

Analyzing Compost Fermentation Accuracy Through Fuzzy Logic and R-Square Techniques

Reza Firmansyah Putranto¹, Novita Kurnia Ningrum²

Teknik Informatika, Universitas Dian Nuswantoro Semarang
111202113571@mhs.dinus.ac.id¹, novita.kn@dsn.dinus.ac.id²

Article Info

Article history:

Received 2025-12-10

Revised 2026-01-28

Accepted 2026-01-30

Keyword:

IoT,
Fuzzy Logic,
Temperature,
Humidity,
Compost.

ABSTRACT

The accumulation of unmanaged organic waste remains a critical environmental issue, highlighting the need for technological support to improve composting efficiency and monitoring. This study proposes an Internet of Things (IoT)-based system for monitoring compost fermentation conditions using temperature and humidity sensors, combined with Fuzzy Logic and R-square (R^2) analysis to evaluate fermentation quality. The system employs a DHT11 sensor integrated with an ESP8266 microcontroller to collect temperature and humidity data in real time over a 20-day observation period, resulting in 1,008 data points. Fuzzy Logic is applied through fuzzification, rule-based inference, and defuzzification to classify compost conditions into four categories: poor, good, very good, and cooling needed. The model's performance is further validated using multiple linear regression, with temperature and humidity as independent variables and average temperature as the dependent variable. The results show that compost temperature ranged between 28–32°C and humidity between 50–87%, indicating that the fermentation process was predominantly in the mesophilic or early composting phase. The fuzzy inference results demonstrate that most conditions fell within the “good” category, while the R^2 value of 0.87 indicates a strong relationship between the observed variables. These findings confirm that the integration of IoT, Fuzzy Logic, and statistical analysis is effective as a real-time monitoring and decision support system for compost management, while also highlighting the need for additional parameters to achieve a more comprehensive compost quality assessment.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

I. PENDAHULUAN

Sampah merupakan salah satu masalah utama yang dihadapi masyarakat Indonesia saat ini. Tantangan dan solusi pengelolaan sampah di Indonesia telah menjadi isu yang semakin mendesak seiring dengan pertumbuhan populasi yang pesat dan urbanisasi yang terus berkembang (Julia Lingga et al., 2024). Data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2024 menunjukkan bahwa timbulan sampah se-Indonesia mencapai 33 juta ton/tahun, dengan 59.82% atau sebesar 20 juta ton sampah terkelola, dan 40.18% atau sebesar 13 juta ton sampah tidak terkelola (KLHK, 2024). Sampai saat ini, masih banyak daerah di Indonesia yang belum memiliki infrastruktur yang memadai untuk pengelolaan sampah, kurangnya partisipasi

masyarakat dalam mengelola sampah juga masih tergolong rendah [3]. Pemerintah telah berupaya dalam mengatasi dan mencegah masalah pengelolaan sampah ini dengan mengeluarkan berbagai kebijakan dan program, namun kerangka hukum yang mengatur tentang pengelolaan sampah di Indonesia belum optimal [4]. Dengan terus meningkatnya volume sampah pertahunnya, hal ini dapat menyebabkan penumpukan sampah yang akan mengakibatkan banyak masalah salah satunya bencana dan penyebaran penyakit [5]. Maka diperlukan pemanfaatan sampah agar jumlah volume sampah dapat berkurang [6].

Pemanfaatan sampah khususnya sampah organik sebagai sumber pupuk organik jelas sangat berguna bagi penunjang sektor pertanian dan perkebunan [7]. Pupuk organik memberikan keuntungan bagi tanaman dan tanah dengan cara meningkatkan karakteristik biologis, kimia, dan fisika tanah.

Dalam hal sifat kimia tanah, pupuk organik berfungsi sebagai penyedia kandungan hara makro dan mikro, serta berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation tanah [8]. Pupuk organik juga berperan dalam memperbaiki sifat fisika tanah, salah satunya adalah memperbaiki struktur tanah [9]. Pada sifat biologi tanah manfaat pupuk organik yaitu sebagai sumber makanan dan energi untuk meso dan mikro fauna tanah [10]. Peluang ini dapat dimanfaatkan oleh masyarakat Indonesia untuk dapat memproduksi pupuk organik secara mandiri dari sampah organik. Dengan masyarakat yang memanfaatkan peluang ini dapat membantu mencegah berbagai kemungkinan buruk seperti bencana dan penyebaran penyakit, serta dapat mengatasi masalah ketahanan pangan di masa yang akan datang [11]. Namun pada pelaksanaannya pembuatan pupuk organik masih menggunakan metode tradisional seperti komposting manual. Proses komposting membutuhkan waktu berminggu-minggu hingga berbulan-bulan untuk menghasilkan pupuk yang siap digunakan [12]. Proses yang tidak efisien ini menyebabkan masyarakat menjadi enggan untuk mengolah sampah organik menjadi pupuk organik. Hal ini membuat pengembang teknologi seperti IoT, menjadi solusi yang sangat dibutuhkan dalam pembuatan pupuk secara otomatis [13].

Inovasi dalam sektor pertanian telah meluas mulai dari perubahan teknologi hingga budidaya tanaman. Pemanfaatan Iot, sensor, dan robotika menjadi pintu bagi kemajuan yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi produksi [14]. Teknologi dalam sektor pertanian memiliki dampak positif meningkatkan efisiensi dan meringankan beban kerja para petani [15]. Pemanfaatan Iot pada sektor pertanian juga berdampak bagi pendapatan yang stabil dan lebih tinggi secara berkelanjutan bagi para petani [16]. Tantangan yang muncul dalam pemanfaatan Iot di sektor pertanian diakibatkan karena banyaknya perangkat Iot yang terhubung dan jumlah data yang dihasilkan dari berbagai sumber, termasuk ketersediaan dan keandalan data, kualitas data, keamanan, dan privasi [17].

Pada proses pengomposan terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan salah satunya yaitu suhu dan kelembaban. Meskipun suhu dan kelembaban merupakan indikator utama dalam proses fermentasi kompos karena berhubungan langsung dengan aktivitas mikroorganisme, parameter tersebut belum sepenuhnya merepresentasikan kualitas akhir kompos. Parameter lain seperti pH, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), dan kadar oksigen juga diketahui berperan penting dalam menentukan tingkat kematangan dan kualitas kompos. Namun, penelitian ini difokuskan pada suhu dan kelembaban sebagai tahap awal pengembangan sistem monitoring berbasis IoT. Evaluasi kualitas kompos dalam penelitian ini masih bersifat parsial dan ditujukan untuk mengamati dinamika kondisi lingkungan fermentasi, sehingga pengembangan dengan penambahan parameter lain direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya. Agar tetap dapat memantau kondisi kompos selama proses pembuatan

kompos berlangsung meskipun dengan jarak jauh, maka perlu memanfaatkan teknologi IoT yang ada [18]. Penelitian yang sama dilakukan oleh [19] menerapkan sistem kendali yang dibangun menggunakan metode *fuzzy logic* menghasilkan pupuk yang sesuai dengan standar kualitas kompos pada hari ke 30. Pada penelitian [20] menggunakan metode pengujian R^2 dan menghasilkan kompos kering pada hari ke 24. Penelitian sebelumnya banyak peneliti yang sudah membuat rancangan sistem pemantauan suhu dan kelembaban. Pada penelitian ini penulis membuat rancangan sistem pemantauan suhu dan kelembaban pada pupuk kompos berbasis ESP8266 dengan metode *Fuzzy Logic* dan pengujian sistem R^2 . Input sensor yang digunakan pada penelitian ini sensor DHT11. Hasil input ditampilkan di LCD dan Aplikasi Blynk yang dapat memonitor suhu dan kelembaban secara *real-time* dari jarak jauh.

II. METODE

Penelitian ini terdiri dari tiga komponen utama yaitu input, *process*, dan output. Masing-masing memiliki tugas dan fungsi yang berbeda, yang memungkinkan sistem beroperasi dengan efektif. Komponen input bertugas untuk menerima data dari parameter yang diukur melalui sensor, kemudian bagian proses berfungsi sebagai pengendali atau pengolah informasi yang diterima, dan komponen output berperan sebagai pemberi respon sesuai dengan reaksi dari sensor. Data hasil pengukuran sensor yang telah diolah *microcontroller* akan di *upload* ke server yang dapat dilihat pada sebuah komputer atau *smartphone* melalui Blynk.

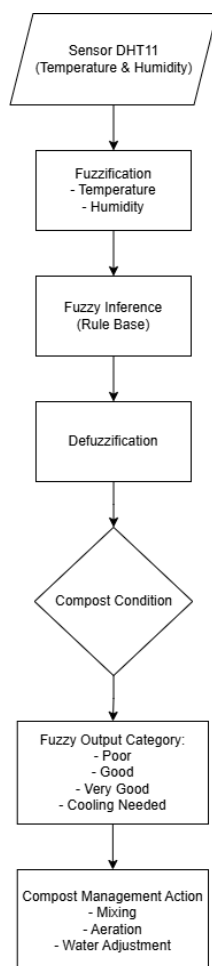
Eksperimen dilakukan menggunakan komposter skala kecil berbasis wadah tertutup dengan kapasitas ± 20 liter. Bahan organik yang digunakan terdiri dari campuran sampah rumah tangga berupa sisa sayuran, daun kering, dan limbah dapur, tanpa penambahan aktivator komersial. Proses fermentasi dilakukan pada lingkungan terbuka dengan kondisi iklim tropis dan curah hujan tinggi, sehingga faktor lingkungan sekitar seperti suhu udara dan kelembaban eksternal turut memengaruhi dinamika kondisi kompos. Faktor-faktor tersebut menjadi konteks penting dalam interpretasi hasil pengukuran suhu dan kelembaban selama proses pengomposan.

TABEL I
DATA VARIABEL

Variabel		Tipe Data	Jumlah Data
Notasi	Nama		
X	Suhu (Temp)	Numerik	1008
Y	Kelembaban (Hum)	Numerik	1008

Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari sensor *IoT* DHT11. Data dikumpulkan dari 1 Oktober 2025 hingga 20 Oktober 2025, menghasilkan total 1008 data yang diambil setiap 30 menit sekali untuk setiap variabel. Pada tabel 1 adalah variabel-variabel yang digunakan pada penelitian ini dan terdiri dari suhu (Temp), kelembaban (Hum), dan suhu rata-rata (T_{avg}) sebagai variabel target.

Data yang telah tercatat kemudian diolah dan dikirim ke server dan dapat dilihat pada komputer atau *smartphone* secara realtime melalui web/aplikasi Blynk. Sensor DHT11 digunakan dalam penelitian ini karena memiliki biaya rendah, konsumsi daya kecil, dan kemudahan integrasi dengan mikrokontroler ESP8266. Namun demikian, sensor DHT11 memiliki beberapa keterbatasan teknis, antara lain resolusi suhu sebesar $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $\pm 1\%$, serta akurasi pembacaan yang lebih rendah dibandingkan sensor sejenis seperti DHT22. Selain itu, DHT11 memiliki waktu respons yang relatif lebih lambat dan rentan terhadap fluktuasi lingkungan ekstrem. Oleh karena itu, hasil pengukuran dalam penelitian ini berpotensi mengandung error pembacaan, khususnya pada kondisi kelembaban tinggi. Keterbatasan ini perlu diperhatikan dalam menilai keandalan data, dan penggunaan sensor dengan presisi lebih tinggi direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi sistem di masa mendatang.



Gambar 1. Diagram Alur Sistem Pendukung Keputusan

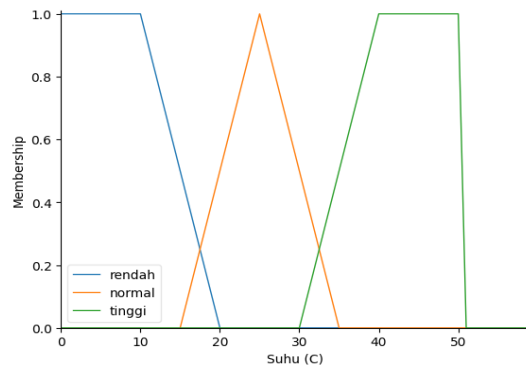
Gambar 1 menunjukkan diagram alur sistem pendukung keputusan yang dikembangkan dalam penelitian ini. Data suhu dan kelembaban diperoleh dari sensor DHT11,

kemudian diproses melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan kategori kualitas kompos. Kategori tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar rekomendasi tindakan pengelolaan kompos.

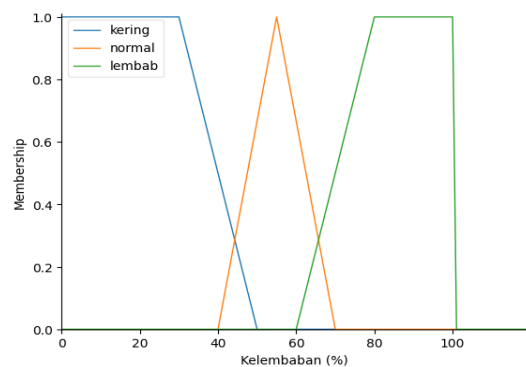
Penelitian ini menggunakan metode *Fuzzy logic*, tahapan-tahapan yang digunakan meliputi fuzzifikasi, rule base, dan defuzzifikasi. Penentuan fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy dalam penelitian ini didasarkan pada kombinasi studi literatur dan standar umum proses pengomposan. Rentang suhu ideal $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $50\text{--}70\%$ mengacu pada penelitian sebelumnya dan standar teknis pengomposan. Fungsi keanggotaan dirancang berbentuk segitiga dan trapesium untuk memudahkan implementasi serta memberikan respons yang fleksibel terhadap perubahan nilai input. Penyusunan rule base dilakukan berdasarkan prinsip pakar (expert knowledge) yang menggambarkan hubungan logis antara suhu, kelembaban, dan kualitas proses fermentasi. Dengan pendekatan ini, sistem fuzzy diharapkan mampu merepresentasikan penilaian kondisi kompos secara mendekati cara berpikir manusia.

Pada fuzzifikasi nilai suhu dan kelembaban diubah menjadi nilai keanggotaan, himpunan fuzzy untuk masing-masing parameter adalah suhu (rendah, normal, tinggi) dan kelembaban (kering, normal, lembab). Pada rule base kondisi ideal pengomposan yaitu suhu $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $50\text{--}70\%$. Output fuzzy yang dihasilkan memiliki tiga himpunan yaitu buruk, baik, sangat baik. Untuk menguji seberapa akurat model fuzzy dalam memprediksi kondisi kompos berdasarkan data suhu dan kelembaban digunakan perhitungan R-square (R^2). Tujuan dari perhitungan R^2 yaitu menguji apakah kombinasi suhu dan kelembaban mampu menjelaskan variasi pada suhu rata-rata, mengukur hubungan kedua variabel terhadap kondisi kompos, mengukur akurasi model fuzzy.

Pengujian regresi linier berganda digunakan sebagai metode validasi untuk mengevaluasi kesesuaian hasil inferensi fuzzy terhadap data aktual. Dalam model ini, suhu (Temp) dan kelembaban (Hum) bertindak sebagai variabel independen (X), sedangkan suhu rata-rata kompos (Tavg) digunakan sebagai variabel dependen (Y). Pemilihan Tavg sebagai variabel target didasarkan pada pertimbangan bahwa suhu rata-rata mencerminkan kondisi termal kompos secara agregat dan berhubungan langsung dengan tingkat aktivitas mikroorganisme. Model regresi linier digunakan untuk menguji hubungan linear antara variabel input dan output selama periode pengamatan. Penerapan regresi linier dalam penelitian ini mengasumsikan hubungan linear antar variabel, kestabilan pola data, serta tidak adanya perubahan ekstrem selama proses pengamatan. Meskipun pengujian asumsi statistik lanjutan seperti normalitas residual dan heteroskedastisitas tidak dilakukan secara eksplisit, pendekatan ini tetap relevan sebagai tahap awal evaluasi akurasi model fuzzy.



Gambar 2. Variabel Input Suhu



Gambar 3. Variabel Input Kelembaban

Gambar 2 dan gambar 3 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk variabel input suhu dan kelembaban yang digunakan pada proses fuzzifikasi. Variabel suhu dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy yaitu rendah, normal, dan tinggi, yang masing-masing merepresentasikan kondisi awal, kondisi ideal, dan kondisi berlebihan dalam proses pengomposan. Sementara itu, variabel kelembaban juga memiliki tiga himpunan fuzzy yaitu kering, normal, dan lembab menggambarkan tingkat kadar air mulai dari kondisi yang tidak mendukung aktivitas mikroorganisme hingga kondisi yang terlalu basah. Pembagian fungsi keanggotaan pada kedua variabel ini memungkinkan sistem fuzzy mengolah perubahan suhu dan kelembaban secara bertahap dan tidak kaku, sehingga proses inferensi mampu menilai kondisi kompos secara lebih adaptif dan akurat.

TABEL II
FUZZY RULE

Suhu \ Kelembaban	Rendah	Normal	Tinggi
Kering	Buruk	Buruk	Buruk
Normal	Buruk	Baik	Basah
Lembab	Buruk	Sangat Baik	Perlu Pendinginan

Tabel 2 menunjukkan aturan *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan kualitas kondisi kompos berdasarkan kombinasi nilai suhu dan kelembaban. Aturan ini disusun berdasarkan

prinsip bahwa proses pengomposan optimal terjadi pada suhu dan kelembaban yang berada pada rentang ideal. Kombinasi suhu rendah atau tinggi atau tinggi dengan kelembaban apapun umumnya menghasilkan kategori buruk, karena kedua kondisi tersebut tidak mendukung aktivitas mikroorganisme secara optimal. Ketika suhu dan kelembaban berada pada kondisi normal, sistem memberikan output baik yang menandakan proses fermentasi berlangsung sesuai standar. Output sangat baik muncul pada kombinasi suhu normal dan kelembaban lembab karena kondisi tersebut mendukung aktivitas maksimal mikroorganisme. Sementara itu, kombinasi suhu tinggi dan kelembaban lembab dikategorikan perlu pendinginan untuk mencegah *overheating* pada kompos.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sejak 1 Oktober 2025 hingga 20 Oktober 2025 dengan total 1008 data yang diambil setiap 30 menit untuk setiap variabel. Data direkam secara *real-time* menggunakan sensor DHT11 dan dikirim ke server melalui ESP8266. Data monitoring suhu (Temp) dan kelembaban (Hum) pada penelitian ini memiliki statistik seperti pada tabel 3 dibawah ini.

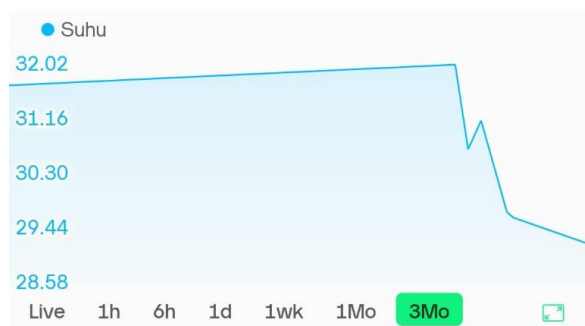
TABEL III
STATISTIK DATA SUHU DAN KELEMBABAN

Variabel	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Jumlah Data
Suhu (Temp)	28°C	32°C	30,5°C	1008
Kelembaban (Hum)	50%	87%	68,85%	1008

Hasil monitoring suhu pada aplikasi Blynk menunjukkan pola peningkatan pada hari hari awal proses komposting hingga mencapai fase dekomposisi paling optimal. Suhu mulai meningkat pada hari ke-3 dan stabil pada rentang 31-32°C pada hari ke-5 hingga hari ke-15. Suhu kembali menurun seiring menurunnya kandungan bahan organik sebagai substrat bagi mikroorganisme. Hasil monitoring kelembaban pada aplikasi Blynk juga menunjukkan perubahan sesuai perubahan suhu dan aktivitas bakteri. Kelembaban ikut meningkat seiring meningkatnya suhu disebabkan karena penelitian dilakukan pada musim penghujan, sehingga cuaca hujan menyebabkan kelembaban lingkungan naik seiring suhu naik akibat aktifitas bakteri.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pengomposan yang dipantau menggunakan sistem IoT berbasis sensor DHT11 mampu memberikan informasi suhu dan kelembaban secara *real-time* selama 20 hari pengamatan. Rentang suhu 28–32°C yang terpantau selama periode pengamatan menunjukkan bahwa proses pengomposan masih berada pada fase mesofilik atau fase awal. Pada fase ini, mikroorganisme

mesofilik mulai menguraikan bahan organik dengan laju dekomposisi yang relatif moderat.



Gambar 4. Grafik Suhu



Gambar 5. Grafik Kelembaban

Menurut teori pengomposan, fase termofilik yang ditandai oleh suhu 40–60°C umumnya terjadi ketika populasi mikroorganisme meningkat secara signifikan dan proses dekomposisi berlangsung intensif. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan tercapainya fase termofilik dalam 10–15 hari, penelitian ini menunjukkan dinamika yang lebih lambat. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh skala komposter yang relatif kecil, jenis bahan organik rumah tangga, serta kondisi lingkungan eksternal seperti curah hujan yang tinggi selama periode penelitian. Hasil ini menunjukkan bahwa dinamika fase pengomposan sangat dipengaruhi oleh kondisi eksperimental dan menegaskan pentingnya konteks lingkungan dalam interpretasi data suhu.

B. Proses Fuzzifikasi

Proses fuzzifikasi mengubah nilai suhu yang didominasi oleh kategori rendah serta kelembaban yang bervariasi antara kering dan lembab, sehingga menghasilkan output *fuzzy* yang mayoritas berada pada kondisi buruk dan baik. Hal ini sejalan dengan rule base yang menetapkan bahwa suhu rendah dikombinasikan dengan kelembaban tinggi maupun rendah akan menghasilkan kualitas kompos yang belum ideal. Meskipun demikian, adanya 506 data (50,2%) yang masuk dalam kategori baik menunjukkan bahwa sebagian kondisi kompos mulai mendekati kondisi optimal, terutama ketika kelembaban berada pada kisaran 50-70%. Hal ini menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu menangkap

ketidakstabilan suhu dan kelembaban serta mengklasifikasikannya secara adaptif sesuai rule yang ditetapkan dalam metode.

TABEL IV
HASIL FUZZIFIKASI SAMPEL DATA SUHU

Suhu	μ_{Rendah}	μ_{Normal}	μ_{Tinggi}
31	0,80	0,20	0,00
31,2	0,76	0,24	0,00
31,8	0,64	0,36	0,00
31,8	0,64	0,36	0,00
31,6	0,68	0,32	0,00

TABEL V
HASIL FUZZIFIKASI SAMPEL DATA KELEMBABAN

Kelembaban	μ_{Kering}	μ_{Normal}	μ_{Lembab}
50	1,00	0,00	0,00
52	0,60	0,40	0,00
52	0,60	0,40	0,00
55	0,00	1,00	0,00
58	0,00	1,00	0,00

Fuzzifikasi dilakukan dengan mengubah nilai suhu dan kelembaban yang bersifat crisp menjadi derajat keanggotaan. Berdasarkan hasil fuzzifikasi, nilai suhu berada pada rentang 31–32°C sehingga memiliki derajat keanggotaan dominan pada himpunan suhu rendah ($\mu = 0,64\text{--}0,80$). Nilai kelembaban berada pada kisaran 50–58%, sehingga derajat keanggotaan bergeser dari kategori kering ($\mu = 0,60\text{--}1,00$) ke normal ($\mu = 0,40\text{--}1,00$).

C. Inferensi Fuzzy dan Defuzzifikasi

TABEL VI
REKAP HASIL INFERENSI FUZZY

Kategori Output	Persentase	Jumlah Data
Buruk	29,9%	302
Baik	50,2%	506
Sangat Baik	14,9%	150
Perlu Pendinginan	5%	50
Total Data		1008

TABEL VII
INTERPRETASI KATEGORI FUZZY DAN IMPLIKASI PRAKTIS

Kategori Fuzzy	Kondisi Fermentasi	Implikasi/Tindakan
Buruk	Suhu atau kelembaban tidak stabil	Pengadukan, penyesuaian kadar air
Baik	Kondisi stabil	Proses dilanjutkan
Sangat Baik	Mendekati optimal	Pertahankan kondisi
Perlu Pendinginan	Suhu tinggi dan lembab	Aerasi atau pembalikan

Untuk memperjelas makna operasional dari setiap kategori fuzzy yang dihasilkan, Tabel VII menyajikan interpretasi kondisi fermentasi beserta implikasi praktis yang

dapat digunakan sebagai panduan pengelolaan kompos. Kategori hasil inferensi fuzzy tidak hanya merepresentasikan kondisi fermentasi secara kualitatif, tetapi juga memiliki makna operasional yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan kompos. Kategori *buruk (poor)* merefleksikan kondisi lingkungan kompos yang belum mendukung aktivitas mikroorganisme secara optimal, yang umumnya ditandai oleh suhu rendah atau kelembaban yang tidak stabil. Pada kondisi ini, proses dekomposisi berlangsung lambat sehingga diperlukan intervensi berupa pengadukan kompos, penambahan bahan kaya nitrogen, atau penyesuaian kadar air. Kategori *baik (good)* menunjukkan kondisi fermentasi yang berada dalam rentang aman dan stabil sesuai dengan standar umum pengomposan, dimana aktivitas mikroorganisme berlangsung secara konsisten. Kondisi ini menandakan bahwa proses dapat dilanjutkan tanpa tindakan korektif yang signifikan. Kategori *sangat baik (very good)* mengindikasikan kondisi lingkungan yang mendekati optimal, dengan keseimbangan suhu dan kelembaban yang mendukung aktivitas maksimum mikroorganisme. Kondisi ini berpotensi mempercepat proses dekomposisi dan memperpendek waktu fermentasi. Sementara itu, kategori *perlu pendinginan (cooling needed)* berfungsi sebagai indikator peringatan dini, yang menandakan risiko peningkatan suhu berlebih. Pada kondisi ini, tindakan seperti aerasi atau pembalikan kompos diperlukan untuk menjaga kestabilan suhu dan mencegah penurunan kualitas kompos. Dengan demikian, hasil fuzzy logic dalam penelitian ini dapat diposisikan sebagai sistem pendukung keputusan (*decision support system*) yang menjembatani data sensor dengan tindakan pengelolaan kompos secara praktis.

TABEL VIII
DEFUZZIFIKASI SAMPEL DATA UNTUK PERHITUNGAN R²

Suhu (°C)	Kelembaban (%)	Tavg (≈ Suhu)	Rata-rata Tavg
31	50	31	0,2304
31,2	52	31,2	0,0784
31,8	52	31,8	0,1024
31,8	55	31,8	0,1024
31,6	58	31,6	0,0144
SS_{tot}			0,5280

Hasil defuzzifikasi dan inferensi fuzzy juga mendukung pemahaman bahwa sistem dapat memberikan rekomendasi kondisi kompos secara dinamis. Sebanyak 150 data (14,9%) yang termasuk kategori sangat baik menunjukkan bahwa meskipun suhu belum memasuki fase yang optimal, kelembaban yang stabil pada kondisi lembab tetap memberikan nilai output yang dianggap mendukung proses dekomposisi. Sementara itu, kategori perlu pendinginan sebanyak 50 data (5%) muncul ketika suhu mulai meningkat tetapi kelembaban tetap tinggi, sehingga sistem mendeteksi adanya potensi peningkatan suhu berlebih. Temuan ini

menjadi penting karena menunjukkan kemampuan *fuzzy logic* sebagai sistem pengambilan keputusan yang tidak hanya bergantung pada satu nilai, tetapi juga pada hubungan antar variabel yang saling berkaitan, sehingga jauh lebih fleksibel dibandingkan standar konvensional.

D. Pengujian R-Square (R²)

SS_{tot} (Total Sum of Squares) :

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (1)$$

SS_{res} (Residual Sum of Squares) :

$$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

Pengujian R² dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel suhu dan kelembaban terhadap variabel target yaitu suhu rata-rata. Pengujian dilakukan dengan membandingkan output defuzzifikasi fuzzy dan nilai suhu rata-rata sebagai data aktual. Tujuan pengujian adalah melihat kesesuaian model fuzzy dalam menggambarkan kondisi kompos. Perhitungan R² dilakukan dengan menggunakan rumus regresi linear berganda antara suhu (Temp) dan kelembaban (Hum) terhadap suhu rata-rata (Tavg).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3)$$

SS_{res} = Jumlah kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi

SS_{tot} = Jumlah kuadrat selisih antara nilai aktual dan rata-rata

Berdasarkan hasil perhitungan regresi linear berganda, diperoleh nilai R² sebesar 0,87. Nilai ini menunjukkan bahwa sebesar 87% variasi pada Tavg dapat dijelaskan oleh kombinasi perubahan suhu dan kelembaban yang direkam oleh sistem IoT. Hasil menunjukkan bahwa selisih prediksi terhadap nilai aktual sangat kecil, sehingga SS_{res} bernilai rendah dan menghasilkan nilai R² yang tinggi.

Pengujian akurasi dari beberapa sampel data menggunakan R² menunjukkan bahwa variasi pada suhu rata-rata (Tavg) dapat dijelaskan oleh variasi suhu dan kelembaban yang direkam oleh sistem IoT. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel input dan target bersifat linear serta konsisten selama pengamatan. Hal ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kombinasi sensor suhu dan kelembaban memiliki korelasi kuat dalam menentukan kualitas proses pengomposan. Dengan nilai R² yang tinggi, model *fuzzy logic* yang digunakan dalam penelitian ini terbukti mampu memetakan alur kompos secara efektif dan memberikan estimasi prediksi terhadap kondisi suhu rata-rata kompos.

Meskipun koefisien determinasi (R²) memberikan gambaran kuat mengenai hubungan antara nilai prediksi dan data aktual, metrik ini belum sepenuhnya menggambarkan besarnya kesalahan prediksi secara absolut. Nilai R² yang tinggi tidak selalu menjamin bahwa prediksi model memiliki

tingkat kesalahan yang kecil pada setiap observasi. Oleh karena itu, penelitian ini mengakui bahwa evaluasi kinerja model masih bersifat terbatas. Pengembangan penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan metrik evaluasi lain seperti *Root Mean Square Error (RMSE)* dan *Mean Absolute Error (MAE)* untuk mengukur deviasi prediksi secara kuantitatif dan memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kinerja model fuzzy.

Dari perspektif pengguna akhir, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu monitoring dan pengambilan keputusan dalam pengelolaan kompos. Bagi petani atau pengelola TPS, sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi fermentasi secara real-time tanpa perlu melakukan pengukuran manual yang berulang. Informasi kategori fuzzy yang ditampilkan dapat digunakan sebagai panduan sederhana untuk menentukan tindakan operasional, seperti melakukan pembalikan kompos ketika sistem mendeteksi kondisi *perlu pendinginan* atau mempertahankan kondisi ketika kategori *baik* dan *sangat baik* tercapai. Dengan demikian, sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi waktu, mengurangi kesalahan pengelolaan, serta mendukung praktik pengomposan yang lebih konsisten dan terkontrol.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini memiliki beberapa kebaruan. Penelitian sebelumnya lebih menekankan pada sistem kendali kualitas kompos, namun belum melakukan penggabungan dengan platform *IoT* untuk monitoring jarak jauh dan tidak dilakukan perhitungan tingkat akurasi. Sementara penelitian lain hanya berfokus pada pengujian R^2 untuk mengevaluasi tingkat kekeringan kompos, namun tidak menggabungkan analisis dengan metode *fuzzy logic*. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menggabungkan monitoring *IoT*, *fuzzy logic* untuk klasifikasi kualitas kompos, serta validasi model melalui pengujian R^2 secara bersamaan. Kombinasi ketiga pendekatan ini belum banyak diterapkan pada penelitian sebelumnya, sehingga memperkuat nilai kebaruan penelitian.

Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal parameter, perangkat sensor, dan kondisi eksperimen. Sistem hanya mengandalkan sensor DHT11 yang memiliki akurasi terbatas, serta hanya memanfaatkan suhu dan kelembaban sebagai parameter utama. Selain itu, eksperimen dilakukan pada satu skala komposter dan satu kondisi lingkungan, sehingga generalisasi hasil masih terbatas. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan menambahkan sensor pH, oksigen, dan rasio C/N, menggunakan sensor dengan presisi lebih tinggi, serta mengintegrasikan metode analitik lanjutan seperti machine learning untuk prediksi kematangan kompos. Pengujian pada berbagai skala dan kondisi lingkungan juga diperlukan untuk meningkatkan robustness sistem.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang dilakukan, sistem monitoring suhu dan kelembaban berbasis *IoT* dengan sensor DHT11 berhasil memberikan pemantauan kondisi kompos secara *real-time* dan menunjukkan bahwa proses pengomposan selama periode pengamatan berada pada rentang suhu 28-32°C dan kelembaban 50-87%. Penerapan metode *fuzzy logic* mampu mengklasifikasikan kondisi kualitas kompos secara adaptif berdasarkan kombinasi suhu dan kelembaban, menghasilkan total 1008 data yang dilakukan selama 20 hari. Dari data tersebut terbagi menjadi kategori buruk, baik, sangat baik, dan perlu pendinginan dengan mayoritas kondisi berada pada kategori baik yaitu sebanyak 506 data (50,2%). Validasi menggunakan pengujian R^2 menunjukkan nilai 0,87 yang menandakan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang sangat baik terhadap variasi suhu rata-rata kompos. Penggabungan *IoT*, *fuzzy logic*, dan analisis statistik ini membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan efektif dalam memantau, menilai, dan merepresentasikan kondisi pengomposan secara akurat, sehingga dapat menjadi solusi teknologi yang mendukung proses pembuatan pupuk organik secara lebih modern dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Julia Lingga, M. Yuana, N. Aulia Sari, H. Nur Syahida, and C. Sitorus, "Sampah di Indonesia: Tantangan dan Solusi Menuju Perubahan Positif," *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, vol. 4, pp. 12235–12247, 2024.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah," SIPSN. Accessed: May 07, 2025. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- [3] H. D. Atmanti, "Kajian Pengelolaan Sampah Di Indonesia," 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/383621724>
- [4] M. Sutalhis and E. Novaria, "Analisis Manajemen Sampah Rumah Tangga Di Indonesia: Literatur Review," *CENDEKIA : Jurnal Ilmu Pengetahuan*, vol. 4, no. 2, pp. 97–106, 2024, doi: <https://doi.org/10.51878/cendekia.v4i2.2800>.
- [5] I. U. Rahman, H. J. Mohammed, and A. Bamasag, "An exploration of recent waste-to-energy advancements for optimal solid waste management," *Discover Chemical Engineering*, vol. 5, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43938-025-00079-8.
- [6] V. A. Simbolon and M. Diansafitri, "Pemanfaatan Sampah Organik Rumah Tangga Menjadi Pupuk Organik Cair Sebagai Salah Satu Upaya Mengurangi Volume Sampah Di Rt 005 Kelurahan Kampung Baru Tahun 2021," *Jurnal Salam Sehat Masyarakat*, vol. 2, no. 2, pp. 57–65, 2021.
- [7] A. I. Ashraf, E. Mohareb, and M. Vahdati, "Evaluation of life cycle cost for the comparison of decentralized waste to composting and landfilling of municipal solid waste," *Discover Sustainability*, vol. 5, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1007/s43621-024-00409-w.
- [8] S. Alfari, "Pengaruh Pemberian Pupuk Organik Terhadap Sifat Kimia Tanah dan Pertumbuhan Tanaman Terong Ungu (*Solanum melongena* L.) Effect of application of organic fertilizer on Soil Physical Properties and Growth of Purple Eggplant Plant (*Solanum melongena* L.)," *BIOFARM*, vol. 20, no. 1, pp. 56–64, 2024.
- [9] N. Fikria Sagitarini and N. Made Amelia Ratnata Dewi, "Pemanfaatan Sampah Sebagai Bahan Pembuatan Pupuk Kompos Organik untuk Menjaga Kelestarian Tumbuh-Tumbuhan di Desa Nyiur Tebel," *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, vol. 6, pp. 225–230, 2023, doi: 10.29303/jpmp.v6i2.4184.

- [10] A. Gunawan *et al.*, “Pemanfaatan Limbah Ternak Sebagai Pupuk Organik untuk Mendukung Pengembangan Sektor Pertanian dan Perkebunan Desa Segoroyoso,” *Jurnal Atma Inovasia (JAI)*, vol. 2, no. 4, pp. 382–386, 2022, doi: <https://doi.org/10.24002/jai.v2i4.5216>.
- [11] T. Abedin *et al.*, “From waste to worth: advances in energy recovery technologies for solid waste management,” *Clean Technol Environ Policy*, vol. 27, pp. 5963–5989, Nov. 2025, doi: 10.1007/s10098-025-03204-x.
- [12] N. Rachman, S. Muda, B. Farandila, D. Safanabila, and M. Faisal Fadilah D, “Desain dan Implementasi Robot Pengolah Sampah Organik Berbasis Autonomous Menjadi Pupuk dengan Produktivitas 1 Ton Per Hari,” *CENDEKIA : Jurnal Penelitian dan Pengkajian Ilmiah*, vol. 2, no. 1, pp. 18–28, 2025, doi: 10.62335.
- [13] A. A. Alzubi and K. Galyna, “Artificial Intelligence and Internet of Things for Sustainable Farming and Smart Agriculture,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 78686–78692, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3298215.
- [14] S. A. Rahayu, “Inovasi dalam Sektor Pertanian dan Dampaknya terhadap PDB,” 2024. Accessed: May 07, 2025. [Online]. Available: <http://circle-archive.com/index.php/carc/article/view/182>
- [15] Putri Maulida, Muryani Muryani, and Andhita Risiko Faristiana, “Dampak Perkembangan Teknologi Pertanian Terhadap Perubahan Sosial Masyarakat di Kabupaten Madiun,” *Student Scientific Creativity Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 349–365, Jun. 2023, doi: 10.55606/sscj-amik.v1i4.1650.
- [16] B. Ahmed, H. Shabbir, S. R. Naqvi, and L. Peng, “Smart Agriculture: Current State, Opportunities, and Challenges,” 2024, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2024.3471647.
- [17] M. Louta, K. Banti, and I. Karampelis, “Emerging Technologies for Sustainable Agriculture: The Power of Humans and the Way Ahead,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 98492–98529, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3428401.
- [18] I. Syukhron, R. Rahmadewi, J. Teknik Elektro, F. Teknik, U. Singaperbangsa Karawang, and K. H. Jl Ronggowaluyo Telukjambe Timur -Karawang, “Penggunaan Aplikasi Blynk Untuk Monitoring dan Kontrol Jarak Jauh pada Sistem Kompos Pintar Berbasis IoT,” *ELECTRICIAN –Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 15, no. 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.23960/elc.v15n1.2158>.
- [19] Sandi, “Perancangan Dan Implementasi Sistem Kendali Dan Monitoring Kelembapan, Suhu Dan pH Pada Proses Dekomposisi Pupuk Kompos Dengan Kendali Logika Fuzzy,” Thesis, Universitas Komputer Indonesia, 2021.
- [20] M. H. Prasajo, R. Purnamasari, and Y. Eliskar, “Perancangan Alat Pemrosesan Sampah Organik Berbasis Internet Of Things (IoT) Untuk,” *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 6080–6085, Dec. 2024.