

BAB 1

USULAN GAGASAN

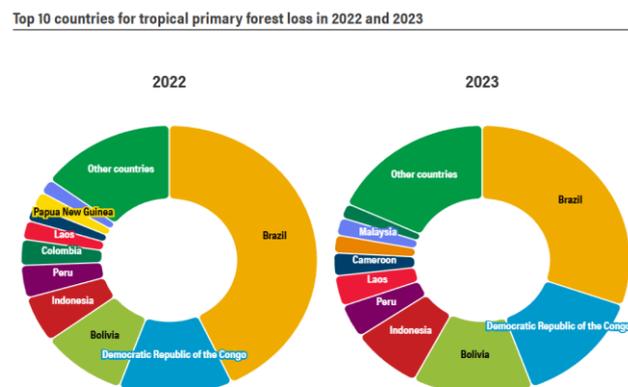
1.1 Latar Belakang Masalah

Perubahan iklim global terjadi dari emisi gas karbon dioksida CO_2 yang meningkatkan bencana hidrometeorologi dan penurunan degradasi sumber daya alam yang berada di permukaan bumi [1]. Iklim merupakan unsur utama dari sistem metabolisme dan fisiologi makhluk hidup, sehingga apabila terjadi perubahan iklim global akan berdampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem [2]. Pemanasan global yang disebabkan emisi gas rumah kaca, walaupun dihentikan namun sifatnya akan terus berlanjut karena sifat inersia sistem iklim [1]. Dampak perubahan iklim yaitu perubahan pola hujan, penurunan produktivitas tanah dan luas lahan, berkurangnya kualitas dan kuantitas air, serta kerusakan keseimbangan habitat [3].

Dinamika perubahan pembukaan lahan berpotensi penyebab adanya peningkatan pada produksi emisi karbon. Berdasarkan data Kementerian Negara Lingkungan Hidup Indonesia menyatakan bahwa gas yang menyumbang gas rumah kaca terbesar, salah satunya yaitu CO_2 [4]. Konversi lahan, degradasi hutan, reforestasi, dan deforestasi dapat mengubah jenis penutupan lahan serta berakibat mengubah komposisi biomassa terestrial [5]. Ruang terbuka hijau melalui kemampuannya mentransformasikan karbon dioksida CO_2 untuk menyerap gas rumah kaca dari udara menjadi simpanan karbon dalam bagian ekosistem hutan seperti pohon, tanah, dan tumbuhan. Biomassa hutan dari semua karbon terestrial di atas tanah sekitar 80% dan dari karbon di bawah tanah sekitar 40% [6].

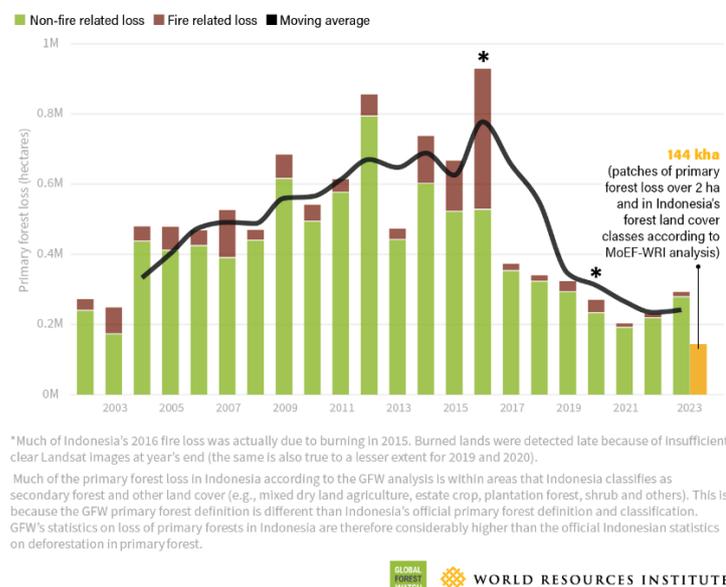
Tanah menjadi sumber daya alam yang berperan strategis di masa depan, sebab menjadi salah satu *carbon pool* di darat dan hampir sepertiga dari luas daratan [7]. Lalu penyimpanan lainnya ada pada tanaman hidup maupun tanaman mati (nekromassa), dan serasah [8]. Unsur hara sebagai *resevoir* hara dari dekomposisi memiliki keterkaitan pada kandungan karbon tanah seperti nitrogen (N), fosfor (P), sulfur (S), kalsium (Ca), magnesium (Mg), seng (Zn), dan besi (Fe) yang menentukan indikator kesuburan tanah, dan kesehatan tanah untuk pertumbuhan tanaman. Indonesia termasuk ke golongan wilayah tropikal basah dengan *low activity clay*, sehingga untuk menggambarkan kemampuan tanah dalam menyerap serta mempertukarkan kation memiliki faktor pembatas berupa nilai rendahnya Kapasitas Tukar Kation (KTK). Nilai KTK rendah dipengaruhi oleh kandungan kimia tanah serta pH tanah. Rendahnya

nilai karbon organik tanah berkaitan erat dengan kandungan tinggi dari senyawa Hidroksida Besi (Fe) dan Aluminium (Al), serta fraksi oksidasi. Sementara itu nilai karbon organik rendah atau linier dengan penurunan, berkaitan dengan penurunan sumber Nitrogen (N) dalam tanah, dikarenakan kandungan tersebut tercuci mineral atau diserap mikroorganisme. Penurunan nilai pH akibat dekomposisi fraksi labil yang berdampak ke C-Organik, karena pada proses tersebut bahan organik belum termineralisasi untuk menghasilkan sedikit keasaman tanah agar menjaga kestabilan unsur hara. Bahan organik Nitrogen (N) dapat terlepas di tanah dengan proses nitrifikasi, dekomposisi, amonifikasi, dan aminisasi berbentuk protein dan asam amino yang terurai menjadi Nitrat (NO_3^-) atau Ammonium (NH_4^+) sehingga kadar karbon organik pada jenis tanah di Indonesia yaitu tanah inceptisol berpengaruh dengan kadar Nitrogen (N), dan sebaliknya tanah ultisol tidak terpengaruh oleh peningkatan kadar N. Menurut penelitian Charlie, stok karbon organik pada semak belukar adalah 9,54 ton/ha dan stok karbon organik terendah pada tanah ada di kedalaman tanah 30 cm yaitu rata-rata 6,90 ton/ha [9]. Lalu perkiraan prediksi setidaknya sebesar 1,7 miliar ton karbon dilepas pertahunnya akibat alih fungsi lahan. Penyumbang terbesar stok karbon dari lima *carbon pool* ditemukan pada komponen tanah sebesar 28,15% atau sebesar 39,84 ton/ha, lalu vegetasi hidup menyumbang 48,50%, dan persentase sisanya ada pada nekromassa [10]. Selain itu adapula representasi dari proporsi persentase stok carbon pools yaitu biomassa di atas tanah 15 – 30%, biomassa di bawah tanah 4 – 8%, nekromassa kayu 1%, serasah organik 0,4%, dan tanah 60 – 80% [11]. Oleh karena itu perlu ada upaya terhadap pengendalian kerusakan tanah untuk menjaga keberlanjutan dan kelestarian produksi biomassa. Bentuk pemanfaatan dari sumber daya di tanah yaitu untuk produksi biomassa. Tanah mengandung karbon organik secara global pada dasarnya sekitar 2.344 Gt (1 Gigaton = 1 Miliar ton), dan menjadi teresterial terbesar cadangan karbon organik [12].



Gambar 1. 10 Negara yang Kehilangan Hutan Primer Tropis 2022 dan 2023

Menurut *Forest Declaration Assessment* tahun 2022 menyatakan bahwa dunia kehilangan lebih dari 16 juta hektar area hutan [13]. Menurut penilaiannya prediksi tahun 2023, penyebab degradasi adalah aktivitas penebangan dan pembangunan jalan [14]. Perubahan kecil fungsi tanah berdampak sangat signifikan terhadap kondisi stok karbon organik tanah yang menyebabkan perubahan pada konsentrasi karbon di atmosfer. Konversi lahan hutan yang menjadi lahan pertanian dan perkebunan dalam skala luas berdampak terhadap penurunan stok karbon tanah. Deforestasi dan degradasi hutan Indonesia menjadi penyumbang emisi nasional terbesar. Deforestasi di kawasan hutan tropis menyumbang sekitar 20% emisi karbon dunia, dengan persentase nilainya lebih besar daripada emisi pembuangan sektor transportasi global menggunakan bahan bakar fosil [14].



Gambar 1. 2 Data Analisis *Global Forest Review*

Data analisis *Global Forest Review* dari *World Resources Institute* menyatakan kehilangan hutan primer Indonesia mengalami peningkatan 27% pada tahun 2023, meskipun tingkatnya masih dibawah tahun 2010 yang disebabkan oleh kondisi El Nino [14]. Menurut Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan terjadi perluasan perkebunan industri. Lalu berdampak kebeberapa area-area dilindungi termasuk salah satunya Taman Nasional Tesso Nilo dan Kawasan Suaka Margasatwa Rawa Singkil [14]. Sehingga perlu adanya evaluasi untuk mengetahui cadangan karbon organik tanah serta kondisi tanah sesuai fungsi pokoknya khususnya kawasan hutan (UU No. 19 Tahun 2004).

Mengukur serta memantau cadangan stok karbon organik tanah sangat berkontribusi dalam mencapai *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang mengacu pada *Goals* ke-12

(*Responsible Consumption and Production*), *Goals ke-13 (Climate Action)*, dan *Goals ke-15 (Life on Land)* terkait penanganan perubahan iklim dan keberlanjutan pengolahan lahan dalam mitigasi perubahan iklim untuk ketahanan ekosistem alami. Dalam pengukuran karbon organik tanah bertujuan mengetahui indikator tanah untuk strategi mitigasi iklim. Pengukuran in-situ berbasis real-time akan berpeluang menghemat biaya namun tetap sesuai fungsi utamanya. Pengamatan ini berfokus pada pengukuran jumlah karbon organik tanah secara *real-time* dengan titik pengukuran sampel di dalam kawasan Hutan Telkom University, tepatnya pada area kawasan Gedung K. Pada mekanisme biogeokimia, untuk menganalisis bahan organik tanah yang berkaitan dengan kestabilan retensi hara. Setelah data pengukuran di dapatkan, selanjutnya membandingkan hasil sampel dengan penelitian sebelumnya dan hasil data laboratorium. Hasil perbandingan data menjadi analisis dari parameter-parameter penentu karbon organik tanah.

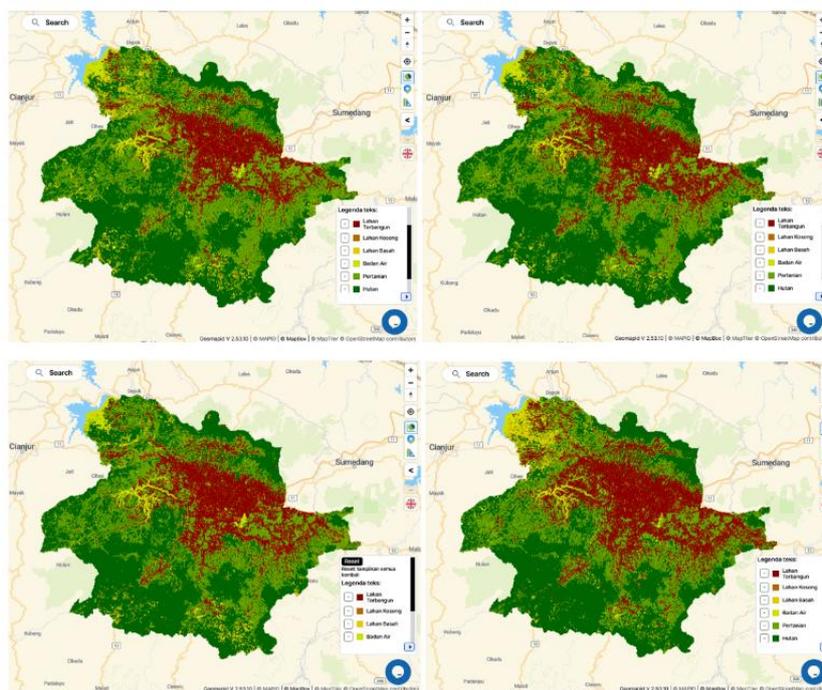
1.2 Informasi Pendukung Masalah

Vegetasi di hutan tropis merupakan penyimpanan karbon yang besar dan signifikan secara global karena hutan tropis mengandung lebih banyak karbon per satuan luas daripada tutupan lahan lainnya [15]. Hutan merupakan sumber dan penyerapan karbon. Mereka adalah sumber ketika mereka melepaskan karbon yang tersimpan dalam biomassa ke atmosfer melalui penggundulan hutan dan degradasi. Secara global hutan merupakan penyerap bersih, mereka akan menyerap lebih banyak karbon dari atmosfer daripada yang mereka pancarkan. Namun, dari 2,6 miliar ton karbon yang diserap setiap tahun, 60% akan dipancarkan kembali ke atmosfer melalui deforestasi. Selain itu, tanah juga dapat menenggelamkan karbon dan melepaskan ke atmosfer ketika kandungan karbon keseimbangan (aliran masuk dan keluar) terganggu karena tindakan manusia seperti perubahan penggunaan lahan, curah hujan, suhu dll. Selama proses inilah tanah akan bertindak sebagai sumber karbon sesuai dengan rasio antara arus masuk dan aliran keluarnya [16].

Karbon organik tanah merupakan salah satu kunci dalam menilai kesehatan pada tanah [17]. Proses fungsionalitas penting dalam tanah sangat dipengaruhi pula oleh kandungan karbon organik di dalam tanah, seperti kandungan untuk menyimpan nutrisi terutama nitrogen dan daya tahan air [18]. Perlu diketahui bahwa karbon organik tanah sangat mempengaruhi aktivitas mikroba dalam tanah [19].

Berdasarkan data penelitian saat ini, diketahui bahwa tutupan lahan atau perubahan lahan hijau di Indonesia mempengaruhi jumlah karbon stok yang ada. Diketahui data dari PT. Multi

Areal Planing Indonesia (MAPID), pada **Gambar 1.3** Peta Tutupan Lahan di Wilayah Bandung menunjukkan peta tutupan lahan di empat periode yang berbeda (2014, 2017, 2020, dan 2023), di wilayah Bandung Raya lebih tepatnya Kota Bandung, Kabupaten Bandung, Kota Cimahi dan sebagian Kabupaten Bandung Barat. Perubahan tersebut menunjukkan perubahan tutupan lahan yang intensif dan memiliki dampak langsung terhadap penyimpanan karbon [20]. Dari data, menunjukkan adanya hubungan antara perubahan tutupan lahan dengan perubahan total karbon di wilayah tersebut. Dapat dilihat pula, semakin tahun lahan hijau di wilayah Bandung Raya tersebut semakin berkurang karena adanya konversi lahan menjadi lahan terbangun (pemukiman atau industri), pertanian, lahan kosong, lahan basah dll.



Gambar 1.3 Peta Tutupan Lahan di Wilayah Bandung [21]

Pada data, terlihat adanya penurunan yang cukup signifikan dalam jumlah total karbon yang disimpan dari tahun 2014 sampai 2023. Penurunan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1.4** Data Total Karbon Periode 2014-2023 data total karbon yang turun dari 69,905,148 MgC pada tahun 2014 menjadi 61,664, 784 MgC pada tahun 2023. Pada saat yang sama pula terjadi tutupan lahan, terutama lahan pertanian sebesar 1,52% dan lahan bangunan sebesar 50,68% [22]. Penurunan tersebut terkait dengan faktor-faktor seperti konversi lahan hijau menjadi lahan pertanian atau pembangunan, dan perubahan iklim.



Gambar 1. 4 Data Total Karbon Periode 2014-2023 [20]



Gambar 1. 5 Luas per Kelas Tutupan Lahan Periode 2014-2023 [20]

Grafik menunjukkan luas per kelas tutupan lahan di Indonesia dari tahun 2014 hingga 2023 menggambarkan adanya penurunan yang signifikan. Di tahun 2014, luas lahan hutan masih mendominasi tutupan lahan, namun pada tahun-tahun berikutnya terlihat adanya penurunan lahan hutan yang sangat signifikan, dan digantikan dengan adanya peningkatan lahan pertanian [22]. Luas lahan pertanian yang terus meningkat tiap tahunnya mencerminkan adanya ekspansi yang cukup besar di sektor pertanian. Proses tersebut sering kali berkontribusi terhadap penurunan jumlah karbon total pada suatu wilayah, karena lahan yang dikonversi untuk kegiatan pertanian umumnya merupakan lahan hutan atau lahan alami yang memiliki kemampuan tinggi dalam menyimpan karbon. Ketika lahan hijau diubah menjadi lahan pertanian, kadar karbon organiknya akan berkurang karena adanya penghilangan vegetasi alami [23]. Lalu pengolahan tanah yang intensif juga dapat memecah struktur tanah dan mempercepat terjadinya proses dekomposisi (bahan organik dipecah menjadi karbon dioksida) bahan organik [24]. Begitupula dengan lahan terbuka, lahan basah, dan badan air pada gambar yang menunjukkan adanya perubahan dalam pola penggunaan lahan. Oleh karena itu, transformasi tutupan lahan, memiliki dampak yang besar dan langsung terhadap dinamika jumlah total karbon di wilayah tersebut. Secara keseluruhan, data tersebut menyoroti fakta adanya tutupan lahan yang menyebabkan kerugian bagi ekosistem lingkungan.

Selain itu, perubahan iklim global juga memiliki efek yang potensial pada SOC dan penyerapan kapasitas karbon tanah. Perubahan iklim akan berdampak pada pola curah hujan, mengubah jumlah curah hujan yang diterima dan distribusinya. Perubahan iklim inilah yang akan berdampak buruk pada lingkungan tanah. Pada wilayah tropis yang kering, biasanya akan lebih rentan terhadap perubahan iklim karena kekurangan air dan resiko penggurunan. Faktor tersebutlah yang dapat menyebabkan adanya penurunan produktivitas pohon yang menyebabkan berkurangnya masukan karbon ke tanah [25].

SOC sendiri merupakan salah satu strategi yang dianggap efektif dalam upaya mitigasi perubahan iklim karena berkaitan langsung dengan penyimpanan karbon di dalam tanah. Semakin besar jumlah karbon yang terakumulasi dalam bentuk karbon organik di tanah, maka semakin sedikit karbon yang tersisa di atmosfer, sehingga dapat membantu menurunkan dampak pemanasan global dan perubahan iklim [26]. Peningkatan jumlah cadangan SOC juga dapat berkontribusi dalam perbaikan kualitas tanah, karena berpengaruh terhadap tiga aspek utama kesuburan tanah, yaitu kesuburan kimia, fisika, dan biologi [27]. Saat ini, estimasi jumlah karbon organik global yang tersimpan dalam tanah berada pada kisaran 1.400–1.600 Pg C (1 Pg = satu miliar ton) pada kedalaman satu meter pertama, serta tambahan sebesar 500–1.000 Pg C pada kedalaman satu meter berikutnya. Peningkatan kandungan SOC tidak hanya berperan dalam pengendalian emisi gas rumah kaca, tetapi juga memberikan manfaat terhadap peningkatan produktivitas di sektor pertanian dan kehutanan [28].

Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa selain kondisi iklim dan sifat tanah, perubahan penggunaan lahan juga mempengaruhi dinamika stok SOC. Penggundulan tanah, penanaman, dan perubahan penggunaan lahan dapat SOC rusak dan membuat CO₂ terlepas ke atmosfer serta berkontribusi terhadap pemanasan global. Mengenai stok SOC sendiri sangat bervariasi dimulai dari fungsi tekstur, densitas masal, kandungan bahan organik, dan aktivitas mikrobiologi dalam tanah. Perubahannya sendiri dihitung dengan menggunakan acuan dibawah vegetasi asli menggunakan tiga faktor yang mewakili penggunaan lahan, rezim pengelolaan, dan masukkan bahan organik [29].

Memperkirakan distribusi dan penyimpanan SOC serta pengaruh penggunaan lahan terhadap kandungan SOC lebih signifikan pada lapisan tanah 0-10 cm dibandingkan pada lapisan tanah lainnya. Hal tersebut didukung **Gambar 1.6** bahwa kandungan SOC dipengaruhi oleh kedalaman tanah. Pada gambar kandungan SOC jelas menurun dengan kedalaman tanah. Namun, perilaku kandungan SOC juga bisa bervariasi tergantung jenis lahannya [30].

		SOC		
		0–10 cm	10–30 cm	30–60 cm
Max		23.12	13.15	9.7
Min		2.63	2.44	2.36
Mean		9.16a	6.80b	5.16c
Percentiles	25th	6.95	4.77	3.59
	50th	9.1	6.25	4.74
	75th	10.86	8.88	7.03
S.D.		3.72	2.57	1.92
C.V.		0.41	0.38	0.37
Skewness		1.19	0.36	0.53
Kurtosis		3.78	-0.35	-0.71
P of K-Stest		0.66	0.68	0.21

Gambar 1. 6 Hasil Analisis Statistik Karbon Organik Tanah [23]

Diketahui bahwa nilai maksimum SOC tertinggi ditemukan pada kedalaman 0-10 cm, dan nilai minimum atau terendahnya SOC juga masih lebih tinggi pada lapisan atas tanah 0-10 cm. Dari gambar juga ditunjukkan bahwa nilai rata-rata, dan standar deviasi yang dihasilkan pada pengukuran dengan kedalaman 0-10 cm mempunyai nilai yang lebih tinggi.

Adapula pada **Gambar 1.7** diketahui bahwa penggunaan lahan memiliki efek yang signifikan terhadap kandungan SOC. Kandungan SOC terendah diketahui ditemukan pada *terrace cropland*, sedangkan pada *shrublandll* dan *natural grassland* atau (semak belukar dan padang rumput alami) memiliki kandungan SOC yang jauh lebih tinggi secara umum daripada lahan pertanian.

Soil organic carbon (SOC) content (g kg^{-1}) for different land uses.

Land use	SOC content		
	0–10 cm	10–30 cm	30–60 cm
Terrace cropland	$7.47 \pm 3.01aA$	$5.65 \pm 2.32aA$	$4.87 \pm 2.05abB$
Level ground cropland	$8.46 \pm 1.48abA$	$7.16 \pm 0.96abcA$	$5.37 \pm 1.20abcB$
Abandoned cropland	$8.74 \pm 1.76abA$	$8.97 \pm 0.24bcA$	$7.33 \pm 0.06bcA$
Orchard	$9.69 \pm 1.26abA$	$6.96 \pm 0.67abcB$	$4.77 \pm 0.84abC$
Natural grassland	$12.29 \pm 1.06bA$	$9.88 \pm 0.42cdB$	$7.11 \pm 0.04bcC$
Artificial grassland	$9.21 \pm 1.67abA$	$5.97 \pm 1.76abB$	$4.04 \pm 1.29aC$
ShrublandI	$11.99 \pm 2.36bA$	$11.00 \pm 2.03dA$	$8.23 \pm 1.18cA$
ShrublandII	$20.72 \pm 3.39cA$	$10.48 \pm 2.74cdB$	$4.05 \pm 0.42abcC$

Gambar 1. 7 Soil Organic Carbon (SOC) content for Different Land Uses [23]

Diketahui pula menurut Balai Penelitian dan Pengembangan Pertanian, terdapat kriteria dalam penilaian hasil tanah di Indonesia. Pada **Tabel 1.1** menunjukkan bahwa jumlah karbon yang baik dan bisa di kategorikan tinggi dalam tanah berada di antara 3% - 5% dan sangat tinggi berada di atas 5% [31]. Namun di Indonesia sendiri, kandungan karbon organik tanah cukup rendah. Dapat dilihat pada **Gambar 1.8** dan **Gambar 1.9** [32].

Tabel 1. 1 Kriteria Penilaian C-Organik Tanah

Parameter Tanah	Nilai				
	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
C (%)	<1	1-2	2-3	3-5	>5

No	Kedalaman (cm)	Alang-alang			Kriteria
		BD (g cm ⁻¹)	% C	Densitas C (g cm ⁻²)	
1.	0-5	1,43	2,12	0,152	Sedang
2.	5-10	1,43	1,91	0,137	Sedang
3.	10-20	1,43	1,72	0,246	Rendah
4.	20-30	1,54	1,26	0,194	Rendah
5.	30-70	1,54	0,83	0,511	Sangat rendah
6.	70-100	1,54	0,15	0,069	Sangat rendah
Rata-rata		1,48	1,33	0,218	Rendah

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Gambar 1. 8 Hasil Analisa Karbon Tanah di Lahan Alang-Alang

No	Kedalaman (cm)	Hutan Tanaman Industri			Kriteria
		BD (g cm ⁻¹)	% C	Densitas C (g cm ⁻²)	
1.	0-5	1,54	1,7	0,131	Sedang
2.	5-10	1,54	1,08	0,083	Sedang
3.	10-20	1,54	0,75	0,116	Rendah
4.	20-30	1,57	0,51	0,080	Rendah
5.	30-70	1,57	0,29	0,182	Sangat rendah
6.	70-100	1,57	0,31	0,146	Sangat rendah
Rata-rata		1,55	0,77	0,123	Sangat rendah

Sumber : Hasil analisis laboratorium

Gambar 1. 9 Hasil Analisa Karbon Tanah di Lahan Terbuka

Berdasarkan data, lapisan tanah baik pada lahan alang-alang dan hutan taman industri mempunyai nilai rata-rata yang tergolong rendah. Kondisi ini mencerminkan rendahnya kapasitas menyimpan karbon organik Indonesia. Hal inilah yang menjadi indikasi bahwa stok karbon organik tanah di Indonesia memerlukan perhatian melalui berbagai pendekatan yang mendukung peningkatan kandungan karbon organik tanah untuk mitigasi perubahan iklim dan pemulihan kualitas tanah.

1.3 Analisis Umum

1.3.1 Aspek Ekonomi

Kualitas tanah yang relatif rendah merupakan salah satu penyebab rendahnya produktivitas lahan pertanian di Indonesia, pertanian menjadi salah satu sektor utama yang berperan penting dalam kemajuan ekonomi Indonesia. Sektor pertanian berkontribusi dalam pelestarian sumber daya alam serta menyediakan lapangan pekerjaan bagi masyarakat, terutama di negara dengan perekonomian berbasis tani seperti Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Republik Indonesia (2022), mayoritas penduduk Indonesia berkerja di sektor pertanian dengan presentase pangsa pasar sebesar 29,96% pada tahun 2022, atau sebanyak 40,64 juta orang yang bekerja pada sektor pertanian [33]. Sektor ini memberikan sumbangan besar terhadap Pendapatan Domestik Bruto (PDB) nasional. Sepanjang tahun 2021, BPS mencatat bahwa produk domestik bruto (PDB) sektor usaha pertanian atas dasar harga berlaku (ADHB) mencapai Rp.2,25 kuadriliun. Jumlah ini berkontribusi sebesar 13.28% terhadap PDB Nasional [34].

1.3.2 Aspek Manufakturabilita

Penelitian kandungan karbon organik tanah mencakup parameter NPK, EC, pH, *Moisture*, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan, yang sebelumnya diukur secara terpisah dengan alat berbeda. Penelitian ini mengintegrasikan alat ukur *Soil Organic Carbon* (SOC) dan semua parameter secara *real-time*. Dari segi manufaktur, komponen yang digunakan relatif murah dan mudah diakses, memungkinkan produksi alat dengan biaya rendah. Dengan efisiensi sensor, alat ini memiliki potensi untuk diproduksi, dan penerapan luas di sektor pertanian maupun penelitian lingkungan.

1.3.3 Aspek Keberlanjutan

Pengukuran kadar *Soil Organic Carbon* (SOC) secara *real-time* berdasarkan parameter seperti NPK, EC, pH, *Moisture*, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan. Alat ini, akan dipasang di hutan Universitas Telkom tepatnya dikawasan area Gedung K, menggunakan sistem pemantauan berbasis web. Namun, sistem *real-time* ini masih dalam pengembangan, serta pengukuran ini juga masih membandingkan analisis laboratorium. Dengan pemantauan secara *real-time*, penelitian ini bertujuan memahami kesuburan tanah, siklus karbon, dan perubahan iklim.

1.3.4 Aspek Lingkungan

Soil Organic Carbon (SOC) memiliki peran penting dalam siklus karbon global, salah satu peran pentingnya yaitu perubahan iklim [35]. Selain itu, kandungan *Soil Organic Carbon*

(SOC) secara signifikan mendukung kualitas tanah dengan memperbaiki struktur tanah, meningkatkan penyimpanan kadar air tanah, dan memperkuat kesuburan secara keseluruhan yang berdampak besar pada keseimbangan ekosistem [36]. Perubahan iklim disebabkan adanya emisi gas rumah kaca yang dapat mengancam bagi umat manusia dan mengubah kehidupan di Bumi [37]. Maka dari itu, tanah memiliki potensi yang sangat besar untuk membantu mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan *Soil Organic Carbon* (SOC).

Pengaruh SOC yang dapat melibatkan penghapusan CO₂ atmosfer oleh tanaman dan penyimpanan karbon tetap sebagai bahan organik tanah [38]. Selain itu, untuk meningkatkan cadangan SOC serta meningkatkan kesuburan dan produksi tanah. Namun, perubahan iklim seperti peningkatan suhu, curah hujan, konsentrasi CO₂ di atmosfer, dan periode kekeringan dapat secara signifikan mempengaruhi proses biotik dan abiotik dalam transformasi karbon tanah, yang pada akhirnya bisa mengganggu cadangan *Soil Organic Carbon* (SOC) [39].

1.4 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan perolehan diatas, selanjutnya adalah beberapa kebutuhan yang harus dipenuhi dalam penelitian ini:

- 1) Alat dapat mengukur parameter *Soil Organic Carbon* (SOC) dalam tanah;
- 2) Data mengenai karakteristik tanah yang mampu mempengaruhi penyimpanan dan pelepasan karbon organik dalam tanah;
- 3) Metode analisis data untuk memprediksi penyimpanan karbon organik dalam tanah;
- 4) Mekanisme pengintegrasian hasil sensor yang didapatkan ke *platform* berbasis *website*.

Alat pengukuran stok karbon tanah akan di implementasikan pada tutupan lahan alami di Kawasan Telkom University, membutuhkan komponen dari sisi *hardware* dan *software*.

1.5 Solusi Sebelumnya

Pada pengukuran *Soil Organic Carbon* sebelumnya, dilakukan pengukuran di Laboratorium dengan penambahan cairan kimia. Pengukuran kadar SOC di laboratorium merupakan salah satu langkah untuk mengetahui berapa kadar atau nilai SOC dalam tanah. Hasil pengukuran tersebut akan memberikan gambaran akurat mengenai berapa jumlah karbon organik yang tersimpan di dalam tanah, dan apakah mempunyai peranan penting dalam menjaga lingkungan terutama dalam hal perubahan iklim. Pengukuran pada laboratorium biasanya akan digunakan dengan membawa beberapa sampel tanah yang kemudian di uji dan dilihat hasilnya. Dalam penelitian, hasil pengukuran laboratorium sering digunakan sebagai

sebuah standar karena tingkat akurasi yang tinggi, meskipun membutuhkan waktu lebih lama dan peralatan khusus yang harganya relatif mahal. [40].

Tahapan rancangan pengambilan sampel (*sample design*) menggunakan teknik sampel berlapis (*Stratified Sampling*) secara sistematis untuk mentoleransi kesalahan (*sampling error*) maksimal 20%. Jumlah plot minimal yang diperoleh setelah perhitungan luas area, rata-rata biomassa, standar deviasi biomassa, dan ukuran plot seperti berikut:

1. Tahap stratifikasi untuk mengelompokkan area tutupan lahan (*land cover*) dengan interpretasi citra satelit dengan resolusi minimal 30 m yang disesuaikan dengan SNI 7645-1 dan IPCC2006 *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
2. Tahap menentukan bentuk plot sesuai kondisi lapangan, ukuran, dan jumlah plot. Plot yang sudah distandarkan berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, dan lingkaran dengan ukuran yang bervariasi sesuai standarnya

Pada pengujiannya, sampel akan dibawa ke laboratorium untuk diukur kadar karbon oksigen yang berada dalam tanah tersebut. Kedalaman pengambilan sampel akan diambil di rentang 0 – 10 cm dengan berat sekitar 500 gr tanah per-sampel. Sampel ini kemudian dikeringkan di udara terbuka atau dalam oven dengan suhu tertentu (40°C– 50°C) untuk menghilangkan kadar air yang dapat mempengaruhi pengukuran.

Perlu ada ekstraksi dengan reagen tertentu yaitu dengan menambahkan 10 mL larutan Kalium Dikromat ($K_2Cr_2O_7$) ke dalam sampel [41]. Kemudian tambahkan juga 20 mL Asam Sulfat pekat (H_2SO_4) ke dalam campuran untuk memastikan reaksi oksidasi yang diperlukan. Setelah itu campurkan 200 mL air ke dalam wadah, jika terdapat residu yang mengganggu maka perlu di saring dengan kertas saring tahan asam. Tambahkan 10 mL asam fosfat (H_3PO_4) 85% jika Anda menggunakan indikator *barium diphenylamine sulfonate*, diikuti dengan 3-4 tetes indikator *o-phenanthroline* atau *barium diphenylamine sulfonate* untuk mempermudah pengamatan titik akhir titrasi.

Langkah akhir adalah titrasi larutan menggunakan larutan *ferrous sulfate* ($FeSO_4$) 0.5 M atau *ammonium ferrous sulfate* $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ hingga warna larutan berubah, yang menandakan tercapainya titik akhir. Setelah titrasi selesai, hitung persentase karbon organik dalam sampel tanah menggunakan rumus yang telah ditentukan untuk mendapatkan nilai akhir. Jika sudah, selanjutnya adalah mencatat volume larutan titran ($FeSO_4$ atau $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) yang digunakan dalam titrasi. Volume inilah yang akan digunakan

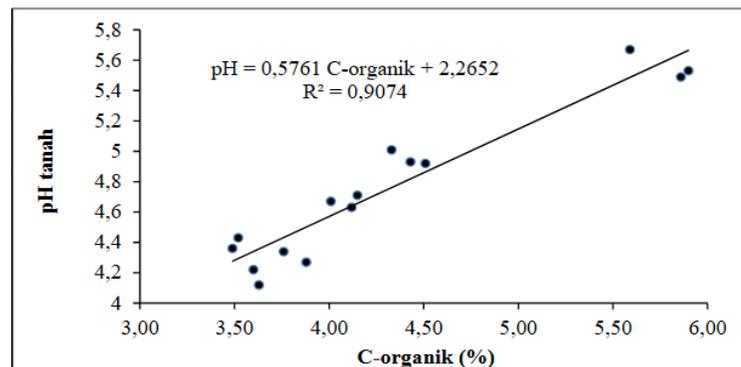
untuk menghitung kadar karbon organik (SOC) dalam sampel tanah menggunakan rumus *Walkley-Black* yang telah ada [42].

1.6 Solusi Sistem yang Diusulkan

Berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kadar SOC dengan parameter fisika dan kimia tanah. Pengamatan ini dilakukan untuk memperoleh data yang dapat digunakan dalam membandingkan hasil analisis laboratorium dengan kondisi lapangan. Namun parameter apa saja yang mencakup dan ada kaitannya dengan *Soil Organic Carbon*.

Berdasarkan grafik dari parameter fisika dan kimia, diketahui bahwa terdapat beberapa parameter yang mempunyai korelasi langsung terhadap kandungan organik dalam tanah. Validasi terhadap parameter merujuk pada berbagai literatur penelitian yang mendukung korelasi signifikan dengan *Soil Organic Carbon* (SOC). Beberapa parameter tersebut seperti:

1) pH



Gambar 1.10 Hubungan pH dengan SOC

Berdasarkan grafik, terlihat bahwa terdapat hubungan positif antara kadar karbon organik dengan nilai pH tanah, ditunjukkan oleh koefisien korelasi sebesar 0,90. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi kandungan karbon organik, maka nilai pH tanah juga cenderung meningkat, dan sebaliknya. Koefisien korelasi ini menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat atau mendekati sempurna antara kedua variabel tersebut [43].

2) *Moisture*

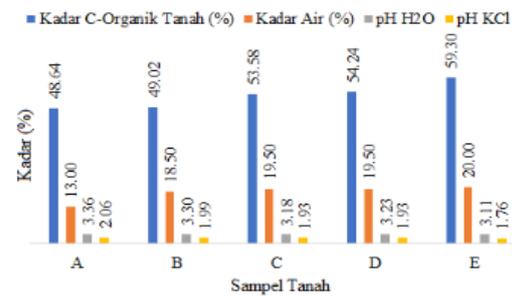
Perlakuan	Kadar Air (%)								C-organik (%)
	Minggu Ke								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
B0D0	20,1	20,6	28,1	27,3	21,9	25,2	19,8	28,8	0,22 (SR)
B1D1	22,2	19,9	23,3	27,6	23,7	18,5	18,5	22,9	0,40 (R)
B1D2	25	20,3	26,5	32,1	25	23,11	23,1	29	1,56(R)
B1D3	25,1	26,8	32,8	34,5	30,1	26,8	26,8	30,4	1,66(R)
B2D1	18,9	19,9	25,6	25,2	23,7	25,5	16,9	17,9	1,94(R)
B2D2	22,6	21,1	29,9	27,2	24,4	26	26,3	21,2	1,94(R)
B2D3	25,1	29,2	30,1	29,6	25,4	34,4	29	23,8	3,38 (T)

Keterangan: SR (Sangat Rendah), R (Rendah), T (Tinggi)

Gambar 1. 11 Pengaruh Pemberian Perlakuan terhadap Kadar Air dan C-Organik

Sampel	Kadar Air %	Kadar C-Organik Tanah %	pH H ₂ O	pH KCl
A	13,00	48,640	3,359	2,062
B	18,50	49,020	3,303	1,992
C	19,50	53,580	3,179	1,927
D	19,50	54,242	3,225	1,929
E	20,00	59,300	3,114	1,759

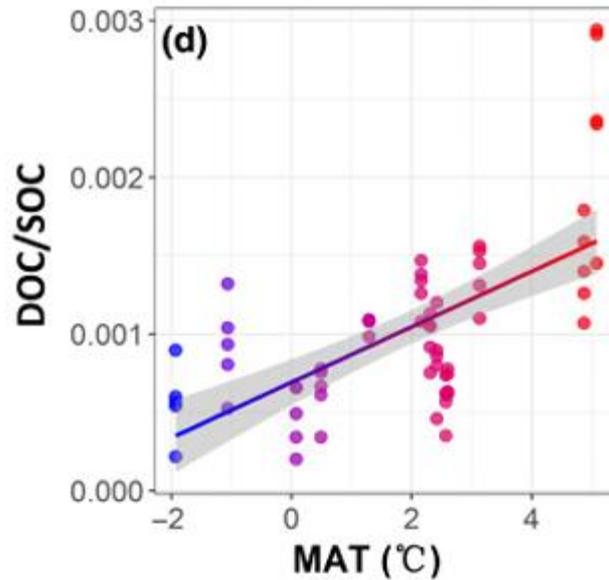
Gambar 1.13 Data Hasil Perhitungan Kadar Air dan C-Organik



Gambar 1. 12 Kadar Air dan C-Organik Tanah pada Sampel Tanah

Berdasarkan **Gambar 1.13** di atas, dapat dilihat bahwa kadar air dapat mempengaruhi C-Organik dalam tanah. Pada dasarnya konteks kadar air sama dengan *moisture* di dalam tanah, seperti *humidity* di udara. Secara umum terdapat kecenderungan bahwa peningkatan kadar air diikuti oleh peningkatan kadar C-Organik. Hal tersebut dapat terlihat pada perlakuan B1D3 dimana kadar air berkisar antara 25,1% hingga 34,5% dan kadar organik mencapai 1,66% (yang termasuk kategori rendah). Sedangkan pada perlakuan B2D3 kadar air meningkat hingga 34,4% di minggu 6 dengan kadar organik tertinggi sebesar 3,38% (kategori tinggi) [44]. Selanjutnya ada pula pada **Gambar 1.11** dan **Gambar 1.2** peneliti menyatakan bahwa semakin tinggi kadar air dapat mempengaruhi nilai kadar C-Organik dan keasaman tanah [45].

3) Suhu



Gambar 1. 14 Hubungan Suhu terhadap SOC

Pada gambar yang ada, terlihat grafik mengenai hubungan antara parameter suhu dengan SOC. Uji korelasi pada grafik mendapati hasil yang linear dalam rata-rata data pertahun dengan SOC terhadap *Mean Annual Temperature (MAT)*. Terdapat dua hal yang dapat menjadi dampak terhadap suhu yang meningkat ini, dampak positifnya mempercepat dekomposisi bahan organik menjadi karbon larut atau *Dissolved Organic Carbon (DOC)*. Namun, kenaikan suhu dapat meningkatkan dekomposisi menjadi CO₂ maka SOC akan mengurangi kemampuan tanah dalam menyimpan karbon dalam jangka panjang. Hal tersebutlah yang akan berpengaruh pada mitigasi perubahan iklim [46].

Grafik menunjukkan bahwa SOC meningkat dengan kenaikan suhu rata-rata tahunan. Perubahan suhu (seperti yang diakibatkan oleh perubahan iklim) dapat mempengaruhi distribusi karbon organik tanah, dengan potensi dampak terhadap siklus karbon tanah dan kualitas air pada tanah.

Selain itu, adapula pengaruh berdasarkan parameter kimia yang mempunyai pengaruh langsung terhadap kandungan organik tanah. Beberapa parameter tersebut antara lain:

- 4) Konduktivitas

Sampel	ORP (Mv)	TDS (ppm)	EC (uS/cm)	Kadar Air a(Kadar air pada c-organik) (%)	C-organik (%)	Bahan Organik (%)	Ph Tanah	Kematangan Gambut
G.12<20cm	298	103	205	13,48	44,82	77,28	3,16	Saprik
G.12>20cm	273	93	192	15,20	40,96	70,61	2,55	
H.14<20cm	251	176	349	15,70	43,72	75,37	2,94	
H.14>20cm	232	124	249	15,26	42,47	73,23	3,27	Hemik
Rerata					42,99	74,12	2,98	-

Gambar 1.15 Kadar C-Organik, bahan organik dan karakteristik sampel

Pada tabel tersebut dapat terlihat bahwa adanya pola kenaikan nilai EC (*Electrical Conductivity*) dengan peningkatan kandungan C-Organik. Dapat dilihat bahwa **Sampel G.12 (<20 cm)** memiliki nilai EC sebesar **205 μ S/cm** dengan kandungan C-organik sebesar **44,82%**. **Sampel H.14 (<20 cm)** menunjukkan peningkatan EC menjadi **349 μ S/cm**, diikuti dengan kandungan C-organik yang tinggi yaitu **43,72%**. Meskipun terdapat fluktuasi pada beberapa titik sampel, pola umumnya menunjukkan bahwa ketika nilai EC meningkat, kandungan C-organik juga cenderung lebih tinggi [47].

5) NPK (Nitrogen, Phosphorus, Potassium)

Tabel 2. Hasil analisis rata-rata sifat kimia tanah pada berbagai perlakuan

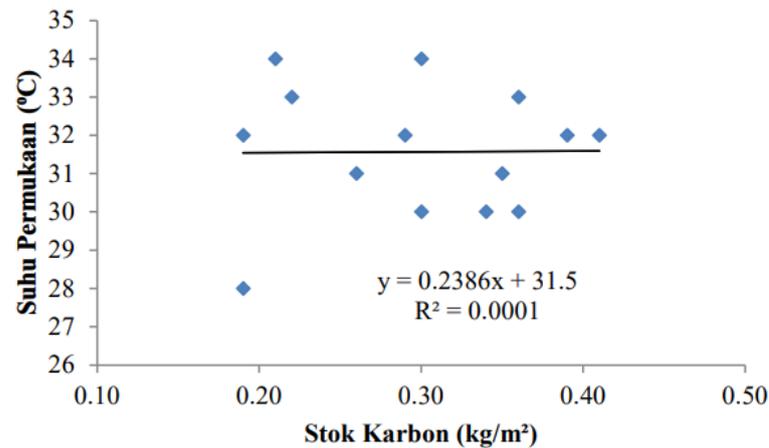
Perlakuan	Sifat Kimia Tanah								
	pH	C-Org %	N %	C/N	P (ppm)	K	Ca	Mg	Na
P ₀	4,12	9,30	0,60	15,50	108,20	0,50	3,60	1,10	0,56
P ₁	5,04	9,80	0,62	15,80	124,88	0,65	3,61	1,19	0,58
P ₂	5,15	9,98	0,63	15,84	146,02	0,78	3,80	1,51	0,60
P ₃	5,38	10,05	0,59	17,03	138,10	0,75	3,67	1,32	0,52
P ₄	5,54	10,17	0,55	18,49	166,02	0,41	3,65	1,25	0,54

Gambar 1.16 Hubungan NPK terhadap SOC

Dari grafik diatas menjelaskan bahwa ada beberapa perlakuan, salah satunya perlakuan dengan menggunakan pupuk NPK yang menunjukkan korelasi antara mineralisasi C dan sifat dasar tanah yang berkorelasi positif . Dalam pengujian ini dilakukan lima jenis perlakuan, yaitu: P₀ (100% NPK tanpa pupuk organik), P₁ (75% NPK dan 25% pupuk organik), P₂ (50% NPK dan 50% pupuk organik), P₃ (25% NPK dan 75% pupuk organik), dan P₄ (tanpa NPK, 100% pupuk organik). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa parameter mineralisasi karbon memiliki keterkaitan yang kuat terhadap karakteristik dasar tanah berdasarkan variasi perlakuan yang diberikan [48].

Parameter-parameter tersebut menunjukkan hubungan langsung dengan kandungan *Soil Organic Carbon* (SOC). Meskipun masih ada banyak parameter lain yang dapat memengaruhi SOC, analisis menunjukkan bahwa kelima parameter tersebut memiliki pengaruh paling signifikan. Hal ini didasarkan pada evaluasi hubungan positif dan negatif terhadap SOC serta mempertimbangkan keterbatasan alat ukur untuk parameter lainnya.

6) Suhu Tanah



Gambar 1.17 Grafik Hubungan Stok Karbon dengan Suhu Permukaan Tanah

Dari Gambar 1.10, terlihat bahwa suhu permukaan tanah memiliki pengaruh yang kecil terhadap cadangan karbon tanah. Hal ini dapat dilihat dari nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0001 (0,1%), yang mengindikasikan bahwa hanya 0,1% variasi stok karbon tanah dipengaruhi oleh suhu permukaan tanah, sedangkan sisanya ditentukan oleh factor lain. Meskipun suhu permukaan tanah merupakan salah satu factor iklim yang mempengaruhi C-Organik tanah, variable lain seperti curah hujan, kerapatan vegetasi, topografi, praktik manajemen lahan dan pemberian bahan organik.

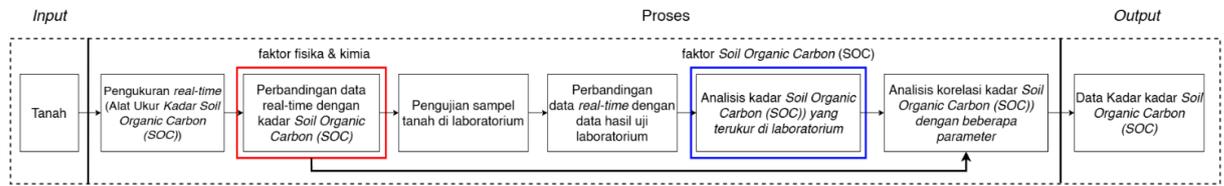
Secara umum, kenaikan suhu yang signifikan dapat mempengaruhi aktivitas ezim tanah yang akan menyebabkan meningkatnya laju dekomposisi bahan organik tanah dan fraksi karbon labil. Namun, perubahan iklim dalam jangka pendek cenderung tidak mengubah penyimpanan karbon organik tanah secara signifikan [49].

1.6.1 Karakteristik Produk

1.6.1.1 Pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) secara *Real-time*.

Pengamatan ini dilakukan menggunakan *soft sensor* yaitu pengukuran secara tidak langsung untuk memperoleh data yang dapat digunakan dalam membandingkan hasil analisis laboratorium dengan kondisi lapangan. Pengamatan ini dilakukan menggunakan *soft sensor*

karena belum ada alat yang dapat mengukur SOC langsung secara *real-time*, berikut rancangan proses pengamatan terlihat pada **Gambar 1.11**.



Gambar 1.18 Diagram Blok Pengamatan Kadar *Soil Organic Carbon (SOC)*

Sistem ini dirancang untuk mengukur NPK, EC, pH, *Moisture*, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan secara *real-time*, lalu membandingkan hasilnya dengan data laboratorium untuk menentukan kadar *Soil Organic Carbon (SOC)*. Proses ini bertujuan menganalisis kondisi fisika dan kimia tanah serta mengukur akurasi data *real-time*. Sampel tanah diambil dari beberapa titik untuk diuji di laboratorium, dan hasilnya digunakan untuk menentukan apakah kadar SOC sudah melebihi standar. Analisis ini menjadi dasar klasifikasi kadar SOC di tanah.

Pengembangan sistem ini menambahkan fitur pengukuran *real-time* pada alat pengukur karbon tanah, yang selama ini bergantung pada uji laboratorium. Dengan mengintegrasikan parameter seperti NPK, EC, pH, *Moisture*, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan, sistem ini meningkatkan akurasi serta efisiensi pemantauan kondisi tanah, menghubungkan data *real-time* dengan hasil laboratorium untuk menghasilkan pemantauan yang lebih komprehensif.

Pengukuran yang dilakukan secara *real-time*, dengan integrasi menggunakan *soft sensor* (pengukuran tidak langsung), dengan sistem kerjanya mengumpulkan data dari setiap parameternya. Sensor ini terhubung mikrokontroler untuk proses kalibrasi hingga pengiriman data ke *server*, dan termasuk proses normalisasi nilai. Setelah data siap, data sistem akan dimodelkan menggunakan pendekatan algoritma *machine learning* untuk prediksi nilai SOC. Data dari sensor akan menjadi *input* model yang akan menghasilkan prediksi SOC berdasarkan pelatihan model. Hasil prediksi akan divalidasi dengan membandingkan data *real-time* dengan hasil uji laboratorium. Data SOC yang diprediksi dan sudah dibandingkan laboratorium akan di kirim ke *platform* berbasis *web* melalui koneksi IoT, nantinya akan di visualisasikan.

- 1) Penambahan Parameter *Soil Moisture*, *pH*, *EC Sensor*, *Temperature* tanah & *Temperature* lingkungan.

Pengukuran kadar karbon organik tanah menggunakan sensor *Soil Moisture*, pH, EC, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan. Parameter pH menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan yang memengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman dan mikroorganisme. *Moisture* tanah mengukur kadar air yang berperan dalam dekomposisi bahan organik. Konduktivitas menunjukkan jumlah garam atau mineral, sementara suhu tanah memengaruhi penguraian bahan organik, aktivitas mikroba, dan ketersediaan nutrisi. Hasil pengukuran parameter tersebut secara *real-time* dianalisis untuk mengetahui hubungan antara *Soil Moisture*, *Temperature* tanah, *Temperature* lingkungan, pH, dan EC dengan kadar *Soil Organic Carbon* (SOC) yang diuji di laboratorium.

2) Penambahan parameter Sensor Pengukur NPK Tanah.

Selain pada pengukuran parameter pH, *Moisture*, EC, *Temperature* tanah, *Temperature* lingkungan pada tanah, parameter lain yang dapat digunakan yaitu Sensor Pengukuran NPK Tanah. Sensor Pengukuran NPK Tanah merupakan perangkat yang dapat digunakan untuk mendeteksi nilai nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Selain itu parameter Pengukuran NPK Tanah dapat dikorelasikan dengan parameter yang lain pada pengukuran kadar karbon organik tanah. Tanaman yang tumbuh subur akan menghasilkan lebih banyak biomassa (daun, akar, batang), yang kemudian berkontribusi pada peningkatan bahan organik di tanah ketika tanaman tersebut mati dan terurai. Dengan demikian, kandungan NPK yang cukup dalam tanah dapat mendorong akumulasi bahan organik yang lebih tinggi, yang pada akhirnya meningkatkan SOC.

1.6.1.2 Pengukuran Soil Organic Carbon (SOC) dengan Metode *Dry Combustion - Elemental Analyzer (EA)*

Pengukuran kadar SOC dengan menggunakan metode *Dry Combustion Elemental Analysis* merupakan salah satu langkah untuk mengetahui berapa kadar atau nilai SOC yang terkandung dalam tanah. Metode ini termasuk kedalam teknik analitik yang akurat untuk mendeteksi kandungan karbon organik tanah. Metode ini menggunakan prinsip atau pembakaran kering (*dry combustion*), sampel tanah akan di panaskan menggunakan suhu tinggi (sekitar 900°C - 1000°C). Pada suhu tersebut karbon organik dalam sampel akan teroksidasi menjadi karbon dioksida (CO₂). Karbon dioksida yang dihasilkan kemudian akan dideteksi oleh sensor inframerah atau *Thermal Conductivity Detector* (TCD) yang terintegrasi dengan instrumen EA. *Elemental Analysis* sendiri akan memberikan kemampuan untuk memberikan hasil yang cepat dan sensitivitas tinggi terhadap kandungan karbon tanah. Karakteristik utama

EA meliputi akurasi tinggi, efisiensi waktu, dan kemudahan dalam pengolahan data. Sehingga metode tersebut dapat dipastikan akan menghasilkan nilai yang konsisten [50].

1.6.1.3 Pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) menggunakan Spektrometer FieldSpec Pro FR

Spektrometer FieldSpec Pro FR sebagai instrumen memiliki keefektifan untuk mengukur SOC dengan pengindraan jarak jauh berupa karakteristik spektral yang berkorelasi dengan biofisik lainnya. Dengan kemampuan pengukuran spektrum berkisar 350-2500 nm, yang mencakup area inframerah. Lalu resolusi *spectral* yang tinggi yaitu 3 nm pada 700 nm dan 10 nm pada 1400 nm dan 2100 nm. Sehingga mampu memberikan analisis yang detail dari spektrum reflektansi, karena setiap spektrum memiliki resolusi pengambilan sampel 1 nm dan penggunaan panel reflektansi 99% untuk memastikan keakuratan pengukuran melalui kalibrasi sebelum pengambilan sampel. Pengukuran in-situ dengan pengukuran secara langsung ke lokasi tersebut, dan metodologi pengukuran pada berbagai jenis kondisi tanah berdasarkan tutupan alami menjadikan data tidak perlu ke laboratorium.

1.6.1.4 Analisis Data

Pada proses analisis data, akan ada beberapa proses Analisa yang dilakukan seperti perbandingan data pengukuran secara *real-time* dari delapan parameter dengan konsentrasi *Soil Organic Carbon* (SOC) untuk melihat apakah hasil data yang diperoleh dari parameter-parameter yang ada berkorelasi dengan konsentrasi SOC yang diperoleh. Parameter-parameter tersebut kemudian akan di validasi kembali untuk mendapatkan kadar SOC yang berada dalam tanah dan digunakan pula metode prediksi untuk melihat bagaimana variasi dalam data untuk mengidentifikasi strategi pengelolaan tanah. Lalu perbandingan secara *real-time* dengan hasil uji di laboratorium untuk melihat tingkat keakuratan data yang diperoleh apakah mendekati dengan hasil yang di peroleh menggunakan sampel.

1.6.2 Skenario Penggunaan

1.6.2.1 Pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) secara *Real-time*

Pada pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) secara *real-time* terdapat beberapa langkah persiapan yang perlu dilakukan. Parameter yang akan digunakan terdiri dari NPK, EC, pH, *Moisture*, *Temperature* tanah dan *Temperature* lingkungan. Proses dapat diawali dengan mengkalibrasi sensor, sebelum digunakan ke lapangan sensor perlu dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan larutan *buffer* dan sampel tanah. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan sensor dapat mengukur dan memberikan hasil yang akurat. Sensor pH akan memberikan informasi

mengenai tingkat keasaman tanah, hal tersebut dapat mempengaruhi aktivitas mikroba yang menguraikan bahan organik dalam tanah menjadi karbon. Sensor konduktivitas (EC) yang mengukur salinitas tanah, yang menggambarkan mengenai kesuburan tanah. Kemudian, *Sensor Moisture* mengukur jumlah kadar air dalam tanah yang merupakan salah satu faktor utama untuk aktivitas mikroba yang memproses karbon organik.

Selanjutnya, sensor suhu yang berperan penting untuk memantau kondisi termal dalam tanah yang akan berdampak langsung pada laju dekomposisi bahan organik. Sensor NPK akan mengukur konsentrasi nitrogen, fosfor, dan kalium dalam tanah yang berperan penting untuk siklus nutrisi juga kandungan organik dalam tanah. Setelah melakukan pengukuran, langkah selanjutnya adalah menganalisis data untuk menghubungkan antara masing-masing parameter dengan kadar *Soil Organic Carbon (SOC)* dengan menggunakan sistem prediksi.

Misalnya, jika peningkatan *moisture* tanah atau kadar NPK menunjukkan adanya peningkatan SOC, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa parameter tersebut berkorelasi positif dengan SOC. Sebaliknya, jika suatu parameter seperti pH atau EC menunjukkan tren penurunan SOC dengan peningkatan nilai parameter tersebut, maka terdapat korelasi negatif. Lalu dilakukan juga pengambilan sampel tanah untuk kebutuhan pengujian di laboratorium, hasil uji tersebut yang nantinya akan dibandingkan dengan kadar persen SOC yang telah diperoleh sebelumnya. Apakah data yang diperoleh secara *real-time* mendekati hasil pengukuran di laboratorium. Jika hasil sudah mendekati, maka bisa dikatakan bahwa data *real-time* memiliki akurasi yang tinggi karena adanya kesesuaian pada data.

1.6.2.2 Pengukuran *Soil Organic Carbon (SOC)* dengan Metode *Dry Combustion - Elemental Analyzer (EA)*

Pengukuran *Soil Organic Carbon* menggunakan metode *Dry Combustion – Elemental Analysis (EA)* dilakukan dalam beberapa tahap. Sampel tanah yang akan dilihat kadar SOC-nya akan diambil sekitar 30 mg yang kemudian akan digiling hingga lolos dalam saringan 0.2 mm. Sampel tersebut kemudian akan dimasukkan ke dalam kapsul timal dan di bakar pada suhu 975°C yang dilengkapi dengan detektor sensor konduktivitas termal. Semua sampel akan diolah terlebih dahulu dengan menggunakan HCL untuk menghilangkan kadar C-anorganik. Karbon organik dalam tanah akan terbakar dan menjadi karbon dioksida (CO₂), sedangkan unsur lain seperti nitrogen, sulfur, dan logam berat tidak terbakar.

Gas CO₂ yang dihasilkan dalam pembakaran kemudian akan dikumpulkan dan diukur menggunakan detektor berbasis inframerah atau menggunakan Deteksi *Thermal Conductivity*

Detector (TCD) yang nantinya akan mencatat konsentrasi gas yang terdeteksi. Berdasarkan volume konsentrasi gas CO₂ yang terdeteksi dan berat sampel tanah yang digunakan, akan digunakan perangkat lunak (*software*) yang akan mengkonversi data menjadi kadar karbon organik (SOC) secara otomatis. Dengan adanya hal tersebut, perangkat EA akan menghasilkan presentase SOC dalam sampel tanah tanpa perlu perhitungan manual dari pengguna, karena hanya tinggal memasukkan sampel tanah dan menunggu hasilnya [51].

1.6.2.3 Pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) menggunakan Spektrometer FieldSpec Pro FR

Pada pengukuran *Soil Organic Carbon* (SOC) secara *in-situ* dilakukan satu titik disebuah hutan kampus dengan tutupan alami untuk mengevaluasi kesehatan tanah dan dampaknya dari perubahan iklim. Penelitian ini menggunakan perangkat *Spektrometer FieldSpec Pro FR*. Proses sistem kerjanya mengukur spektrum yang dipantulkan oleh tanah berjenis lembab, dengan menggunakan probe sebagai kontak intensitas tinggi pada inti tanah. Rentang spektral yang ditembakkan pada instrumen ini yaitu berkisar 350-2500 nm. Pengukuran untuk resolusi 3 nm pada 700 nm dan 10 nm pada 1400 dan 2100 nm. Setiap spektrum memiliki resolusi pengambilan sampel 1 nm, dengan bantuan panel reflektansi 99% digunakan sebagai referensi sebelum pengukuran setiap sampel tanah. Tanah setiap sampel akan di belah dua, lalu probe akan ditempatkan pada permukaan datar yang terpotong. Setiap 5 cm sampel tanah menghasilkan 10 spektrum reflektansi, karna hutan dan semak-semak berdasarkan tutupan alami memiliki dua pertiga dari inti tanah. Setelah hasil spektrum reflektansi tanah didapatkan, selanjutnya nilai di rata-ratakan agar menghasilkan kurva spektral. Penetapan nilai konsentrasi kadar SOC yang dibandingkan dengan analisis kimia menggunakan metode *Walkley-Black*. Data kadar SOC interpretasikan untuk melihat dampak iklim terhadap ekosistem tanah. Sehingga dapat memberi rekomendasi pengelolaan konservasi tanah [52].

1.6.2.4 Analisis Data

Pada analisis data yang dilakukan, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan perbandingan data *real-time* dengan jumlah konsentrasi yang ada. Kandungan SOC dalam kisaran 3%- 5% maka dengan begitu dapat membantu pula dalam mitigasi perubahan iklim dan penyerapan karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer. Analisa kadar SOC dilakukan dengan menggunakan metode prediksi yang mampu untuk menganalisa yang paling signifikan diantara data yang ada.

Dilakukan pula pengujian sampel di laboratorium untuk dapat melihat tingkat akurasi data pengukuran secara *real-time* dengan data laboratorium. Jika hasil data menunjukkan sebaliknya maka data tersebut bisa dikatakan tidak akurat. Kemudian hasil analisis akan ditampilkan dalam bentuk grafik atau angka yang menunjukkan konsentrasi SOC dalam tanah. Informasi ini dapat diakses secara langsung oleh pengguna melalui antarmuka perangkat lunak, yang memungkinkan pemantauan yang cepat dan efisien. Data yang diperoleh dari pengukuran dapat disimpan untuk analisis lebih lanjut. Ini penting untuk membangun basis data yang dapat digunakan untuk penelitian jangka panjang mengenai perubahan SOC di lokasi tertentu.

1.6.2.5 *Stakeholder* Yang Terlibat

Proses pengamatan terhadap *Soil Organic Carbon* (SOC) dalam tanah dibutuhkan kolaborasi dengan beberapa pihak. Dukungan kerja sama sangat dibutuhkan untuk memastikan kelancaran untuk proses pemantauan keberlanjutan. Berbagai pihak yang terlibat dalam kerja sama ini diharapkan berjalan lancar dan menghasilkan data yang akurat juga bermanfaat bagi lingkungan. Pihak-pihak tersebut antara lain:

1) Telkom University

Pada pemantauan kadar SOC pada tanah, alat ukur akan di pasang di beberapa titik tanah kampus. Pihak kampus Telkom University akan berkontribusi dengan memberikan izin pemasangan alat ukur.

2) Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian UNPAD

Pada pengujian sampel tanah untuk mengetahui kadar *Soil Organic Carbon* (SOC), Laboratorium yang lebih tepatnya berada di Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian UNPAD juga akan turut serta membantu melakukan pengujian sampel tanah.

3) *Innovation and Sustainability for Geo-Environmental Health* (INSIGHT) Laboratory

Pada penelitian yang akan dilakukan, hasil kadar *Soil Organic Carbon* (SOC) akan di informasikan ke *platform* pemantauan berbasis *website* untuk menganalisis data karbon tanah secara terpusat.

4) Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Instalasi sistem pengukuran didukung dan mendapatkan fasilitasi riset dan inovasi oleh BRIN mengenai intervensi Karbon Organik Tanah *In-Situ* untuk Mitigasi Perubahan Iklim dalam mendukung *Sustainable Development Goals*.

1.7 Kesimpulan dan Ringkasan CD-1

Perubahan iklim global akibat emisi karbon, terutama CO₂, berdampak signifikan terhadap ekosistem dan kualitas sumber daya alam, memperburuk degradasi lingkungan melalui deforestasi dan perubahan penggunaan lahan. Tanah, sebagai penyimpan utama karbon organik terestrial, memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim. Di kawasan hutan Telkom University, ruang terbuka hijau berkontribusi dalam mengurangi gas rumah kaca melalui penyimpanan karbon. Pemanfaatan teknologi *soft* sensor untuk mengukur *Soil Organic Carbon* (SOC) memungkinkan pemantauan *real-time* yang akurat, pengujian hemat biaya, serta analisis cepat menggunakan metode laboratorium. Data SOC yang dihasilkan dapat mendukung pelestarian lingkungan, pengelolaan lahan berkelanjutan, konservasi ekosistem, serta inovasi mitigasi perubahan iklim, sekaligus menjadi dasar bagi kebijakan pengelolaan ruang hijau dan kontribusi terhadap pencapaian target SDGs.