total menjadi 0,11%, meskipun masih berada pada kategori rendah. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa proses pemulihan nitrogen tanah telah mulai berlangsung sejak dilaksanakannya revegetasi. Tanaman sengon (*Falcataria moluccana*) sebagai spesies revegetasi utama mulai memberikan masukan nitrogen melalui serasah daun, ranting, akar yang mati, serta eksudat akar yang kemudian mengalami dekomposisi menjadi bahan organik tanah. Selain itu, sengon merupakan tanaman leguminosa yang mampu membentuk simbiosis dengan bakteri penambat nitrogen (*Rhizobium*), sehingga berpotensi menambah nitrogen ke dalam tanah. Namun, usia revegetasi yang masih relatif muda menyebabkan biomassa dan serasah sengon yang dihasilkan belum banyak, sehingga akumulasi bahan organik dan nitrogen tanah masih terbatas.

Kandungan N-total tertinggi ditemukan pada lahan revegetasi usia 12 tahun, yaitu sebesar 0,17%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin lama revegetasi berlangsung, semakin besar kontribusinya terhadap pemulihan nitrogen tanah. Pada usia revegetasi yang lebih tua, tegakan sengon telah menghasilkan biomassa dan serasah dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan revegetasi usia 4 tahun. Selain itu, masukan serasah pada lahan revegetasi usia 12 tahun diduga tidak hanya berasal dari tanaman sengon, tetapi juga dari tumbuhan bawah atau semak yang tumbuh secara alami di bawah tegakan sengon. Akumulasi serasah dari berbagai jenis vegetasi tersebut selama bertahun-tahun meningkatkan kandungan bahan organik tanah, yang selanjutnya memperbesar cadangan nitrogen organik. Hasil penelitian ini mendukung pernyataan Farzadfar *et al.* (2021) bahwa sebagian besar nitrogen di dalam tanah terikat pada bahan organik, sehingga peningkatan akumulasi bahan organik cenderung diikuti oleh meningkatnya kandungan N-total tanah.

Hutan sekunder memiliki kandungan N-total sebesar 0,12%, lebih rendah dibandingkan lahan revegetasi usia 12 tahun, tetapi tidak berbeda nyata. Kondisi ini menunjukkan bahwa revegetasi dengan dominasi sengon mampu menghasilkan masukan biomassa dan serasah yang cukup besar sehingga

berpotensi meningkatkan cadangan nitrogen tanah. Selain berasal dari dekomposisi serasah, peningkatan nitrogen pada lahan revegetasi juga diduga dipengaruhi oleh kemampuan sengon sebagai tanaman penambat nitrogen melalui simbiosis dengan bakteri *Rhizobium*. Menurut Krisnawati *et al.* (2011) sengon salah satu jenis pohon yang cepat tumbuh dan mampu menghasilkan biomassa tinggi serta memiliki kemampuan fiksasi nitrogen, sehingga berpotensi meningkatkan kandungan nitrogen tanah.

Pola perubahan N-total dalam penelitian ini sejalan bersama pola kandungan C-organik tanah, di mana peningkatan C-organik diikuti oleh peningkatan kandungan N-total. Hal ini menunjukkan bahwa bahan organik merupakan sumber utama nitrogen di lokasi penelitian. Havlin *et al.* (2014) menyatakan bahwa sekitar 95% nitrogen tanah berada dalam bentuk organik, sehingga kandungan N-total umumnya berkorelasi positif dengan kandungan bahan organik tanah.

Secara keseluruhan, pada hasil penelitian memperlihatkan bahwa aktivitas penambangan menurunkan N-total di dalam tanah akibat hilangnya lapisan *top soil* dan berkurangnya bahan organik. Sebaliknya, revegetasi tanaman sengon berperan dalam meningkatkan kembali kandungan nitrogen melalui penambahan biomassa, serasah tanaman sengon, serta pada revegetasi yang lebih tua didukung oleh serasah tumbuhan bawah yang berkembang secara alami. Meskipun kandungan N-total pada lahan revegetasi usia 12 tahun merupakan yang tertinggi, status N-total pada seluruh lokasi penelitian masih tergolong rendah hingga sangat rendah.

Kandungan nitrogen dalam tanah tidak dapat dipisahkan dari keberadaan bahan organik sebagai sumber utama nitrogen. Oleh karena itu, evaluasi kandungan N-total perlu dikaji bersama dengan kandungan karbon organik melalui analisis rasio C/N. Rasio C/N adalah salah satu indikator yang menunjukkan keseimbangan karbon dan nitrogen di dalam tanah, serta digunakan untuk menilai tingkat dekomposisi bahan organik, aktivitas mikroorganisme, dadinamika siklus hara.

4. Rasio C/N

Rasio C/N merupakan parameter yang dipergunakan untuk mengevaluasi keseimbangan karbon dan nitrogen dalam tanah serta tingkatan dekomposisi pada bahan organik di dalam tanah. Perbedaan nilai yang terdapat pada rasio C/N memberikan gambaran mengenai dinamika unsur hara dan aktivitas biologis tanah. Untuk mengetahui pengaruh usia revegetasi terhadap rasio C/N hasil pengamatan dianalisis menggunakan sidik ragam pada Tabel 5.

Tabel 5. Rasio C/N pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	Rasio C/N	Kriteria
Sedang ditambang	2,84b	Sangat Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	3,90b	Sangat Rendah
Revegetasi usia 12 tahun	6,59ab	Rendah
Hutan sekunder	9,30a	Rendah

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 95%. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 5, diketahui bahwa rasio C/N tertinggi terdapat pada hutan sekunder sebesar 9,30, sedangkan rasio C/N terendah terdapat pada lahan yang sedang ditambang sebesar 2,84. Meskipun rasio C/N pada lahan revegetasi berusia 12 tahun mencapai 6,59, nilainya masih berada pada kisaran yang secara statistik tidak berbeda nyata dibandingkan dengan hutan sekunder dan jenis lahan lainnya. Pada hutan sekunder dan revegetasi usia 12 tahun masuk dalam kriteria rendah, sedangkan pada lahan sedang ditambang dan revegetasi usia 4 tahun masuk kriteria sangat rendah. Meskipun demikian, terdapat kecenderungan peningkatan rasio C/N pada lahan revegetasi usia 12 tahun dibandingkan lahan yang sedang ditambang dan lahan revegetasi usia 4 tahun. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses revegetasi tanaman secong dalam jarak waktu yang lebih lama meningkatkan akumulasi bahan organik di dalam tanah sehingga rasio C/N cenderung mendekati kondisi hutan sekunder.

Tingkat dekomposisi bahan organik dalam tanah dapat diidentifikasi melalui rasio C/N, yaitu perbandingan antara kandungan karbon organik dan nitrogen total. Peningkatan pada dekomposisi bahan organik dapat diinterpretasikan melalui nilai rasio C/N, di mana menurut Hardjowigeno (2015),

nilai rasio C/N yang rendah mengindikasikan bahwa bahan organik telah mengalami dekomposisi lanjutan, sedangkan nilai yang tinggi mengindikasikan bahan organik masih berada pada tahap dekomposisi yang belum sempurna. Rendahnya rasio C/N pada seluruh lokasi penelitian mengindikasikan bahwa proses dekomposisi bahan organik berlangsung cukup intensif serta menunjukkan bahwa nitrogen relatif lebih tersedia dibandingkan karbon organik. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik lingkungan tropis basah yang memiliki suhu dan kelembapan tinggi sehingga aktivitas mikroorganisme pengurai berlangsung cepat. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan tingginya aktivitas dekomposisi bahan organik pada lingkungan tropis basah sehingga karbon lebih cepat hilang dari sistem tanah dibandingkan nitrogen, yang pada akhirnya menyebabkan rasio C/N rendah.

Nilai rasio C/N terendah terdapat di lahan sedang ditambang yang menunjukkan bahwa aktivitas penambangan telah menyebabkan hilangnya sebagian besar sumber karbon organik tanah melalui pengupasan lapisan tanah atas dan berkurangnya masukan serasah. Selain itu, kondisi lahan yang terbuka diduga dapat meningkatkan suhu dan aerasi tanah sehingga mempercepat dekomposisi bahan organik yang tersisa. Sebaliknya, peningkatan rasio C/N pada lahan revegetasi usia 4 tahun dan 12 tahun menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon mulai memperbaiki keseimbangan karbon dan nitrogen melalui penambahan serasah serta biomassa tanaman. Nilai rasio C/N yang tertinggi pada revegetasi usia 12 tahun mengindikasikan bahwa akumulasi bahan organik berlangsung lebih baik dibandingkan revegetasi usia 4 tahun, meskipun masih berada di bawah kondisi hutan sekunder.

Hutan sekunder memiliki rasio C/N tertinggi yang diduga berkaitan dengan masukan bahan organik secara kontinu melalui guguran daun, ranting, akar mati, dan sisa vegetasi lainnya. Nilai rasio C/N hutan sekunder masih tergolong rendah dibandingkan kisaran umum tanah mineral, yang menunjukkan bahwa proses dekomposisi bahan organik pada lokasi penelitian berlangsung relatif cepat. Proses mineralisasi nitrogen berlangsung lebih cepat pada bahan organik yang memiliki rasio C/N rendah dari pada pada bahan organik dengan rasio C/N tinggi, sebagaimana dikemukakan oleh Brady dan Weil (2017). Dengan demikian, perubahan yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa

aktivitas penambangan dan pelaksanaan revegetasi telah memengaruhi keseimbangan karbon dan nitrogen di dalam tanah. Peningkatan rasio C/N pada lahan revegetasi tanaman sengon menunjukkan adanya perbaikan akumulasi bahan organik, meskipun hingga usia revegetasi 12 tahun nilainya masih belum sepenuhnya menyamai kondisi hutan sekunder.

Pertumbuhan tanaman bergantung pada kecukupan berbagai unsur hara makro, termasuk fosfor (P), selain karbon dan nitrogen yang juga berperan penting dalam mendukung perkembangan tanaman. Fosfor merupakan unsur esensial yang berfungsi dalam transfer energi, pembentukan jaringan tanaman, serta perkembangan sistem perakaran. Oleh karena itu, analisis kandungan P-tersedia diperlukan untuk mengevaluasi tingkat ketersediaan fosfor dan keberhasilan proses pemulihan kesuburan tanah pada berbagai jenis lahan pascatambang.

5. P-tersedia

Status hara fosfor tanah dapat digambarkan melalui nilai P-tersedia, yaitu fraksi fosfor yang berada dalam bentuk relatif mudah tersedia di dalam tanah. Ketersediaan fosfor tersebut ditentukan oleh berbagai proses tanah, antara lain pengikatan dan pelepasan fosfor pada partikel tanah serta perubahan bentuk fosfor yang dimediasi oleh aktivitas mikroorganisme. Oleh karena itu, parameter ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan ketersediaan fosfor pada beberapa lahan tambang batubara. Hasil analisis sidik ragam P-tersedia disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. P-tersedia pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	P-tersedia (ppm)	Kriteria
Sedang ditambang	0,22c	Sangat Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	0,50bc	Sangat Rendah
Revegetasi usia 12 tahun	1,19a	Sangat Rendah
Hutan sekunder	0,79ab	Sangat Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 6, diketahui bahwa kandungan P-tersedia tertinggi terdapat pada lahan revegetasi usia 12 tahun sebesar 1,19 ppm,

sedangkan kandungan P-tersedia terendah terdapat pada lahan yang sedang ditambang sebesar 0,22 ppm. Kedua jenis lahan tersebut berbeda nyata satu sama lain. Pada hutan sekunder terdapat kandungan P-tersedia sebesar 0,79 ppm sehingga tidak berbeda nyata dengan lahan revegetasi usia 12 tahun maupun revegetasi usia 4 tahun. Sementara itu, lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 0,50 ppm dan tidak berbeda nyata dengan lahan yang sedang ditambang. Nilai P-tersedia pada seluruh lahan penelitian masih berada pada kategori sangat rendah. Namun, peningkatan kandungan P-tersedia mulai terlihat sejalan dengan bertambahnya usia revegetasi. Menurut Fitriani *et al.* (2018) rendahnya kandungan P-tersedia pada lahan yang sedang ditambang menunjukkan bahwa aktivitas penambangan telah menurunkan kesuburan tanah melalui pengupasan lapisan *top soil*, yang merupakan bagian tanah dengan kandungan bahan organik dan cadangan fosfor lebih tinggi. Selain itu, hilangnya vegetasi menyebabkan terputusnya siklus hara alami karena tidak terdapat masukan serasah yang dapat mengembalikan fosfor ke dalam tanah melalui proses dekomposisi.

Lahan revegetasi usia 4 tahun menunjukkan peningkatan kandungan P-tersedia menjadi 0,50 ppm, meskipun masih berada pada kategori sangat rendah. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa proses pemulihan fosfor tanah mulai berlangsung setelah revegetasi dilakukan. Pada lahan ini, tanaman sengon (*Falcataria moluccana*) mulai menghasilkan sisa-sisa vegetasi, meliputi daun, ranting, akar yang telah mati, dan biomassa lainnya, yang selama proses dekomposisi melepaskan sebagian unsur fosfor ke dalam tanah. Menurut Efendi *et al.* (2019) usia revegetasi yang masih relatif muda menyebabkan akumulasi bahan organik dan serasah belum banyak sehingga peningkatan P-tersedia masih terbatas. Selain itu, kondisi pH tanah pada revegetasi usia 4 tahun yang masih tergolong sangat masam juga menyebabkan sebagian fosfor yang dilepaskan mudah terikat oleh aluminium (Al) dan besi (Fe), sehingga hanya sedikit fosfor yang tersedia untuk tanaman.

P-tersedia tertinggi ditemukan pada lahan revegetasi usia 12 tahun, yaitu 1,19 ppm. Peningkatan ini menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon yang berlangsung lebih lama memberikan kontribusi terhadap meningkatnya ketersediaan fosfor tanah. Pada usia revegetasi yang lebih tua, tanaman sengon

menghasilkan biomassa dan serasah dalam jumlah lebih besar dibandingkan revegetasi usia 4 tahun. Selain itu, masukan serasah pada lokasi ini diduga tidak hanya berasal dari tegakan sengon, tetapi juga dari tumbuhan bawah atau semak yang tumbuh secara alami di bawah tegakan sengon. Akumulasi serasah tersebut meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan melalui proses dekomposisi melepaskan fosfor secara bertahap ke dalam tanah. Di sisi lain, perkembangan tajuk, lapisan serasah, dan sistem perakaran pada revegetasi usia 12 tahun juga membantu mempertahankan unsur hara di zona perakaran sehingga kehilangan fosfor akibat erosi menjadi lebih kecil dibandingkan lahan yang masih terbuka. Rendahnya kandungan P-tersedia diduga bahwa fosfor yang telah dilepaskan belum sepenuhnya tersedia bagi tanaman karena sebagian masih mengalami proses fiksasi di dalam tanah.

Kandungan P-tersedia pada lahan vegetasi alami sebesar 0,79 ppm, lebih rendah dibandingkan lahan revegetasi berusia 12 tahun. Namun, hasil uji statistik menunjukkan bahwa kedua lahan tersebut tidak berbeda nyata. Kondisi ini menunjukkan bahwa revegetasi dengan dominasi sengon berpotensi memberikan masukan bahan organik yang cukup besar melalui akumulasi biomassa dan serasah sehingga meningkatkan pelepasan fosfor ke dalam tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa revegetasi belum mampu meningkatkan kandungan P-tersedia hingga mencapai kategori yang lebih tinggi, sehingga seluruh lokasi penelitian masih diklasifikasikan memiliki P-tersedia sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa faktor utama yang membatasi ketersediaan fosfor pada lokasi penelitian bukan hanya rendahnya masukan fosfor, tetapi juga tingginya proses fiksasi fosfor di dalam tanah.

Tanah pada lokasi penelitian tergolong Oxisol yang kaya akan oksida besi dan aluminium, sehingga memiliki kemampuan tinggi dalam mengikat ion fosfat menjadi senyawa yang sukar larut. Selain itu, pada seluruh lokasi penelitian memiliki pH tanah yang sangat masam, sehingga kelarutan Al dan Fe meningkat dan memperkuat proses fiksasi fosfor. Brady dan Weil (2017) mengemukakan bahwa pada tanah dengan pH masam, fosfor mudah terikat oleh Al dan Fe, sehingga ketersediaannya menurun akibat terbentuknya senyawa fosfat yang sulit larut. Sedangkan Havlin *et al.* (2014) menjelaskan bahwa tanah-tanah tropis yang

didominasi oksida Fe dan Al umumnya memiliki kapasitas fiksasi fosfor yang tinggi.

Hasil penelitian ini secara keseluruhan mengindikasikan bahwa aktivitas penambangan menyebabkan penurunan kandungan P-tersedia tanah, sedangkan revegetasi tanaman sengon secara bertahap meningkatkan ketersediaan fosfor melalui penambahan bahan organik dari serasah tanaman sengon dan, pada revegetasi usia 12 tahun, didukung oleh serasah tumbuhan bawah yang berkembang secara alami. Namun, tingginya tingkat kemasaman tanah serta dominasi oksida Fe dan Al menyebabkan sebagian besar fosfor tetap terfiksasi, akibatnya kandungan P-tersedia di seluruh lokasi penelitian masih berada dalam kategori sangat rendah. Pertumbuhan tanaman tidak hanya bergantung pada fosfor, tetapi juga pada kalium yang merupakan salah satu unsur hara makro esensial. Kalium merupakan salah satu kation basa yang berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman, antara lain mengaktifkan enzim, mengatur keseimbangan air, mendukung sintesis karbohidrat, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Winarso *et al.*, 2019). Atas dasar tersebut, kandungan kalium dapat ditukar (K-dd) dianalisis untuk menggambarkan ketersediaan unsur hara basa sekaligus mengevaluasi tingkat kesuburan tanah pada berbagai penggunaan lahan.

6. K-dd

K-dd (kalium dapat ditukar) merupakan fraksi kalium yang terjerap pada koloid tanah dan dapat dipertukarkan dengan ion lain dalam larutan tanah. Kandungan K-dd mencerminkan ketersediaan kalium serta kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur tersebut dari kehilangan akibat pencucian. Hasil analisis sidik ragam K-dd pada beberapa lahan tambang batubara disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kalium dapat ditukar (K-dd) pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	K-dd (cmol(+)/kg)	Kriteria
Sedang ditambang	0,18c	Sangat Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	0,50a	Sedang
Revegetasi usia 12 tahun	0,27b	Rendah
Hutan sekunder	0,16c	Sangat Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 7, diketahui bahwa kandungan K-dd tertinggi terdapat pada lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 0,50 cmol(+)/kg. Kandungan K-dd pada lahan revegetasi usia 12 tahun sebesar 0,27 cmol(+)/kg berbeda nyata dengan seluruh jenis lahan lainnya. Sementara itu, hutan sekunder sebesar 0,16 cmol(+)/kg dan lahan yang sedang ditambang sebesar 0,18 cmol(+)/kg sehingga tidak menunjukkan perbedaan yang nyata antarkeduanya, namun berbeda nyata dibandingkan dengan lahan revegetasi usia 4 tahun dan lahan revegetasi usia 12 tahun. Nilai kandungan K-dd pada hutan sekunder dan lahan yang sedang ditambang termasuk kategori sangat rendah, sedangkan pada lahan revegetasi usia 4 tahun termasuk kategori sedang dan pada lahan revegetasi usia 12 tahun termasuk kriteria rendah.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon berpengaruh terhadap peningkatan ketersediaan kalium dalam tanah. Tingginya kandungan K-dd pada lahan revegetasi usia 4 tahun diduga berkaitan dengan proses pengembalian hara melalui serasah dan dekomposisi bahan organik yang berlangsung selama revegetasi. Tetapi kandungan K-dd yang lebih rendah pada lahan revegetasi usia 12 tahun menunjukkan bahwa dinamika kalium dalam tanah dipengaruhi oleh faktor serapan tanaman yang cukup besar dan karakteristik tanah setempat.

Nilai K-dd yang rendah pada hutan sekunder dan lahan sedang ditambang menunjukkan bahwa ketersediaan kalium dalam tanah masih terbatas. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik tanah Oxisol sehingga ion K^+ relatif mudah tercuci dari tanah. Pada lahan sedang ditambang, rendahnya K-dd juga dipengaruhi oleh pengupasan lapisan tanah atas dan hilangnya vegetasi yang menyebabkan berkurangnya masukan unsur hara melalui serasah. Nilai K-dd tertinggi pada lahan revegetasi usia 4 tahun menunjukkan bahwa proses revegetasi dengan tanaman sengon telah berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan kalium tanah.

Serasah vegetasi dan biomassa tanaman yang telah mengalami dekomposisi dapat melepaskan kalium ke dalam tanah. Suwardi *et al.* (2023) menyatakan bahwa kalium memiliki pola pelepasan yang relatif cepat

dibandingkan beberapa unsur hara lainnya sehingga pengembalian biomassa tanaman dapat menjadi sumber kalium yang efektif. Pada lahan revegetasi usia 12 tahun kandungan K-dd menurun, meskipun masih lebih tinggi dibandingkan hutan sekunder dan lahan yang sedang ditambang. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan usia revegetasi pada tanaman sengon tidak selalu diikuti oleh peningkatan kandungan kalium dapat ditukar. Penurunan tersebut diduga berkaitan dengan dinamika kalium dalam tanah yang dipengaruhi oleh berbagai proses seperti pelepasan dari bahan organik, pencucian, dan redistribusi unsur hara di dalam tanah. Kasno dan Suastika (2017) menjelaskan bahwa lahan masam pada wilayah bercurah hujan tinggi umumnya mengalami pencucian kation basa yang intensif termasuk pada kalium.

Pola distribusi K-dd pada berbagai jenis lahan tidak mengikuti kecenderungan yang sama seperti yang terlihat pada parameter C-organik, N-total, dan P-tersedia. Ketiga parameter tersebut meningkat seiring bertambahnya usia revegetasi, sedangkan K-dd mencapai nilai tertinggi pada revegetasi usia 4 tahun kemudian menurun pada revegetasi usia 12 tahun. Pola perubahan K-dd diduga merupakan hasil interaksi berbagai proses di dalam tanah. Oleh karena itu, kandungan kalium tidak hanya dipengaruhi oleh akumulasi bahan organik, tetapi juga oleh mekanisme lain yang berlangsung secara bersamaan. Menurut Sparks (1999) kandungan kalium tersedia dalam tanah tidak bersifat tetap, melainkan dipengaruhi oleh proses pelepasan dari bahan organik, perpindahan unsur dalam tanah, dan kehilangan melalui aliran air.

Oleh karena itu, perubahan kandungan K-dd pada lahan revegetasi tidak selalu mengikuti pola peningkatan bahan organik yang terjadi selama proses revegetasi. Secara keseluruhan, revegetasi tanaman sengon mampu meningkatkan kandungan K-dd dibandingkan lahan sedang ditambang, meskipun sebagian besar lokasi penelitian masih berada pada kategori rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kandungan kalium dapat ditukar pada tanah pascatambang masih relatif terbatas.

Salah satu indikator yang menggambarkan kemampuan tanah dalam mengikat dan mempertukarkan kation adalah nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK). Oleh karena itu, analisis KTK diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih

komprehensif mengenai kemampuan tanah dalam mempertahankan unsur hara dan mendukung proses pemulihan kesuburan pada lahan pascatambang.

7. KTK

Kemampuan tanah untuk menahan sekaligus mempertukarkan kation pada permukaan koloid dinyatakan melalui parameter Kapasitas Tukar Kation (KTK). Besarnya nilai parameter tersebut ditentukan oleh kandungan bahan organik, karakteristik mineral liat, serta tingkat pelapukan yang terjadi di dalam tanah. Ringkasan hasil analisis sidik ragam terhadap nilai KTK pada setiap penggunaan lahan disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Kapasitas tukar kation (KTK) pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	KTK (cmol(+)/kg)	Kriteria
Sedang ditambang	7,19d	Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	15,34a	Rendah
Revegetasi usia 12 tahun	13,30b	Rendah
Hutan sekunder	12,13c	Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 8, diketahui bahwa kandungan KTK tertinggi terdapat pada lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 15,34 cmol(+)/kg, diikuti oleh lahan revegetasi usia 12 tahun sebesar 13,30 cmol(+)/kg. Hutan sekunder memiliki nilai KTK sebesar 12,13 cmol(+)/kg, sedangkan nilai KTK terendah terdapat pada lahan yang sedang ditambang sebesar 7,19 cmol(+)/kg. Perbedaan kelompok huruf tersebut memperlihatkan bahwa masing-masing jenis lahan berbeda nyata satu sama lain. Nilai KTK pada seluruh jenis lahan termasuk dalam kategori rendah. Meskipun demikian, terdapat perbedaan nilai KTK yang cukup besar antar jenis lahan. Nilai KTK yang lebih tinggi pada lahan revegetasi menunjukkan bahwa proses revegetasi tanaman sengon berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan tanah dalam mengadsorpsi dan mempertahankan unsur hara. Sebaliknya, rendahnya nilai KTK pada lahan yang sedang ditambang mengindikasikan bahwa aktivitas penambangan telah menurunkan kemampuan tanah dalam menahan kation hara akibat hilangnya lapisan tanah atas dan berkurangnya bahan organik di dalam tanah.

Kapasitas Tukar Kation (KTK) menggambarkan kemampuan tanah dalam menyimpan serta mempertukarkan kation-kation hara yang diperlukan oleh tanaman. Oleh karena itu, parameter ini sering digunakan sebagai salah satu indikator untuk menilai tingkat kesuburan kimia tanah. Menurut Harefa dan Zebua (2024), tanah yang memiliki nilai KTK tinggi umumnya mampu mengikat dan mempertahankan unsur hara dengan lebih baik, sehingga kehilangan hara akibat proses pencucian dapat diminimalkan. Nurjannah (2025) menyatakan KTK juga dipengaruhi beberapa faktor seperti kandungan bahan organik, kandungan liat, jenis mineral liat, serta tingkat kemasaman tanah.

Rendahnya nilai KTK pada lahan yang sedang ditambang mengindikasikan bahwa kegiatan penambangan telah menurunkan kapasitas tanah dalam mengikat dan mempertahankan unsur hara. Menurut Chen *et al.* (2021) pengupasan lapisan tanah atas selama proses penambangan menyebabkan hilangnya sebagian besar bahan organik dan fraksi koloid tanah yang berperan sebagai sumber muatan negatif. Berkurangnya komponen tersebut menyebabkan jumlah tapak pertukaran kation menjadi lebih sedikit sehingga kemampuan tanah dalam menahan unsur hara juga menurun.

Kondisi ini sejalan dengan rendahnya kandungan C-organik pada lahan sedang ditambang yang hanya sebesar 0,19%, menunjukkan bahwa hilangnya bahan organik akibat penambangan turut berkontribusi terhadap rendahnya nilai KTK. Nilai KTK cenderung lebih rendah pada tanah yang memiliki kadar bahan organik yang relatif rendah jika dibandingkan dengan tanah yang kaya akan bahan organik, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai penelitian pada beragam penggunaan lahan. Peningkatan nilai KTK pada lahan revegetasi usia 4 tahun menunjukkan bahwa proses reklamasi telah memberikan dampak baik terhadap perbaikan sifat kimia tanah. Peningkatan tersebut diduga berkaitan dengan penambahan bahan organik dari serasah dan biomassa tanaman serta pengelolaan lahan yang dilakukan selama proses reklamasi. Bahan organik diketahui memiliki gugus bermuatan negatif yang mampu meningkatkan kapasitas pertukaran kation tanah. Oleh karena itu, peningkatan akumulasi bahan organik diduga secara umum akan diikuti oleh peningkatan nilai KTK. Hasil penelitian Siregar *et al.* (2017) mengindikasikan bahwa penambahan bahan organik berperan dalam peningkatan

kapasitas tukar kation (KTK) tanah karena mampu memperbaiki kondisi kimia tanah.

Nilai KTK pada lahan revegetasi usia 12 tahun masih lebih tinggi dibandingkan hutan sekunder dan lahan yang sedang ditambang, meskipun lebih rendah dibandingkan revegetasi usia 4 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan usia revegetasi tidak selalu diikuti oleh peningkatan KTK secara linier. Meskipun lahan revegetasi berusia 12 tahun memiliki kandungan C-organik yang hampir setara dengan hutan sekunder, nilai KTK pada revegetasi usia 12 tahun masih sedikit lebih tinggi. Perbedaan nilai KTK antara lahan revegetasi usia 4 tahun dan 12 tahun diduga berkaitan dengan perbedaan kandungan bahan organik yang berperan sebagai sumber muatan negatif tanah. Tingginya kandungan C-organik pada lahan revegetasi berusia 4 tahun dapat meningkatkan jumlah situs pertukaran kation sehingga kemampuan tanah dalam menjerap kation menjadi lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa besarnya nilai KTK merupakan hasil interaksi beberapa sifat tanah, sehingga tidak hanya bergantung pada kandungan bahan organik, tetapi juga dipengaruhi oleh mineral liat, pH tanah, dan komposisi kation yang menempati kompleks jerapan.

Secara umum, seluruh lokasi penelitian memiliki nilai KTK yang tergolong rendah. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan karakteristik tanah Oxisol yang telah mengalami pelapukan lanjut. Tanah yang telah mengalami pelapukan intensif secara umum didominasi mineral liat yang beraktivitas rendah menyebabkan kapasitas tukar kation tanah lebih rendah dibandingkan pada tanah yang didominasi mineral liat beraktivitas tinggi. Selain itu, rendahnya kandungan bahan organik pada sebagian besar lokasi penelitian turut membatasi perkembangan muatan negatif tanah yang berfungsi sebagai tempat pertukaran kation. Nilai KTK yang masih rendah mengindikasikan bahwa kapasitas tanah dalam mengikat serta menyediakan unsur hara bagi tanaman belum optimal. Oleh karena itu, proses pemulihan kesuburan tanah pada lahan pascatambang masih membutuhkan waktu serta pengelolaan yang dilakukan secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas penambangan menyebabkan penurunan kemampuan tanah dalam menahan unsur hara yang ditunjukkan oleh rendahnya nilai KTK pada lahan sedang ditambang.

Sebaliknya, revegetasi tanaman sengon mampu meningkatkan nilai KTK melalui perbaikan kondisi tanah dan peningkatan bahan organik. Dikarenakan seluruh lokasi penelitian masih berada pada kategori rendah, proses pemulihan kapasitas penyangga hara tanah pascatambang masih berlangsung dan memerlukan waktu yang lebih panjang untuk mendekati kondisi lahan acuan.

Evaluasi kandungan kimia tanah tidak hanya dilakukan melalui nilai KTK, tetapi juga menggunakan parameter kejenuhan basa (KB). Nilai parameter ini merepresentasikan persentase tempat pertukaran kation pada kompleks jerapan yang ditempati oleh kation basa, yaitu Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , dan Na^{+} (Widyati *et al.*, 2020). Nilai kejenuhan basa dapat digunakan untuk menggambarkan tingkat ketersediaan unsur hara basa sekaligus mencerminkan kondisi kesuburan tanah dan tingkat kehilangan hara akibat pencucian. Dengan demikian, analisis kejenuhan basa memberikan informasi tambahan mengenai kualitas kimia tanah. Data tersebut melengkapi penilaian yang menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan yang lebih baik untuk memasok unsur hara bagi pertumbuhan tanaman pada berbagai penggunaan lahan di lokasi penelitian.

8. Kejenuhan Basa

Kejenuhan Basa adalah parameter yang menunjukkan persentase tempat pertukaran kation yang ditempati oleh kation basa dibandingkan dengan total situs pertukaran kation yang tersedia di dalam tanah. Nilai KB mencerminkan tingkat kesuburan kimia tanah dan berkaitan erat dengan status hara serta tingkat kemasaman tanah. Hasil analisis sidik ragam kejenuhan basa (KB) pada Tabel 9.

Tabel 9. Kejenuhan Basa pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	Kejenuhan Basa (%)	Kriteria
Sedang ditambang	34,26b	Rendah
Revegetasi usia 4 tahun	38,33a	Sedang
Revegetasi usia 12 tahun	39,01a	Sedang
Hutan sekunder	34,02b	Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 9, diketahui bahwa kejenuhan basa pada lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 38,33% dan lahan revegetasi usia 12

tahun sebesar 39,01% sehingga tidak berbeda nyata dan masuk dalam kriteria sedang. Sebaliknya, kedua lahan tersebut berbeda nyata dengan hutan sekunder sebesar 34,02% dan lahan yang sedang ditambang sebesar 34,26% sehingga tidak berbeda nyata satu sama lain dan memiliki kriteria rendah.

Meskipun demikian, nilai kejenuhan basa pada lahan revegetasi tanaman sengon cenderung lebih tinggi dibandingkan hutan sekunder dan lahan yang sedang ditambang. Hasil ini menunjukkan bahwa proses revegetasi tanaman sengon berkaitan dengan peningkatan nilai kejenuhan basa tanah dibandingkan lahan yang sedang ditambang. Tetapi peningkatan tersebut belum mampu meningkatkan status kejenuhan basa ke kategori yang lebih tinggi sehingga kondisi kesuburan tanah masih relatif rendah. Kejenuhan basa menggambarkan proporsi situs pertukaran kation pada kompleks jerapan tanah yang ditempati oleh kation-kation basa, yaitu kalsium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), dan natrium (Na). Albuquerque *et al.* (2024) menyatakan bahwa meningkatnya nilai kejenuhan basa menunjukkan semakin besarnya proporsi kation basa yang mengisi kompleks jerapan tanah. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa tanah memiliki tingkat kesuburan yang relatif lebih baik. Rendahnya nilai KB pada seluruh jenis lahan mengindikasikan bahwa kompleks pertukaran di dalam tanah masih didominasi oleh kation bersifat masam, terutama H^+ dan Al^{3+} .

Hasil tersebut didukung oleh nilai pH tanah yang memperlihatkan bahwa seluruh lokasi penelitian tergolong sangat masam. Selain itu, karakteristik tanah Oxisol yang telah mengalami pelapukan lanjut serta besarnya curah hujan menyebabkan proses pelindian kation basa berlangsung lebih intensif, sehingga jumlah kation basa yang tertahan pada kompleks jerapan tanah berkurang dan nilai kejenuhan basa tetap rendah. Nilai kejenuhan basa yang relatif rendah pada lokasi penelitian juga sejalan dengan nilai KTK yang tergolong rendah. KTK yang rendah menunjukkan terbatasnya jumlah tapak pertukaran kation dalam tanah, sehingga kemampuan tanah untuk mempertahankan kation basa juga menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut menyebabkan proporsi kation basa pada kompleks jerapan tanah relatif terbatas.

Lahan sedang ditambang memiliki nilai KB yang rendah akibat hilangnya lapisan tanah atas dan berkurangnya sumber bahan organik selama

proses penambangan. Peningkatan nilai KB pada lahan revegetasi usia 4 tahun dan 12 tahun diduga berkaitan dengan bertambahnya bahan organik selama proses revegetasi yang berkontribusi terhadap keberadaan kation basa dalam tanah. Fransisca dan Julianto (2025) mengatakan bahwa peningkatan kandungan kation basa dalam tanah dapat meningkatkan nilai kejenuhan basa, terutama pada lahan yang memperoleh masukan bahan organik secara berkelanjutan.

Meskipun nilai kejenuhan basa pada lahan revegetasi telah mencapai kategori sedang, nilainya masih relatif rendah dibandingkan kondisi tanah yang memiliki kejenuhan basa tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa proses pemulihan kation basa berlangsung lebih lambat dibandingkan akumulasi bahan organik dengan memperlihatkan peningkatan C-organik dan N-total di lahan yang sudah revegetasi dengan tanaman sengon. Rendahnya nilai kejenuhan basa yang diikuti oleh KTK yang relatif rendah mengindikasikan bahwa kemampuan tanah dalam menyediakan dan mempertahankan unsur hara masih terbatas. Secara keseluruhan, revegetasi tanaman sengon mampu meningkatkan nilai kejenuhan basa dibandingkan lahan sedang ditambang, tetapi proses pemulihan kesuburan kimia tanah pascatambang masih berlangsung dan belum sepenuhnya mampu mengatasi kehilangan kation basa akibat kemasaman tanah yang tinggi serta pencucian hara yang intensif.

Selain kejenuhan basa, parameter yang penting untuk mengevaluasi kondisi tanah masam adalah aluminium dapat ditukar (Al-dd). Kandungan Al-dd yang tinggi menunjukkan dominasi ion Al^{3+} pada kompleks pertukaran tanah yang umumnya berkaitan dengan peningkatan kemasaman tanah. Selain itu, keberadaan Al-dd yang tinggi dapat memengaruhi dinamika unsur hara, terutama fosfor, melalui pembentukan senyawa yang sukar larut sehingga menurunkan ketersediaannya dalam tanah. Oleh karena itu, analisis Al-dd diperlukan untuk melengkapi evaluasi tingkat kesuburan dan kondisi kimia tanah pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian.

9. Al-dd

Aluminium dapat dipertukarkan (Al-dd) merupakan fraksi aluminium yang terjerap pada kompleks pertukaran tanah dan dapat dipertukarkan dengan ion lain dalam larutan tanah. Nilai Al-dd diperlukan untuk mengetahui perubahan sifat

kimia tanah akibat usia revegetasi yang dilakukan. Hasil analisis sidik ragam parameter Al-dd pada lahan berbeda dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Aluminium dapat ditukar (Al-dd) pada berbagai jenis lahan di lokasi penelitian

Jenis Lahan	Al-dd (cmol(+)/kg)	Kriteria
Sedang ditambang	3,54a	Tinggi
Revegetasi usia 4 tahun	2,06b	Tinggi
Revegetasi usia 12 tahun	1,20c	Sedang
Hutan sekunder	0,66c	Rendah

Keterangan: Angka dengan huruf yang sama pada kolom yang sama mengindikasikan tidak adanya perbedaan nyata berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi. Kriteria tanah oleh Eviati *et al.* (2023).

Berdasarkan hasil uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 95% yang disajikan pada Tabel 10, diketahui bahwa kadar Al-dd tertinggi terdapat di lahan yang sedang ditambang sebesar 3,54 cmol(+)/kg, diikuti oleh lahan revegetasi usia 4 tahun sebesar 2,06 cmol(+)/kg. Sementara itu, kandungan Al-dd pada lahan revegetasi usia 12 tahun sebesar 1,20 cmol(+)/kg tidak berbeda nyata dengan hutan sekunder sebesar 0,66 cmol(+)/kg. Nilai Al-dd pada lahan yang sedang ditambang dan lahan revegetasi usia 4 tahun termasuk kategori tinggi, lahan revegetasi usia 12 tahun termasuk kategori sedang, sedangkan hutan sekunder tergolong rendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon yang berlangsung lebih lama berasosiasi dengan penurunan kandungan aluminium dapat dipertukarkan hingga mendekati kondisi hutan sekunder sebagai ekosistem acuan.

Tingginya kandungan Al-dd pada lahan yang sedang ditambang diduga berkaitan dengan kondisi rendahnya kandungan bahan organik akibat minimnya tutupan vegetasi menyebabkan berkurangnya pembentukan kompleks organo-Al yang berperan mengikat aluminium, sehingga kandungan Al-dd tetap tinggi. Menurut Ritung *et al.* (2018) pada tanah masam, peningkatan konsentrasi ion H^+ menyebabkan mineral yang mengandung aluminium lebih mudah melarut sehingga meningkatkan konsentrasi Al dapat dipertukarkan dalam tanah. Menurut Abdi (2024) peningkatan kemasaman tanah menyebabkan meningkatnya aluminium dapat dipertukarkan, sedangkan perbaikan pH tanah dapat menurunkan Al-dd dan memperbaiki sifat kimia tanah.

Selain dipengaruhi oleh sifat alami tanah, tingginya Al-dd pada lahan yang sedang ditambang juga diduga berkaitan dengan aktivitas penambangan batubara yang mempercepat proses pengasaman tanah. Oksidasi mineral sulfida menghasilkan asam yang meningkatkan konsentrasi ion H^+ sehingga mempercepat pelepasan aluminium ke dalam larutan tanah. Temuan tersebut sejalan dengan hasil analisis pH tanah, yang menunjukkan bahwa seluruh lokasi penelitian termasuk ke dalam kategori reaksi tanah sangat masam. Akumulasi Al-dd pada tanah masam merupakan salah satu indikator degradasi kimia tanah pascatambang karena berkaitan dengan meningkatnya kemasaman tanah dan menurunnya ketersediaan beberapa unsur hara (Sari *et al.*, 2021). Kandungan Al-dd yang tinggi turut memengaruhi ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Pada kondisi tanah masam, aluminium bereaksi dengan ion fosfat membentuk senyawa yang sukar larut sehingga fosfor menjadi kurang tersedia bagi tanaman. Fenomena tersebut selaras dengan hasil analisis P-tersedia yang menunjukkan bahwa seluruh lokasi penelitian memiliki kandungan fosfor tersedia dalam kategori sangat rendah. Oleh karena itu, tingginya Al-dd diduga menjadi salah satu faktor yang membatasi ketersediaan fosfor pada lokasi penelitian. Sebaliknya, penurunan kandungan Al-dd pada lahan revegetasi, terutama pada revegetasi usia 12 tahun, diikuti oleh peningkatan kandungan P-tersedia dibandingkan lahan yang sedang ditambang.

Hubungan tersebut menunjukkan bahwa berkurangnya aluminium dapat dipertukarkan selama proses revegetasi berkontribusi terhadap perbaikan kondisi kimia tanah terutama dalam meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam tanah. Kandungan Al-dd yang lebih rendah pada lahan revegetasi usia 12 tahun menunjukkan adanya perbaikan kondisi kimia tanah dibandingkan lahan yang sedang ditambang dan lahan revegetasi usia 4 tahun. Penurunan Al-dd diduga berkaitan dengan meningkatnya akumulasi bahan organik dari serasah dan biomassa tanaman selama proses revegetasi. Bahan organik memiliki gugus fungsional yang mampu mengikat ion aluminium membentuk kompleks organo-aluminium yang lebih stabil sehingga menurunkan aktivitas dan toksisitas Al pada tanah.

Peningkatan akumulasi bahan organik berpengaruh dalam memperbaiki kapasitas tukar kation dan mengurangi kemasaman tanah. Penelitian Zhang *et al.*

(2025) menunjukkan bahwa bahan organik dapat menurunkan aluminium dapat dipertukarkan melalui pembentukan kompleks organik yang stabil dan meningkatkan kualitas tanah masam. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa revegetasi tanaman sengon berperan dalam menurunkan kandungan Al-dd dan memperbaiki kualitas tanah pascatambang. Meskipun demikian, kandungan Al-dd pada lahan revegetasi tanaman sengon usia 12 tahun masih berada pada kategori sedang, yang menunjukkan bahwa proses pemulihan tanah belum berlangsung sepenuhnya. Oleh karena itu, proses pemulihan sifat kimia tanah pascatambang masih berlangsung dan memerlukan waktu yang lebih panjang untuk mendekati kondisi hutan sekunder sebagai ekosistem acuan.

Berdasarkan seluruh parameter yang diamati, revegetasi tanaman sengon menunjukkan peran penting dalam memperbaiki sifat kimia tanah pada lahan pascatambang batubara. Perbaikan tersebut menunjukkan peningkatan beberapa sifat kimia tanah, meliputi C-organik, N-total, P-tersedia, kapasitas tukar kation (KTK), dan kejenuhan basa, serta menurunnya kandungan aluminium dapat ditukar pada lahan revegetasi dibandingkan lahan yang sedang ditambang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses revegetasi tanaman sengon berkontribusi terhadap pemulihan kondisi kimia tanah melalui peningkatan bahan organik dan perbaikan siklus hara tanah. Meskipun demikian, sebagian besar parameter kesuburan tanah pada seluruh parameter tersebut masih termasuk dalam kategori rendah hingga sangat rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pemulihan sifat kimia tanah pascatambang masih berlangsung dan dipengaruhi oleh karakteristik tanah yang telah mencapai tingkat pelapukan yang tinggi, tingkat kemasaman yang tinggi, serta proses pencucian hara yang intensif. Dengan demikian, revegetasi tanaman sengon yang lebih lama cenderung menghasilkan kondisi tanah yang lebih baik, tetapi pemulihan kualitas tanah secara menyeluruh memerlukan waktu yang lebih panjang untuk mendekati kondisi hutan sekunder sebagai ekosistem acuan.

Penentuan tingkat kesuburan tanah tidak dapat didasarkan pada satu sifat kimia saja karena setiap parameter saling berinteraksi. Berdasarkan hal tersebut, analisis korelasi dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antarparameter sifat kimia tanah, meliputi pH, C-organik, N-total, rasio C/N, P-tersedia, K-dd,

kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa, dan Al-dd. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai keterkaitan antarparameter serta dinamika perubahan sifat kimia tanah selama proses revegetasi pada lahan pascatambang batubara.

C. Korelasi Antar Sifat Kimia Tanah

Keterkaitan antarparameter sifat kimia tanah pada setiap lahan penelitian dievaluasi menggunakan analisis korelasi Pearson. Metode ini digunakan untuk menentukan arah hubungan sekaligus mengukur tingkat keeratan antarparameter yang diamati. Hasil pengujian korelasi tersebut disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Korelasi antar sifat kimia tanah pada berbagai lahan di lokasi penelitian

Variabel	pH	C-organik	N-total	Rasio C/N	P-tersedia	K-dd	KTK	Kejenuhan Basa	Al-dd
pH	1								
C-organik	-0,236	1							
N-total	-0,512	0,742**	1						
Rasio C/N	0,077	0,789**	0,198	1					
P-tersedia	-0,392	0,723**	0,691*	0,481	1				
K-dd	-0,238	-0,172	0,154	-0,255	0,059	1			
KTK	-0,404	0,414	0,555	0,237	0,468	0,793**	1		
Kejenuhan Basa	-0,059	0,195	0,365	0,005	0,395	0,639*	0,566	1	
Al-dd	0,235	-0,912**	-0,634*	-0,795**	-0,719**	-0,055	-0,601*	-0,297	1

Keterangan: ** Korelasi signifikan pada 0,01 (2-arah)

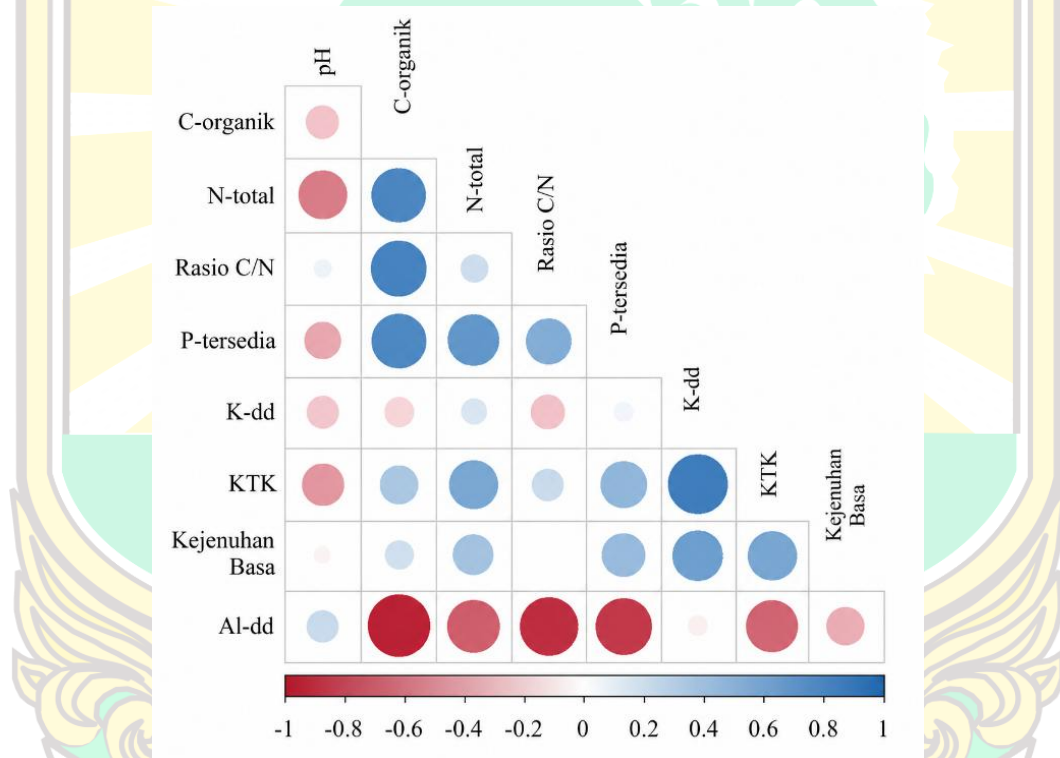
*Korelasi signifikan pada 0,05 (2-arah)

Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa beberapa parameter sifat kimia tanah memiliki hubungan yang signifikan. C-organik berkorelasi positif dengan N-total, rasio C/N, dan P-tersedia, yang mengindikasikan bahwa peningkatan bahan organik cenderung diikuti oleh meningkatnya kandungan nitrogen dan ketersediaan fosfor melalui proses dekomposisi. Selain itu, K-dd berkorelasi positif dengan KTK dan kejenuhan basa (KB), yang mengindikasikan bahwa tanah dengan kapasitas tukar kation lebih tinggi cenderung mampu mempertahankan kalium dalam jumlah yang lebih besar.

Hubungan yang berlawanan ditunjukkan oleh Al-dd, yang berkorelasi negatif dengan parameter C-organik, N-total, rasio C/N, P-tersedia, serta KTK. Di antara seluruh pasangan parameter, C-organik dan Al-dd memperlihatkan korelasi negatif yang paling kuat. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi

kandungan bahan organik berperan dalam menurunkan kandungan aluminium dapat ditukar melalui pembentukan kompleks organo-Al. Selain itu, peningkatan Al-dd cenderung menurunkan ketersediaan fosfor akibat fiksasi fosfat oleh aluminium pada tanah masam. Sementara itu, parameter pH tidak menunjukkan korelasi yang signifikan dengan parameter lainnya, yang mengindikasikan bahwa variasi pH di lokasi penelitian belum cukup berkontribusi dalam mendorong perubahan sifat kimia tanah secara nyata.

Hasil analisis korelasi Pearson disajikan dalam bentuk diagram korelasi (koregram) pada Gambar 2 untuk memperjelas hubungan antarparameter sifat kimia tanah. Diagram tersebut memudahkan interpretasi arah dan tingkat keeratan hubungan antar parameter.



Gambar 2. Diagram korelasi antar sifat kimia tanah pada berbagai lahan di lokasi penelitian

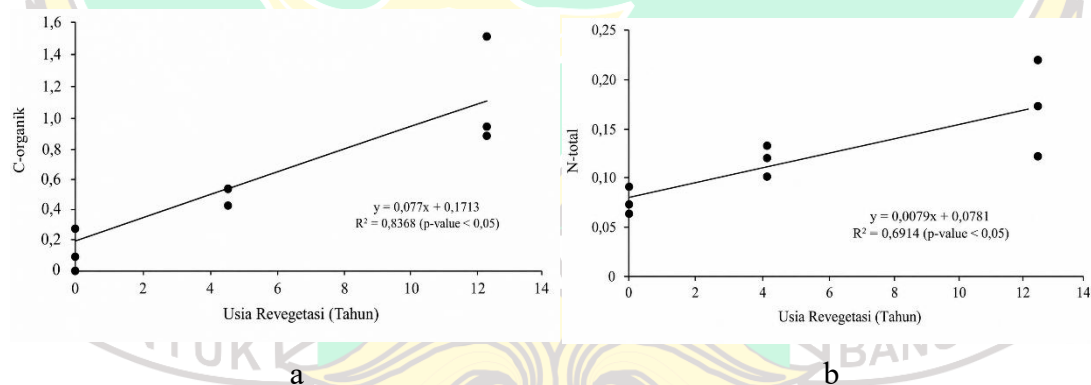
Keterangan: Pada visualisasi korelasi, warna merah menunjukkan korelasi negatif, sedangkan warna biru menunjukkan korelasi positif. Besar kecilnya lingkaran menggambarkan keeratan hubungan antarparameter, dengan lingkaran yang semakin besar menunjukkan korelasi yang semakin kuat. Skala korelasi ditunjukkan pada legenda warna dari -1 (negatif sempurna) hingga +1 (positif sempurna)

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa sebagian besar parameter sifat kimia tanah memiliki keterkaitan yang erat satu sama lain. Gambar tersebut

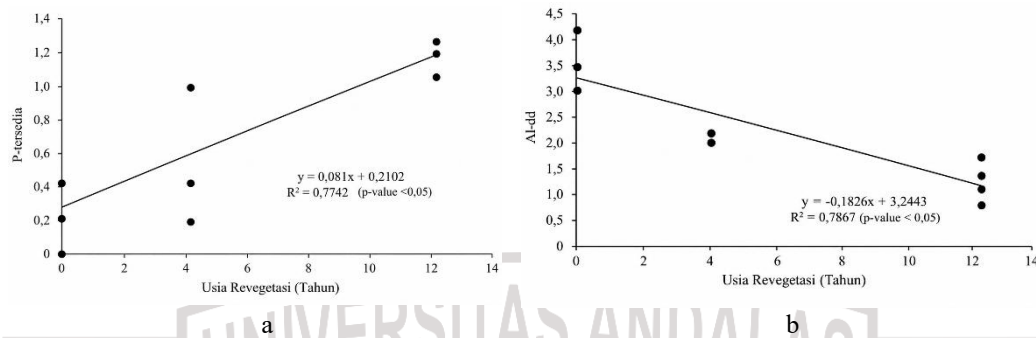
memperlihatkan bahwa C-organik memiliki hubungan positif yang kuat dengan N-total, rasio C/N, dan P-tersedia, serta K-dd menunjukkan hubungan positif dengan KTK dan kejenuhan basa (KB). Sebaliknya, Al-dd memperlihatkan hubungan negatif terhadap sebagian besar parameter kesuburan tanah, terutama dengan C-organik, rasio C/N, N-total, P-tersedia, dan KTK. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas kimia tanah selama proses revegetasi diikuti oleh peningkatan kandungan bahan organik, ketersediaan unsur hara, serta kapasitas tukar kation tanah dalam menahan kation, serta menurunnya kandungan aluminium dapat ditukar.

D. Analisis Regresi Linear antara Usia Revegetasi dan Sifat Kimia Tanah

Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk mengetahui hubungan antara usia revegetasi dan sifat kimia tanah pada seluruh parameter yang diamati. Berdasarkan hasil analisis, hanya parameter yang menunjukkan hubungan paling kuat dengan usia revegetasi yang disajikan dalam bentuk grafik, yaitu C-organik, N-total, P-tersedia, dan Al-dd. Keempat parameter tersebut dipilih karena memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) yang relatif lebih tinggi dibandingkan parameter lainnya, sehingga dianggap paling representatif dalam menggambarkan perubahan sifat kimia tanah selama proses revegetasi.



Gambar 3. Regresi linear sederhana antara usia revegetasi dengan C-organik (a) dan N-total (b).



Gambar 4. Regresi linear sederhana antara usia revegetasi dengan P-tersedia (a) dan Al-dd (b).

Hasil analisis regresi linear sederhana pada Gambar 3 menunjukkan bahwa usia revegetasi memiliki hubungan positif dengan kandungan C-organik dan N-total. Hubungan antara usia revegetasi dan C-organik tergolong sangat kuat dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8368 dan nilai p sebesar 0,001 ($p < 0,05$), yang menunjukkan bahwa 83,68% variasi kandungan C-organik dapat dijelaskan oleh usia revegetasi serta hubungan tersebut signifikan secara statistik. Sementara itu, hubungan usia revegetasi dengan N-total juga menunjukkan kecenderungan positif dengan nilai R^2 sebesar 0,6914 dan nilai p sebesar 0,005 ($p < 0,05$). Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin bertambah usia revegetasi, kandungan C-organik dan N-total tanah cenderung meningkat, dan hubungan tersebut signifikan secara statistik.

Peningkatan C-organik merupakan akibat dari semakin banyaknya masukan serasah, akar, dan biomassa tanaman yang terakumulasi selama proses revegetasi menggunakan tanaman sengon. Bahan organik tersebut kemudian mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme tanah sehingga menghasilkan humus sekaligus melepaskan unsur nitrogen ke dalam tanah. Oleh karena itu, peningkatan kandungan C-organik selama revegetasi diikuti oleh meningkatnya kandungan N-total. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi bahan organik berperan penting dalam memperbaiki cadangan nitrogen tanah serta meningkatkan kesuburan tanah pada lahan pascatambang.

Hasil analisis regresi linear sederhana pada Gambar 4 menunjukkan bahwa usia revegetasi memiliki hubungan positif dengan P-tersedia dan hubungan negatif dengan Al-dd. Hubungan antara usia revegetasi dan P-tersedia tergolong kuat dengan nilai R^2 sebesar 0,7742 dan nilai p sebesar 0,002 ($p < 0,05$),

sedangkan hubungan usia revegetasi dan Al-dd juga menunjukkan hubungan yang kuat dengan nilai R^2 sebesar 0,7867 dan nilai p sebesar 0,001 ($p < 0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya usia revegetasi cenderung meningkatkan kandungan fosfor tersedia sekaligus menurunkan kandungan aluminium dapat dipertukarkan (Al-dd), dengan kedua hubungan tersebut signifikan secara statistik.

Peningkatan P-tersedia diduga berkaitan dengan menurunnya kandungan Al-dd selama proses revegetasi. Pada tanah masam, ion Al^{3+} dapat mengikat fosfat membentuk senyawa yang sukar larut sehingga mengurangi ketersediaan fosfor bagi tanaman. Seiring bertambahnya usia revegetasi, akumulasi bahan organik mampu mengompleks Al sehingga kandungan Al-dd menurun. Penurunan Al-dd mengurangi fiksasi fosfor, sehingga jumlah fosfor yang tersedia di dalam tanah meningkat. Kondisi ini menunjukkan bahwa revegetasi tidak hanya berperan dalam menambah bahan organik tanah, tetapi juga memperbaiki ketersediaan unsur hara melalui penurunan aluminium dapat dipertukarkan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa revegetasi tanaman sengon berperan dalam memperbaiki kualitas kimia tanah pascatambang batubara melalui peningkatan kandungan bahan organik dan ketersediaan unsur hara yang diiringi oleh penurunan kadar aluminium dapat dipertukarkan (Al-dd). Informasi ini dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi keberhasilan revegetasi dan mendukung pengelolaan kualitas tanah pada lahan pascatambang. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya mengevaluasi sifat kimia tanah pada satu waktu pengambilan sampel, jumlah dan cakupan sampel yang terbatas pada empat tipe lahan di satu lokasi penelitian, serta belum mencakup analisis sifat fisik, biologi didalam tanah. Untuk memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai proses pemulihan tanah pascatambang, penelitian berikutnya perlu dilakukan melalui pengamatan secara berkala, penambahan cakupan lokasi dan jumlah sampel, serta penerapan analisis terpadu terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.