



Analisis Serapan Karbon *Beneficial Plant* pada Lahan Kelapa Sawit Berbasis *Life Cycle Assessment* (LCA)

Maisarah¹, Ingrid Ovie Yosephine², Hasanal Fachri Satia Simbolon³, Rahmad Dian⁴, Eka Bobby Febrianto⁵

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Aceh Indonesia, maisarah@unimal.ac.id

²Program Studi Budidaya Perkebunan, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan, Indonesia, ingrid_ovie@itsi.ac.id

³Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Tarbiyah dan Ilmu Komunikasi, UIN Syekh Ali Hasan Ahmad Addary, Padangsidempuan, Indonesia, hasanalfachri@gmail.com

⁴Program Studi Rekayasa Tekstil dan Apparel, Politeknik STTT Bandung, Bandung, Indonesia, rahmaddian27@gmail.com

⁵Program Studi Budidaya Perkebunan, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan, Indonesia, eka_bobby@itsi.ac.id

Corresponding Author: maisarah@unimal.ac.id¹

Abstract: *The increase of carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere has become one of the major drivers of global warming and is often associated with oil palm plantation activities. However, in addition to generating emissions, oil palm ecosystems also function as carbon sinks through both the main crop and beneficial plants such as legume cover crops. This study aims to analyze the carbon content of Mucuna bracteata as a legume cover crop in oil palm plantations using both direct and indirect approaches. Direct measurement was carried out using the Organic Carbon Walkley-Black: Colorimetric Method with a UV-VIS spectrophotometer, while indirect quantification was performed through Life Cycle Assessment (LCA) modeling using OpenLCA software supported by the Ecoinvent v.3 database. The results showed that the carbon content of M. bracteata leaves was relatively stable with a coefficient of variation below 0.2%, where the highest value was recorded at sample S2 (3.098 mg/mL per 0.1 g leaf). The LCA analysis supported these findings, indicating that M. bracteata contributes to reducing net CO₂ emissions in the oil palm plantation subsystem. These results demonstrate that M. bracteata has a strong capacity for carbon sequestration, consistent with previous studies highlighting its high biomass production, nitrogen fixation ability, soil quality improvement, and weed suppression. Therefore, M. bracteata can serve as an important carbon storage agent in oil palm agroecosystems, while supporting sustainable plantation practices and providing baseline data for carbon trading schemes.*

Keyword: *Carbon, Palm Oil, Sequestration, Beneficial Plant, LCA*

Abstrak: Peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer merupakan salah satu isu utama pemanasan global yang kerap dikaitkan dengan aktivitas perkebunan kelapa sawit. Namun, selain menghasilkan emisi, ekosistem kelapa sawit juga berperan sebagai penyerap karbon melalui tanaman utama maupun tanaman penutup tanah yang disebut *beneficial plant*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kadar karbon pada *Mucuna bracteata* sebagai tanaman penutup tanah leguminosa di lahan kelapa sawit. Pengukuran dilakukan dengan metode Organic Carbon Walkley-Black: Colorimetric Method menggunakan spektrofotometer UV-VIS. sedangkan pengukuran tidak langsung dilakukan melalui pemodelan *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan bantuan perangkat lunak OpenLCA dan database Ecoinvent v.3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar karbon daun *M. bracteata* relatif stabil dengan koefisien variasi <0,2%, di mana nilai tertinggi tercatat pada sampel S2 sebesar 3,098 mg/mL per 0,1 g daun. Analisis LCA mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan potensi kontribusi *M. bracteata* dalam menekan emisi bersih CO₂ pada subsistem perkebunan kelapa sawit. Konsistensi kadar karbon tersebut mengindikasikan kemampuan *M. bracteata* dalam menyerap karbon, sejalan dengan literatur yang menegaskan biomassa tinggi dan kontribusinya terhadap perbaikan sifat tanah, fiksasi nitrogen, dan pengendalian gulma. Dengan demikian, *M. bracteata* berpotensi menjadi agen penyimpanan karbon yang signifikan di ekosistem perkebunan kelapa sawit sekaligus mendukung penerapan perkebunan berkelanjutan dan baseline data untuk perdagangan karbon.

Kata Kunci: Karbon, Sawit, Penyerapan, *Beneficial Plant*, LCA

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan pusat produksi dan ekspor kelapa sawit dunia. Dari tahun 1980 hingga 2020, luas lahan sawit meningkat tajam dari 0,3 juta ha menjadi 14,8 juta ha, menjadikannya sektor vital dalam perekonomian nasional ((Nurhadi et al., 2023; Zhao et al., 2023). Namun, pertumbuhan ini tidak terlepas dari tekanan lingkungan, khususnya peran industrinya dalam emisi gas rumah kaca dan deforestasi. Sebagai respons terhadap tren *green economy* global, evaluasi terhadap kinerja lingkungan industri sawit menjadi sangat penting (Yami et al., 2015). Selain memproduksi emisi, tanaman sawit juga memiliki kemampuan menyerap karbon melalui sekuestrasi. Dalam kajian LCA yang komprehensif, diketahui bahwa pengolahan limbah seperti *palm oil mill effluent* (POME) dan pengolahan limbah cair menjadi dua penyumbang utama jejak karbon, oleh karena itu, optimalisasi pengelolaan limbah sangat strategis untuk mitigasi emisi ((Farizal et al., 2024). Sementara itu, studi berbasis LCA di lingkup perkebunan menemukan bahwa pemanfaatan limbah organik khususnya sisa TBS dan limbah cair dapat mengurangi emisi GHG hingga 17–34 % dari volume produksi (Harimurti & Noor, 2021).

Penelitian (Maisarah et al., 2024), telah menghasilkan penelitian pada proses sekuestrasi atau penyimpanan CO₂ pada seluruh fase tanaman kelapa sawit. Berdasarkan Kegiatan *Focus Group Discussion* yang dilaksanakan pada penelitian tersebut, didapatkan bahwa pemenuhan informasi terkait *beneficial plant*. Pada lahan perkebunan kelapa sawit terdapat berbagai macam *beneficial plant* yang dapat juga berpotensi sebagai agen penyimpanan CO₂ di perkebunan kelapa sawit (Hutajulu et al., 2023; Mariana et al., 2023; Syarovy et al., 2021). Tanaman *beneficial plant* dapat berupa pengendalian hayati dan tanaman penutup tanah (H. B. Hasibuan et al., 2024). Tanaman *beneficial plant* yang juga sangat masif berada di lahan perkebunan kelapa sawit juga dapat dijadikan sebagai agen penyimpanan karbon sehingga tanaman pengendalian hayati seperti *Turnera subulata*, *Antigonon leptopus* dan tanaman penutup tanah seperti *Mucuna bracteata* memiliki potensi penyimpanan karbon. Pada penelitian ini akan digunakan *beneficial plant* berupa *Mucuna bracteata* serta digunakan teknologi berupa *software* LCA sebagai perhitungan secara tidak

langsung, untuk meminimalisir kesalahan perhitungan data sebagai data pada *baseline trading carbon*.

Interpretasi potensi serapan karbon tidak bisa dilepaskan dari konteks perubahan penggunaan lahan. Konversi hutan, khususnya lahan gambut, ke kebun sawit sering memicu pelepasan karbon yang besar dan mengancam fungsi lahan sebagai *carbon sink* alami (Negm et al., 2018; Syarifuddin et al., 2019). Oleh karena itu, perlu dicermati neraca antara emisi dan serapan dalam setiap fase pertumbuhan tanaman serta subsistem pengelolaan kebun yang lebih luas selain dari tanaman kelapa sawit itu sendiri. Penelitian ini bertujuan membandingkan perhitungan serapan karbon secara langsung maupun melalui pendekatan LCA pada *beneficial plant* pada lahan kelapa sawit, sehingga dapat menyajikan data yang lebih akurat untuk mendukung praktek *carbon trading* dan mitigasi perubahan iklim.

Rumusan permasalahan pada penelitian ini adalah apakah *beneficial plant* juga dapat bertindak sebagai agen penyimpanan karbon? Sehingga gambaran besar penelitian ini nantinya ialah untuk dapat memberikan *big data* dan memudahkan terhadap proses emisi dan penyerapan karbon di Industri Kelapa Sawit secara spesifik dan akurat dalam konsep *trading karbon*. Urgensi penelitian ini yaitu untuk mendapatkan data mengenai serapan karbon dengan data *beneficial plant* yang ada di perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

METODE

Tempat dan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dan preparasi sampel dilakukan di Kebun Percobaan dan Laboratorium Institut Teknologi Sawit Indonesia (ITSI), Medan, Sumatera Utara. Sampel seluruh kelompok tanaman kelapa sawit diambil dari Kebun Institut Teknologi Sawit Indonesia (ITSI), Medan. Pada Area ini merupakan area dengan jenis tanah mineral. Pengukuran Kadar Karbon dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Sumatera Utara, Medan.

Data Penelitian

Jenis data yang digunakan pada penelitian ini meliputi data primer maupun data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran di lapangan yaitu kadar karbon *beneficial plant Mucuna bracteata* sedangkan data sekunder diperoleh dari laporan dan dokumen kebun yang peta blok dan peta tahun tanam. Selain itu data sekunder juga diperoleh data pencarian literatur terkait data penyerapan karbon yang sudah dilakukan untuk diinput ke dalam software LCA.

Rancangan Penelitian

Teknik penarikan sampel dilakukan dengan menggunakan metode purposive sampling atau teknik penentuan sampel dengan pertimbangan tertentu. Bahan yang dipakai dalam penelitian ini adalah berupa tegakan pohon, *beneficial plant* pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Tegakan *Mucuna bracteata* pada lahan kelapa sawit

Metode yang digunakan yaitu diawali survey dan sensus *Mucuna bracteata* pada lahan kelapa sawit pada lokasi kebun yang telah ditentukan. Pengambilan data dilakukan dengan metode destruktif pada perhitungan secara langsung dan non-destruktif dengan menggunakan rumus persamaan allometrik pada perhitungan secara tidak langsung. Pengukuran dilakukan pada 3 kali ulangan. Bahan pendukung lain adalah berupa kantong plastik dan tali rafia yang dipakai untuk pengepakan sampel. Alat yang diperlukan adalah pita ukur, timbangan digital dengan skala gram, golok, cangkul, tally sheet, alat tulis, karung dan oven.

Pelaksanaan Penelitian di Laboratorium

Pengukuran biomassa tumbuhan secara langsung

Pengukuran Karbon didasarkan pada pengukuran karbon menggunakan prinsip kolorimetri metode *Organic Carbon Walkley-Black Method: Colorimetric Method* dengan spektrofotomer UV-VIS dengan menggunakan instrumen *Microplate reader absorbance*. Preparasi sampel dilakukan pada seluruh sampel. Sebanyak 0,1 g sampel dimasukkan kemudian ditambahkan larutan 2 mL $K_2Cr_2O_7$ 10% (0,34 M) selanjutnya ditambahkan 5,0 mL H_2SO_4 , dinginkan dan diamkan selama 30,0 menit. Kemudian ditambahkan 20,0 mL air ke dalam tabung. Sampel dicampur dan diamkan semalaman. Selanjutnya absorbansi standar kalibrasi dan sampel dalam spektrofotometer yang diatur pada panjang gelombang 600 nm. Standar Kalibrasi yang digunakan yaitu menggunakan standar larutan sukrosa sesuai pada tabel 1.

Tabel 1. Preparasi Larutan Standar

Mass of OC. (mg)	Sucrose Standard (4 mg C/mL) (mL)	H ₂ O (mL)
0	0.00	2.00
1	0.25	1.75
2	0.50	1.50
3	0.75	1.25
4	1.00	1.00
5	1.25	0.75
6	1.50	0.50
7	1.75	0.25
8	2.00	0.00

Metode pengukuran Secara Tidak Langsung

Pengukuran biomassa secara tidak langsung akan mengidentifikasi beberapa penggunaan artikel menggunakan pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis* (PRISMA). Pada penelitian ini digunakan beberapa penelitian untuk melihat data serapan karbon pada subsistem perkebunan sawit terlebih dahulu. Pada *database Scopus*, penulis menggunakan TITLE-ABSKEY *life cycle assessment*, *LCA*, *oil palm*. Selain itu, penelitian menggunakan topik (TS) TS: *life cycle assessment* dan *oil palm* dari database WoS. Selanjutnya memeriksa secara teliti artikel -artikel (judul, penulis, jurnal, dan tahun terbit). Selain itu digunakan pula artikel yang berasal dari Indonesia untuk melengkapi kriteria pada penelitian yang berbasis di Indonesia. Selanjutnya data yang didapat dikumpulkan untuk dimasukkan ke dalam aplikasi Perhitungan secara tidak langsung. Pada penelitian ini, perhitungan dampak dilakukan dengan menggunakan aplikasi OpenLCA dan bantuan database Ecoinvent v.3. Untuk memudahkan perhitungan dan mengurangi kesalahan perhitungan maka penggunaan aplikasi ini digunakan. OpenLCA menggunakan metode berbasis matriks yang memiliki metode perhitungan yang dijalankan secara matematis sebagai *Life Cycle Inventory* (LCI). Perangkat lunak OpenLCA digunakan untuk membangun model siklus hidup. Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang menggambarkan apa saja yang akan dikerjakan selama waktu yang diusulkan mulai dari persiapan bahan sampai pada penarikan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

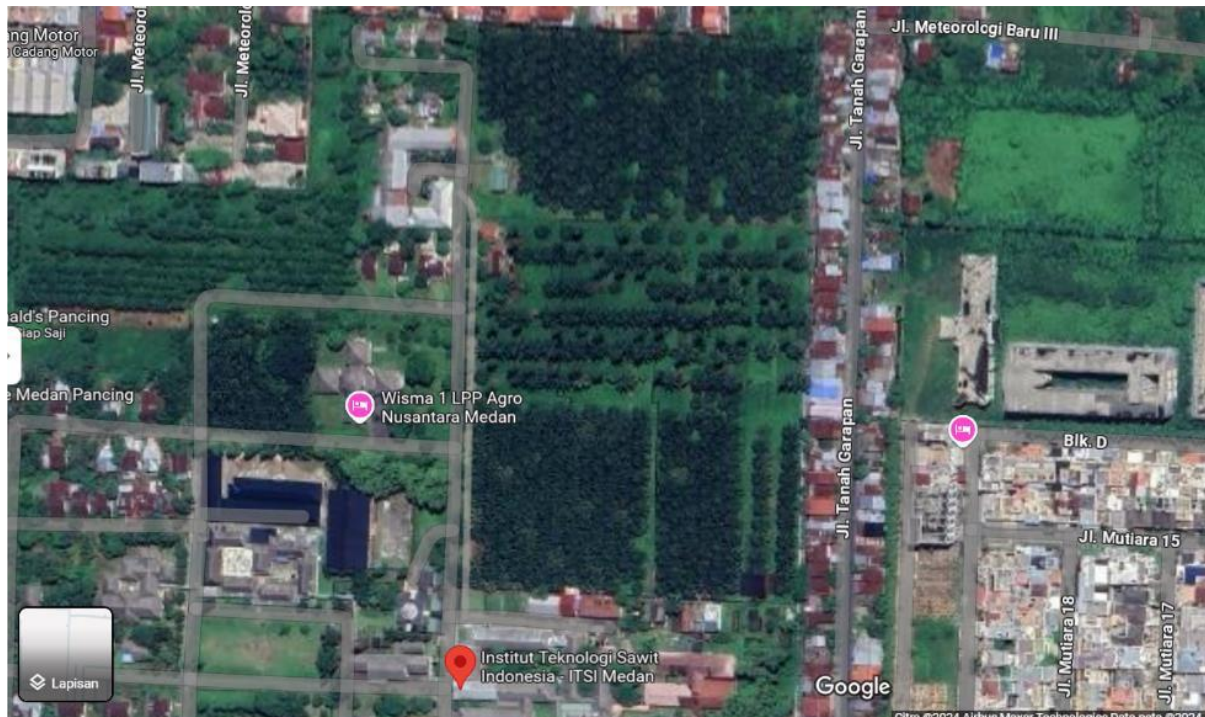
Biomassa dan Potensi Karbon *Beneficial plant Mucuna bracteata*

Mucuna bracteata dilaporkan mampu menghasilkan biomassa kering hingga 8–10 ton/ha/tahun, lebih tinggi dibanding tanaman penutup tanah lainnya (Supriyadi et al., 2017). Tingginya akumulasi biomassa memungkinkan tanaman ini menyerap CO₂ dalam jumlah signifikan melalui proses fotosintesis, yang kemudian tersimpan dalam jaringan tanaman dan bahan organik tanah. Penelitian di Benin menunjukkan bahwa penanaman *Mucuna* dapat meningkatkan stok karbon tanah hingga 1,3 ton C/ha/tahun pada kedalaman 0–40 cm (Elberling & Brandt, 2003). Selain menyimpan karbon dalam biomassa, *M. bracteata* juga meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Penelitian di Malaysia menunjukkan adanya peningkatan kandungan bahan organik dari 1,44% menjadi 2,22% pada lahan miring setelah penanaman *M. bracteata* selama beberapa tahun (Supriyadi et al., 2017). Peningkatan ini sangat penting untuk menjaga produktivitas tanah serta mendukung keberlanjutan perkebunan kelapa sawit. Pertumbuhan vegetatif *M. bracteata* yang menutupi permukaan tanah mampu menurunkan erosi dan limpasan air hujan. Hasil penelitian di Riau, Indonesia, menunjukkan bahwa penanaman *M. bracteata* secara signifikan mengurangi kehilangan tanah pada lahan miring 25% dibanding lahan tanpa penutup tanah (Wawan et al., 2019). Dengan demikian, selain menyerap karbon, *M. bracteata* juga menjaga stabilitas ekosistem tanah. Pemanfaatan *M. bracteata* dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk nitrogen sintetis melalui mekanisme fiksasi nitrogen, sehingga berkontribusi terhadap penurunan emisi N₂O dari tanah. Selain itu, tanaman ini mampu menekan pertumbuhan gulma, mengurangi penggunaan herbisida, serta meningkatkan efisiensi produksi sawit secara keseluruhan. Oleh karena itu, penerapan *M. bracteata* sejalan dengan prinsip perkebunan kelapa sawit berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim.

Isu perubahan iklim dan pemanasan global telah menjadi perhatian utama dalam pembangunan berkelanjutan. Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer yang mencapai lebih dari 420 ppm pada tahun 2022 berkontribusi terhadap ketidakseimbangan iklim global. Perkebunan kelapa sawit, sebagai salah satu komoditas utama Indonesia, kerap dikaitkan dengan degradasi tanah dan emisi karbon akibat pembukaan lahan serta praktik budidaya yang kurang berkelanjutan. Salah satu pendekatan untuk mengurangi emisi karbon di lahan sawit adalah melalui penerapan tanaman penutup tanah leguminosa (*Legume Cover Crop*). *Mucuna bracteata* merupakan spesies yang banyak direkomendasikan karena pertumbuhannya yang cepat, tahan naungan, dan mampu menghasilkan biomassa dalam jumlah besar (Herath et al., 2017). Tanaman ini juga mampu melakukan fiksasi nitrogen, menekan gulma, dan meningkatkan kandungan karbon organik tanah.

Hasil Pengamatan Kelompok Sampel Penelitian

Pengambilan sampel daun tanaman kelapa sawit pada penelitian ini telah dilakukan di Institut Teknologi Sawit Indonesia pada bulan Juli 2024 berdasarkan prosedur metode sampling dan pengambilan data karbon menggunakan metode “*Organic Carbon Walkley-Black Method: Colorimetric*”. Seluruh tahapan proses pengambilan sampel mengacu pada Buku *Standard Operating Procedure* yang dikeluarkan oleh Global Soil Laboratory Network GLOSOLAN dengan kode Dokumen GLOSOLAN-SOP-02 *Version number 1* (Global Soil Laboratory Network, 2019). Prosedur pengambilan sampel didasarkan pula pada penelitian serupa oleh Farista & Virgota, 2021; Jannah et al., 2021 dalam pengukuran kadar karbon pada tanaman (Farista & Virgota, 2021; Jannah et al., 2021). Pada area perkebunan kelapa sawit di Institut Teknologi Sawit Indonesia merupakan area dengan jenis tanah mineral. Area perkebunan kelapa sawit yang menjadi tempat penelitian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tampilan Peta Menggunakan Google Earth pada Area Perkebunan Kelapa Sawit di Institut Teknologi Sawit Indonesia (Sumber: Google)

Teknik penarikan sampel dilakukan dengan menggunakan metode *purposive sampling* atau teknik penentuan sampel dengan pertimbangan tertentu. Gambar 3 menunjukkan tampilan lahan perkebunan kelapa sawit yang dijadikan tempat pengambilan sampel. Bahan yang dipakai dalam penelitian ini adalah daun pada tanaman kelapa sawit dengan kriteria sebagai berikut:



Gambar 3. Titik Pengambilan Sampel (Sumber: Google)

Selanjutnya pada tahapan preparasi sampel, diawali dengan persiapan alat dan bahan untuk mengambil sampel daun yaitu, pisau, cutter, plastik klip, wadah penyimpanan sampel, serta egrek untuk pengambilan sampel daun yang tinggi. Seluruh sampel daun diambil pada cuaca yang normal tidak dalam cuaca dengan curah hujan yang tinggi pada waktu yang sama. Selanjutnya sampel dari lahan perkebunan kelapa sawit Kampus ITSI Medan dibawa ke

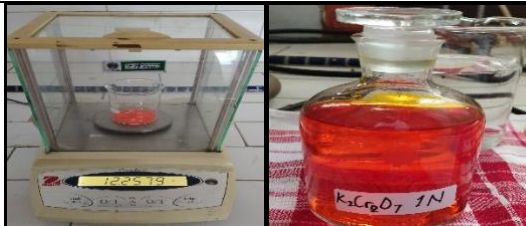
laboratorium Institut Teknologi Sawit Indonesia. Sampel daun kemudian dilakukan pencacahan agar memiliki luas permukaan yang besar. Ukuran partikel biomassa dikurangi dengan penggilingan yang akan meningkatkan luas permukaan (Maisarah et al., 2021). Ukuran partikel yang lebih kecil dilakukan, karena akan memberikan lebih besar luas permukaan yang tersedia untuk ikatan antar partikel pada bagian melakukan reaksi dengan bahan kimia pada pengukuran karbon. Kemudian proses penghalusan dan pengayakan dilakukan untuk membuat bahan menjadi partikel yang lebih kecil. Karena semakin kecil bahan akan semakin mudah polutan melakukan penetrasi ke dalam bahan tersebut. Pada tahapan ini pula daun kelapa sawit dibersihkan dari pengotor-pengotor seperti debu, hama, dll yang menempel pada permukaan daun. Sehingga dengan adanya tahapan proses ini, dapat dipastikan bahwa penggunaan daun bersih dari pengotor.

Preparasi Larutan dan Larutan Standar Pengukuran Karbon

Pengukuran Karbon didasarkan pada pengukuran karbon menggunakan prinsip kolorimetri metode *Organic Carbon Walkley-Black Method: Colorimetric Method* dengan spektrofotometer UV-VIS dengan menggunakan instrumen *Microplate reader absorbance*. Instrumen UV-VIS yang digunakan pada penelitian ini berada pada Laboratorium Terpadu Universitas Sumatera Utara. Untuk Metode Kolorimetri, preparasi didasarkan Buku *Standard Operating Procedure* yang dikeluarkan oleh Global Soil Laboratory Network GLOSOLAN dengan kode Dokumen GLOSOLAN-SOP-02 *Version number 1* (Global Soil Laboratory Network, 2019). Pada tahapan awal disiapkan air deionisasi yang menggunakan air deionisasi/air suling yang memiliki $EC < 1,5 \times 10^{-3} \text{ dS m}^{-1}$. Selanjutnya pada penelitian ini digunakan Asam Sulfat Pekat H_2SO_4 (tidak kurang dari 96%). Selanjutnya disiapkan bahan kimia Kalium Dikromat $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 10% (0,34 M) dengan melarutkan 50,0 g kadar analitis $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ yang dicampurkan dalam 500 mL air deionisasi/suling. Sebagai larutan standar digunakan larutan Sukrosa Standar (4 mg C/mL) dengan melakukan penimbangan 0,95 g sukrosa (dikeringkan pada suhu 105°C selama dua jam) dan dilarutkan dalam 100 mL air deionisasi/suling. Tabel 2 menunjukkan preparasi alat dan bahan untuk pengukuran kadar karbon.

Tabel 2. Preparasi Alat dan Bahan Penelitian

Keterangan	Gambar	
Tahapan Pengambilan Sampel Daun Kelapa Sawit		
Penyimpanan Sampel di Plastik Klip dan tempat Penyimpanan Sampel di Wadah		
Persiapan Asam Sulfat Pekat dan Aquadest yang digunakan		

Keterangan	Gambar
Preparasi Larutan Kalium Dikromat yang Digunakan	
Preparasi Larutan Standar Sukrosa	

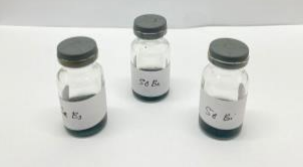
Selanjutnya pembuatan larutan Standar Kalibrasi yang digunakan yaitu menggunakan standar larutan sukrosa.

Pengukuran kadar karbon secara langsung

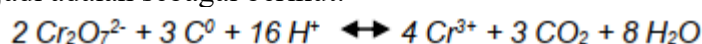
Preparasi sampel dilakukan pada seluruh kelompok tanaman kelapa sawit. Sebanyak 0,1 g sampel dimasukkan kemudian ditambahkan larutan 2 mL $K_2Cr_2O_7$ 10% (0,34 M) dan dikocok selanjutnya ditambahkan 5,0 mL H_2SO_4 , dinginkan dan diamkan selama 30,0 menit. Kemudian ditambahkan 20,0 mL air ke dalam *beaker glass*. Sampel dicampur dan diamkan semalaman. Selanjutnya absorbansi standar kalibrasi dan sampel dalam spektrofotometer yang diatur pada panjang gelombang 600 nm. Sebelum dilakukan pengukuran, sampel dipreparasi terlebih dahulu untuk memperoleh sampel karbon yang representatif. Proses preparasi sampel tanaman kelapa sawit pada penelitian ini terdiri atas tahapan destruksi. Sampel *Mucuna bracteata* ditimbang sebanyak 0,1 g kemudian dilakukan pengayakan menggunakan mesh. Pengukuran dilakukan pada 3 tanaman kelapa sawit untuk setiap plot sampelnya.

Tabel 3. Hasil Preparasi Sampel untuk Pengukuran Kadar Karbon menggunakan Instrumentasi UV-Vis

Keterangan	Gambar
Aquadest	
Larutan Blanko	
Larutan Standar 1 dan Standar 2	

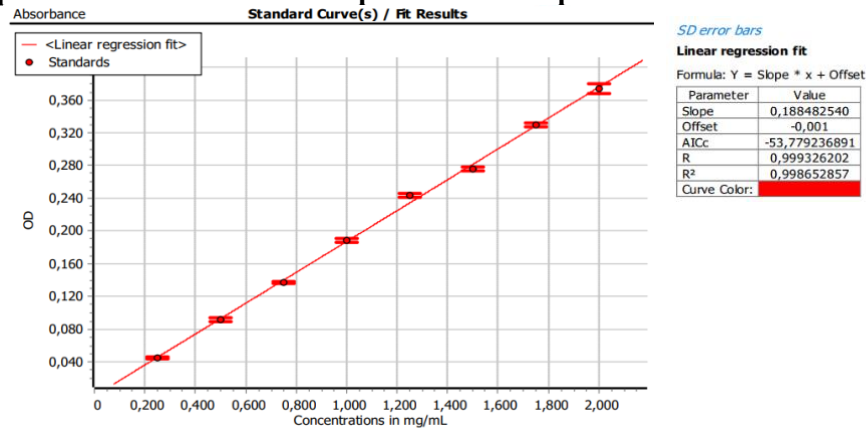
Keterangan	Gambar	
Larutan Standar 3 dan Standar 4		
Larutan Standar 5 dan Standar 6		
Standar 7 dan 8		
Sampel Mucuna Bracteata		

Selanjutnya pengukuran karbon dilakukan dengan menggunakan metode *Organic Carbon Walkley-Black Method: Colorimetric Method*. Penentuan karbon organik ini dipilih karena merupakan metode yang akurat untuk mengetahui kadar karbon yang didasarkan pada metode oksidasi basah asam kromat Walkley & Black. Karbon organik dioksidasi oleh larutan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,167 M dalam asam sulfat pekat. Panas pada reaksi menaikkan suhu yang cukup untuk memicu terjadinya oksidasi substansial. Reaksi kimia yang terjadi adalah sebagai berikut:



$Cr_2O_7^{2-}$ yang direduksi selama reaksi sebanding dengan C organik yang dapat dioksidasi yang ada dalam sampel. Karbon organik kemudian dapat diperkirakan dengan mengukur sisa dikromat yang tidak direduksi, karbon organik dapat dihitung dari jumlah ion kromat (Cr^{3+}) yang terbentuk, menggunakan prosedur kolorimetri yang mengukur absorbansi pada 600 nm. Keuntungan prosedur ini dibandingkan metode titrimetri adalah tidak diperlukannya standarisasi larutan $Cr_2O_7^{2-}$ yang akurat. Sehingga preparasi sampel dilakukan pada seluruh kelompok tanaman kelapa sawit. Sebanyak 0,1 g sampel dimasukkan kemudian ditambahkan larutan $K_2Cr_2O_7$ 10% (0,34 M) selanjutnya ditambahkan 5,0 mL H_2SO_4 , dinginkan dan diamkan selama 30,0 menit. Kemudian ditambahkan 20,0 mL air ke dalam tabung. Sampel dicampur dan diamkan semalaman. Selanjutnya absorbansi standar kalibrasi dan sampel dalam spektrofotometer yang diatur pada panjang gelombang 600 nm.

Kuantifikasi Sampel Beneficial Plant *Mucuna* pada lahan kelapa sawit



Gambar 4. Kurva Kalibrasi Pengukuran Karbon

Kuantifikasi Pengukuran karbon dilakukan dengan mengukur nilai absorbansi menggunakan instrumentasi Spektrofotometri UV-VIS. Spektrometri ultraviolet/sinar tampak menyangkut absorpsi sinar ultraviolet/sinar tampak oleh molekul yang menyebabkan promosi elektron dari keadaan dasar (ground state) ke keadaan tereksitasi (excited state). Instrumen yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan *Microplate reader absorbance* menggunakan *microplate*.



Gambar 5. (a). Instrumen *Microplate reader absorbance* (b) Sampel pada *Microplate*

Metode kuantifikasi karbon dilakukan secara langsung menggunakan prinsip spektrofotometri. Panjang gelombang yang digunakan adalah 600 nm sesuai dengan panjang gelombang spesifik untuk pengukuran karbon. Pengukuran karbon pada penelitian ini sesuai dengan metode untuk penentuan karbon yang ada pada GLOSOLAN-SOP-02 dari Global Soil Laboratory Network secara internasional.

Tabel 4. Tabel Pengamatan *Mucuna bracteata* pada lahan Tanaman Kelapa Sawit

Keterangan	Pengukuran 1 (mg/mL)	Pengukuran 2 (mg/mL)	Pengukuran 3 (mg/mL)
S1	2,968	2,960	2,965
S2	3,097	3,099	3,097
S3	2,953	2,951	2,957

Tabel 4. menunjukkan data pengukuran kadar karbon pada *Mucuna bracteata* pada lahan kelapa sawit. Pada Pengukuran 1 dapat dilihat bahwa *Mucuna bracteata* pada lahan kelapa sawit Main menunjukkan pengukuran kadar karbon yang cukup tinggi yaitu 3,097 mg/mL per 0,1 g sampel daun. Hal ini mendekati pengukuran karbon tanaman kelapa sawit

pada fase *main nursery* (Maisarah et al., 2024). Dari tiga titik/ulangan (S1–S3), rerata kadar karbon (mg/mL per 0,1 g sampel daun) dan ragamnya adalah:

1. S1: 2,964 mg/mL (SD $\approx$ 0,004; CV $\approx$ 0,14%)
2. S2: 3,098 mg/mL (SD $\approx$ 0,001; CV $\approx$ 0,04%) – tertinggi
3. S3: 2,954 mg/mL (SD $\approx$ 0,003; CV $\approx$ 0,10%)

Ragam yang kecil (CV < 0,2%) menunjukkan pengukuran stabil dan replikasi konsisten. Secara praktis, S2 memiliki kadar karbon daun tertinggi, mengindikasikan kondisi tumbuh/lingkungan dan/atau status fisiologi daun yang lebih mendukung akumulasi karbon terlarut/terukur pada metode yang digunakan dibanding S1 dan S3. Keterkaitan dengan peran *M. bracteata* sebagai LCC (legume cover crop). Sebagai penutup tanah leguminosa yang cepat tumbuh dan berbiomassa tinggi, *M. bracteata* dikenal meningkatkan kesehatan tanah dan mendukung produktivitas sistem kelapa sawit. Studi lapangan terbaru pada kebun kelapa sawit muda di Sumatera Utara menunjukkan bahwa petak yang ditanami *M. bracteata* memiliki respirasi tanah, populasi fauna tanah, dan biomassa penutup lebih tinggi dibanding alternatif penutup (mis. ubi jalar); sebagian parameter kimia tanah (termasuk C-organik tanah) cenderung setara, namun indikator biologis dan K-tukar lebih baik pada *M. bracteata*. Peningkatan masukan serasah dan aktivitas biota tanah dari *M. bracteata* sejalan dengan peningkatan penyerapan hara daun kelapa sawit (N dan P). Temuan-temuan ini mendukung interpretasi bahwa tingginya kadar karbon jaringan daun (seperti pada S2) konsisten dengan performa fisiologis tanaman penutup yang vigor di sistem sawit. Berbagai kajian di Malaysia dan Indonesia menunjukkan *M. bracteata* menghasilkan biomassa dan mulsa yang besar dan persisten di bawah naungan sawit, dengan peran penting pada pengembalian bahan organik dan N ke tanah, serta pengendalian gulma. Bahkan ketika biomassa dipanen berkala, *M. bracteata* tetap menyediakan biomassa substansial tanpa menurunkan sifat fisikokimia tanah; frekuensi panen 6-bulanan sering dianggap kompromi yang baik antara perolehan biomassa dan pemulihan tajuk. Dalam konteks penelitian ini, nilai karbon daun yang tinggi pada S2 ($\approx$ 3,098 mg/mL) selaras dengan literatur yang menempatkan *M. bracteata* sebagai “penambang” karbon yang efisien melalui pertumbuhan vegetatif cepat dan siklus serasah yang intens.

Perbedaan antar-titik (S1–S3) kemungkinan dipengaruhi variasi mikro-situs: intensitas cahaya di antar-gawangan, ketersediaan air, status N hasil fiksasi Rhizobium, dan tingkat kompetisi gulma. Literatur menegaskan bahwa genus *Mucuna* (termasuk *M. bracteata*) memperbaiki sifat hidro-fisik tanah, menekan gulma, dan meningkatkan fungsi ekosistem (biota tanah, agregasi), yang pada gilirannya mendukung akumulasi C pada jaringan tumbuhan maupun stok tanah. Hal ini memberi konteks biologis bagi profil kadar C daun yang relatif tinggi dan stabil yang diamati.

Nilai yang dinyatakan sebagai mg/mL per 0,1 g daun, menandakan pendekatan berbasis ekstraksi/analit cair dan kuantifikasi spektrofotometrik atau serupa. Keterkaitan dengan fase pembibitan/main nursery secara fisiologis ialah jaringan daun muda yang aktif fotosintesis umumnya memperlihatkan kandungan C larut yang relatif tinggi.

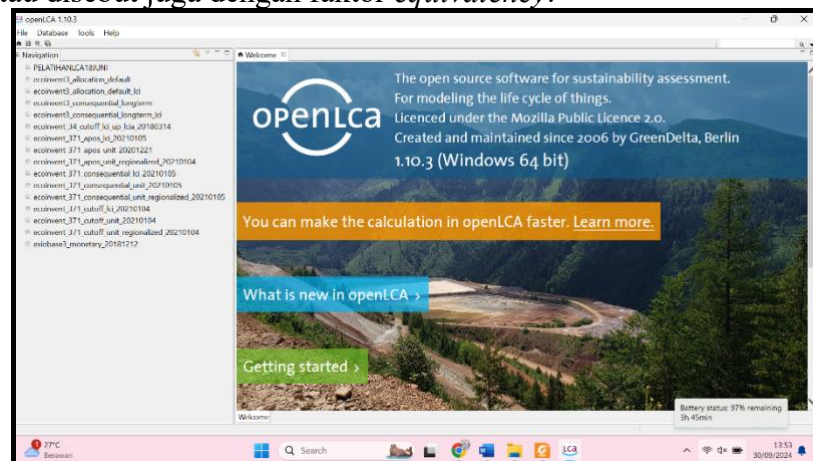
Pelaksanaan Penelitian di Laboratorium Komputer

Kuantifikasi Sampel Karbon pada kelompok Tanaman Kelapa Sawit secara LCA

Pada penelitian ini, perhitungan dampak dilakukan dengan menggunakan aplikasi OpenLCA dan bantuan database Ecoinvent v.3. Untuk memudahkan perhitungan dan mengurangi kesalahan perhitungan maka penggunaan aplikasi ini digunakan. OpenLCA menggunakan metode berbasis matriks yang memiliki metode perhitungan yang dijalankan secara matematis sebagai Life Cycle Inventory (LCI). Perangkat lunak OpenLCA digunakan untuk membangun model siklus hidup. Selanjutnya Kuantifikasi Secara Tidak langsung digunakan aplikasi OpenLCA dan database ecoinvent. Gambar 6 menunjukkan tampilan aplikasi OpenLCA yang digunakan sebagai perhitungan.

Penilaian dampak

Analisa *life cycle impact assessment* (LCIA) berupa metode penilaian dampak siklus hidup yang berbeda dapat memberikan hasil yang berbeda dalam hal nilai, kategori dampak, unit, dll. (Nishikawa et al., 2018). Metode yang digunakan untuk langkah penilaian dampak adalah CML (Nishikawa et al., 2018; Rathore & Mondal, 2018). Metodologi CML 2001 untuk penilaian dampak siklus hidup dikembangkan oleh Institut Ilmu Lingkungan di Universitas Leiden di Belanda. Metodologi untuk penilaian dampak siklus hidup ini adalah salah satu metodologi yang paling diterima secara luas (Rathore & Mondal, 2018). Kategori dampak *midpoint* yang dipertimbangkan adalah GWP, Asidifikasi (AP) dan HTP. Setelah langkah klasifikasi dampak selesai, kuantifikasi dampak lingkungan oleh setiap parameter inventarisasi pada kategori dampak dapat dinilai. Faktor karakterisasi yang mencirikan kontribusi parameter inventaris tertentu ke kategori dampak yang ditetapkan memberikan cara praktis untuk kuantifikasi atau perhitungan dampak potensial. Kuantifikasi hanya dilakukan dalam kategori dampak tertentu, dimana faktor karakterisasi hanya membahas kontribusi relatif di antara parameter inventaris yang ditetapkan untuk kategori dampak tertentu. Dengan demikian, dampak lingkungan dari kategori dampak tertentu dapat dihitung dari hasil inventarisasi siklus hidup suatu sistem produk. Kunci untuk perhitungan dampak lingkungan yang diberikan oleh parameter inventarisasi pada kategori dampak adalah faktor karakterisasi atau disebut juga dengan faktor *equivalency*.



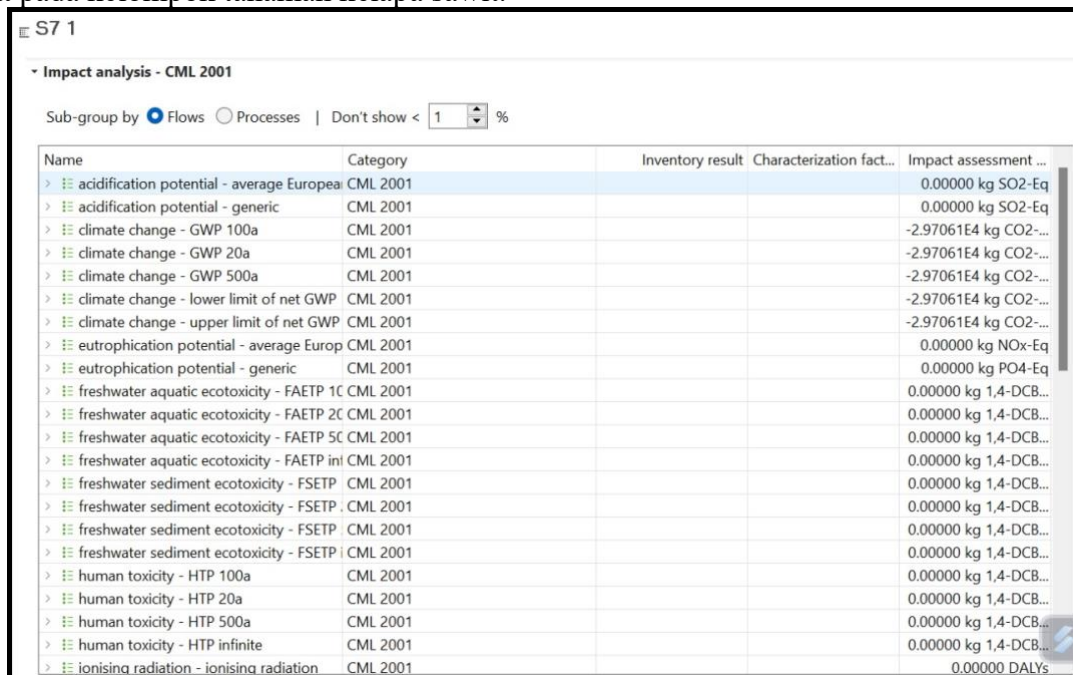
Gambar 6. Pengukuran Secara tidak langsung menggunakan OpenLCA



Gambar 7. Tampilan Flow Input dan Output pada OpenLCA

Faktor karakterisasi didasarkan pada prinsip kesetaraan yang digunakan dalam kimia. Faktor karakterisasi akan mengasumsikan bahwa emisi tertentu menyebabkan dampak lingkungan yang sama dimanapun dan bagaimanapun emisi terjadi, dengan tidak ada pertimbangan yang diberikan pada dampak lingkungan sebagai fungsi dari tingkat emisi dari waktu ke waktu. Namun, hal ini memungkinkan untuk mempertimbangkan efek geografis.

Pada penelitian ini input yang digunakan yaitu Jumlah Pokok serta Biomassa tanaman kelapa sawit pada kelompok tanaman kelapa sawit.



Name	Category	Inventory result	Characterization fact...	Impact assessment ...
> acidification potential - average Europe	CML 2001			0.00000 kg SO2-Eq
> acidification potential - generic	CML 2001			0.00000 kg SO2-Eq
> climate change - GWP 100a	CML 2001			-2.97061E4 kg CO2-Eq
> climate change - GWP 20a	CML 2001			-2.97061E4 kg CO2-Eq
> climate change - GWP 500a	CML 2001			-2.97061E4 kg CO2-Eq
> climate change - lower limit of net GWP	CML 2001			-2.97061E4 kg CO2-Eq
> climate change - upper limit of net GWP	CML 2001			-2.97061E4 kg CO2-Eq
> eutrophication potential - average Europe	CML 2001			0.00000 kg NOx-Eq
> eutrophication potential - generic	CML 2001			0.00000 kg PO4-Eq
> freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP 1C	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP 2C	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP 5C	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP int	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater sediment ecotoxicity - FSETP	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater sediment ecotoxicity - FSETP	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater sediment ecotoxicity - FSETP	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater sediment ecotoxicity - FSETP	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> freshwater sediment ecotoxicity - FSETP	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> human toxicity - HTP 100a	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> human toxicity - HTP 20a	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> human toxicity - HTP 500a	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> human toxicity - HTP infinite	CML 2001			0.00000 kg 1,4-DCB...
> ionising radiation - ionising radiation	CML 2001			0.00000 DALYs

Gambar 8 Hasil Dampak Lingkungan berupa CO₂ eq- pada OpenLCA

Analisis Komparatif pada Metode pengukuran Secara Tidak Langsung dengan LCA

Pengukuran secara tidak langsung akan mengidentifikasi beberapa penggunaan artikel menggunakan pendekatan Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis (PRISMA). Pada penelitian ini digunakan beberapa penelitian untuk melihat data serapan karbon pada subsistem perkebunan sawit terlebih dahulu. Pada database Scopus, penulis menggunakan TITLE-ABSKEY life cycle assessment, LCA, oil palm. Selain itu, penelitian menggunakan topik (TS) TS: life cycle assessment dan oil palm dari database WoS. Selanjutnya memeriksa secara teliti artikel -artikel (judul, penulis, jurnal, dan tahun terbit). Selain itu digunakan pula artikel yang berasal dari Indonesia untuk melengkapi kriteria pada penelitian yang berbasis di Indonesia. Selanjutnya data yang didapat dikumpulkan untuk dimasukkan ke dalam aplikasi Perhitungan secara tidak langsung. penggunaan aplikasi ini digunakan.

Tabel 5. Identifikasi Hasil Studi Menggunakan Perangkat Lunak LCA pada Industri Kelapa Sawit

No	Judul untuk Perangkat Lunak LCA yang digunakan	Penilaian Dampak Lingkungan	Referensi
1	Cradle To Gate Life Cycle Assessment Of Palm Oil Industry	Penilaian Emisi Gas Rumah Kaca pada Industri Perkebunan Kelapa Sawit	Ahmadi dkk., 2021 (Ahmadi et al., 2021)
2	Life Cycle Assessment Pada Pembibitan Kelapa Sawit Untuk Menghitung Emisi Gas Rumah Kaca		Al Hakim dkk., 2014 (Musthafa Al Hakim et al., 2014)
3	Life-Cycle Assessment Of Crude Palm Oil Produced At Mill J, PT XYZ, Sumatera Island Using Eco-Indicator 99		Andarani dkk., 2018 (Andarani et al., 2018)
4	Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Perkebunan Kelapa Sawit Dengan Pendekatan Life Cycle Assessment		Harimurti dkk., 2021 (Harimurti & Noor, 2021)
5	Life Cycle Impact Assessment Produksi Biodiesel Sawit Untuk Mendukung Keberlanjutan Hilirisasi Industri Sawit Indonesia		Hasibuan dkk., 2018 (S. Hasibuan & Thaheer, 2017)
6	Life Cycle Assessment (LCA) Untuk Rantai		lestari dkk., 2021

No	Judul untuk Perangkat Lunak LCA yang digunakan	Penilaian Dampak Lingkungan	Referensi
	Pasok Agroindustri Perkebunan Kelapa Sawit		(Hawari, 2020)
7	Life Cycle Assessment Produksi Crude Palm Oil (CPO)(Studi Kasus: PT X Provinsi Bengkulu)		Rinaldo dkk., 2023 (Rinaldo et al., 2023)
8	Life Cycle Assessment (LCA) In Palm Oil Plantation And Mill With Impact Categories Global Warming Potential, Acidification, And Eutrophication		Sari dkk., 2023 (D. A. P. Sari et al., 2023)
9	Implementation Of Life Cycle Assessment (LCA) For Oil Palm Industry In Aceh Province, Indonesia		Siregar dkk., 2020 (Siregar et al., 2020)
10	Life Cycle Assessment Of Biodiesel Production From Palm Oil In Indonesia		Soraya dkk., 2014 (Soraya et al., 2011)
11	Assessing The Environmental Performance Of Palm Oil Biodiesel Production In Indonesia: A Life Cycle Assessment Approach		Wahyono dkk., 2020 (Wahyono et al., 2020)
12	Estimasi Cadangan Karbon Kelapa Sawit Bibit Bersertifikat Pada Perkebunan Kelapa Sawit Kabupaten Serdang Bedagai Sumatera Utara		Sari anggraini, Nur afriyanti., 2019 (Sari anggraini, 2019)
13	Potensi biomassa dan simpanan karbon pada agroforestri kayu bawang dan kelapa sawit	Penilaian Serapan Karbon pada Industri Perkebunan Kelapa Sawit hanya berdasarkan perhitungan	Febria Dewita Sari, dkk., 2022 (F. D. Sari et al., 2022)
14	The dynamic of carbon dioxide (CO ₂) emission and land coverage on intercropping system on oil palm replanting area		Sri Ambar Kusumawati dkk., 2020 (Kusumawati et al., 2020)
15	“Uji Serapan Karbon (Sekuestrasi) Tanaman Kelapa Sawit berbasis Software Life Cycle Assessment (LCA) sebagai Baseline Pada Trading Karbon”	Penelitian Sebelumnya	Maisarah, Rahmad Dian, Eka Bobby, 2024(Maisarah et al., 2024)
16	“Analisis Serapan Karbon Beneficial Plant pada Lahan Kelapa Sawit Berbasis Life Cycle Assessment (LCA)”	Penelitian ini	Maisarah, Ingrid Ovie Yosephine, Hasanah Fachri Satia Simbolon (2025)

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Mucuna bracteata* memiliki kadar karbon daun yang relatif tinggi dan stabil pada lahan kelapa sawit, dengan nilai tertinggi tercatat pada sampel S2 yaitu 3,098 mg/mL per 0,1 g daun. Hasil tersebut memperlihatkan konsistensi kemampuan tanaman penutup tanah leguminosa ini dalam menyerap dan menyimpan karbon, sejalan dengan literatur yang menegaskan bahwa *M. bracteata* mampu menghasilkan biomassa besar, memperbaiki sifat biologis dan fisik tanah, serta mendukung siklus hara pada ekosistem perkebunan.

Secara ekologis, keberadaan *M. bracteata* tidak hanya berfungsi sebagai pengendali gulma dan penyedia nitrogen, tetapi juga berkontribusi nyata terhadap mitigasi emisi karbon melalui sekuestrasi biomassa. Perbedaan nilai antar titik pengukuran kemungkinan dipengaruhi oleh variasi faktor mikro-situs seperti intensitas cahaya, ketersediaan air, dan aktivitas fiksasi nitrogen. Dengan demikian, *M. bracteata* terbukti potensial sebagai *beneficial plant* yang mendukung praktik perkebunan kelapa sawit berkelanjutan sekaligus memberikan kontribusi terhadap strategi mitigasi perubahan iklim dan baseline data dalam perdagangan karbon.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan standarisasi pengukuran melalui analisis %C jaringan menggunakan metode CHN analyzer serta integrasi dengan pengukuran

C-organik tanah, sehingga dapat diperoleh gambaran neraca karbon yang lebih komprehensif pada sistem agroekosistem kelapa sawit.

REFERENSI

- Ahmadi, Mahidin, Faisal, M., Hamdani, Siregar, K., Erdiwansyah, Masturah, R., & Nasrullah. (2021). Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Palm Oil Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1143(1), 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1143/1/012044>
- Andarani, P., Dwi Nugraha, W., Sawitri, D., & Budiawan, W. (2018). Life-Cycle Assessment of Crude Palm Oil Produced at Mill J, PT XYZ, Sumatera Island using Eco-indicator 99. *MATEC Web of Conferences*, 159. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815901028>
- Elberling, B., & Brandt, K. K. (2003). Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil...of arctic C cycle. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 263–272.
- Farista, B., & Virgota, A. (2021). Serapan Karbon Hutam Mangrove di Bagek Kembar Kecamatan Sekotong Kabupaten Lombok Barat. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 9(June). <https://doi.org/10.33394/bjib.v9i1.3777>
- Farizal, F., Amanda, T., Dachyar, M., & Noor, Z. Z. (2024). 2030 oil palm plantation carbon footprint estimation using O-LCA and forecasting. *Journal of Cleaner Production*, 463(May), 142646. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142646>
- Global Soil Laboratory Network. (2019). Standard operating procedure for soil organic carbon: Walkley-Black method. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Harimurti, D., & Noor, E. (2021). Pengurangan emisi gas rumah kaca pada perkebunan kelapa sawit dengan pendekatan life cycle assessment. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 2018, 1–9.
- Hasibuan, H. B., Lesmana, R. N., Parinduri, S., & Maisarah. (2024). The Influence Of The Time Of Light Trap Application On The Effectiveness Of Capturing (Metisa Plana) Bagworm At Plantation PT. Perkebunan Nusantara IV. *Agro Estate*, 8(1).
- Hasibuan, S., & Thaheer, H. (2017). Life Cycle Impact Assessment Produksi Biodiesel Sawit Untuk Mendukung Keberlanjutan Hilirisasi Industri Sawit Indonesia. *Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri 2017 ITN Malang*, 1–7.
- Hawari, N. A. (2020). Life Cycle Assessment (Lca) Untuk Rantai Pasok Agroindustri Perkebunan Kelapa Sawit. In *Jurnal Ekonomi Volume 18, Nomor 1 Maret201* (Vol. 2, Issue 1).
- Herath, H. M. P. M., Herath, H. M. I. K., & Ratnayake, W. M. (2017). Potential use of *Mucuna bracteata* as a Cover Crop for Coconut Plantations in the Low Country Intermediate Zone of Sri Lanka. *Journal of Food and Agriculture*, 10(1–2), 26. <https://doi.org/10.4038/jfa.v10i1-2.5210>
- Hutajulu, K., Tarmadja, S., & Santi, I. S. (2023). Peran Tanaman *Turnera ulmifolia* dan *Cassia cobanensis* sebagai Penyangga Kebutuhan Sumber Pakan Predator UPDKS. *I*(September), 1527–1534.
- Jannah, S. W., Rahman, F. A., & Hadi, A. P. (2021). Analisis Kandungan Karbon pada Vegetasi Mangrove di Desa Lembar Kabupaten Lombok Barat. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 9(2), 588. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v9i2.4303>
- Kusumawati, S. A., Yahya, S., Hariyadi, Mulatsih, S., & Istina, I. N. (2020). The Dynamic Of Carbon Dioxide (Co₂) Emission And Land Coverage On Intercropping System On Oil Palm Replanting Area. 33(2016), 267–277.
- Maisarah, Adityosulindro, S., & Wulandari, D. (2021). Utilization of wild algae biomass as biosorbent for removal of heavy metal Zinc (Zn²⁺) from aqueous solution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1), 2–9.

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012017>
- Maisarah, Dian, R., & Febrianto, E. B. (2024). Uji Serapan Karbon (Sekuestrasi) Tanaman Kelapa Sawit sebagai Baseline Pada Trading Karbon. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(1), 633–643.
- Mariana, M., Manullang, W., Sarumaha, M. D. P., & Novita, A. (2023). The Effectiveness of Beneficial Plants in Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Area in Reducing the Attack Rate of Oil Palm Leaf-Eating Caterpillar (oplec) at PT. Socfindo Mata Pao Gardens. *Jurnal Online Pertanian Tropik*, 10(2), 51–57.
- Musthafa Al Hakim, H., Supartono, W., & Suryandono, A. (2014). Life Cycle Assesment Pada Pembibitan Kelapa Sawit Untuk Menghitung Emisi Gas Rumah Kaca (Life Cycle Assessment Of Palm Oil Seedlings For Calculating The Greenhouse Gas Emissions). *Ziraa'Ah*, 39(2), 72–80.
- Negm, N. A., Abd El Wahed, M. G., Hassan, A. R. A., & Abou Kana, M. T. H. (2018). Feasibility of metal adsorption using brown algae and fungi: Effect of biosorbents structure on adsorption isotherm and kinetics. *Journal of Molecular Liquids*, 264, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.027>
- Nishikawa, E., da Silva, M. G. C., & Vieira, M. G. A. (2018). Cadmium biosorption by alginate extraction waste and process overview in Life Cycle Assessment context. *Journal of Cleaner Production*, 178, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.025>
- Nurhadi, F., Theresia, Y., Astuti, M., & Ginting, C. (2023). Pengaruh Aplikasi Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Pupuk NPK terhadap Pembibitan Kelapa Sawit di Pre Nursery. *Agroforetech*, 1(September), 1382–1386.
- Rathore, V. K., & Mondal, P. (2018). Life cycle assessment of defluoridation of water using laterite soil based adsorbents. *Journal of Cleaner Production*, 180, 716–727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.176>
- Rinaldo, R., Suprihatin, S., & Yani, M. (2023). Life cycle assessment produksi crude palm oil (CPO) (studi kasus: PT X Provinsi Bengkulu). *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(3), 651–659. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v17i3.17131>
- Sari anggraini, N. afriyanti. (2019). Estimasi Cadangan Karbon Kelapa Sawit Bibit Bersertifikat Pada Perkebunan Kelapa Sawit Kabupaten Serdang Bedagai Sumatera Utara. *Agroprimatech*, 3(1), 11–16.
- Sari, D. A. P., Rahmah, A., & Sasongko, N. A. (2023). Life Cycle Assessment (LCA) in Palm Oil Plantation and Mill with Impact Categories Global Warming Potential, Acidification, and Eutrophication. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 10(2), 797–807. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i2.1236>
- Sari, F. D., Anwar, G., & Suharto, E. (2022). Potensi biomassa dan simpanan karbon pada agroforestri kayu bawang (*Azadirachta excelsa* Jacobs) dan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Global Forest and ...*, 2(3), 52–62.
- Siregar, K., Ichwana, Nasution, I. S., Sholihati, Sofiah, I., & Miharza, T. (2020). Implementation of Life Cycle Assessment (LCA) for oil palm industry in Aceh Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 542(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012046>
- Soraya, D. F., Bonnet, S. H. G. S., & Tongurai, C. (2011). Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Palm Oil in Indonesia. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 5, 27–32.
- Supriyadi, S., Sudaryanto, R., Hadisudarmo, P., & Safrudin, A. (2017). Management of Legume As Land Cover Crop and Empty Bunch for the Nitrogen Efficiency in Inceptisols At Oil-Palm Plantation. *Sains Tanah - Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 13(2), 51. <https://doi.org/10.15608/stjssa.v13i2.264>
- Syarifuddin, H., Sy, A. R., & Devitriano, D. (2019). Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca

- (CH₄ dan N₂O) Dari Sektor Peternakan Sapi Dengan Metode Tier-1 IPCC di Kabupaten Muaro Jambi. *Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Peternakan*, 22(2), 84–94. <https://doi.org/10.22437/jiip.v22i2.8351>
- Syarovy, M., Santoso, H., & Sembiring, D. S. (2021). Pertumbuhan Tanaman Kelapa Sawit Pada Lahan Dengan Tanaman Penutup Tanah *Mucuna Bracteata* Yang Tidak Terawat Dan Alang-Alang (*Imperata Cylindrica*). *Warta Ppks*, 26(1), 46–54.
- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. A., & Adiansyah, J. S. (2020). Assessing the environmental performance of palm oil biodiesel production in indonesia: A life cycle assessment approach. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123248>
- Wawan, Dini, I. R., & Hapsoh. (2019). The effect of legume cover crop *Mucuna bracteata* on soil physical properties, runoff and erosion in three slopes of immature oil palm plantation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 250(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/250/1/012021>
- Zhao, J., Elmore, A. J., Lee, J. S. H., Numata, I., Zhang, X., & Cochrane, M. A. (2023). Replanting and yield increase strategies for alleviating the potential decline in palm oil production in Indonesia. *Agricultural Systems*, 210(July), 103714. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103714>