

Simpanan Karbon Tanah pada Lahan Sawah Irigasi, Sawah Tadah Hujan, dan Tegalan di SUB-DAS Tuntang Hulu

Abner Darmawan Sigar¹, Yefta Audy Susetyo², Rosita Mustikasari³, Bistok Hasiholan Simanjuntak⁴, Andree Wijaya Setiawan⁵, Dina Banjarnahor⁶

^{1,2,3,5,6} Program Studi Agroteknologi, Fak. Pertanian dan Bisnis, Universitas Kristen Satya Wacana

⁴ Magister Ilmu Pertanian, Fakultas Pertanian dan Bisnis Universitas Kristen Satya Wacana

¹Email: 512021004@student.uksw.edu

Submit : 19-09-2025

Revisi : 20-11-2025

Diterima : 01-12-2025

ABSTRACT

Soil organic carbon storage plays a critical role in climate change mitigation and agricultural sustainability. This study analyzes soil carbon storage in three types of agricultural land in the Upper Tuntang Sub-Watershed, namely irrigated rice fields, rain-fed rice fields, and dry fields. Soil organic carbon was measured using gravimetric methods, and total carbon stock was calculated based on bulk density and 0–30 cm soil depth. A survey of cultivation practices and farmer interviews was conducted to identify factors influencing soil carbon accumulation. The results indicated that upland farms had the highest average carbon stocks. However, no statistically significant relationship was found between cultivation practices such as crop residue management, tillage, fertilization, and livestock ownership and soil carbon content. Cultivation practices that support soil carbon reserve resilience in sequence were dry fields, rain-fed rice fields, and irrigated rice fields.

Keywords: Land use, Soil conservation, Soil organic carbon, Sustainable agriculture, Upper Tuntang Sub-Watershed.

ABSTRAK

Simpanan karbon organik tanah berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim dan menjaga keberlanjutan sistem pertanian. Penelitian ini menganalisis simpanan karbon tanah pada tiga jenis lahan pertanian di Sub-DAS Tuntang Hulu, yaitu sawah irigasi, sawah tadah hujan, dan tegalan. Kandungan karbon organik diukur menggunakan metode gravimetri, dan simpanan karbon total dihitung berdasarkan bobot isi tanah dan kedalaman 0–30 cm. Survei praktik budidaya dan wawancara petani dilakukan untuk mengidentifikasi faktor yang berpengaruh terhadap akumulasi karbon tanah. Hasil menunjukkan bahwa lahan tegalan memiliki simpanan karbon rata-rata tertinggi. Namun, hubungan antara praktik budidaya seperti pengembalian sisa tanaman, pengolahan tanah, pemupukan, dan kepemilikan ternak dengan kandungan karbon tidak menunjukkan signifikansi statistik. Praktik budidaya yang mendukung ketahanan cadangan karbon tanah secara berurutan adalah tegalan, sawah tadah hujan dan sawah irigasi.

Kata kunci: Karbon organik tanah, Konservasi tanah, Penggunaan lahan, Pertanian berkelanjutan, Sub-DAS Tuntang Hulu.

1 Pendahuluan

Karbon merupakan unsur kimia penting dalam keseimbangan lingkungan dan iklim global, terutama melalui siklus karbon yang melibatkan pergerakan karbon dalam bentuk organik dan anorganik di berbagai reservoir (Zhen et al., 2023). Karbon dioksida (CO_2) berperan besar sebagai gas rumah kaca yang mempercepat pemanasan global. Aktivitas deforestasi dan konversi lahan pertanian menjadi sumber utama peningkatan emisi karbon (Ajani & Shams, 2016). Hutan tropis antara tahun 2001–2010 mengalami kehilangan sekitar 77 juta ha akibat ekspansi pertanian menjadi tekanan terhadap cadangan karbon alami dunia (Seydewitz et al., 2023).

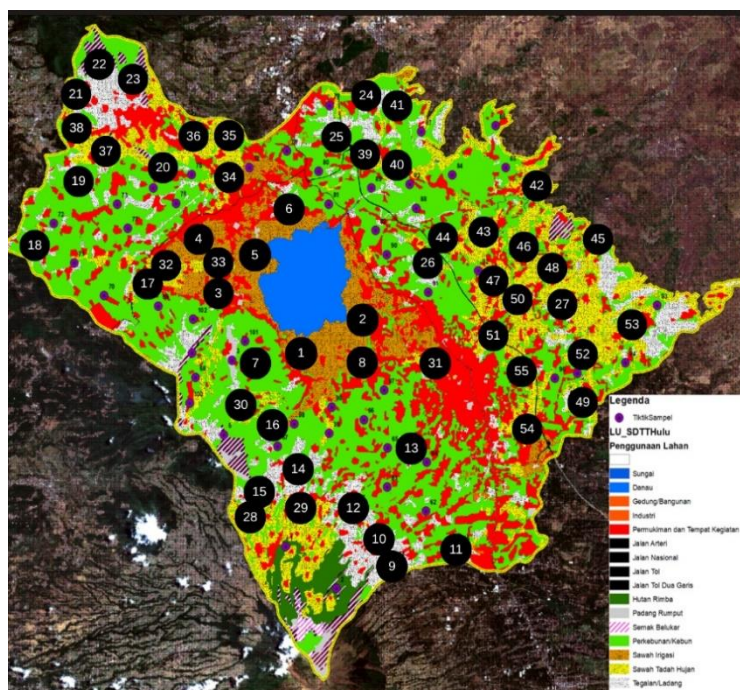
Wilayah Sub-DAS Tuntang Hulu di Jawa Tengah merupakan salah satu wilayah yang mengalami tekanan cadangan karbon. Lahan pertanian mendominasi wilayah ini, terutama sawah dan tegalan. Menurut BPS Kab Semarang (2024), pada tahun 2023 luas sawah mencapai 23.694,02 ha, terdiri dari sawah irigasi 16.869,77 (71,2%), dan sawah tadah hujan 6.824,25 (28,8%). Lahan tegalan juga cukup luas mencapai 24.933,92 ha. Tegalan umumnya digunakan untuk tanaman semusim seperti jagung, kacang-kacangan, dan singkong, dengan karakteristik lahan kering, minim irigasi, dan input organik rendah.

Agroekosistem seperti sawah dan tegalan memiliki peran ganda dalam siklus karbon, baik sebagai penyimpan maupun sumber emisi. Residu tanaman, input organik, dan fotosintesis menjadi sumber utama karbon tanah. Praktik budidaya pertanian intensif seperti pengolahan tanah dalam, pembakaran residu, dan penggunaan nitrogen berlebihan dapat mempercepat dekomposisi bahan organik, mengurangi cadangan karbon, dan meningkatkan emisi gas rumah kaca (Mboyerwa et al., 2022; Habib et al., 2023). Olah tanah minimal (OTM) mampu meningkatkan simpanan karbon tanah dan mengurangi emisi dibandingkan olah tanah konvensional (Ariani et al., 2017).

Informasi mengenai tingkat simpanan karbon tanah (C-organik) pada berbagai jenis lahan pertanian di wilayah Sub DAS Tuntang masih terbatas. Strategi pertanian rendah emisi diperlukan untuk mencapai pertanian berkelanjutan dengan pemahaman tentang sebaran karbon tanah dan praktik budidaya yang mendukung penyimpanan karbon. penelitian ini bertujuan untuk mengetahui C-organik tanah dan keterkaitannya dengan praktik budidaya pada tiga sistem penggunaan lahan pertanian yang berbeda (sawah irigasi, sawah tadah hujan, dan tegalan) di Sub-DAS Tuntang Hulu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan yang mendukung mitigasi perubahan iklim di tingkat tapak.

2 Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksploratif untuk membangun basis data mengenai cadangan karbon tanah dan praktik budidaya pada lahan pertanian di Sub-DAS Tuntang Hulu, Kabupaten Semarang. Penelitian dilaksanakan di empat kecamatan yang terdapat di Sub DAS Tuntang yaitu Bawen, Bringin, Tuntang, dan Jambu. Lokasi sampel ditentukan berdasarkan analisis peta topografi, jenis tanah, dan penggunaan lahan yang dipilih secara acak menggunakan teknik *stratified random sampling* dengan bantuan perangkat lunak ArcGIS. Dari hasil stratifikasi tersebut, diperoleh 55 titik sampel (Gambar 1), terdiri dari 10 titik sawah irigasi, 24 titik sawah tadah hujan, dan 21 titik tegalan



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Sub-DAS Tuntang Hulu Kabupaten Semarang Provinsi Jawa Tengah. Lingkaran menunjukkan titik pengambilan sampel tanah

Identifikasi praktik budidaya dilakukan melalui observasi lapangan dan wawancara semi-terstruktur dengan petani, pemilik, atau pengelola lahan. Data yang dikumpulkan mencakup delapan parameter: jenis lahan, pola tanam, jenis pestisida, penutup tanah, sumber hara, metode pengolahan tanah, pengelolaan sisa tanaman, dan keberadaan hewan ternak. Setiap parameter diklasifikasikan dalam dua kategori untuk memudahkan analisis hubungan dengan kandungan karbon tanah (Tabel 1).

Tabel 1. Klasifikasi Praktik Pertanian

Praktik Budidaya	Klasifikasi
Pola Tanam	1 = Tumpangsari /campuran 2 = monokultur
Pestisida	1 = Pestisida anorganik 2 = Pestisida organik dan anorganik
Penutup Tanah	1 = Seresah tumbuhan 2 = Campuran (seresah dan tanaman hidup)
Sumber Hara	1 = Pupuk Organik (pupuk cair, seresah, kotoran hewan)

Pengolahan Tanah	2 = Pupuk Campuran (gabungan organik dan anorganik) 1 = minimum tillage (1-2 kali per musim tanam) 2 = full tillage (> 3 kali per musim tanam)
Pengelolaan Sisa Tanaman	1 = dikembalikan ke tanah 2 = dikeluarkan dari lahan (pakan ternak, dibakar, dan lainnya)
Hewan Ternak	1 = tidak ada 2 = ada ternak (sapi, kambing, unggas)

Pengukuran kandungan C-organik tanah (*Soil Organic Carbon/SOC*) dilakukan pada 55 titik sampel dengan cara mengambil sampel tanah dari petak berukuran 10 x 10 meter di tiap titik sampel. Dua jenis sampel dikumpulkan dari tiap titik sampel: 1) sampel tanah utuh diambil dengan ring untuk mengukur bobot isi tanah (*Bulk Density/BD*) dan 2) sampel tanah komposit (campuran dari berbagai titik dalam petak 10 x 10 m) sebanyak 1 kg untuk uji kimia. Pengambilan sampel dilakukan pada kedalaman 5–20 cm saat kondisi tanah agak kering untuk menjaga konsistensi. Bobot isi tanah dianalisis menggunakan metode ring sampel (Minangkabau et al., 2023), sedangkan kandungan C-organik tanah dianalisis menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis (Kamisah & Kartika, 2024). Kandungan C-organik dihitung dengan rumus:

$$\text{Kandungan C-Organik: } \frac{100}{75} \times \frac{100}{58} \times \frac{y}{BKM} \times 100\%$$

Keterangan :
y = hasil absorbansi
BKM = Berat Kering Mutlak tanah
100/75 = Faktor koreksi reagen $K_2Cr_2O_7$
100/58 = konversi dari %C organik → %bahan organik.

SOC yang mengacu pada kandungan karbon organik pada lapisan tanah tertentu. Sehingga untuk mengetahui lebih mendalam bisa dilakukan konversi SOC ke SOCT (*Soil Organic Carbon Total*) yang mengacu pada jumlah total karbon organik di seluruh profil tanah atau kedalaman tertentu yang ditentukan (misalnya 0–30 cm, 0–100 cm). Perhitungan SOCT menggunakan rumus:

$$SOCT = SOC \times BD \times H \times (1 - \delta_{> 2 \text{ mm}}/100) \times 10$$

Keterangan:
BD = Bobot isi tanah
H = Ketebalan lapisan tanah
1- δ = presentasi partikel tanah berukuran > 2 mm (fraksi pasir).

Adapun kandungan C-organik tanah (SOC) dalam satuan (%) menunjukkan nilai tertinggi mencapai 11,9% dan nilai terendah sebesar 2.35% sedangkan total kandungan C-organik tanah (SOCT) dalam satuan (Mg/Ha) (Mg: Megagram atau Ton) menunjukkan nilai tertinggi mencapai 90,78 Mg/Ha dan nilai terendah sebesar 17,55 Mg/Ha. Pada penelitian ini dibuat 2 klasifikasi berbeda untuk SOC dan SOCT, dimana nilai dikategorikan ke dalam dua kategori (Tabel 2).

Tabel 2. Klasifikasi data karbon organik tanah

Klasifikasi	SOC	SOCT
Rendah	0% - 3%	<45,83 Mg/ha
Tinggi	>3,01%	>45,82 Mg/ha

Hubungan antara praktik budidaya dengan kandungan C-organik dianalisis dengan menggunakan data klasifikasi praktik budidaya, SOC, dan SOCT. Uji *Fisher's Exact Test* digunakan untuk menguji signifikansi hubungan antara kedua variabel tersebut. Hasil dari uji statistik ini kemudian dianalisis lebih lanjut secara deskriptif. Penjelasan deskriptif didukung oleh interpretasi dari berbagai literatur relevan yang memperkuat pemahaman tentang pengaruh praktik pertanian terhadap dinamika karbon tanah.

3 Hasil dan Pembahasan

Praktik Budidaya di Lahan Sawah dan Tegalan Sub DAS Tuntang

Tanah berperan sebagai penyimpan karbon organik terbesar setelah lautan, di mana akumulasi dan pelepasan karbon dari tanah sangat dipengaruhi oleh praktik penggunaan lahan dan budidaya pertanian. Sub-DAS Tuntang yang terletak di kawasan hulu hingga tengah Pulau Jawa memiliki variasi sistem lahan pertanian yang berbeda dan masing-masing menunjukkan praktik budidaya yang berbeda dan berkontribusi secara berbeda pula terhadap dinamika karbon organik tanah.

Sawah irigasi memiliki pasokan air yang relatif stabil sepanjang tahun berkat sistem saluran teknis atau setengah teknis. Hal ini memungkinkan intensifikasi pertanian melalui pola tanam tiga kali setahun, seperti padi-padi-palawija (Sari et al., 2023). Sawah tadah hujan sangat bergantung pada curah hujan musiman, sehingga pola tanamnya cenderung hanya satu kali dalam setahun, umumnya padi, yang dilanjutkan dengan palawija (Rahmadiyah et al., 2019). Tegalan yang merupakan lahan tanpa sistem pengairan buatan, ditanami tanaman kering musiman seperti jagung, kacang tanah, atau ubi kayu (Jaya et al., 2023). Pola tanam di tegalan cenderung lebih fleksibel dan bergantung pada kondisi iklim serta ketersediaan tenaga kerja lokal. Ketiganya menunjukkan kapasitas berbeda dalam menambah atau mempertahankan stok karbon melalui input biomassa, baik dari akar, sisa panen, maupun tanaman penutup (Gunadi et al., 2020).

Praktik budidaya pada lokasi penelitian yang diamati adalah penggunaan pestisida, tutupan lahan, pemupukan, pengolahan tanah, penanganan limbah dan keberadaan hewan ternak. Penggunaan pestisida pada jenis lahan yang berbeda menunjukkan bahwa sawah irigasi memiliki intensitas penggunaan paling tinggi dibandingkan jenis lahan yang lain. Penggunaan pestisida di sawah tadah hujan lebih sedikit dibanding sawah irigasi dikarenakan memiliki siklus tanam yang lebih lambat dan musim kering panjang secara alami mengurangi serangan hama (Agapitus et al., 2024). Lahan tegalan paling sedikit menggunakan pestisida, umumnya metode pengendalian hama yang lebih ramah lingkungan, yaitu dengan pengendalian mekanis, rotasi tanaman, atau pemanfaatan predator alami (Hadiyanti et al., 2021).

Tutupan tanah pertanian berfungsi untuk menjaga kelembapan tanah, mencegah erosi dan menambah bahan organik. Pada lahan sawah baik irigasi maupun tadah hujan tidak menggunakan penutup tanah, sedangkan pada lahan tegalan menggunakan tutupan seperti mulsa, jerami, tanaman merambat maupun plastik. Strategi tutupan tanah ini berkontribusi terhadap penambahan karbon organik melalui dekomposisi biomassa yang lebih lambat dan stabil (Edwin, 2016). Pemupukan merupakan salah satu sistem budidaya yang menyediakan nutrisi bagi tanaman. Tingginya produktifitas lahan tergantung dari ketersediaan sumber hara ini. Pada lahan pertanian sawah irigasi paling banyak menggunakan pupuk anorganik dalam dosis tinggi. Intensitas budidaya 3 musim tanam dalam setahun membutuhkan hara yang cukup banyak. Sumber hara yang digunakan diantaranya urea, TSP, dan KCl (Sari et al., 2023). Sawah tadah hujan sering mengkombinasikan pupuk kimia dan pupuk organik, seperti kompos atau pupuk kandang, tergantung pada kesadaran petani akan kelestarian tanah (Jawang, 2021). Tegalan lebih dominan menggunakan pupuk organik karena karakteristik tanaman yang tidak terlalu menuntut unsur hara dan karena faktor ekonomi (Jaya et al., 2023). Penggunaan pupuk organik ini sangat penting dalam mempertahankan dan meningkatkan cadangan karbon tanah (Pratama et al., 2023).

Pengolahan tanah bertujuan menciptakan kondisi tanah yang optimal untuk genangan dan pengendalian gulma. Pada sawah irigasi dan tadah hujan memiliki pengolahan yang intensif yang berpotensi mempercepat dekomposisi bahan organik dan mengganggu struktur tanah (Gunadi et al., 2020). Pengolahan tanah pada lahan tegalan lebih minimalis dan dangkal, menggunakan cangkul atau bajak ringan (Jaya et al., 2023). Sistem ini menjaga agregasi tanah dan memperlambat hilangnya karbon organik, menjadikan tegalan sebagai sistem budidaya yang relatif lebih konservatif terhadap cadangan karbon tanah (Pratama et al., 2023).

Limbah pertanian pada lahan sawah irigasi sering dibakar atau dibuang karena siklus tanam yang padat tidak memberi waktu untuk pengomposan. Di sawah tadah hujan, jeda antar tanam lebih panjang, sehingga memungkinkan pemanfaatan jerami sebagai kompos atau pakan ternak (Harahap et al., 2021). Berbeda pada lahan tegalan, hampir seluruh sisa tanaman dimanfaatkan kembali ke dalam sistem pertanian, baik sebagai mulsa, pupuk hijau, maupun bahan kompos (Hadiyanti et al., 2021).

Hewan ternak banyak dipelihara oleh petani tegalan sebagai bagian sistem usaha tani campuran. Kotoran ternak digunakan sebagai pupuk kandang, sementara jerami dan sisa tanaman menjadi pakan ternak. Integrasi ini menciptakan sistem pertanian tertutup yang berkelanjutan dan lebih efisien dalam siklus hara dan karbon. Keterlibatan ternak lebih

terbatas pada lahan sawah karena padatnya jadwal tanam dan akses lahan yang kurang fleksibel (Gunadi et al., 2020).

Simpanan Karbon Tanah di Lahan Sawah dan Tegalan Sub DAS Tuntang

Analisis kandungan SOC dan SOCT dilakukan untuk mengetahui besarnya simpanan karbon pada berbagai tipe penggunaan lahan di Sub-DAS Tuntang Hulu (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil analisis SOC dan SOCT pada berbagai tipe lahan

Titik	Jenis Lahan	SOC	SOCT	Titik	Jenis Lahan	SOC	SOCT
1	Sawah Irigasi	5,02	50,98	29	Tegalan	7,79	63
2	Sawah Irigasi	7,81	63,43	30	Sawah irigasi	6,76	59,048
3	Sawah irigasi	3,99	40,2	31	Sawah Irigasi	5,02	53,026
4	Sawah Irigasi	5,53	50,6	32	Sawah Irigasi	5,86	47,096
5	Sawah Irigasi	4,39	47,62	33	Sawah Irigasi	4,16	36,765
6	Sawah irigasi	6,72	85,49	34	Sawah Irigasi	2,68	34,03
7	Sawah tadah hujan	3,51	44,8	35	Sawah tadah hujan	6,37	86,275
8	Sawah Irigasi	6,43	57,33	36	Sawah Irigasi-> tegalan	4,24	39,287
9	Tegalan	8,18	61	37	Sawah irigasi	4,56	38,26
10	Tegalan	8,04	59	38	Sawah irigasi	4,12	38,682
11	Tegalan	8,09	58	39	Sawah tadah hujan	3,11	29,259
12	Tegalan	8,46	57	40	Sawah Irigasi	5,22	54,442
13	Tegalan	5,34	51	41	Sawah tadah hujan	2,66	26,153
14	Tegalan	8,04	65	42	Sawah Irigasi	5,63	54,709
15	Tegalan	7,88	46	43	Sawah irigasi	4,72	38,622
16	Tegalan	3,87	35	44	Sawah Tadah Hujan	3,57	34,227
17	Tegalan	3,61	25	45	Sawah tadah hujan-tegalan	2,56	27,825
18	Tegalan	3,23	32	46	Sawah tadah hujan	3,48	33,805
19	Tegalan	2,58	27	47	Sawah Irigasi	5,56	59,39
20	Tegalan	5,3	59	48	Sawah Irigasi	5,36	39,723
21	Tegalan	9,99	91	49	Sawah tadah hujan	3,98	17,895
22	Tegalan	9,78	65	50	Sawah Irigasi	3,56	33,415
23	Tegalan	11,19	75	51	Sawah irigasi	3,96	41,993
24	Tegalan	3,8	42	52	Sawah Tadah hujan	4,5	45,338
25	Tegalan	2,6	18	53	Sawah tadah hujan	4,25	30,922
26	Tegalan	2,35	20	54	Sawah irigasi	2,78	25,154
27	Tegalan	2,69	23	55	Sawah irigasi	4,39	42,792
28	Tegalan	9,2	64				

Hasil analisis SOC dan SOCT di Sub-DAS Tuntang, menunjukkan perbedaan signifikan antar jenis penggunaan lahan. Rata-rata SOC di lahan sawah irigasi berkisar antara 2,68% hingga 7,81%, sedangkan SOCT-nya berkisar antara 25,15 hingga 85,49 Mg/ha. Nilai ini menunjukkan bahwa lahan sawah irigasi menyimpan karbon dalam jumlah yang cukup besar, terutama pada lahan dengan input organik tinggi dan praktik budidaya yang intensif. Hasil ini sejalan dengan penelitian Liu et al., (2021), yang menunjukkan bahwa sawah, khususnya padi, berperan sebagai penyimpan karbon global yang signifikan karena akumulasi bahan organik dari jerami dan residu tanaman yang terus-menerus.

Sawah tadah hujan menunjukkan nilai SOC antara 2,56% hingga 6,37% dan SOCT antara 17,89 hingga 86,27 Mg/ha. Nilai ini cenderung lebih rendah dan bervariasi, mencerminkan ketergantungan terhadap curah hujan musiman yang memengaruhi pola tanam, input bahan organik, dan frekuensi pengolahan lahan. Penelitian Harahap et al., (2021), menunjukkan bahwa fluktuasi musim tanam dan keterbatasan input pupuk organik

membuat karbon di tanah sawah tadah hujan cenderung tidak stabil. Namun, pada beberapa titik, kandungan karbon tinggi kemungkinan besar masih dapat ditemukan karena praktik konservasi tanah seperti pengembalian jerami atau penggunaan pupuk kandang.

Lahan tegalan, nilai kisaran SOC yang lebih luas, yakni dari 2,35% hingga 11,19%, dengan SOCT mulai dari 18 hingga 91 Mg/ha. Nilai tertinggi SOC dan SOCT secara umum berasal dari tegalan, khususnya pada lahan yang dikelola dengan input organik tinggi dan praktik tumpangsari. Sistem budidaya berbasis campuran dan penggunaan pupuk organik secara konsisten mampu meningkatkan kandungan karbon tanah secara signifikan. Selain itu, tutupan vegetasi yang beragam serta keterlibatan ternak dalam sistem pertanian turut memperkaya input bahan organik ke dalam tanah (Anika et al., 2024) variasi penggunaan lahan dan praktik budidaya sangat memengaruhi stok karbon tanah, terutama dalam kaitannya dengan pengolahan tanah, penutup tanah, dan input hara (Saida et al., 2025).

Hubungan antara Praktik Budidaya dan Simpanan Karbon Tanah

Pola tanam merupakan salah satu praktik budidaya yang berpotensi memengaruhi simpanan karbon tanah melalui perbedaan input biomassa dan pengelolaan lahan. Dalam penelitian ini pola tanam diklasifikasikan menjadi tumpangsari/campuran dan monokultur. Hubungan antara pola tanam dengan kategori SOC dan SOCT dianalisis menggunakan uji *Fisher's Exact Test* (Tabel 4). Berdasarkan analisis data 55 titik lahan, tidak ditemukan hubungan yang signifikan antara pola tanam (tumpangsari/campuran vs. monokultur) dengan klasifikasi SOC maupun SOCT. Nilai *p-value* sebesar 0,479 untuk SOC dan 0,346 untuk SOCT ($P > 0,05$), menunjukkan bahwa variasi pola tanam tidak cukup kuat mempengaruhi kandungan karbon organik tanah. Interaksi yang kompleks antar faktor biofisik menyebabkan ketidaksignifikanan ini. Kontribusi pola tanam terhadap peningkatan karbon tanah umumnya bersifat jangka panjang, sementara riwayat perubahan lahan yang terjadi sebelumnya memiliki dampak yang lebih dominan.

Tabel 4. Hubungan pola tanam dengan SOC serta SOC.

Klasifikasi Karbon		Pola Tanam		Total	P_Valeu
		Tumpang Sari / Campuran	Monokultur		
SOC Rendah	N	4	3	7	0,479
	%	14,8%	10,7%	12,7%	
SOC Tinggi	N	23	25	48	
	%	85,2%	89,3%	87,3%	
Total	N	27	28	55	
	%	100%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	13	16	29	0,346
	%	48,1%	57,1%	52,7%	
SOCT Tinggi	N	14	12	26	

	%	51,9%	42,9%	47,3%
Total	N	27	28	55
	%	100%	100%	100%

Wahyuni et al., (2021), menyatakan bahwa konversi ekosistem alami menjadi lahan pertanian intensif telah menurunkan stok karbon secara signifikan, dan perbaikannya tidak bisa dicapai hanya melalui pengubahan pola tanam dalam waktu singkat. Sistem irigasi dapat menciptakan kondisi anaerobik yang mempercepat emisi gas rumah kaca, seperti metana (CH₄). Hal ini mengindikasikan bahwa efektivitas pola tanam dalam mempertahankan karbon juga sangat bergantung pada sistem air dan teknik pengelolaan lainnya (Mboyerwa et al., 2022). Pola tanam memang memiliki potensi sebagai strategi pengelolaan karbon tanah, namun efektivitasnya sangat kontekstual dan bergantung pada kombinasi faktor lingkungan, manajemen lahan, serta jangka waktu penerapan

Penggunaan jenis pestisida (sintetik maupun campuran) terhadap klasifikasi SOC dan SOCT (Tabel 5).

Tabel 5. Hubungan Pestisida dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon	Pestisida		Total	P_Valeu
	Sintetik	Campuran		
SOC Rendah	N	2	7	0,370
	%	8,7%	12,7%	
SOC Tinggi	N	21	48	
	%	91,3%	87,3%	
Total	N	23	55	
	%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	9	29	0,075
	%	39,1%	52,7%	
SOCT Tinggi	N	14	26	
	%	60,9%	47,3%	
Total	N	23	55	
	%	100%	100%	

Variasi jenis pestisida belum secara langsung mempengaruhi kapasitas tanah dalam menyimpan karbon organik di wilayah penelitian ini. Menurut Akter et al., (2022), efek pestisida terhadap karbon tanah sangat tergantung pada faktor-faktor pendukung lainnya seperti pemupukan dan rotasi tanaman. Pengaruh alih fungsi lahan dan intensifikasi pertanian, berkontribusi lebih besar terhadap dinamika karbon tanah dibandingkan input pestisida itu sendiri (Dewa et al., 2022; Wahyuni et al., 2021). Sistem pengairan mempengaruhi efektivitas pestisida dalam mengubah kandungan karbon tanah. Zhen et al., (2023), menyatakan bahwa dalam sistem pertanian tropis, faktor dominan penentu karbon tanah justru adalah dinamika kelembapan dan ketersediaan bahan organik. Penggunaan pestisida memiliki berpotensi dampak, tetapi bukanlah sebagai faktor penentu utama dalam variabilitas SOC dan SOCT.

Hubungan antara jenis penutup tanah (seresah daun vs. campuran seresah dan tumbuhan hidup) dengan kandungan SOC maupun SOCT tidak signifikan, p-value sebesar

0,630 dan 0,366 ($P > 0,05$) (Tabel 6). Jenis penutup tanah bukanlah faktor dominan dalam menentukan kandungan karbon organik tanah dalam konteks pertanian tropis seperti Sub DAS Tuntang.

Tabel 6. Hubungan Penutup Tanah dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon		Penutup Tanah		Total	P_Valeu
		Seresah daun	Campuran		
SOC Rendah	N	3	4	7	0,630
	%	13%	12,5%	12,7%	
SOC Tinggi	N	20	28	48	
	%	87%	87,5%	87,3%	
Total	N	23	32	55	
	%	100%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	11	18	29	0,366
	%	47,8%	56,3%	52,7%	
SOCT Tinggi	N	12	14	26	
	%	52,2%	43,8%	47,3%	
Total	N	23	32	55	
	%	100%	100%	100%	

Pada lahan sawah irigasi, kondisi anaerob akibat genangan air memperlambat dekomposisi bahan organik, memungkinkan akumulasi karbon meskipun tanpa penutup tanah vegetatif aktif (Agustina et al., 2020). Sawah tadah hujan atau tegalan yang mengalami fluktuasi kelembapan ekstrem, manfaat penutup tanah vegetatif seringkali dikompensasi oleh percepatan dekomposisi bahan organik. Selain itu, pengaruh manajemen lahan (penggunaan pupuk, intensitas olah tanah, dan sistem rotasi tanaman) lebih menentukan dibandingkan jenis penutup tanah itu sendiri (Jawang, 2021; Sari et al., 2023).

Hubungan antara jenis sumber hara (pupuk organik vs. campuran organik-anorganik) dengan kandungan SOC maupun SOCT juga tidak signifikan, nilai p-value $> 0,05$ (Tabel 7). Variasi jenis pupuk saja tidak secara langsung menentukan kandungan karbon organik tanah pada sistem lahan yang dikaji. Efek jangka panjang dari pupuk organik yang secara nyata menaikkan SOC, apabila tidak digunakan secara berkelanjutan dan dalam jumlah cukup (Wiwardjaka, 2021). Variabilitas tekstur tanah, kelembapan, dan retensi air pada sawah irigasi, sawah tadah hujan, dan tegalan juga berpengaruh besar terhadap dinamika karbon, sehingga efek pupuk dapat tertutupi oleh kondisi alamiah lokasi (Saida et al., 2025).

Tabel 7. Hubungan Sumber Hara dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon		Sumber Hara		Total	P_Valeu
		Pupuk Organik	Pupuk Campuran		
SOC Rendah	N	4	3	7	0,100
	%	25%	7,7%	12,7%	
SOC Tinggi	N	12	36	48	
	%	75%	92,3%	87,3%	
Total	N	16	39	55	
	%	100%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	10	19	29	0,264
	%	62,5%	48,7%	52,7%	
SOCT Tinggi	N	6	20	26	
	%	37,5%	51,3%	47,3%	

Total	N	16	39	55
	%	100%	100%	100%

Sumber hara campuran lebih cepat memenuhi kebutuhan tanaman melalui unsur hara anorganik. Dampak jangka panjang belum menentukan peningkatan kualitas bahan organik tanah jika tidak diiringi dengan input biomassa atau konservasi tanah yang baik (Indis et al., 2022).

Hubungan tidak signifikan antara jenis pengolahan tanah (*minimum tillage* vs. *full tillage*) dengan SOC maupun SOCT (Tabel 8). Seluruh titik lahan dengan sistem *full tillage* memiliki SOC tinggi, ketimpangan jumlah sampel (hanya 6 titik *full tillage* dibanding 49 titik *minimum tillage*) membatasi signifikansi statistik hasil. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi olah tanah saja belum cukup mempengaruhi kandungan karbon tanah dalam konteks penggunaan lahan yang beragam seperti sawah irigasi, sawah tadah hujan, dan tegalan.

Tabel 8. Hubungan Pengolahan Tanah dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon		Pengolahan Tanah		Total	P_Valeu
		Minimum Tillage	Full Tillage		
SOC Rendah	N	7	0	7	0,423
	%	14,3%	0%	12,7%	
SOC Tinggi	N	42	6	48	
	%	85,7%	100%	87,3%	
Total	N	49	6	55	
	%	100%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	26	3	29	0,611
	%	53,1%	50%	52,7%	
SOCT Tinggi	N	23	3	26	
	%	46,9%	50%	47,3%	
Total	N	49	6	55	
	%	100%	100%	100%	

Menurut Subandi et al., (2024), sistem *minimum tillage* dapat menjaga struktur agregat tanah dan memperlambat dekomposisi bahan organik, namun dampaknya akan terbatas jika tidak disertai input biomassa atau rotasi tanaman. Ketiadaan informasi mengenai lamanya penerapan sistem olah tanah pada studi ini juga menjadi faktor penting yang melemahkan interpretasi hasil. Kualitas tanah sangat dipengaruhi oleh jenis tanah dan ketersediaan bahan organik. Jika input organik tidak mencukupi atau struktur tanah tidak mendukung, maka perbedaan sistem olah tanah tidak akan menghasilkan perbedaan nyata dalam kandungan karbon. Pengolahan tanah lebih berdampak pada sifat fisik seperti porositas, bukan langsung pada peningkatan karbon (Putri et al., 2020; Putra et al., 2017).

Hubungan yang tidak signifikan antara pengolahan sisa tanaman (dikembalikan ke lahan vs. diolah) dengan klasifikasi SOC dan SOCT (Tabel 9). Seluruh lahan yang sisa tanamannya diolah menunjukkan SOC tinggi (100%), sementara pada lahan yang hanya mengembalikan sisa tanaman ke lahan, terdapat 18,4% yang tergolong SOC rendah.

Variasi praktik pengolahan sisa tanaman antar lokasi dan tidak adanya standarisasi perlakuan menyebabkan ketidaksignifikan ini.

Tabel 9. Hubungan Pengolahan Sisa Tanaman dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon	Pengolahan Sisa Tanaman		Total	P_Valeu
	Dikembalikan ke Lahan	Diolah		
SOC Rendah	N	7	0	0,062
	%	18,4%	0%	
SOC Tinggi	N	31	17	87,3%
	%	81,6%	100%	
Total	N	38	17	55
	%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	23	6	0,075
	%	60,5%	35,3%	
SOCT Tinggi	N	15	11	26
	%	39,5%	64,7%	
Total	N	38	17	55
	%	100%	100%	

Pengembalian sisa tanaman dapat meningkatkan karbon tanah apabila dilakukan dengan pengelolaan yang tepat. Proses pelapukan alami berjalan lambat sehingga serapan karbon menjadi tidak maksimal (Ende et al., 2022). Faktor kehilangan karbon melalui erosi, pencucian, serta respirasi mikroba juga turut melemahkan akumulasi karbon (Sabaruddin et al., 2019).

Hubungan tidak signifikan antara keberadaan hewan ternak dengan klasifikasi SOC maupun SOCT (Tabel 10). Keberadaan ternak tidak berperan nyata terhadap kandungan karbon organik tanah. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran ternak saja tidak menjamin peningkatan karbon tanah, melainkan sangat bergantung pada bagaimana limbah ternak dikelola dan dimanfaatkan dalam sistem pertanian (Salawati & Ende, 2023). Pola pengelolaan ternak, seperti sistem kandang tertutup, juga membatasi distribusi alami limbah ke lahan tanam, sehingga pengaruhnya menjadi terbatas. Pada lahan sawah yang tergenang, limbah dapat tercuci atau mencemari air irigasi, sedangkan di lahan kering seperti tegalan, keberhasilannya bergantung pada aktivitas mikroba tanah, aerasi, serta perlakuan tambahan seperti pencampuran dengan tanah (Subandi et al., 2024).

Tabel 10. Hubungan Keberadaan Hewan Ternak dengan SOC dan SOCT.

Klasifikasi Karbon	Hewan Ternak		Total	P_Valeu
	Tidak Ada	Ada Ternak		
SOC Rendah	N	4	3	0,204
	%	9,5%	23,1%	
SOC Tinggi	N	38	10	48
	%	79,2%	76,9%	
Total	N	42	13	55
	%	100%	100%	
SOCT Rendah	N	20	9	0,148
	%	100%	100%	

	%	47,6%	69,2%	52,7%
SOCT Tinggi	N	22	4	26
	%	52,4%	15,4%	47,3%
Total	N	42	13	55
	%	100%	100%	100%

Kontribusi ternak terhadap SOC dan SOCT sangat dipengaruhi oleh praktik pertanian terpadu yang mencakup pengelolaan limbah organik secara efektif. Kehadiran ternak perlu disertai strategi pemanfaatan limbah yang terintegrasi dan berkelanjutan agar berdampak nyata pada peningkatan karbon organik tanah.

3 Kesimpulan

Simpanan karbon tanah (SOC dan SOCT) di Sub-DAS Tuntang Hulu bervariasi antar jenis lahan. Tegalan memiliki potensi tertinggi apabila dikelola secara organik dan terpadu. Praktik budidaya seperti pengembalian sisa tanaman, sistem olah tanah, dan keberadaan ternak menunjukkan kecenderungan positif terhadap kandungan karbon, namun secara statistik belum menunjukkan hubungan yang signifikan. Praktik budidaya yang mendukung ketahanan cadangan karbon tanah adalah lahan tegalan dan sawah tadah hujan. Sawah irigasi paling berpotensi kehilangan cadangan karbon tanah.

Daftar Pustaka

Agapitus, A., Ekawati, Rizieq, R., & Bancin, H. D. (2024). Perbandingan Pendapatan Usahatani Padi Sawah Berdasarkan Jenis Pengairan di Kecamatan Sengah Temila. *Jurnal Ekonomi STIEP*, 9(1), 26–35. <https://doi.org/10.54526/jes.v9i1.275>

Agustina, C., Lutfi Rayes, M., Kusumarini, N., & Amaladewi Sudharta, K. (2020). Pemetaan Bahan Organik Tanah Pada Sawah Irigasi Dan Tadah Hujan Di Kecamatan Turen, Malang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 7(1), 69–75. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007.1.9>

Ajani, A., & Shams, Z. I. (2016). Comparative Status of Sequestered Carbon Stock of *Azadirachta indica* and *Conocarpus erectus* at the University of Karachi Campus, Pakistan. *International Journal of Environment*, 5(2), 89–97. <https://doi.org/10.3126/ije.v5i2.15009>

Akter, R., Mukhles, M. B., Rahman, M. M., Rana, M. R., Huda, N., Ferdous, J., Rahman, F., Rafi, M. H., & Biswas, S. K. (2022). Effect of pesticides on nitrification activity and its interaction with chemical fertilizer and manure in long-term paddy soils. *Chemosphere*, 304, 135379. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135379>

Anika, E., Rasyidin, A., Junaidi, J., & Journal, A. (2024). Karbon Organik Tanah Pada Beberapa Penggunaan Lahan Di Kelurahan Limau Manis Kota Padang. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.15315264>

Ariani, M., Yulianingrum, H., & Setyanto, P. (2018). Emisi Gas Rumah Kaca dan Hasil Padi dari Cara Olah Tanah dan Pemberian Herbisida Di Lahan Sawah MK 2015. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(2), 74. <https://doi.org/10.14710/jil.15.2.74-82>

BPS Kab Semarang. (2024). Kabupaten Semarang dalam Angka 2024. Badan Pusat Statistik Kabupaten Semarang

- Dewa, D. D., Buchori, I., & Sejati, A. W. (2022). Assessing land use/land cover change diversity and its relation with urban dispersion using Shannon Entropy in the Semarang Metropolitan Region, Indonesia. *Geocarto International*, 37(26), 11151–11172. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2046871>
- Edwin, M. (2016). Penilaian Stok Karbon Tanah Organik pada beberapa Tipe Penggunaan Lahan di Kutai Timur, Kalimantan Timur. *AGRIFOR*, 15(2), 279. <https://doi.org/10.31293/af.v15i2.2083>
- Ende, S., Salawati, S., Kadekoh, I., Fathurrahman, F., Darman, S., & Lukman, L. (2022). Aktivitas Nitrat Reduktase (ANR) Tanaman Jagung pada Pola Tumpangsari yang Diberi Serasah Jagung-Kedelai serta Biochar di Lahan Suboptimal Sidondo Sulawesi Tengah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(4), 528–535. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.544>
- Gunadi, Juniarti, & Gusnidar. (2020). Hubungan Stok Karbon Tanah Dan Suhu Permukaan Pada Beberapa Penggunaan Lahan Di Nagari Padang Laweh Kabupaten Sijunjung. *Jurnal Solum*, 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.25077/jsolum.17.1.1-11.2020>
- Habib, M. A., Islam, S. M. M., Haque, Md. A., Hassan, L., Ali, Md. Z., Nayak, S., Dar, M. H., & Gaihre, Y. K. (2023). Effects of Irrigation Regimes and Rice Varieties on Methane Emissions and Yield of Dry Season Rice in Bangladesh. *Soil Systems*, 7(2), 41. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020041>
- Hadiyanti, N., Pamujiati, A. D., & Lisanty, N. (2021). Sistem Budidaya Lahan Kering Dan Pemanfaatan Pekarangan Di Desa Kunci Kabupaten Nganjuk. *JMM - Jurnal Masyarakat Merdeka*, 4(1). <https://doi.org/10.51213/jmm.v4i1.63>
- Harahap, F. S., Kurniawan, D., & Susanti, R. (2021). Pemetaan Status pH Tanah dan C-Organik Tanah Sawah Tadah Hujan di Kecamatan Panai Tengah Kabupaten Labuhanbatu. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 23(1), 37. <https://doi.org/10.20961/agsjpa.v23i1.48479>
- Indis, N. A., Haliza, N. N., Prayitno, A., & Helilusiatiningsih, N. (2022). Analisis Kadar Air, Karbon Organik, Fosfor, Nitrogen, Kalium, pH Dan Tekstur Pada Contoh Tanah Di Laboratorium Tanah - Bptp Jawa Timur. *Agrika*, 16(2), 106. <https://doi.org/10.31328/ja.v16i2.4025>
- Jawang, U. P. (2021). Penilaian Status Kesuburan dan Pengelolaan Tanah Sawah Tadah Hujan di Desa Uumbu Pabal Selatan, Kecamatan Uumbu Ratu Nggay Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26(3), 421–427. <https://doi.org/10.18343/jipi.26.3.421>
- Jaya, I. K. D., Santoso, B. B., Jayaputra, Sudirman, & Made Sriasih. (2023). Peningkatan Kapasitas Petani Lahan Kering Kecamatan Kayangan Tentang Benih Bermutu dan Budidaya Tanaman di Luar Musim. *Jurnal SIAR ILMUWAN TANI*, 4(1), 56–63. <https://doi.org/10.29303/jsit.v4i1.93>
- Kamisah, K., & Kartika, T. (2024). Analisis Penentuan C-Organik Pada Sampel Tanah Secara Spektrofotometer UV-Vis. *Indobiosains*, 74–80. <https://doi.org/10.31851/indobiosains.v6i2.16308>
- Liu, Y., Ge, T., Van Groenigen, K. J., Yang, Y., Wang, P., Cheng, K., Zhu, Z., Wang, J., Li, Y., Guggenberger, G., Sardans, J., Penuelas, J., Wu, J., & Kuzyakov, Y. (2021). Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 154. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>
- Mboyerwa, P. A., Kibret, K., Mtakwa, P., & Aschalew, A. (2022). Greenhouse gas emissions in irrigated paddy rice as influenced by crop management practices and nitrogen fertilization rates in eastern Tanzania. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6,

868479. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.868479>

- Minangkabau, A. F., Supit, J. M. J., & Kamagi, Y. E. B. (2023). Kajian Permeabilitas, Bobot Isi Dan Porositas Pada Tanah Yang Diolah Dan Diberi Pupuk Kompos Di Desa Talikuran Kecamatan Remboken Kabupaten Minahasa. *Soil and Environment Journal*, 1(2), 1–5. <https://doi.org/10.35791/se.22.1.2022.38910>
- Pratama, W. E. C., Wulandari, C., Novriyanti, N., Iswandaru, D., & Prasetya, H. (2024). PERSEPSI MASYARAKAT SEKITAR LAHAN GAMBUT TENTANG SIMPANAN KARBON DAN PERUBAHAN IKLIM. *Jurnal Hutan Tropis*, 12(1), 114. <https://doi.org/10.20527/jht.v12i1.19031>
- Putra, R. Y. A., Sarno, S., Wiharso, D., & Niswati, A. (2017). Pengaruh Pengolahan Tanah Dan Aplikasi Herbisida Terhadap Kandungan Asam Humat Pada Tanah Ultisol Gedung Meneng Bandar Lampung. *Jurnal Agrotek Tropika*, 5(1). <https://doi.org/10.23960/jat.v5i1.1847>
- Putri, K. Y., Utomo, M., Afrianti, N. A., & Afandi, A. (2020). Pengaruh Sistem Olah Tanah Dan Pemupukan Nitrogen Jangka Panjang Terhadap Permeabilitas Tanah Pada Pertanaman Jagung (*Zea mays* L.) Di Lahan Politeknik Negeri Lampung. *Jurnal Agrotek Tropika*, 8(3), 547. <https://doi.org/10.23960/jat.v8i3.4454>
- Rahmadiyah, R., Tanjung, F., & Hariance, R. (2020). Analisis Perbandingan Usahatani Padi Sawah Irigasi Dengan Padi Sawah Tadah Hujan Di Kecamatan Koto Tangah Kota Padang. *JOSETA: Journal of Socio-economics on Tropical Agriculture*, 1(3). <https://doi.org/10.25077/joseta.v1i3.177>
- Sabaruddin, S., Fitri, S. N. A., & Lestari, L. (2019). Hubungan antara Kandungan Bahan Organik Tanah dengan Periode Pasca Tebang Tanaman HTI Acacia Mangium Willd. *JOURNAL OF TROPICAL SOILS*, 14(2), 105–110. <https://doi.org/10.5400/jts.2009.v14i2.105-110>
- Saida, S., Robbo, A., & A, R. I. (2025). Pemetaan Karbon Organik Tanah Lahan Sawah Di Kecamatan Pallangga Kabupaten Gowa. *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, 9(1), 82–91. <https://doi.org/10.33096/agrotek.v9i1.714>
- Salawati, S., & Ende, S. (2023). Pengelolaan Residu Jagung-Kedelai Pada Pola Tumpangsari Terhadap Simpanan C-Organik Dan Beberapa Sifat Kimia Tanah. *Jurnal Agrotek Tropika*, 9(1), 162. <https://doi.org/10.23960/jat.v12i1.6741>
- Sari, R., Maryam, & Yusmah, R. A. (2023). Penentuan C-Organik Pada Tanah Untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman Dan Keberlanjutan Umur Tanaman Dengan Metoda Spektrofotometri UV VIS. *JURNAL TEKNOLOGI PERTANIAN*, 12(1), 11–19. <https://doi.org/10.32520/jtp.v12i1.2598>
- Seydewitz, T., Pradhan, P., Landholm, D. M., & Kropp, J. P. (2023). Deforestation Drivers Across the Tropics and Their Impacts on Carbon Stocks and Ecosystem Services. *Anthropocene Science*, 2(1), 81–92. <https://doi.org/10.1007/s44177-023-00051-7>
- Subandi, R. D., Afandi, A., Afrianti, N. A., & Banuwa, I. S. (2024). Pengaruh Sistem Olah Tanah Dan Pemupukan Nitrogen Jangka Panjang Terhadap Distribusi Agregat Tanah Dalam Pertanaman Kacang Hijau (*Vigna radiata* L.) Pada Tanah Ultisol. *Jurnal Agrotek Tropika*, 12(3). <https://doi.org/10.23960/jat.v12i3.9440>
- Wahyuni, N., Hasyim, A., & Soemarno, S. (2021). Dynamic of the Land Use and Land Cover Change in Banyuwangi Regency From 1995-2019. *Jurnal Wasian*, 8(2), 121–132. <https://doi.org/10.20886/jwas.v8i2.6707>
- Wihardjaka, A. (2021). Dukungan Pupuk Organik Untuk Memperbaiki Kualitas Tanah Pada Pengelolaan Padi Sawah Ramah Lingkungan. *JURNAL PANGAN*, 30(1), 53–64. <https://doi.org/10.33964/jp.v30i1.496>

Zhen, Y., Zhang, X., Zhang, C., Gao, Q., Dong, J., Zhang, L., Lu, X., & Wang, Y. (2023). Effects of climate change and land use/cover changes on carbon sequestration in forest ecosystems in the coastal area of China. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1271239. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1271239>