



EFEK VARIABILITAS LINGKUNGAN TERHADAP DINAMIKA KARBON DAN NUTRIEN DI AGROEKOSISTEM KELAPA SAWIT: SEBUAH TINJAUAN SISTEMATIS

Sani Paindra¹, Aulia Juanda Djaingsastro²
sanipaindra350@gmail.com¹, aulia_juanda@itsi.ac.id²
Institut Teknologi Sawit Indonesia

Abstrak

Agroekosistem kelapa sawit di Indonesia menunjukkan dinamika lingkungan yang kompleks akibat variasi kondisi biofisik dan praktik pengelolaan lahan. Variabilitas lingkungan seperti umur tanaman, kondisi hidrologi, sistem drainase, serta keberadaan vegetasi bawah memengaruhi keseimbangan karbon dan siklus nutrisi dalam ekosistem perkebunan. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh variabilitas lingkungan terhadap dinamika karbon dan nutrisi pada agroekosistem kelapa sawit menggunakan pendekatan SPIDER (Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, Research type). Kajian dilakukan melalui penelusuran dan sintesis artikel jurnal nasional Indonesia yang relevan, termasuk hasil-hasil penelitian empiris pada lahan mineral dan lahan gambut. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa perubahan kondisi lingkungan dan pengelolaan lahan berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon, cadangan karbon, serta ketersediaan unsur hara tanah, sehingga integrasi pengelolaan lingkungan menjadi kunci keberlanjutan perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

Kata Kunci: Agroekosistem Kelapa Sawit, Variabilitas Lingkungan, Dinamika Karbon, Dinamika Nutrien, SPIDER, Systematic Review.

Abstract

Oil palm agroecosystems in Indonesia are characterized by intricate environmental dynamics driven by diverse biophysical conditions and land management approaches. Variations in environmental factors, such as stand age, hydrological regimes, drainage infrastructure, and understory vegetation, substantially influence carbon balance and nutrient cycling within plantation systems. This study presents a systematic review examining how environmental variability affects carbon and nutrient dynamics in oil palm agroecosystems, applying the SPIDER (Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, Research Type) framework. The review synthesizes findings from relevant Indonesian national journal publications, encompassing empirical research conducted on both mineral soils and peatland environments. The results demonstrate that shifts in environmental conditions and land management practices have a significant impact on carbon emissions, carbon storage, and soil nutrient availability. Consequently, the adoption of integrated and environmentally responsive management practices is crucial to enhance the long-term sustainability of oil palm plantations in Indonesia.

Keywords: Oil Palm Agroecosystems, Environmental Variability, Carbon Dynamics, Nutrient Dynamics, SPIDER Framework, Systematic Review.

PENDAHULUAN

Perkebunan kelapa sawit telah menjadi salah satu bentuk agroekosistem yang paling berkembang dan berperan strategis dalam struktur perekonomian Indonesia. Kontribusinya tidak hanya terlihat dari peningkatan devisa negara dan penyerapan tenaga kerja, tetapi juga

dari perannya dalam mendorong pertumbuhan wilayah pedesaan. Namun, di balik manfaat ekonomi tersebut, pengelolaan agroekosistem kelapa sawit menghadirkan berbagai tantangan lingkungan yang semakin kompleks, khususnya yang berkaitan dengan peningkatan emisi karbon dan penurunan kualitas tanah. Alih fungsi bentang alam dari hutan alam atau sistem pertanian campuran menjadi perkebunan kelapa sawit berskala luas telah menyebabkan perubahan signifikan terhadap keseimbangan ekosistem. Perubahan ini terutama tercermin dalam terganggunya siklus karbon dan nutrisi yang sebelumnya relatif stabil, sehingga pemahaman mendalam mengenai dinamika lingkungan dalam agroekosistem kelapa sawit menjadi aspek fundamental dalam menilai keberlanjutan sistem tersebut (Prayitno, C., et al 2014)

Variabilitas lingkungan dalam agroekosistem kelapa sawit merupakan fenomena yang tidak terpisahkan dari perbedaan kondisi biofisik dan praktik pengelolaan lahan yang diterapkan. Variasi tersebut meliputi perbedaan jenis dan karakteristik tanah, kondisi hidrologi, umur tanaman kelapa sawit, serta intensitas dan pola pengelolaan seperti sistem drainase, pemupukan, dan pengendalian vegetasi bawah. Keragaman kondisi lingkungan ini secara langsung memengaruhi proses-proses biogeokimia di dalam tanah, termasuk laju respirasi akar, dinamika aktivitas mikroorganisme, mineralisasi bahan organik, serta transformasi unsur hara. Sejumlah studi yang dilakukan di berbagai wilayah perkebunan kelapa sawit di Indonesia menunjukkan bahwa bahkan perbedaan lingkungan yang relatif kecil dapat menghasilkan variasi yang signifikan dalam besaran emisi karbon dan tingkat ketersediaan nutrisi tanah, yang pada akhirnya berdampak pada produktivitas dan stabilitas ekosistem perkebunan (Kusumawati, A., et al 2020).

Lebih lanjut, agroekosistem kelapa sawit tidak dapat dipandang semata-mata sebagai sumber emisi karbon, melainkan juga memiliki potensi sebagai sistem penyerap karbon melalui mekanisme akumulasi biomassa di atas permukaan tanah maupun peningkatan simpanan karbon di dalam tanah. Pertumbuhan tanaman kelapa sawit, keberadaan vegetasi bawah, serta penggunaan tanaman penutup tanah berkontribusi terhadap peningkatan input bahan organik yang berperan penting dalam pembentukan karbon tanah. Selain itu, penerapan sistem tumpangsari dan pengelolaan vegetasi bawah yang adaptif terbukti mampu memperbaiki efisiensi siklus hara, mengurangi kehilangan nutrisi, serta meningkatkan kualitas fisik dan biologis tanah. Dengan demikian, pengelolaan agroekosistem kelapa sawit yang mempertimbangkan variabilitas lingkungan berpotensi mendukung keseimbangan antara fungsi produksi dan fungsi ekologis.

Oleh karena kompleksitas interaksi antara faktor lingkungan, pengelolaan lahan, serta dinamika karbon dan nutrisi, diperlukan suatu pendekatan kajian yang komprehensif dan terstruktur untuk menghimpun bukti-bukti ilmiah yang tersedia. Pendekatan SPIDER dipandang relevan untuk digunakan dalam kajian sistematis karena mampu mengakomodasi berbagai jenis penelitian empiris yang menelaah fenomena lingkungan dalam konteks agroekosistem. Melalui sintesis hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan di Indonesia, kajian sistematis berbasis SPIDER diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai pengaruh variabilitas lingkungan terhadap dinamika karbon dan nutrisi pada agroekosistem kelapa sawit, sekaligus menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan strategi pengelolaan perkebunan yang lebih berkelanjutan (Yahya, S., et al 2022).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode systematic review dengan kerangka SPIDER, yang dinilai lebih sesuai untuk kajian agroekologi dan lingkungan karena mampu menangkap kompleksitas fenomena ekologis dan variasi konteks penelitian. Pendekatan SPIDER digunakan untuk menyusun pertanyaan penelitian, kriteria inklusi, serta proses

sintesis hasil penelitian secara sistematis (Prayitno, et al., 2014)

Sample (S)

Sampel dalam kajian ini adalah agroekosistem kelapa sawit di Indonesia, baik pada lahan gambut maupun lahan mineral. Sampel mencakup berbagai kondisi umur tanaman, sistem pengelolaan lahan, serta keberadaan vegetasi bawah dan sistem tumpangsari. Data diperoleh dari artikel jurnal nasional Indonesia yang membahas dinamika karbon dan nutrisi pada perkebunan kelapa sawit (Prayitno et al., 2014, Yahya et al., 2022).

Phenomenon of Interest (PI)

Fenomena utama yang dikaji adalah pengaruh variabilitas lingkungan terhadap dinamika karbon dan nutrisi dalam agroekosistem kelapa sawit. Variabilitas lingkungan meliputi kondisi hidrologi, saluran drainase, umur tanaman, serta tutupan vegetasi bawah. Dinamika karbon dianalisis melalui emisi CO₂, cadangan karbon biomassa, dan karbon tanah, sedangkan dinamika nutrisi dikaji melalui proses dekomposisi, pelepasan unsur hara, dan peran vegetasi bawah dalam daur hara (Kusumawati, A., et al., 2020)

Design (D)

Desain penelitian yang dianalisis mencakup penelitian lapangan, studi observasional, serta eksperimen agroekosistem yang dilakukan pada perkebunan kelapa sawit. Metode yang digunakan dalam artikel-artikel tersebut antara lain pengukuran emisi karbon menggunakan sungkup, analisis cadangan karbon biomassa dan tanah, serta pengamatan dinamika nutrisi melalui dekomposisi vegetasi bawah. Keragaman desain ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai respon agroekosistem terhadap perubahan lingkungan (Prayitno et al., 2014).

Evaluation (E)

Evaluasi dalam kajian ini difokuskan pada indikator lingkungan, yaitu besaran emisi karbon, kapasitas serapan karbon, cadangan karbon tanah, serta ketersediaan nutrisi utama seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Indikator tersebut digunakan untuk menilai dampak variabilitas lingkungan terhadap keberlanjutan agroekosistem kelapa sawit (Yahya, S., et al., 2022)

Research Type (R)

Jenis penelitian yang dikaji meliputi penelitian kuantitatif deskriptif, penelitian eksperimental lapangan, serta studi evaluatif berbasis ekosistem. Kombinasi jenis penelitian ini memungkinkan analisis yang komprehensif terhadap dinamika karbon dan nutrisi dalam berbagai kondisi lingkungan agroekosistem kelapa sawit di (Kusumawati, , 2020)

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dalam kajian ini disusun berdasarkan tahapan systematic review dengan pendekatan SPIDER (Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, Research type) untuk memastikan proses penelusuran, seleksi, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis dan terstruktur. Pendekatan ini digunakan untuk mengakomodasi karakteristik penelitian agroekosistem yang bersifat kontekstual dan multidimensional.

Tahap awal penelitian diawali dengan perumusan fokus kajian, yaitu pengaruh variabilitas lingkungan terhadap dinamika karbon dan nutrisi pada agroekosistem kelapa sawit di Indonesia. Fokus ini ditetapkan dengan mempertimbangkan aspek lingkungan utama yang sering dilaporkan dalam penelitian nasional, seperti kondisi hidrologi, umur tanaman, sistem drainase, serta keberadaan vegetasi bawah dan sistem tumpangsari.

Tahap berikutnya adalah penelusuran literatur ilmiah, yang dilakukan dengan mengidentifikasi artikel jurnal nasional Indonesia yang relevan. Penelusuran difokuskan pada jurnal terakreditasi dan prosiding ilmiah yang memuat hasil penelitian empiris mengenai emisi karbon, cadangan karbon, serapan karbon, serta dinamika nutrisi pada

perkebunan kelapa sawit. Artikel yang digunakan mencakup penelitian pada lahan gambut dan lahan mineral guna memperoleh gambaran kondisi agroekosistem yang beragam.

Selanjutnya dilakukan seleksi literatur berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi artikel yang: (1) dilakukan di wilayah Indonesia, (2) membahas agroekosistem kelapa sawit, dan (3) menyajikan data atau analisis terkait karbon dan/atau nutrisi. Sementara itu, artikel yang tidak relevan dengan topik, bersifat opini, atau tidak menyajikan hasil penelitian lapangan dikeluarkan dari kajian.

Artikel yang terpilih kemudian melalui tahap ekstraksi data, yaitu pengambilan informasi utama dari setiap studi yang meliputi lokasi penelitian, kondisi lingkungan, desain penelitian, parameter karbon dan nutrisi yang diamati, serta temuan utama. Data yang telah diekstraksi selanjutnya dikelompokkan berdasarkan komponen SPIDER untuk memudahkan proses analisis dan sintesis.

Tahap akhir prosedur penelitian adalah sintesis dan analisis data secara kualitatif. Pada tahap ini, hasil-hasil penelitian dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi pola, persamaan, dan perbedaan temuan antarstudi. Sintesis dilakukan dengan menekankan hubungan antara variabilitas lingkungan dan respons dinamika karbon serta nutrisi, sehingga diperoleh pemahaman komprehensif mengenai implikasi ekologis pengelolaan agroekosistem kelapa sawit di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik dan Variabilitas Lingkungan Agroekosistem Kelapa Sawit

Hasil tinjauan sistematis menunjukkan bahwa agroekosistem kelapa sawit di Indonesia memiliki karakteristik lingkungan yang sangat heterogen, baik secara spasial maupun temporal. Variabilitas ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor alam dan praktik pengelolaan, yang mencakup tipe tanah, kondisi topografi, pola curah hujan, sistem drainase, serta umur dan kerapatan tanaman kelapa sawit. Keberagaman kondisi tersebut membentuk lingkungan mikro yang berbeda-beda di dalam satu bentang perkebunan, sehingga memengaruhi proses ekologi yang berlangsung di dalamnya.

Pada lahan gambut, variabilitas lingkungan terutama ditentukan oleh fluktuasi muka air tanah yang sangat sensitif terhadap sistem drainase. Penurunan muka air tanah akibat drainase mengubah kondisi tanah dari anaerob menjadi lebih aerob, yang berdampak langsung pada aktivitas mikroorganisme pengurai. Kondisi ini mempercepat dekomposisi bahan organik gambut yang sebelumnya tersimpan dalam jangka waktu lama. Sebaliknya, lahan dengan pengelolaan hidrologi yang lebih konservatif cenderung mempertahankan kelembapan tanah yang tinggi, sehingga laju dekomposisi berlangsung lebih lambat dan stabil (Prayitno et al., 2014).

Di lahan mineral, variabilitas lingkungan lebih banyak dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia tanah, seperti tekstur, kandungan bahan organik, dan kapasitas menahan air. Perbedaan umur tanaman kelapa sawit juga menciptakan variasi kondisi iklim mikro, terutama terkait intensitas cahaya yang mencapai permukaan tanah, suhu tanah, dan kelembapan. Tanaman kelapa sawit yang telah membentuk tajuk rapat menghasilkan kondisi lingkungan yang lebih teduh dan lembap dibandingkan tanaman muda, sehingga memengaruhi aktivitas biologi tanah dan dinamika unsur hara (Kusumawati et al., 2020).

Selain itu, keberadaan vegetasi bawah memberikan kontribusi signifikan terhadap kompleksitas lingkungan agroekosistem. Vegetasi penutup tanah berfungsi sebagai pelindung permukaan tanah dari erosi, menjaga kelembapan tanah, serta memodifikasi suhu tanah. Interaksi antara vegetasi bawah dan tanaman kelapa sawit menciptakan sistem agroekosistem yang lebih stabil secara ekologis, terutama pada lahan yang dikelola secara berkelanjutan (Yahya et al., 2022).

2. Dinamika Karbon pada Agroekosistem Kelapa Sawit akibat Variabilitas Lingkungan

Dinamika karbon dalam agroekosistem kelapa sawit sangat dipengaruhi oleh variasi kondisi lingkungan dan praktik pengelolaan lahan. Hasil kajian menunjukkan bahwa lahan gambut yang mengalami drainase intensif memiliki tingkat emisi karbon yang lebih tinggi dibandingkan lahan tanpa drainase atau dengan drainase terbatas. Hal ini berkaitan erat dengan meningkatnya oksidasi bahan organik gambut akibat masuknya oksigen ke dalam profil tanah, yang mendorong pelepasan karbon dalam bentuk karbon dioksida ke atmosfer (Prayitno et al., 2014).

Variasi umur tanaman kelapa sawit juga berperan dalam menentukan besaran emisi karbon. Pada fase tanaman menghasilkan, aktivitas respirasi akar dan mikroorganisme tanah cenderung meningkat seiring bertambahnya biomassa akar dan serasah. Proses ini menyebabkan peningkatan fluks karbon dari tanah ke atmosfer. Namun demikian, peningkatan emisi tersebut tidak dapat dipisahkan dari peran kelapa sawit sebagai penyerap karbon, karena akumulasi biomassa batang, daun, dan akar turut menyimpan karbon dalam jumlah besar (Prayitno et al., 2014).

Keberadaan vegetasi bawah memberikan dimensi tambahan dalam dinamika karbon agroekosistem kelapa sawit. Vegetasi penutup tanah berkontribusi terhadap peningkatan cadangan karbon melalui dua mekanisme utama, yaitu penyerapan karbon melalui fotosintesis dan penambahan bahan organik ke tanah melalui serasah. Serasah vegetasi bawah yang terdekomposisi menjadi sumber karbon tanah yang relatif stabil, sehingga membantu menekan kehilangan karbon dalam jangka panjang. Beberapa studi menunjukkan bahwa lahan dengan vegetasi bawah yang terkelola baik memiliki keseimbangan karbon yang lebih stabil dibandingkan lahan yang dibiarkan terbuka (Kusumawati et al., 2020).

Selain faktor biotik, faktor abiotik seperti suhu dan kelembapan tanah juga memengaruhi dinamika karbon. Suhu tanah yang lebih tinggi cenderung meningkatkan laju respirasi tanah, sedangkan kelembapan yang optimal mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai. Oleh karena itu, variasi iklim akibat perbedaan tajuk tanaman dan vegetasi bawah memiliki implikasi langsung terhadap fluks karbon dalam agroekosistem kelapa sawit (Yahya et al., 2022).

3. Dinamika Nutrien dalam Agroekosistem Kelapa Sawit sebagai Respons terhadap Variabilitas Lingkungan

Hasil systematic review menunjukkan bahwa dinamika nutrien dalam agroekosistem kelapa sawit sangat erat kaitannya dengan kondisi lingkungan dan keberadaan bahan organik. Variasi hidrologi, terutama pada lahan gambut, memengaruhi proses mineralisasi dan imobilisasi unsur hara. Penurunan muka air tanah mempercepat mineralisasi bahan organik, sehingga nutrien menjadi lebih cepat tersedia bagi tanaman. Namun, kondisi ini juga berpotensi meningkatkan kehilangan nutrien melalui pencucian dan volatilisasi jika tidak diimbangi dengan pengelolaan bahan organik yang memadai (Prayitno et al., 2014).

Vegetasi bawah memiliki peran strategis dalam menjaga keseimbangan nutrien agroekosistem. Tanaman penutup tanah menyerap nutrien dari lapisan tanah atas dan mengembalikannya ke tanah melalui serasah dan akar yang mati. Proses ini membentuk siklus nutrien yang lebih tertutup, sehingga mengurangi ketergantungan pada input pupuk anorganik. Selain itu, keberadaan vegetasi bawah membantu meningkatkan kandungan bahan organik tanah yang berfungsi sebagai penyimpan nutrien jangka panjang (Yahya et al., 2022).

Perbedaan umur tanaman kelapa sawit juga memengaruhi dinamika nutrien. Tanaman yang lebih tua memiliki sistem perakaran yang lebih berkembang, sehingga mampu menyerap nutrien dari lapisan tanah yang lebih dalam. Namun, kebutuhan nutrien yang

meningkat pada fase produktif juga menuntut pengelolaan hara yang lebih intensif. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika nutrisi berdasarkan umur tanaman menjadi penting dalam merancang strategi pemupukan yang efisien dan berkelanjutan (Zulkarnain, et al, 2018)

Selain itu, kondisi iklim mikro yang dipengaruhi oleh tajuk tanaman dan vegetasi bawah berperan dalam mengatur laju dekomposisi bahan organik. Kelembapan tanah yang stabil dan suhu yang moderat mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai, sehingga pelepasan nutrisi berlangsung secara bertahap dan berkelanjutan. Kondisi ini mendukung ketersediaan nutrisi yang lebih stabil bagi tanaman kelapa sawit (Yahya et al., 2022).

4. Sintesis Temuan Berdasarkan Kerangka SPIDER

Sintesis hasil kajian berdasarkan pendekatan SPIDER menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat antara variabilitas lingkungan dan dinamika karbon serta nutrisi pada agroekosistem kelapa sawit. Pada komponen Sample, perbedaan tipe lahan dan umur tanaman menghasilkan variasi respons ekologis yang signifikan. Pada aspek Phenomenon of Interest, perubahan kondisi lingkungan terbukti memengaruhi proses emisi dan penyimpanan karbon serta daur nutrisi tanah (Hairiah, et al 2017).

Pada aspek Design, keberagaman metode penelitian lapangan yang digunakan dalam studi-studi nasional memberikan perspektif yang komprehensif terhadap dinamika agroekosistem kelapa sawit. Sementara itu, pada komponen Evaluation, indikator emisi karbon, cadangan karbon, dan ketersediaan nutrisi menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan lingkungan dan praktik pengelolaan. Dari sisi Research Type, kombinasi penelitian observasional dan eksperimental memperkuat validitas temuan terkait mekanisme ekologis yang mendasari dinamika karbon dan nutrisi (Prayitno et al., 2014, Kusumawati et al., 2020, Yahya et al., 2022).

5. Implikasi Ekologis dan Pengelolaan Berkelanjutan Agroekosistem Kelapa Sawit

Temuan dalam kajian ini menegaskan bahwa pengelolaan agroekosistem kelapa sawit perlu diarahkan pada pendekatan yang mempertimbangkan variabilitas lingkungan secara holistik. Pengaturan sistem drainase yang adaptif, pemanfaatan vegetasi bawah, serta pengelolaan bahan organik tanah merupakan strategi penting dalam menekan emisi karbon dan menjaga keseimbangan nutrisi. Pendekatan ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan, tetapi juga mendukung keberlanjutan produktivitas perkebunan kelapa sawit dalam jangka Panjang (Subowo, G., & Purwanto, 2019).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil systematic review dengan pendekatan SPIDER, dapat disimpulkan bahwa variabilitas lingkungan memiliki peran yang sangat menentukan dalam membentuk dinamika karbon dan nutrisi pada agroekosistem kelapa sawit di Indonesia. Perbedaan kondisi biofisik lahan, khususnya antara lahan gambut dan lahan mineral, serta variasi praktik pengelolaan seperti sistem drainase, umur tanaman, dan keberadaan vegetasi bawah, terbukti memengaruhi keseimbangan proses ekologis di dalam sistem perkebunan kelapa sawit.

Kajian ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi hidrologi, terutama pada lahan gambut, berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi karbon akibat percepatan dekomposisi bahan organik tanah. Namun demikian, agroekosistem kelapa sawit juga memiliki potensi sebagai penyerap karbon melalui akumulasi biomassa tanaman dan peningkatan cadangan karbon tanah, terutama apabila dikelola dengan mempertahankan vegetasi bawah dan bahan organik tanah. Dengan demikian, dinamika karbon dalam perkebunan kelapa sawit merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor lingkungan dan strategi pengelolaan lahan.

Dari sisi dinamika nutrisi, hasil tinjauan menegaskan bahwa variabilitas lingkungan memengaruhi proses mineralisasi, ketersediaan unsur hara, serta efisiensi daur nutrisi tanah. Keberadaan vegetasi bawah berperan penting dalam menjaga keseimbangan nutrisi melalui penambahan bahan organik dan pengurangan kehilangan hara. Selain itu, perbedaan umur tanaman kelapa sawit memengaruhi pola serapan nutrisi dan kebutuhan pemupukan, sehingga pengelolaan hara yang adaptif menjadi aspek krusial dalam keberlanjutan agroekosistem.

Secara keseluruhan, temuan dalam kajian ini menegaskan bahwa pengelolaan agroekosistem kelapa sawit yang berkelanjutan perlu didasarkan pada pemahaman menyeluruh terhadap variabilitas lingkungan. Integrasi pengelolaan hidrologi yang tepat, pemanfaatan vegetasi penutup tanah, serta pengelolaan bahan organik dan nutrisi secara berimbang merupakan strategi penting untuk menekan dampak lingkungan sekaligus mempertahankan produktivitas jangka panjang perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S., Ekadinata, A., Rahayu, S., & van Noordwijk, M. (2017). Pengukuran cadangan karbon: Dari tingkat lahan ke bentang alam. Bogor: World Agroforestry Centre (ICRAF) Indonesia.
- Kusumawati, A., Wibowo, A., & Hairiah, K. (2020). Peran vegetasi penutup tanah terhadap cadangan karbon dan kualitas tanah pada perkebunan kelapa sawit. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 44(2), 85–96.
- Prayitno, C., Widyastuti, E., & Handayani, S. (2014). Emisi karbon dioksida pada agroekosistem kelapa sawit di lahan gambut dengan perlakuan drainase. *Jurnal Tanah Dan Lingkungan*, 16(2), 45–53.
- Subowo, G., & Purwanto, B. H. (2019). Dinamika bahan organik dan ketersediaan hara tanah pada sistem pertanian tropika. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 13(1), J. Sumberd. Lahan.
- Yahya, S., Nugroho, P. A., & Rahman, F. (2022). Dinamika nutrisi dan peran vegetasi bawah pada sistem tumpangsari kelapa sawit. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(1), 34–45.
- Zulkarnain, M., Anwar, S., & Siregar, H. H. (2018). Cadangan karbon biomassa pada perkebunan kelapa sawit berdasarkan umur tanaman. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 26(3), 141–152