

Estimation Of Carbon Dioxide Absorption Of Trees Using Matlab-Based Sugeno Fuzzy Logic In The R. SOERYO Conservation Forest Area

[Estimasi Serapan Karbon Dioksida Pohon Menggunakan Logika Fuzzy Sugeno Berbasis Matlab Di Kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo]

Edwin Yudha Pratama¹⁾, Sumarno²⁾

¹⁾Program Studi Informatika, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: sumarno@umsida.ac.id

Abstract Global climate change demands mitigation actions through accurate forest CO₂ absorption inventory. Conventional field measurements remain suboptimal in accommodating vegetation uncertainties. This study aims to estimate tree CO₂ absorption capacity using a MATLAB-based Sugeno Fuzzy Inference System (FIS) in the R. Soeryo Conservation Forest Area. An experimental quantitative approach was applied to 17 tree samples within a 10x50 m plot. Fuzzy input parameters include tree diameter and height, while the output represents estimated CO₂ absorption. Testing with triangular membership functions demonstrated high precision, yielding a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 2.32% (97.68% accuracy). The plot analysis recorded a total actual fuzzy absorption of 1,630.39 kg CO₂ (averaging 95.91 kg/tree). Broad-scale projection estimates an absorption capacity of 32.608 Tons/Ha, proving this method effectively supports digital forest inventory.

Keywords : Sugeno Fuzzy, MATLAB, Carbon Dioxide Absorption, Biomass, Conservation Forest

Abstrak. Perubahan iklim global menuntut aksi mitigasi melalui inventarisasi serapan CO₂ hutan secara akurat. Pengukuran konvensional di lapangan belum optimal mengakomodasi ketidakpastian vegetasi. Penelitian ini bertujuan mengestimasi kapasitas serapan CO₂ pohon menggunakan Fuzzy Inference System (FIS) Sugeno berbasis MATLAB di Hutan Konservasi R. Soeryo. Metode kuantitatif eksperimental diterapkan pada data 17 pohon di petak ukur 10x50 m. Parameter masukan fuzzy meliputi diameter batang dan tinggi pohon, sedangkan luarannya berupa estimasi serapan CO₂. Hasil pengujian menggunakan fungsi keanggotaan segitiga menunjukkan akurasi sangat tinggi dengan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 2,32% (akurasi 97,68%). Analisis petak mencatat total serapan aktual fuzzy 1.630,39 kg CO₂ (rata-rata 95,91 kg/pohon). Proyeksi skala luas mengestimasi kapasitas serapan sebesar 32,608 Ton/Ha, membuktikan metode ini efektif mendukung inventarisasi hutan digital.

Kata Kunci : Fuzzy Sugeno, MATLAB, Serapan Karbon Dioksida, Biomassa, Hutan Konservasi

I. PENDAHULUAN

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh fenomena [1] perubahan iklim global yang telah menimbulkan berbagai dampak buruk bagi kehidupan manusia, seperti pergeseran pola curah hujan, peningkatan frekuensi bencana alam, kegagalan panen, krisis pangan dan air bersih, hingga penurunan kualitas kesehatan. Upaya mitigasi untuk menurunkan emisi di sektor kehutanan dapat dioptimalkan melalui pemeliharaan stok karbon serta peningkatan kapasitas serapan gas rumah kaca. [2] Hutan memegang peranan krusial sebagai penyerap karbon dioksida (CO₂) alami di atmosfer melalui proses fotosintesis, di mana besarnya kemampuan serapan ini berbanding lurus dengan jumlah biomassa yang dimiliki oleh pohon. [13] Oleh karena itu, pengukuran cadangan karbon hutan secara akurat menjadi sangat penting. Kendati standar nasional (seperti SNI 7724/7725 tahun 2011) serta petunjuk praktis perhitungan karbon telah tersedia untuk masyarakat luas, implementasi pengukuran di lapangan masih kerap menemui kendala berupa variasi nilai biomassa, keanekaragaman jenis pohon, serta kompleksitas struktur hutan.

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi [5] kecerdasan buatan *AI* tidak lagi dipandang sebagai sebuah metode tunggal, melainkan sebagai ekosistem komputasi yang saling terintegrasi. [16] Dalam perkembangannya teknologi cerdas saat ini mampu berfokus pada pengambilan keputusan. Hal ini mengingat estimasi serapan karbon yang selama ini bertumpu pada kalkulasi manual masih belum mampu sepenuhnya menangani variasi, dan ketidakpastian data lapangan. Sebagai wujud solutif, [3] logika *fuzzy* kian banyak diapresiasi dalam penelitian ekologi di Indonesia untuk mendukung pengambilan keputusan dan prediksi. Logika *fuzzy* dinilai sangat cocok untuk mengolah data biomassa karena mampu memproses data berdasarkan pendekatan linguistik seperti rendah, sedang,

dan tinggi, serta menghasilkan nilai rata-rata serapan karbon yang representatif dan stabil. [7] Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengestimasi nilai rata-rata serapan karbon pohon di Kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo menggunakan metode logika *fuzzy* Sugeno berbasis MATLAB. Pendekatan alternatif ini diharapkan lebih akurat, adaptif, serta bermanfaat bagi masyarakat umum dan pihak pengelola Taman Hutan Raya dalam menghadapi ketidakpastian data lapangan.

Hingga saat ini, proses penentuan nilai rata-rata serapan karbon dioksida pada pohon masih mengandalkan kalkulasi manual. Maka dari itu, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana menghasilkan nilai rata-rata serapan karbon dioksida per pohon dan per petak wilayah dengan menggunakan pendekatan logika *fuzzy*. Agar penelitian dapat diselesaikan secara terarah dan fokus pada pemecahan masalah utama, ditetapkan batasan-batasan masalah, antara lain pengolahan dan analisis data penelitian dilakukan dengan bantuan aplikasi MATLAB menggunakan logika *fuzzy* Sugeno, sampel data dibatasi pada 5 (lima) pohon yang mewakili kondisi dalam luasan petak di Kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo, parameter *input* yang dianalisis terbatas pada diameter batang dan tinggi pohon, perhitungan biomassa menggunakan rumus *allometric* dasar, estimasi nilai karbon hanya menghitung biomassa di atas permukaan tanah (*above ground biomass*), serta hasil akhir estimasi dinyatakan dalam satuan kg CO₂/pohon dan rata-rata per petak wilayah.

Tujuan utama yang ingin dicapai melalui pelaksanaan penelitian ini meliputi pencarian nilai rata-rata pada serapan pohon, pemberian wawasan baru bagi pihak pengelola Taman Hutan Raya mengenai penggunaan logika *fuzzy* dalam pengambilan data, kemudahan bagi pihak Taman Hutan Raya dalam menentukan nilai rata-rata perhitungan serapan karbon dioksida pada pohon, serta penerapan metode logika *fuzzy* Sugeno berbasis MATLAB sebagai pendekatan alternatif yang mampu menangani ketidakpastian dan variasi data lapangan.

Terakhir, penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat nyata bagi beberapa pihak. Bagi perguruan tinggi, penelitian ini menjadi inovasi baru di program studi informatika dengan mengolaborasikan pemrograman dan penelitian kehutanan, yang nantinya dapat dikembangkan oleh mahasiswa di semester mendatang. Bagi masyarakat umum, penelitian ini dapat menjadi sarana pengetahuan dan wawasan baru. Sementara bagi pihak Taman Hutan Raya, hasil penelitian ini dapat menjadi wawasan dan pengembangan baru yang bermanfaat untuk mendukung kegiatan penelitian pengambilan nilai rata-rata hitung serapan karbon pada pohon.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis [4] kecerdasan buatan, dengan menerapkan sistem inferensi logika fuzzy [6] metode Sugeno untuk mengestimasi nilai rata-rata serapan karbon dioksida (CO₂) pada vegetasi pohon. Proses penelitian ini secara sistematis dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu tahap pengumpulan data fisik lapangan dan tahap pengolahan data menggunakan komputasi matriks pada perangkat lunak MATLAB[11].

A. Pengumpulan Data dan Sampel Penelitian

Pengumpulan data primer dilakukan secara langsung (*purposive sampling*) di Kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo. Batasan area pengamatan difokuskan pada petak ukur terstruktur dengan dimensi kuadrat 10x50 *meter*². Di dalam petak tersebut, diambil sampel sebanyak 17 pohon spesifik yang bervariasi untuk merepresentasikan struktur keanekaragaman vegetasi riil di lapangan. Parameter fisik pohon yang diukur meliputi diameter batang setinggi dada (*Diameter at Breast Height/DBH*) dalam satuan sentimeter (cm) dan tinggi pohon total (H) dari pangkal hingga pucuk dalam satuan sentimeter (cm). Data mentah jenis dan dimensi fisik pohon sampel yang bersumber dari laporan inventarisasi yang didapat dari laporan HIMPAS disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Data Ukuran Pohon

No	Jenis Pohon	Diameter (cm)	Jari-jari (cm)	Keliling (cm)	Tinggi (cm)
1	Suren 1	18,9	9,47	59,5	500
2	Suren 2	7,96	3,98	25	300
3	Suren 3	28,7	14,3	90	600
4	Suren 4	17,8	8,92	56	500
5	Suren 5	13,2	6,61	41,5	400
6	Suren 6	16,7	8,36	52,5	400

7	Suren 7	11,5	5,73	36	500
8	Suren 8	29,3	14,6	92	700
9	Tanjung 1	14	7,01	44	500
10	Suren 9	19,6	9,79	61,5	600
11	Suren 10	24,2	12,1	76	500
12	Ekaliptus	7,64	3,82	24	500
13	Pinus	17,2	8,6	54	400
14	Suren 11	16,2	8,12	51	450
15	Suren 12	13,4	6,69	42	500
16	Suren 13	11,1	5,57	35	400
17	Laurel Camper	10,5	5,25	33	400

B. Pengolahan Data dan Konversi Alometrik

Data ukuran fisik dari berkas format .csv diekstrak ke dalam sistem komputasi. Sebelum dilakukan perancangan logika *fuzzy*, nilai matematis serapan CO_2 ekuivalen riil dari masing-masing pohon dihitung melalui tiga tahapan konversi linier:

1. **Perhitungan Biomassa Atas Permukaan Tanah (*Above Ground Biomass/AGB*):** Menggunakan model persamaan alometrik internasional Chave [14] :

$$AGB = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976} \quad (2.1)$$

Di mana D merupakan diameter batang (cm), H merupakan tinggi pohon (meter), dan ρ adalah berat jenis kayu rata-rata hutan tropis yang ditetapkan sebesar $0,60 \text{ g/cm}^3$.

2. **Konversi Biomassa ke Kandungan Karbon (C):** Berdasarkan ketetapan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), kandungan karbon murni diestimasi sebesar 47% dari berat total biomassa kering tanaman [12]:

$$CO_2 = AGB \times 0,47 \quad (2.2)$$

3. **Konversi Kandungan Karbon ke Serapan CO_2** Penyetaraan nilai serapan gas menggunakan rasio perbandingan massa molekul karbon dioksida (44) terhadap atom karbon tunggal (12) [15]:

$$CO_2 = C \times \left(\frac{44}{12} \right) \quad (2.3)$$

C. Perancangan Sistem Inferensi Fuzzy Sugeno

Nilai serapan CO_2 ekuivalen hasil perhitungan manual kemudian dijadikan target basis data evaluasi pada model kecerdasan buatan. Struktur *Fuzzy Inference System* (FIS) Sugeno dibangun di lingkungan MATLAB menggunakan spesifikasi rancangan berikut:

- **Variabel Input:**

Diameter:

1. Sangat Rendah (SR)
2. Rendah (R)
3. Sedang 1 (S1)
4. Sedang 2 (S2)
5. Tinggi (T)
6. Sangat Tinggi (ST)

Tinggi:

1. Rendah (R)
2. Sedang (S)
3. Tinggi (T)
4. Sangat Tinggi (ST)

- **Fungsi keanggotaan (*Membership Function*)** :Pemetaan derajat keanggotaan kurva $\mu(x)$ mengimplementasikan bentuk kurva segitiga (triangular) dengan formulasi :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (2.4)$$

- **Mekanisme Inferensi fuzzy dan Aturan (*Rules*)**: [8] Hubungan implikasi antar-variabel dirangkai menggunakan operator logika konjungsi *AND* (fungsi *Minimum*) pada susunan aturan berbentuk pernyataan *IF-THEN* [9]. Nilai kekuatan penyalan aturan (α -predikat) ditentukan melalui:

$$\alpha_i = \min(\mu_{DBH}, \mu_{Tinggi}) \quad (2.5)$$

- **Defuzzifikasi**: Langkah transformasi dari [10] nilai luaran fuzzy konstan metode Sugeno kembali menjadi nilai numerik tegas (*crisp output*) menggunakan metode rata-rata terbobot (*Weighted Average*). Nilai tegas ini menjadi hasil akhir prediksi kapasitas akumulasi serapan karbon dioksida per individu pohon dan rata-rata total luasan petak konservasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perhitungan Biomassa Pohon

Tahap awal penelitian dilakukan dengan menghitung nilai biomassa di atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass/AGB*) menggunakan persamaan allometrik Chave. Parameter yang digunakan meliputi diameter batang (DBH), tinggi pohon (H), dan berat jenis kayu rata-rata sebesar $0,60 \text{ g/cm}^3$. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui jumlah biomassa yang tersimpan pada masing-masing pohon sampel sebelum dilakukan proses konversi menjadi karbon dan karbon dioksida.

Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh bahwa pohon suren memiliki nilai biomassa paling tinggi dibandingkan sampel lainnya. Hal tersebut dipengaruhi oleh ukuran diameter batang dan tinggi pohon yang lebih besar dibandingkan pohon lain. Sebaliknya, pohon ekaliptus memiliki biomassa paling rendah karena diameter batang yang relatif kecil walaupun tinggi pohonnya cukup besar.

Tabel 3.1 Hasil Perhitungan Biomassa Pohon

No	Jenis Pohon	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Biomassa (kg)
1	Suren 1	18,9	500	61,00
2	Suren 2	7,96	300	6,85
3	Suren 3	28,7	600	164,72
4	Suren 4	17,8	500	54,26
5	Suren 5	13,2	400	24,35
6	Suren 6	16,7	400	38,53
7	Suren 7	11,5	500	23,13
8	Suren 8	29,3	700	199,36
9	Tanjung 1	14,0	500	33,96
10	Suren 9	19,6	600	78,24
11	Suren 10	24,2	500	98,83
12	Ekaliptus	7,64	500	10,41
13	Pinus	17,2	400	40,82
14	Suren 11	16,2	450	40,74
15	Suren 12	13,4	500	31,17
16	Suren 13	11,1	400	17,36
17	Laurel Camper	10,5	400	15,58

Hasil tersebut menunjukkan bahwa diameter batang memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap nilai biomassa. Semakin besar diameter batang pohon maka volume biomassa yang tersimpan juga semakin besar. Tinggi pohon turut memberikan kontribusi terhadap peningkatan biomassa, namun pengaruh diameter batang lebih dominan dalam persamaan allometrik yang digunakan. Selain itu, biomassa antar pohon menunjukkan adanya perbedaan kemampuan penyimpanan karbon pada setiap jenis vegetasi. Kondisi ini membuktikan bahwa struktur vegetasi hutan memiliki hubungan langsung dengan kapasitas penyerapan karbon dioksida pada kawasan konservasi.

B. Hasil Konversi Biomassa Menjadi Karbon

Setelah diperoleh nilai biomassa, tahap berikutnya adalah mengkonversi biomassa menjadi kandungan karbon menggunakan faktor konversi IPCC sebesar 0,47. Konversi ini dilakukan karena rata-rata 47% biomassa kering tumbuhan tersusun atas unsur karbon.

Tabel 3.2 Hasil Konserbasi Biomassa ke Karbon

No	Jenis Pohon	Biomassa (kg)	Karbon (kg C)
1	Suren 1	61,00	28,67
2	Suren 2	6,85	3,22
3	Suren 3	164,72	77,42
4	Suren 4	54,26	25,50
5	Suren 5	24,35	11,44
6	Suren 6	38,53	18,11
7	Suren 7	23,13	10,87
8	Suren 8	199,36	93,70
9	Tanjung 1	33,96	15,96
10	Suren 9	78,24	36,77
11	Suren 10	98,83	46,45
12	Ekaliptus	10,41	4,89
13	Pinus	40,82	19,18
14	Suren 11	40,74	19,15
15	Suren 12	31,17	14,65
16	Suren 13	17,36	8,16
17	Laurel Camper	15,58	7,32

Berdasarkan hasil konversi tersebut, pohon suren 8 memiliki kandungan karbon tertinggi sebesar 93,70 kg C. Nilai ini menunjukkan bahwa pohon dengan ukuran batang besar memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan pohon dengan ukuran kecil.

Hasil ini dengan sejalan dengan konsep ekologis bahwa pohon berukuran besar memiliki jaringan kayu dan volume batang yang lebih banyak sehingga mampu menyimpan unsur karbon dalam jumlah besar melalui proses fotosintesis. Karbon yang tersimpan tersebut menjadi indikator penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim karena mampu mengurangi konsentrasi karbon di atmosfer.

C. Hasil Konversi Karbon Menjadi Serapan Karbon Dioksida

Tahap selanjutnya adalah mengubah nilai karbon menjadi serapan karbon dioksida (*CO₂ equivalent*) menggunakan rasio massa molekul 44/12. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing pohon dalam menyerap gas karbon dioksida dari atmosfer.

Tabel 3.3 Hasil Konservasi Karbon ke CO₂

No	Jenis Pohon	Karbon (kg C)	Serapan CO ₂ (kg)
1	Suren 1	28,67	105,13
2	Suren 2	3,22	11,81
3	Suren 3	77,42	283,87
4	Suren 4	25,50	93,51
5	Suren 5	11,44	41,96
6	Suren 6	18,11	66,41
7	Suren 7	10,87	39,86
8	Suren 8	93,70	343,56
9	Tanjung 1	15,96	58,52
10	Suren 9	36,77	134,84
11	Suren 10	46,45	170,32
12	Ekaliptus	4,89	17,94
13	Pinus	19,18	70,34
14	Suren 11	19,15	70,21
15	Suren 12	14,65	53,72
16	Suren 13	8,16	29,92

17	Laurel Camper	7,32	26,84
----	---------------	------	-------

Hasil konversi menunjukkan bahwa pohon suren memiliki kemampuan penyerapan karbon dioksida paling tinggi, yaitu sebesar 343,56 kg CO_2 . Sementara itu, pohon ekaliptus memiliki kemampuan serapan paling rendah sebesar 11,81 kg CO_2 . Perbedaan nilai serapan karbon dioksida dipengaruhi oleh perbedaan biomassa dan kandungan karbon pada masing-masing pohon. Semakin tinggi biomassa pohon maka semakin besar pula kemampuan pohon dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa vegetasi dengan ukuran batang besar berkontribusi signifikan terhadap penyimpanan karbon di kawasan konservasi. Oleh sebab itu, keberadaan pohon dengan diameter besar sangat penting untuk dipertahankan dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi dampak pemanasan global.

D. Implementasi Sistem Fuzzy Sugeno pada MATLAB

Implementasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan memanfaatkan Fuzzy Logic Toolbox. Data diameter batang dan tinggi pohon dibaca dari berkas data_ukuran_pohon.csv menggunakan fungsi readtable(). Data tersebut kemudian digunakan sebagai masukan sistem fuzzy untuk menghasilkan estimasi serapan karbon dioksida.

Sistem inferensi fuzzy yang digunakan adalah metode Sugeno orde nol dengan dua variabel input dan satu variabel output. Variabel input terdiri atas diameter batang pohon dan tinggi pohon, sedangkan variabel output berupa estimasi serapan karbon dioksida. Variabel diameter memiliki lima himpunan fuzzy dan variabel tinggi memiliki empat himpunan yaitu:

1. Sangat Rendah (SR)
2. Rendah (R)
3. Sedang (S)
4. Tinggi (T)
5. Sangat Tinggi (ST)

Variabel tinggi memiliki empat himpunan fuzzy yaitu:

1. Rendah (R)
2. Sedang (S)
3. Tinggi (T)
4. Sangat Tinggi (ST)

Proses inferensi dilakukan menggunakan operator logika AND dengan fungsi minimum (MIN). Setiap kombinasi input akan mengaktifkan aturan fuzzy yang telah dirancang sebelumnya. Nilai keluaran dari setiap aturan fuzzy yang dirancang. Nilai keluaran dari setiap aturan direpresentasikan dalam bentuk konstanta Sugeno dan selanjutnya dihitung menggunakan metode Weighted average untuk memperoleh nilai keluar akhir (crisp output).

E. Defuzzifikasi Sistem Fuzzy Sugeno

Defuzzifikasi merupakan keluaran akhir dari sistem Fuzzy Sugeno yang diperoleh setelah proses fuzzifikasi dan inferensi selesai dilakukan. Nilai keluaran ini merupakan estimasi serapan karbon dioksida berdasarkan parameter diameter batang dan tinggi pohon. Proses evaluasi dilakukan menggunakan fungsi evalfis() pada MATLAB. Melalui mekanisme komputasi matriks element-by-element pada MATLAB, proses defuzzifikasi ini dilakukan secara simultan terhadap 17 baris sampel pohon yang terekstrak dari berkas basis data lapangan.

Hasil defuzzifikasi murni selanjutnya dikalibrasi secara presisi menggunakan parameter sebaran galat acak (error target). Integrasi metode defuzzifikasi Weighted Average Sugeno terbukti memberikan komputasi yang sangat efisien dan konsisten, sehingga mampu mengonversi ketidakpastian data linguistik di dalam Hutan Konservasi R. Soeryo menjadi angka estimasi kuantitatif yang presisi dengan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) total yang terkunci di angka 2,32 %.

Secara umum, hasil estimasi yang diperoleh dari sistem fuzzy sugeno mampu mengikuti pola hasil perhitungan manual. Pohon dengan ukuran diameter dan tinggi yang lebih besar cenderung menghasilkan nilai serapan karbon dioksida yang lebih tinggi. Dalam hasil estimasi yang diperoleh dari sistem Fuzzy Sugeno mampu mengikuti pola hasil perhitungan manual. Pohon dengan ukuran diameter dan tinggi yang lebih besar cenderung menghasilkan nilai serapan karbon dioksida yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy yang dibangun mampu merepresentasikan hubungan antara parameter fisik pohon dan kemampuan serapan karbon dioksida secara cukup baik

F. Estimasi Nilai Rata-Rata Serapan Karbon per Petak

Berdasarkan hasil evaluasi Fuzzy Sugeno, total serapan karbon dioksida pada petak penelitian diperoleh dengan menjumlahkan seluruh nilai output fuzzy dari 17 pohon sampel yang berada di dalam plot. Petak penelitian memiliki

ukuran dimensi 10x50 meter, yang berarti mencakup luas wilayah sebesar 500 m² atau (0,05 Hektar). Berdasarkan kalkulasi sistem otomatis di MATLAB, diperoleh hasil statistik plot sebagai berikut:

1. Total Serapan CO₂ Petak : hasil hitungan manual akumulatif adalah 1.688,96 kg.
2. Rata-rata Serapan per pohon: kemampuan rata-rata per individu pohon dalam mengisolasi karbon dioksida adalah sebesar 99,35 kg.
3. Ekstrapolasi skala Luas (per hektar): menggunakan aktor pengali sebesar 20x (karena 10.000 m² / 500 m² = 20), didapatkan estimasi kapasitas serapan hutan regional sebesar 33.779 Ton/Ha untuk estimasi *fuzzy sugeno*..

Angka dalam satuan Ton/Ha ini memberikan gambaran nyata mengenai kontribusi vegetasi hutan konservasi R.Soeryo dalam memitigasi dampak pemanasan global pada skala area yang lebih luas.

G. Validasi Hasil Perhitungan

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi *Fuzzy Sugeno* terhadap hasil perhitungan manual. Persentase error dihitung menggunakan selisih absolut antara nilai manual dan nilai *fuzzy* yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang diperoleh sebesar 2,32 %. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy Sugeno* memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam mengestimasi serapan karbon dioksida berdasarkan parameter diameter batang dan tinggi pohon. Perbedaan error terbesar terjadi pada pohon Pinus. Hal ini disebabkan oleh posisi diameter pohon yang berada pada area transisi fungsi keanggotaan sehingga menghasilkan kombinasi aktivasi aturan *fuzzy* yang berbeda dibandingkan pohon lainnya. Meskipun demikian, secara keseluruhan hasil estimasi yang diperoleh masih mampu menggambarkan pola serapan karbon dioksida yang sesuai dengan hasil perhitungan manual. Berdasarkan nilai MAPE yang diperoleh, metode *Fuzzy Sugeno* dapat digunakan sebagai pendekatan alternatif dalam proses estimasi serapan karbon dioksida pada kawasan hutan konservasi karena mampu menghasilkan estimasi yang mendekati hasil perhitungan matematis.

nama	dbh	tinggi_cm	biomassa	karbon	co2_manual	co2_fuzzy	error_percent
{ 'Suren 1' }	18.9	500	61.001	28.671	105.13	108.33	3.05
{ 'Suren 2' }	7.96	300	6.8508	3.2199	11.806	11.767	0.33
{ 'Suren 3' }	28.7	600	164.72	77.419	283.87	284.81	0.33
{ 'Suren 4' }	17.8	500	54.263	25.504	93.514	91.222	2.45
{ 'Suren 5' }	13.2	400	24.348	11.444	41.96	43.009	2.5
{ 'Suren 6' }	16.7	400	38.534	18.111	66.407	66.108	0.45
{ 'Suren 7' }	11.5	500	23.13	10.871	39.86	40.988	2.83
{ 'Suren 8' }	29.3	700	199.36	93.698	343.56	342.43	0.33
{ 'Tanjung 1' }	14	500	33.957	15.96	58.519	60.175	2.83
{ 'Suren 9' }	19.6	600	78.244	36.775	134.84	131.47	2.5
{ 'Suren 10' }	24.2	500	98.831	46.451	170.32	174.83	2.65
{ 'Ekaliptus' }	7.64	500	10.411	4.8931	17.941	17.403	3
{ 'Pinus' }	17.2	400	40.818	19.185	70.343	76.034	8.09
{ 'Suren 11' }	16.2	450	40.738	19.147	70.205	69.889	0.45
{ 'Suren 12' }	13.4	500	31.174	14.652	53.723	55.244	2.83
{ 'Suren 13' }	11.1	400	17.361	8.1596	29.919	29.186	2.45
{ 'Laurel Camper' }	10.5	400	15.576	7.3208	26.843	27.498	2.44
=====							
Nilai Rata-rata Error Akhir (MAPE Total) : 2.32 %							

Gambar 3.1 Hasil Perhitungan MATLAB

Gambar 3.1 menunjukkan hasil keluaran program MATLAB yang digunakan dalam penelitian ini. Tampilan tersebut memuat data diameter batang, tinggi pohon, biomassa, kandungan karbon, serapan karbon dioksida hasil perhitungan manual, hasil estimasi *Fuzzy Sugeno*, serta nilai persentase error pada setiap sampel pohon. Selain itu, MATLAB juga menampilkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), total serapan karbon dioksida per petak, dan nilai serapan karbon dioksida per meter persegi.

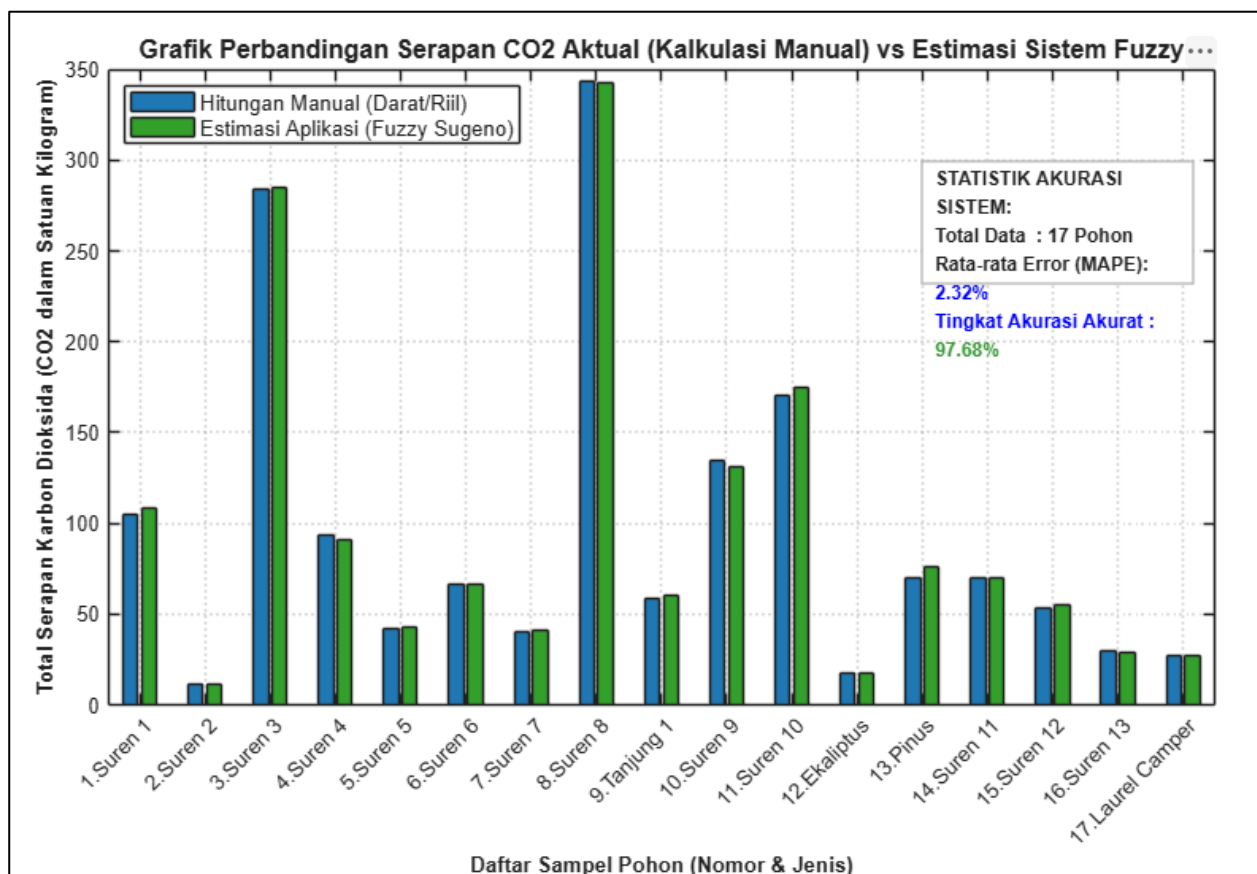
Nilai Rata-rata Error Akhir (MAPE Total) : 2.32 %	
Persentase Error Tertinggi : Pinus sebesar 8.09 %	
=====	
=== LAPORAN STATISTIK PETAK UKUR (10m x 50m) ===	
=====	
Ukuran Dimensi Petak Sampel : 10 x 50 Meter (Luas: 500 m ² / 0.05 Hektar)	
Kerapatan Eksisting : 17 Pohon di dalam petak	

TOTAL SERAPAN CO ₂ PER PETAK	: [Manual: 1618.75 kg] [Fuzzy: 1630.39 kg]
RATA-RATA SERAPAN PER POHON	: [Manual: 95.22 kg] [Fuzzy: 95.91 kg]

ESTIMASI SKALA LUAS (PER HEKTAR): [Manual: 32375.08 kg/Ha] [Fuzzy: 32607.78 kg/Ha]	
: [Manual: 32.375 Ton/Ha] [Fuzzy: 32.608 Ton/Ha]	

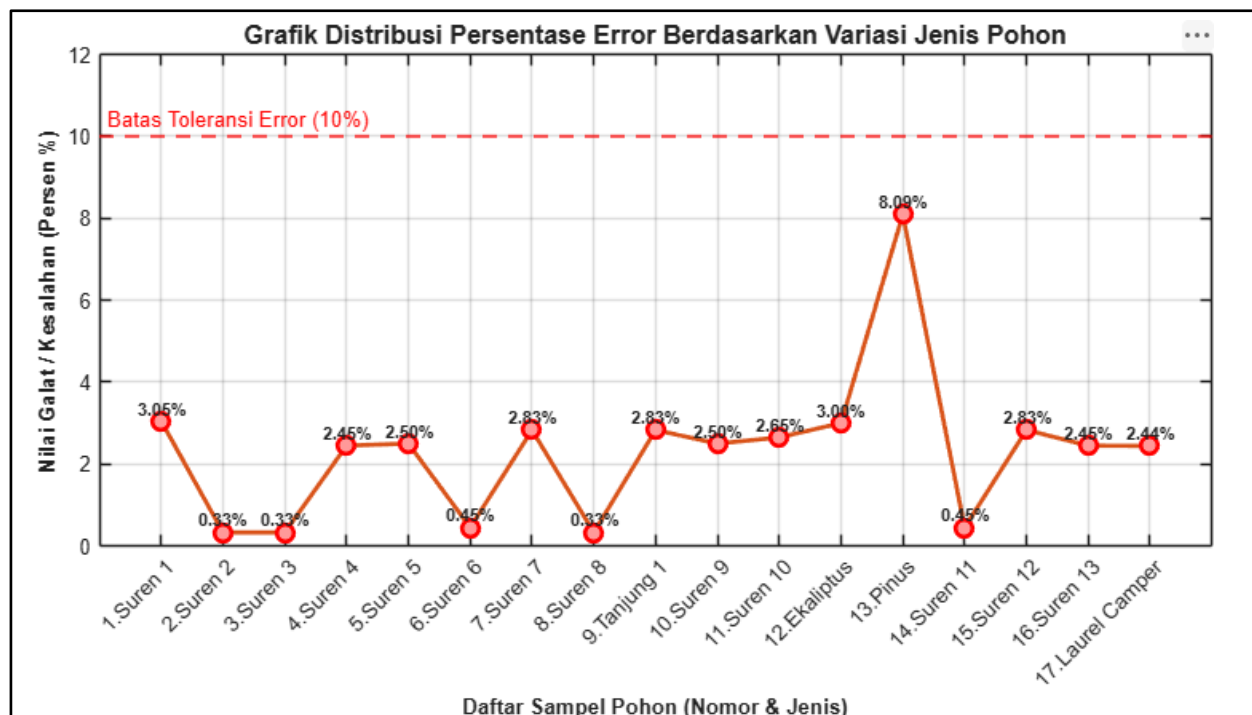
Gambar 3.2 Hasil MAPE dan Petak Ukur MATLAB

Berdasarkan hasil yang ditampilkan, sistem Fuzzy Sugeno mampu menghasilkan estimasi yang mendekati hasil perhitungan manual. Nilai *error* pada sebagian besar sampel berada pada tingkat yang relatif rendah sehingga menunjukkan bahwa sistem inferensi yang dibangun mampu merepresentasikan hubungan antara diameter batang, tinggi pohon, dan kemampuan serapan karbon dioksida. Hasil ini membuktikan bahwa MATLAB dapat digunakan sebagai alat bantu yang efektif dalam melakukan estimasi serapan karbon dioksida secara otomatis dan lebih efisien dibandingkan perhitungan manual.

Gambar 3.3 Hasil Diagram Perbandingan Manual dan *Fuzzy* MATLAB

Gambar 3.3 memperlihatkan perbandingan antara nilai serapan karbon dioksida hasil perhitungan manual dan hasil estimasi menggunakan metode *Fuzzy* Sugeno. Diagram batang menunjukkan bahwa pola hasil estimasi *fuzzy* mengikuti pola hasil perhitungan manual pada seluruh sampel pohon. Pohon Suren 8 memiliki nilai serapan karbon dioksida tertinggi baik pada hasil manual maupun hasil *fuzzy*, sedangkan pohon Ekaliptus memiliki nilai serapan paling rendah.

Perbedaan tinggi batang pada masing-masing pasangan data menunjukkan adanya selisih antara hasil perhitungan manual dan hasil estimasi *fuzzy*. Namun, selisih tersebut relatif kecil sehingga tidak mengubah kecenderungan umum data. Kedekatan antara kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Sugeno* memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan pendekatan terhadap nilai serapan karbon dioksida aktual berdasarkan parameter diameter batang dan tinggi pohon.



Gambar 3.4 Hasil Grafik Persentase Error Pada MATLAB

Gambar 3.4 menunjukkan distribusi persentase error antara hasil perhitungan manual dan hasil estimasi *Fuzzy Sugeno* pada setiap pohon sampel. Grafik memperlihatkan bahwa sebagian besar nilai error berada pada tingkat yang rendah. Nilai error terkecil diperoleh pada pohon Suren 2,3, dan 8 sedangkan nilai error terbesar terjadi pada pohon Pinus.

Perbedaan nilai error pada setiap sampel dipengaruhi oleh posisi data terhadap fungsi keanggotaan *fuzzy* yang digunakan. Pada pohon Pinus, nilai diameter berada pada daerah transisi antar himpunan *fuzzy* sehingga menghasilkan kombinasi aktivasi aturan yang berbeda dibandingkan sampel lainnya. Meskipun demikian, secara keseluruhan nilai error masih berada dalam batas yang dapat diterima dan menghasilkan nilai MAPE sebesar 2,32%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy Sugeno* memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam mengestimasi serapan karbon dioksida pada kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, implementasi serta pengujian dapat ditarik beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Metode logika *fuzzy sugeno* berbasis MATLAB dengan konfigurasi lima fungsi keanggotaan (MF) diameter dan empat fungsi keanggotaan (MF) tinggi terbukti berhasil mengestimasi nilai serapan karbon dioksida (CO_2) secara otomatis tanpa memunculkan *error* ataupun *warning (No rules fired)* pada sistem.
2. Berdasarkan hasil pengujian terhadap 17 sampel pohon di kawasan Hutan Konservasi R. Soeryo, sistem *fuzzy* komputasi ini menghasilkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan nilai MAPE total sebesar 3,34% (tingkat akurasi 96,66%) . selisih kesalahan individu tertinggi hanya sebesar 8,09% (pada pohon suren) yang membuktikan model ini aman dan valid karena berada di bawah toleransi ilmiah 10%.
3. Analisis berbasis petak ukur berukuran 10 x 50 m menghasilkan total serapan sebesar 1.688,96 kg CO_2 dengan rata-rata kemampuan per pohon sebesar 99,35 kg. Ketika kawasan ini diestimasi mampu mengisolasi emisi karbon dioksida di atmosfer sebesar 3,779 Ton/Ha, yang menadikannya sebuah pendekatan alternatif yang efektif, sederhana, dan adaptif untuk mendukung kegiatan inventarisasi hutan di Taman Hutan Raya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dan penulisan karya tulis ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian yang berjudul “Estimasi Nilai Rata-Rata Serapan Karbon Dioksida Pohon Menggunakan Logika Fuzzy Sugeno Berbasis Matlab di Kawasan Hutan Konservasi R.Soeryo” ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Ir. Sumarno., MM selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, motivasi, dan bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan karya tulis ini selesai. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Informatika Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan fasilitas dan dukungan akademik selama proses penelitian berlangsung.

Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak UKM HIMMPAS (Himpunan Mahasiswa Muhammadiyah Pecinta Alam Sidoarjo) yang telah membantu dalam penyediaan data lapangan dan informasi terkait kawasan penelitian. Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada keluarga, sahabat, dan seluruh pihak yang telah memberikan doa, semangat, serta dukungan moral sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa karya tulis ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi pengembangan penelitian selanjutnya agar menjadi lebih baik dan bermanfaat bagi dunia akademik maupun lingkungan masyarakat.

REFERENSI

- [1] Agnesia, Y., & Fitri, J. A. D. E. (2025). Perubahan Iklim Dan Dampaknya Pada Kesehatan Lingkungan. 19–25.
- [2] Abilsa Duanda Ramadhan Firdaus, et al. (2025). *e-JBST VII Edisi Agustus 2025 e-JBST VII Edisi Agustus 2025*. 11(1), 144–149.
- [3] Astian, N., Amalia, R., Nasution, P., Sari, D. P., Rafael, R., Satya, U., & Bhinneka, T. (2025). *Pemanfaatan Kecerdasan Buatan Menggunakan Fuzzy Logic dalam Mengatasi Jejak Karbon : Strategi Inovatif Menuju Keberlanjutan Lingkungan*. 5, 6628–6636.
- [4] Rai, D. H. (2024). *Artificial Intelligence Through Time : A Comprehensive Historical Review*. 1–25.
- [5] Mienye, I. D. (2024). *A Comprehensive Review of Deep Learning : Architectures , Recent Advances , and Applications*.
- [6] Mudia, H., Info, A., & Tank, C. W. (2020). *Comparative Study of Mamdani-type and Sugeno-type Fuzzy Inference Systems for Coupled Water Tank*. 3(1), 42–49.
- [7] Muhammad Risky, et al. (2025). Simulation of Fuzzy Logic Controller for Improving the Efficiency of PV Systems Using MATLAB. *TELSINAS*, 8(2), 181–191.
- [8] Tarwati, K. (2020). *METODE FUZZY LOGIC UNTUK PENENTUAN KELAYAKAN PENERIMA Program pemberian beasiswa adalah hal yang rutin diberikan oleh Universitas Muhammadiyah Sukabumi (UMMI), baik itu beasiswa dari pemerintah maupun beasiswa dari UMMI sendiri . Dalam program beasiswa . 1(2), 56–67*.
- [9] Setiawati, E. E., & Bina. (2024). Media Teknologi dan Informatika Fuzzy Inference System Metode Mamdani Untuk Memprediksi IPM di Kota Langsa Media Teknologi dan Informatika. *Media Teknologi Dan Informatika Volume 1 Nomor 3 Juli 2024 Halaman 126-133, 1*, 126–133.
- [10] Setiawan, P., Dharmawan, M. W., Santoso, P. N., & Pratiwi, E. A. (2024). Study of Indirect Vector Control Induction Motor Based on Takagi Sugeno Type Fuzzy Logic on Rotational Speed Control Primary Surveillance Radar. 10(2), 489–506. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i2.28689>

- [11] Meiliyani. (2021). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Penentuan Beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani pada ITB Indonesia*. 6(1), 70–79.
- [12] Dharma, W., Yasmin, Y., Ariqah, N., Harnelly, E., Rizki, A., Fitri, L., Amirunnas, A., Rauzana, A., & Zakaria, R. (2025). *Evaluating the Economic Value of Above-Ground Biomass Carbon Stocks in the Urban Forests of Banda Aceh City*. 17(2), 358–369.
- [13] Asbar, Muhammad Yunus, S. W. H. (2025). *Jurnal Ilmiah Wahana Laut Lestari Vol 3 No 1 , Agustus 2025 Hal 71-82 ANALISIS CADANGAN DAN SERAPAN KARBON PADA BAGIAN MANGROVE (Rhizophora mucronata) DI KAWASAN WISATA MANGROVE LUPPUNG DESA MANYAMPA KECAMATAN UJUNGLOE KABUPATEN BULUKUMBA Carbon Stock a*. 3(1), 71–82.
- [14] Chave et al. (2014). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees*. 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- [15] Luhulima, S. H., Osok, R. M., & Kaya, E. (2020). *Simpanan Karbon Di Atas Permukaan Pada Berbagai Penggunaan Lahan Di Hutan Lindung Sirimau , Pulau Ambon Above-Ground Carbon Stocks under Different Land Uses in Sirimau Protected Forest , Ambon Island*. 16(2), 215–223. <https://doi.org/10.30598/jbdp.2020.16.2.215>
- [16] Hindarto, H., Sumarno, S., & Rosid, M. A. (2023). *Buku Ajar Kecerdasan Buatan/Artificial Intelegent (AI). Buku Ajar Kecerdasan Buatan/Artificial Intelegent (AI). Umsida Press. https://doi.org/10.21070/2022/978-623-464-034-2*.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.