

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Perkembangan teknologi dalam pengolahan sampah organik terus mengalami kemajuan, terutama dengan penerapan sistem monitoring dan kontrol otomatis untuk mencapai efisiensi maksimal. Sebagai dasar, penelitian oleh Nadia et al. (2023) mengkaji metode Takakura manual yang menunjukkan bahwa sirkulasi oksigen dan penambahan bioaktivator sangat penting untuk mempercepat dekomposisi. Namun, metode ini masih memiliki kelemahan karena memerlukan pengadukan manual dan pengawasan berkala. Untuk mengatasi hal tersebut, Salih et al. (2026) menjelaskan bahwa penggunaan inokulan mikroba yang dikombinasikan dengan pengendalian parameter lingkungan yang tepat dapat meningkatkan populasi mikroba pengurai hingga 300% dan mempersingkat periode pengomposan sebesar 20–50%. Hal ini membuktikan bahwa pengendalian suhu dan kelembapan bukan sekadar pendukung, melainkan faktor utama dalam akselerasi kematangan kompos.

Seiring dengan kebutuhan sistem yang lebih praktis, penelitian mulai mengarah pada komposter tipe in-vessel atau wadah tertutup. Malakahmad et al. (2017) membuktikan bahwa komposter in-vessel dengan sistem agitasi mekanik (pengaduk) mampu menghasilkan kualitas kompos yang lebih baik dan seragam dibandingkan metode windrow atau tumpukan terbuka. Penggunaan agitator membantu distribusi panas dan oksigen secara merata, yang sangat relevan dengan rancang bangun komposter silinder pada penelitian ini. Selain itu, tantangan operasional pada komposter rumah tangga sering kali melibatkan penambahan sampah secara bertahap. Mengenai hal ini, Narihiro dan Hiraishi (2005) menjelaskan bahwa sistem fed-batch atau semi-kontinu memerlukan kestabilan kondisi lingkungan agar mikroba tetap berada pada fase aktif meskipun terjadi fluktuasi akibat asupan material baru.

Untuk menjaga kestabilan parameter tersebut tanpa ketergantungan pada monitoring jarak jauh (IoT), diperlukan sistem kendali cerdas secara lokal. Akbari dan Khadijah (2024) menegaskan bahwa desain komposter tertutup memungkinkan

proses berlangsung dalam kondisi yang lebih terkontrol, sementara Juliansyah dan Haryanti (2025) menetapkan bahwa kontrol suhu pada rentang 30–40°C dan kelembapan 50–60% merupakan kondisi optimal yang harus dipertahankan untuk mendukung aktivitas mikroorganisme aerob. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan metode *Fuzzy Logic* sebagai otak dari sistem kendali. Sebagaimana dikembangkan oleh Saputra et al. (2022) dan Iksan et al. (2022), logika *fuzzy* memiliki keunggulan dalam merespons perubahan kondisi lingkungan secara adaptif dan fleksibel. Perbandingan variabel penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan variabel penelitian

Penelitian	Tujuan & Objek	Metode/ Teknologi	Hasil
Nadia et al. (2023)	Pengomposan rumah tangga dengan metode Takakura dan bioaktivator MOL.	Takakura (Konvensional)	Mempercepat dekomposisi menjadi 14 hari melalui sistem aerasi alami.
Salih et al. (2026)	Akselerasi kematangan kompos via inokulan.	Strategi Inokulasi Mikroba.	Kematangan lebih cepat 20–50% dan populasi mikroba naik 50–300%.
Malakahmad et al. (2017)	Pengomposan <i>yard waste</i> dan <i>food waste</i> menggunakan komposter <i>in-vessel</i> .	<i>In-Vessel Rotary Drum Composter</i>	<i>Composter</i> Agitasi mekanik dan kontrol suhu otomatis menghasilkan kematangan kompos yang lebih cepat dan seragam.
Narihiro dan Hiraishi (2005)	Mikrobiologi pada proses pengomposan <i>fed-batch</i> (semi-kontinu).	<i>Fed-batch Composting (FBC)</i>	Menjelaskan dinamika populasi mikroba pada sistem pengisian sampah berulang untuk menjaga kondisi <i>steady-state</i> .
Akbari dan Khadijah (2024)	Perancangan komposter aerobik terintegrasi dengan pencacah dan penampung lindi.	Aerasi (Konvensional)	Desain tertutup lebih praktis dan mampu menghasilkan kompos sesuai standar nasional.
Juliansyah dan Haryanti (2025)	Pengendalian parameter lingkungan optimal selama proses pengomposan.	<i>In-Vessel Composter</i>	Menentukan kondisi optimal: rasio C/N 25–30:1, kelembapan 50–60%, dan suhu 30–40°C.
Saputra et al. (2022)	Otomasi sistem kontrol suhu dan kelembapan.	<i>Fuzzy Logic Controller</i>	Metode <i>fuzzy</i> mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara adaptif dan menjaga kestabilan aktuator.

Berdasarkan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu pada Tabel 2.1 , diketahui bahwa penelitian-penelitian tersebut telah membahas topik yang sangat relevan dengan penelitian ini, namun masih memiliki keterbatasan dari sisi otomatisasi kendali lokal yang adaptif, integrasi mekanik agitator untuk aerasi, serta durasi pengolahan yang belum optimal untuk sistem semi-kontinu.

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya karena mengkaji permasalahan optimasi bioproses pengomposan aerobik melalui desain wadah tertutup cylindrical, serta menerapkan metode *Fuzzy Logic* untuk mengendalikan suhu dan kelembapan secara presisi tanpa ketergantungan pada pemantauan jarak jauh (IoT). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi pengolahan limbah organik rumah tangga dalam menjawab perumusan masalah, serta melengkapi hasil-hasil penelitian sebelumnya melalui pencapaian target kematangan kompos yang lebih cepat dan stabil secara otomatis.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sampah Organik

Sampah organik merupakan jenis sampah yang berasal dari sisa makhluk hidup, baik yang bersumber dari tumbuhan maupun hewan, dan memiliki sifat mudah terurai secara biologis melalui aktivitas mikroorganisme (Nur et al., 2018). Dalam skala rumah tangga, sampah organik umumnya terdiri atas sisa makanan, sayuran, buah-buahan, serta limbah dapur lainnya. Berdasarkan karakteristiknya, sampah organik memiliki kandungan air yang relatif tinggi dan mudah mengalami proses pembusukan apabila tidak dikelola dengan baik .

Permasalahan utama dalam pengelolaan sampah organik rumah tangga tidak hanya berkaitan dengan volume, tetapi juga dampak lingkungan yang ditimbulkannya. Sampah organik yang dibiarkan menumpuk akan mengalami dekomposisi secara tidak terkontrol, menghasilkan bau tidak sedap, air lindi, serta gas rumah kaca seperti metana (Breva et al., 2026). Selain menurunkan kualitas lingkungan, kondisi ini juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan akibat berkembangnya mikroorganisme patogen dan hama.

Di sisi lain, sampah organik sebenarnya memiliki potensi besar untuk diolah menjadi kompos yang bermanfaat bagi tanah dan tanaman. Namun, praktik pengomposan rumah tangga masih menghadapi berbagai kendala, seperti proses yang memerlukan waktu lama, kebutuhan pemantauan manual yang intensif, serta munculnya bau tak sedap selama proses berlangsung (Ayilara et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengomposan yang mampu mengelola sampah organik secara lebih terkontrol, efisien, dan praktis berbasis teknologi agar dapat diterapkan secara luas di lingkungan rumah tangga.

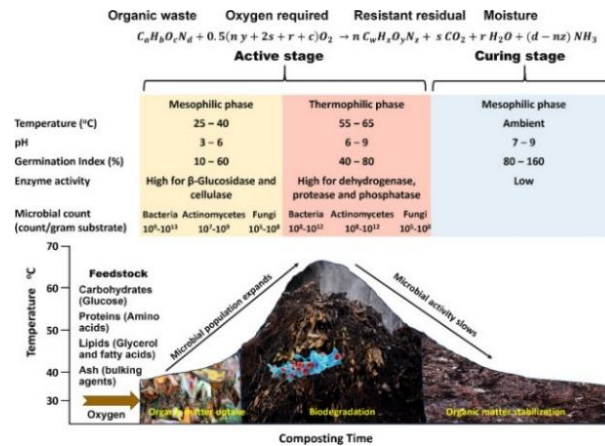
2.2.2 Pengomposan Aerobik

Pengomposan aerobik merupakan proses penguraian material organik yang berlangsung dengan adanya suplai oksigen. Dalam proses metabolisme biologis secara aerobik, mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih stabil dengan menghasilkan karbon dioksida (CO_2), air, dan energi dalam bentuk panas (Nur et al., 2018). Panas yang muncul selama proses ini merupakan indikator bahwa aktivitas mikroba berlangsung secara aktif. Dibandingkan metode anaerob, pengomposan aerobik lebih cepat, lebih efisien, serta tidak menimbulkan bau menyengat karena tidak menghasilkan gas seperti metana dan hidrogen sulfida dalam jumlah signifikan.

Berdasarkan cara pemberian bahan organik, proses pengomposan secara umum dapat dilakukan menggunakan sistem batch maupun semi-continuous (fed-batch). Pada sistem batch, seluruh bahan organik dimasukkan ke dalam reaktor pada awal proses dan dibiarkan terdekomposisi hingga mencapai kondisi matang tanpa penambahan bahan baru selama proses berlangsung. Sistem ini biasanya menunjukkan tahapan pengomposan yang lebih jelas, seperti fase mesofilik, termofilik, pendinginan, dan pematangan.

Proses pengomposan aerobik berlangsung melalui beberapa fase yang ditandai oleh perubahan suhu dan aktivitas mikroorganisme. Pertama, fase mesofilik $25\text{--}40^\circ\text{C}$, di mana mikroba mulai menguraikan bahan organik sederhana sehingga suhu meningkat. Kedua, fase termofilik $55\text{--}65^\circ\text{C}$, yang merupakan tahap dekomposisi paling aktif untuk mengurai senyawa kompleks sekaligus mengeliminasi patogen. Terakhir, tahap pematangan (curing stage) di mana suhu menurun kembali ke level ambien seiring berkurangnya aktivitas mikroba dan

bahan organik menjadi lebih stabil.



Gambar 2. 1 Tahapan proses pengomposan aerobik (Salih et al., 2026)¹

Berdasarkan tahapan pengomposan yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, setiap fase memiliki karakteristik suhu serta mikroorganisme dominan yang berbeda. Ringkasan mikroorganisme dominan pada tahapan pengomposan aerobik tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 2 Mikroorganisme dominan pada berbagai tahapan proses pengomposan (Ho et al.,2022)

Tahapan Pengomposan	Mikroba Dominan	Suhu Maksimum (°C)
Mesofilik	Pseudomonas, Bacillus, Flavobacterium, Alternaria, Cladosporium,	20-40 °C
Termofilik	Bacillus, Thermus, Aspergillus, Chaetomium	40-65 °C
Pendinginan	Pseudomonas, Bacillus,	40-45 °C
Pematangan	Alternaria, Aspergillus	Suhu Lingkungan

Berbeda dengan sistem batch, pada sistem semi-continuous bahan organik dapat ditambahkan secara berkala selama proses pengomposan berlangsung. Penambahan bahan secara berulang menyebabkan material di dalam reaktor memiliki tingkat dekomposisi yang berbeda, sehingga beberapa fase pengomposan

¹ Agarwal, S., Kaushik, S., Saha, H., Paramanick, D., Mazhar, M., Basist, P., Khan, R., & Alhalmi, A. (2025). Stages of the aerobic composting process. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 398(7), 7737–7763. <https://doi.org/10.1007/S00210-025-03807-7>

dapat terjadi secara bersamaan dalam satu reaktor. Sistem ini umum digunakan pada komposter skala rumah tangga karena limbah organik biasanya dihasilkan setiap hari. Selain itu, proses pengomposan pada sistem fed-batch umumnya berlangsung pada suhu yang lebih rendah dibandingkan sistem batch, biasanya berada di bawah 50°C, karena bahan organik baru terus ditambahkan sehingga kondisi reaktor cenderung stabil pada fase mesofilik. Namun demikian, penelitian menunjukkan bahwa evolusi CO₂ yang lebih tinggi diamati pada suhu sekitar 40°C dengan kadar air 30–60%, yang menunjukkan peningkatan aktivitas biodegradasi pada kondisi tersebut (Narihiro dan Hiraishi 2005).

Kadar air yang dimaksud dalam penelitian tersebut merupakan kandungan air pada material pengomposan dan berbeda dengan kelembapan relatif (Relative Humidity/RH) udara yang diukur oleh sensor DHT22 pada penelitian ini. Oleh karena itu, nilai kadar air 30–60% tersebut tidak digunakan secara langsung sebagai setpoint kelembapan sistem. Dalam penelitian ini, parameter kelembapan yang dikendalikan adalah RH udara dengan setpoint 60% RH. Dalam penelitian ini, perubahan setpoint suhu berdasarkan fase pengomposan tidak diterapkan. Nilai 40°C digunakan sebagai setpoint operasional tetap untuk mengevaluasi kemampuan sistem kendali dalam mempertahankan kondisi termal komposter. Pemilihan setpoint tersebut disesuaikan dengan karakteristik sistem semi-continuous, di mana beberapa fase pengomposan dapat berlangsung secara bersamaan akibat penambahan bahan organik secara berkala. Dengan demikian, fase pengomposan digunakan sebagai konteks biologis proses, sedangkan pengendalian suhu difokuskan pada kemampuan sistem mempertahankan suhu pada setpoint 40°C.

Keberhasilan proses ini sangat ditentukan oleh keseimbangan tiga faktor utama, yaitu suhu, kelembapan, dan pH (Kurnia et al., 2017). Suhu berfungsi sebagai penanda aktivitas mikroorganisme, kondisi hangat sangat dibutuhkan untuk mempercepat penguraian, namun suhu yang terlalu ekstrem (terlalu panas atau dingin) justru dapat menghentikan aktivitas mikroba. Selain suhu, kelembapan juga mutlak diperlukan untuk mendukung metabolisme mikroba, tetapi kadar air harus dijaga agar tidak berlebihan. Jika tumpukan terlalu basah, air akan menutup pori-pori material dan menghalangi masuknya oksigen. Padahal, oksigen adalah elemen

paling krusial apabila suplainya kurang, proses akan berubah menjadi anaerob yang memicu bau busuk dan memperlambat pembentukan kompos. Oleh karena itu, proses pengomposan perlu dilakukan dengan menjaga tingkat kelembapan relatif udara antara 50–60%, serta mempertahankan suhu optimal pada rentang 30–40°C agar aktivitas mikroorganisme aerob dapat berlangsung secara maksimal (Juliansyah dan Haryanti 2025).

2.2.3 *Komposter Tertutup*

Komposter tertutup (in-vessel composter) merupakan sistem pengomposan aerobik yang dilakukan di dalam reaktor atau wadah tertutup sehingga kondisi proses dapat dikendalikan lebih baik dibanding metode terbuka. Dalam sistem ini, pengaturan aerasi (oksigen), suhu, dan kelembapan menjadi kunci untuk menjaga aktivitas mikroorganisme pengurai tetap optimal, mempercepat dekomposisi, serta menekan bau dan potensi patogen. Perancangan komposter tertutup berbentuk silinder dengan ruang reaksi tertutup memungkinkan proses berlangsung lebih higienis dan stabil karena lingkungan reaktor relatif terisolasi dari pengaruh cuaca luar. Sistem tertutup juga membantu mempertahankan fase termofilik sehingga proses pengomposan berlangsung lebih efisien dalam waktu yang lebih singkat (Malakahmad et al., 2017).

Dari sisi teknis, komposter tertutup umumnya dilengkapi mekanisme pengaduk (agitator) untuk meratakan distribusi oksigen dan mencegah terbentuknya zona anaerob di dalam massa bahan. Pengadukan berkala terbukti meningkatkan homogenitas campuran dan laju dekomposisi. Selain itu, pengaturan komposisi bahan (rasio C/N) dan kadar air berpengaruh langsung terhadap kualitas kompos yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengendalian parameter proses di dalam reaktor tertutup mampu mempercepat stabilisasi bahan organik dan menghasilkan kompos dengan karakteristik yang lebih konsisten dibandingkan sistem terbuka, sekaligus menurunkan gangguan bau selama operasi (Divyabharathi et al., 2020).

2.2.4 *Fuzzy Logic*

Logika *fuzzy* merupakan salah satu metode sistem kendali cerdas yang digunakan untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas dalam suatu sistem

(Saelan, 2009). Pada logika konvensional, suatu nilai hanya memiliki dua kondisi, yaitu benar (1) atau salah (0). Sedangkan pada logika *fuzzy*, suatu nilai dapat memiliki derajat keanggotaan antara 0 hingga 1, sehingga mampu merepresentasikan kondisi yang lebih fleksibel dan mendekati cara berpikir manusia (Pramudito, 2025). Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi nyata yang sering kali tidak dapat didefinisikan secara pasti, seperti kondisi suhu yang dinyatakan dalam kategori dingin, sedang, atau panas.

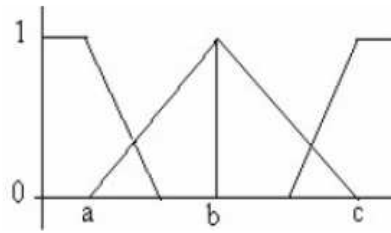
Konsep utama dalam logika *fuzzy* adalah penggunaan himpunan *fuzzy* yang memiliki derajat keanggotaan tertentu. Derajat keanggotaan menunjukkan tingkat keterlibatan suatu nilai terhadap suatu kategori. Nilai derajat keanggotaan dinyatakan dalam rentang 0 hingga 1, di mana nilai 0 menunjukkan bahwa suatu data tidak termasuk dalam himpunan *fuzzy*, sedangkan nilai 1 menunjukkan bahwa data sepenuhnya termasuk dalam himpunan tersebut (Maulana et al., 2024). Representasi himpunan *fuzzy* umumnya digambarkan menggunakan fungsi keanggotaan seperti fungsi segitiga, trapesium, maupun kurva Gaussian (Saelan, 2009).

1) Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga merupakan fungsi yang paling sederhana dan banyak digunakan dalam sistem *fuzzy* karena memiliki bentuk linear dan mudah diimplementasikan. Fungsi ini didefinisikan menggunakan tiga parameter yaitu a , b , dan c , dimana nilai keanggotaan maksimum terjadi pada titik b . Fungsi ini umumnya digunakan pada sistem kontrol yang membutuhkan perhitungan sederhana dan respon yang cepat. Persamaan fungsi keanggotaan segitiga adalah sebagai berikut:

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad 2-1$$

Representasi bentuk grafik:



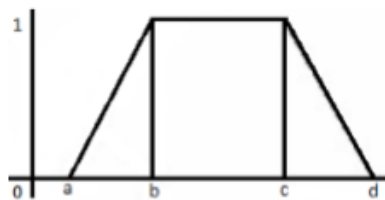
Gambar 2. 2 Grafik fungsi segitiga

2) Fungsi Keanggotaan Trapesium

Fungsi keanggotaan trapesium merupakan pengembangan dari fungsi segitiga yang memiliki daerah nilai keanggotaan maksimum dalam rentang tertentu. Fungsi ini menggunakan empat parameter yaitu a, b, c, dan d. Keunggulan fungsi trapesium adalah mampu merepresentasikan kondisi stabil karena memiliki area keanggotaan penuh yang lebih luas dibandingkan fungsi segitiga. Persamaan fungsi keanggotaan trapesium adalah sebagai berikut:

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad 2-2$$

Representasi bentuk grafik:



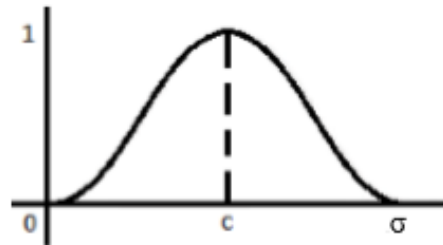
Gambar 2. 3 Grafik fungsi trapesium

3) Fungsi Keanggotaan Gaussian (gauss)

Fungsi keanggotaan gaussian memiliki bentuk kurva halus menyerupai distribusi normal. Fungsi ini sering digunakan pada sistem yang memerlukan transisi nilai yang lebih smooth. Namun, fungsi gaussian memiliki kompleksitas perhitungan yang lebih tinggi dibandingkan fungsi segitiga dan trapesium. Persamaan pada fungsi keanggotaan adalah sebagai berikut:

$$\mu(x; c, \sigma) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{\sigma}\right)^2} \quad 2-3$$

Representasi dalam grafik:



Gambar 2. 4 Grafik fungsi gaussian

Dalam penerapannya, sistem logika *fuzzy* terdiri dari tiga beberapa tahapan utama, yaitu:

1) Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam sistem logika *fuzzy* yang berfungsi untuk mengubah data input yang bersifat tegas (*crisp*) menjadi data dalam bentuk himpunan *fuzzy*. Fuzzifikasi adalah proses membuat bilangan *crisp* memiliki nilai *fuzzy*. Pada tahap pertama ini, nilai input yang berupa nilai *crisp* akan di konversikan menjadi nilai *fuzzy*, sehingga dapat dikelompokkan pada himpunan *fuzzy* tertentu (Budiharto dan Suhartono 2014)

2) Inferensi

Inferensi *fuzzy* merupakan tahap pengolahan data *fuzzy* berdasarkan aturan-aturan yang telah ditentukan. Tahap ini berfungsi untuk menentukan hubungan antara input dan output sistem (Al-Hadithi dan Gómez 2025). Inferensi *fuzzy* menggunakan aturan berbentuk IF-THEN yang menyerupai cara berpikir manusia. Aturan tersebut digunakan untuk menentukan keputusan berdasarkan kondisi tertentu. Dalam sistem inferensi *fuzzy*, terdapat beberapa metode yang umum digunakan, yaitu metode Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto.

a) Metode Mamdani

Metode Mamdani merupakan salah satu metode inferensi *fuzzy* yang paling banyak digunakan karena memiliki konsep yang sederhana dan mudah dipahami. Metode ini menggunakan aturan berbentuk IF-THEN dengan

output berupa himpunan *fuzzy*. Proses inferensi pada metode Mamdani dilakukan dengan menentukan nilai minimum (operator AND) atau maksimum (operator OR) pada setiap aturan. Hasil dari setiap aturan kemudian digabungkan menggunakan metode agregasi sebelum dilakukan proses defuzzifikasi untuk memperoleh nilai output tegas (Nasrul et al., 2024). Metode Mamdani sering digunakan pada sistem kontrol karena mampu merepresentasikan pengetahuan manusia dalam bentuk aturan linguistik.

b) Metode Sugeno

Metode Sugeno merupakan pengembangan dari metode Mamdani yang menggunakan output berupa persamaan matematis atau nilai konstanta. Pada metode ini, bagian THEN dinyatakan dalam fungsi linear atau nilai tetap, dan hasil inferensi diperoleh melalui perhitungan rata-rata berbobot dari aturan yang aktif (Pattiradjawane, 2024). Metode ini memiliki keunggulan pada proses komputasi yang lebih cepat serta mudah diintegrasikan dengan pemodelan matematis dan sistem kontrol yang membutuhkan respon cepat.

c) Metode Tsukamoto

Metode Tsukamoto menggunakan aturan IF–THEN dengan konsekuen berupa himpunan *fuzzy* yang memiliki fungsi keanggotaan monoton (Anjani dan Marpaung 2022). Setiap aturan pada metode ini menghasilkan nilai output tegas berdasarkan tingkat keanggotaan dari hasil inferensi. Nilai output akhir diperoleh melalui perhitungan rata-rata berbobot dari seluruh aturan yang aktif. Metode Tsukamoto memiliki karakteristik menghasilkan output yang lebih sistematis karena setiap aturan menghasilkan nilai tegas secara langsung.

3) Defuzzification

Defuzzifikasi merupakan tahap terakhir dalam sistem logika *fuzzy* yang bertujuan untuk mengubah hasil inferensi *fuzzy* menjadi nilai numerik yang dapat digunakan oleh sistem kontrol. Tahap ini kebalikan dari fuzzifikasi yaitu mengubah variable *fuzzy* menjadi crisp dan akan dikirimkan kesuatu perangkat (Maulana et al., 2024).

2.2.5 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang dirancang untuk aplikasi sistem kendali dan otomasi dengan kebutuhan I/O yang relatif banyak. Mikrokontroler ini bekerja pada tegangan operasi 5 V dengan frekuensi clock 16 MHz, sehingga mampu menjalankan proses pembacaan sensor, pengolahan data, dan pengendalian aktuator secara stabil. ATmega2560 memiliki kapasitas memori Flash sebesar 256 KB yang digunakan untuk menyimpan program, SRAM sebesar 8 KB untuk penyimpanan data sementara saat proses berjalan, serta EEPROM sebesar 4 KB untuk penyimpanan data permanen. Kapasitas memori yang cukup besar ini memungkinkan sistem menjalankan algoritma kendali seperti *Fuzzy Logic* tanpa kendala keterbatasan memori.

Dari sisi antarmuka, Arduino Mega 2560 menyediakan 54 pin digital input/output, di mana 15 di antaranya dapat digunakan sebagai pin PWM. Selain itu, tersedia 16 pin analog input dengan resolusi 10-bit yang memungkinkan pembacaan sinyal analog secara cukup presisi. Board ini juga dilengkapi dengan beberapa port komunikasi, yaitu UART (4 port serial), SPI, dan I2C, sehingga mendukung koneksi dengan berbagai modul eksternal. Jumlah pin yang banyak menjadi salah satu alasan pemilihan Arduino Mega 2560 pada sistem ini, karena memungkinkan integrasi beberapa perangkat sekaligus tanpa perlu ekspansi tambahan. Selain itu, kemudahan pemrograman melalui Arduino IDE serta ketersediaan dokumentasi yang luas menjadikan board ini cukup praktis digunakan dalam pengembangan sistem kendali berbasis mikrokontroler.



Gambar 2. 5 Arduino Mega 2560²

² *Arduino Mega 2560*. Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/KLaEwYLpdrG80DcBn>

2.2.6 DHT22

Sensor DHT22, atau dikenal juga sebagai AM2302, merupakan modul sensor digital yang berfungsi untuk mengukur suhu dan kelembapan relatif udara secara simultan. Dalam sistem komposter, pemilihan sensor ini didasarkan pada kemampuannya dalam memberikan pembacaan yang stabil dengan jangkauan pengukuran yang luas. Sensor DHT22 mampu mengukur suhu pada rentang $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan tingkat akurasi $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, serta kelembapan relatif pada rentang 0% hingga 100% dengan akurasi $\pm 2\%$ (Wurfel, 2018). Spesifikasi tersebut dinilai memadai untuk memantau proses pengomposan, mengingat suhu pada fase termofilik kompos umumnya berada pada kisaran $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Diharja et al., 2025).

Secara teknis, sensor ini menggunakan elemen kapasitif untuk mengukur kelembapan dan termistor (NTC) untuk mengukur suhu. Keunggulan utama DHT22 dibandingkan sensor sejenis (seperti DHT11) terletak pada presisi yang lebih tinggi dan penggunaan protokol komunikasi *single-bus* digital. Protokol ini memungkinkan transmisi data jarak jauh hingga 20 meter tanpa gangguan sinyal yang berarti, sehingga memudahkan integrasi antara sensor yang terletak di dalam wadah kompos dengan mikrokontroler di unit kontrol utama.



Gambar 2. 6 DHT22³

Pada proses pengukuran kelembapan, DHT22 menggunakan elemen sensor kapasitif yang memiliki lapisan polimer higroskopis. Lapisan ini mampu menyerap uap air dari udara sekitar. Perubahan jumlah uap air yang diserap menyebabkan perubahan konstanta dielektrik material sehingga mempengaruhi nilai kapasitansi

³ Sensor DHT22. Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/llyl5s8BMjlV0wsO>

sensor. Perubahan kapasitansi tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik analog oleh rangkaian internal sensor. Sinyal analog ini selanjutnya diolah oleh mikrokontroler internal untuk menghasilkan nilai kelembapan relatif dalam satuan persen (%RH).

Pengukuran suhu dilakukan menggunakan thermistor NTC yang memiliki karakteristik resistansi berubah terhadap temperatur. Ketika suhu lingkungan meningkat, nilai resistansi thermistor menurun. Perubahan resistansi tersebut diubah menjadi sinyal tegangan oleh rangkaian pengondisi sinyal. Tegangan yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi data suhu dalam satuan derajat Celcius oleh mikrokontroler internal sensor.

Setelah proses pengukuran selesai, DHT22 mengirimkan data hasil pembacaan dalam format sinyal digital melalui jalur komunikasi single-wire. Data dikirim dalam paket 40-bit yang terdiri dari 16-bit data kelembapan, 16-bit data suhu, dan 8-bit checksum sebagai verifikasi keakuratan data. Mikrokontroler eksternal akan membaca data tersebut berdasarkan pengaturan timing komunikasi tertentu. Jika nilai checksum sesuai, maka data dianggap valid dan dapat digunakan untuk proses monitoring maupun sistem pengendalian.

2.2.7 Blower

Blower merupakan perangkat elektromekanis yang berfungsi untuk menghasilkan aliran udara dengan tekanan tertentu guna mendukung sirkulasi oksigen di dalam reaktor pengomposan. Dalam rancang bangun komposter, *blower* diintegrasikan sebagai komponen utama sistem aerasi paksa (*forced aeration*) yang bertujuan untuk menjaga kondisi aerobik selama proses dekomposisi berlangsung. Pasokan oksigen yang konsisten sangat krusial untuk menunjang aktivitas mikroorganisme pengurai dan mencegah terjadinya proses anaerobik yang sering kali memicu timbulnya aroma tidak sedap (bau) serta menghambat laju pematangan kompos.

Secara fungsional, operasional *blower* dikendalikan oleh mikrokontroler melalui modul relay untuk memastikan sirkulasi udara terjadi secara periodik atau sesuai dengan kebutuhan lingkungan di dalam wadah. Udara yang dihirupkan oleh *blower* didistribusikan melalui jalur pipa aerasi sehingga dapat menjangkau seluruh lapisan material organik secara merata. Dengan diterapkannya sistem

blower ini, stabilitas suhu dan pasokan oksigen dalam reaktor dapat terjaga secara optimal, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil akhir pengomposan.



Gambar 2. 7 *Blower* ⁴

2.2.8 Mini Water Pump

Sistem aktuasi pada komposter memanfaatkan pompa air sebagai komponen mekanik utama untuk manajemen distribusi cairan di dalam reaktor. Perancangan sistem ini mengintegrasikan dua unit pompa dengan fungsi spesifik yang berbeda guna mendukung optimalisasi proses dekomposisi. Pompa pertama difungsikan sebagai unit penyiraman air yang bertugas menjaga parameter kelembapan material organik agar tetap berada pada kondisi ideal bagi aktivitas mikroorganisme. Sementara itu, pompa kedua berfungsi sebagai unit distribusi aktivator, yang berperan dalam menyalurkan larutan bio-aktivator secara merata ke seluruh massa sampah untuk mempercepat laju pengomposan.

Kedua pompa tersebut bekerja berdasarkan instruksi dari unit kendali pusat melalui mekanisme sakelar elektronik. Penggunaan sistem pompa ini bertujuan untuk menggantikan proses penyiraman manual, sehingga volume air dan aktivator yang diberikan dapat terukur secara presisi sesuai kebutuhan sistem. Dengan adanya integrasi sistem aktuasi ini, distribusi cairan tidak hanya menjadi lebih praktis, tetapi juga lebih efektif dalam memastikan seluruh bagian material organik terpapar kelembapan dan agen pengurai secara konsisten.

⁴ DC Brushless Cooling Blower Fan. Retrieved August 21, 2026, from <https://www.amazon.com/Wathai-Small-Brushless-Cooling-Blower/dp/B07RMGVBKL?th=1>



Gambar 2. 8 Water Pump⁵

2.2.9 Elemen Pemanas (Heater)

Heater merupakan komponen yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui prinsip pemanasan resistif (Joule Heating). Ketika arus listrik mengalir melalui elemen yang memiliki hambatan listrik, sebagian energi listrik akan dikonversi menjadi energi panas. Besarnya panas yang dihasilkan dipengaruhi oleh nilai hambatan elemen pemanas, arus listrik, dan waktu pemanasan.

Pada penelitian ini digunakan *Heater* keramik PTC (Positive Temperature Coefficient) bertegangan kerja 220 VAC dengan daya 40 Watt sebagai sumber panas pada komposter aerobik tertutup. *Heater* PTC menggunakan material keramik semikonduktor yang memiliki karakteristik resistansi meningkat seiring kenaikan suhu. Karakteristik tersebut menyebabkan arus listrik yang mengalir akan menurun ketika suhu *Heater* meningkat sehingga daya pemanasan secara otomatis berkurang. Dengan demikian, *Heater* PTC memiliki kemampuan membatasi suhu kerjanya sendiri (*self-regulating*) sehingga lebih aman dibandingkan *Heater* berbasis kawat resistif konvensional.

Fan-heater merupakan aktuator pendukung yang digunakan untuk membantu mendistribusikan panas yang dihasilkan oleh heater ke seluruh ruang komposter. Fan-heater tidak berfungsi sebagai sumber panas, melainkan meningkatkan pemerataan distribusi panas melalui aliran udara. Kecepatan putaran fan-heater diatur menggunakan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) sehingga tingkat distribusi panas dapat disesuaikan dengan kebutuhan pemanasan. Dalam penelitian

⁵ *Mini DC Water Pump*. . Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/CKB043T66pgj4WoO7>

ini, fan-heater tidak digunakan sebagai variabel keluaran fuzzy yang berdiri sendiri, tetapi dikendalikan berdasarkan kebutuhan kerja heater sehingga berfungsi sebagai aktuator pendukung proses pemanasan.

Prinsip kerja *Heater* PTC dimulai ketika tegangan AC diberikan pada elemen pemanas. Pada kondisi awal, resistansi *Heater* relatif rendah sehingga arus yang mengalir cukup besar dan menghasilkan panas dengan cepat. Seiring meningkatnya temperatur elemen, resistansi material PTC meningkat secara signifikan sehingga arus listrik berkurang. Kondisi ini menyebabkan daya pemanasan menjadi lebih stabil dan mencegah terjadinya kenaikan suhu yang berlebihan (*overheating*).



Gambar 2. 9 *Heater* 220V⁶

2.2.10 AC Light Dimmer

AC Light Dimmer Module merupakan modul elektronika yang digunakan untuk mengatur besarnya daya listrik AC yang disalurkan ke beban, seperti lampu pijar, elemen pemanas (*Heater*), dan motor universal. Pada penelitian ini digunakan RobotDyn AC Light Dimmer Module sebagai pengendali daya *Heater* PTC 220 VAC sehingga suhu di dalam komposter dapat dikontrol secara bertahap sesuai hasil perhitungan metode *Fuzzy Logic* Mamdani.

Modul ini bekerja menggunakan kombinasi TRIAC sebagai sakelar elektronik dan Zero Crossing Detector (ZCD) sebagai pendeteksi titik nol gelombang AC. Zero Crossing Detector berfungsi mendeteksi saat gelombang sinus AC melewati tegangan nol (0 V), kemudian informasi tersebut dikirimkan ke mikrokontroler. Selanjutnya, mikrokontroler memberikan sinyal pemicu (*trigger*) kepada TRIAC setelah jeda waktu tertentu. Semakin cepat TRIAC dipicu setelah

⁶ *Heater*. Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/k32ZXyE988xLgyBi5>

titik nol, semakin besar bagian gelombang sinus yang dialirkan ke beban sehingga daya yang diterima beban semakin besar. Sebaliknya, jika pemunculan dilakukan lebih lambat, daya yang diterima beban menjadi lebih kecil.

Teknik pengaturan daya tersebut dikenal sebagai Phase Angle Control, yaitu metode pengaturan sudut penyalan TRIAC pada setiap setengah siklus gelombang AC. Dengan mengubah sudut penyalan (α), besar tegangan efektif (*Root Mean Square* atau RMS) yang diterima beban dapat diatur tanpa mengubah frekuensi sumber listrik.

Pada penelitian ini, nilai keluaran *Fuzzy Logic* berupa persentase daya *Heater* dikonversi menjadi sudut penyalan TRIAC oleh Arduino Mega 2560. Dengan demikian, *Heater* tidak hanya bekerja dalam kondisi ON atau OFF, tetapi dapat menghasilkan tingkat pemanasan yang bervariasi sesuai kebutuhan untuk mempertahankan suhu komposter pada nilai setpoint.

Secara konseptual, hubungan antara sudut penyalan dan daya keluaran ditunjukkan oleh karakteristik bahwa semakin kecil sudut penyalan (α) maka daya yang diberikan ke beban semakin besar. Sebaliknya, semakin besar sudut penyalan, maka daya yang disalurkan akan semakin kecil.

Pada penelitian ini, AC Light Dimmer digunakan sebagai pengatur daya Heater berdasarkan keluaran *Fuzzy Logic*. Nilai keluaran Heater dari proses defuzzifikasi dinyatakan dalam persentase daya 0–100%, kemudian diterapkan melalui AC Light Dimmer untuk mengatur daya efektif yang diberikan kepada Heater. Dengan demikian, keluaran *Fuzzy Logic* tidak digunakan sebagai PWM DC untuk mengendalikan Heater, tetapi sebagai nilai pengaturan daya AC melalui mekanisme pengaturan sudut penyalan (phase angle) pada AC Light Dimmer.



Gambar 2. 10 Ac Light Dimmer⁷

2.2.11 Driver Mosfet IR520

Driver MOSFET merupakan rangkaian sakelar elektronik berbasis transistor daya tipe MOSFET yang digunakan untuk mengendalikan beban DC. Komponen utama pada modul ini adalah MOSFET tipe N-Channel yang bekerja dengan prinsip pengendalian tegangan pada terminal gate untuk mengatur aliran arus antara drain dan source. Secara teknis, MOSFET akan berada pada kondisi aktif (ON) ketika tegangan gate melebihi tegangan ambang (threshold voltage). Pada kondisi ini, kanal konduksi terbentuk sehingga arus dapat mengalir dari drain ke source. Sebaliknya, jika tegangan gate berada di bawah ambang, MOSFET akan berada pada kondisi nonaktif (OFF) dan arus terputus. Karena dikendalikan oleh tegangan, MOSFET memiliki impedansi input yang tinggi dan membutuhkan arus kendali yang relatif kecil.

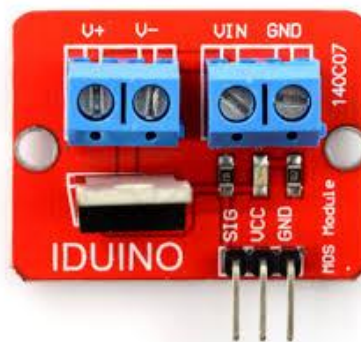
Dalam aplikasi pengaturan daya, driver MOSFET umumnya dikombinasikan dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM adalah teknik pengaturan daya dengan cara mengubah lebar pulsa sinyal digital dalam satu periode tertentu. Tegangan sumber tidak diubah, tetapi lamanya sinyal berada pada kondisi HIGH dan LOW yang diatur. Parameter utama dalam PWM adalah *duty cycle*, yaitu persentase waktu sinyal berada pada kondisi HIGH dalam satu periode. Secara matematis, *duty cycle* dapat dinyatakan sebagai:

$$Duty\ Cycle(\%) = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \times 100\% \quad 2-4$$

⁷ Ac Light Dimmer. Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/apEa0POAhENITw9ye>

Semakin besar *duty cycle*, semakin besar daya rata-rata yang disalurkan ke beban. Jika *duty cycle* 0%, beban tidak menerima daya. Jika *duty cycle* 100%, beban menerima daya penuh. Pada nilai di antara keduanya, daya yang diterima beban bersifat proporsional terhadap persentase *duty cycle*. Driver MOSFET bekerja sebagai sakelar berkecepatan tinggi yang membuka dan menutup mengikuti sinyal PWM. Karena proses switching berlangsung cepat, daya dapat diatur secara efisien tanpa menghasilkan rugi daya besar seperti pada metode pengaturan tegangan linier. Untuk kinerja yang baik, MOSFET idealnya memiliki resistansi kanal ($R_{ds(on)}$) yang rendah agar panas yang dihasilkan minimal dan efisiensi tetap terjaga.

Driver MOSFET IRF520 digunakan sebagai antarmuka antara keluaran PWM Arduino dan beban DC, yaitu fan-heater, blower, dan pompa. Sinyal PWM dari Arduino digunakan. Perubahan *duty cycle* dapat memengaruhi tingkat kerja beban DC, termasuk kecepatan putaran motor pompa. Respons aktual pompa terhadap perubahan *duty cycle* bergantung pada karakteristik pompa dan kondisi sistem, sehingga tidak diasumsikan memiliki hubungan linier tanpa pengukuran eksperimental.



Gambar 2. 11 Driver Mosfet IR520⁸

2.2.12 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler Arduino maupun papan pengembang berbasis

⁸ *Driver Mosfet IR520*. . Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/4yCazZ1XvRBDld4RH>

Arduino lainnya seperti ESP32. Arduino IDE dirancang dengan antarmuka yang sederhana sehingga mudah digunakan baik oleh pemula maupun pengembang sistem tertanam (*embedded system*). Perangkat lunak ini mendukung berbagai bahasa pemrograman berbasis C dan C++ yang telah disederhanakan melalui penggunaan library dan fungsi bawaan Arduino.

Arduino IDE memiliki beberapa fitur utama yang mendukung proses pengembangan sistem mikrokontroler, di antaranya text editor untuk menulis kode program, compiler untuk menerjemahkan kode menjadi bahasa mesin, serta uploader yang berfungsi mengirimkan program ke mikrokontroler melalui koneksi USB atau komunikasi serial. Selain itu, Arduino IDE juga menyediakan Serial Monitor yang digunakan untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor atau proses debugging program secara real-time.

Dalam pengembangan sistem otomatisasi seperti komposter pintar, Arduino IDE berperan sebagai platform utama dalam pemrograman logika kendali, pengolahan data sensor, serta pengaturan aktuator. Melalui Arduino IDE, pengguna dapat mengintegrasikan berbagai komponen seperti sensor suhu dan kelembapan, modul relay, motor agitator, serta sistem monitoring berbasis Internet of Things. Dengan kemudahan penggunaan dan dukungan komunitas yang luas, Arduino IDE menjadi salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem kendali berbasis mikrokontroler.



Gambar 2. 12 Arduino IDE⁹

2.2.13 Evaluasi Kinerja Sistem Kendali

Evaluasi kinerja sistem kendali dilakukan untuk mengetahui kemampuan

⁹ *Arduino IDE*. . Retrieved August 21, 2026, from <https://share.google/uP1wiWSFv8h0pmkw1>

sistem dalam mencapai dan mempertahankan nilai setpoint yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, evaluasi kinerja digunakan untuk menganalisis respons sistem terhadap perubahan kondisi suhu dan kelembapan selama proses pengomposan. Parameter yang digunakan meliputi error, rise time, settling time, overshoot, kondisi steady-state, dan tolerance band.

1) *Error*

Error merupakan selisih antara nilai setpoint (Set Point, SP) dan nilai keluaran aktual (Process Variable, PV) pada suatu waktu. Error dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$e(t) = SP - PV(t) \quad 2-5$$

Nilai error digunakan untuk mengetahui seberapa jauh kondisi aktual sistem dari nilai yang diinginkan.

2) *Rise Time*

Rise time merupakan waktu yang diperlukan respons sistem untuk mencapai daerah nilai tertentu dari nilai awal menuju nilai target. Pada penelitian ini, rise time ditentukan berdasarkan respons suhu dan kelembapan terhadap setpoint yang diberikan.

3) *Overshoot*

Overshoot merupakan kondisi ketika respons sistem melewati nilai setpoint sebelum kembali menuju kondisi stabil. Besarnya overshoot dapat dinyatakan sebagai persentase selisih antara nilai puncak respons (*peak value*) terhadap nilai setpoint:

$$Mp = \frac{PV_{peak} - SP}{SP} \times 100\% \quad 2-6$$

Parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa besar respons sistem melampaui nilai yang ditentukan.

4) *Settling Time*

Settling time merupakan waktu yang diperlukan respons sistem untuk memasuki dan tetap berada di dalam batas toleransi tertentu di sekitar nilai setpoint. Batas toleransi ditentukan berdasarkan tolerance band yang

digunakan dalam penelitian. Oleh karena itu, nilai settling time bergantung pada besar band toleransi yang ditetapkan.

5) *Steady-state*

Kondisi *steady-state* merupakan kondisi ketika respons sistem telah mencapai keadaan relatif stabil di sekitar nilai setpoint sehingga perubahan nilai keluaran relatif kecil. Pada penelitian ini, kondisi *steady-state* digunakan untuk melihat kemampuan sistem mempertahankan suhu dan kelembapan di sekitar nilai yang telah ditentukan setelah respons transien berakhir.

6) *Tolerance Band*

Tolerance band merupakan batas penyimpangan yang digunakan untuk menentukan apakah nilai keluaran masih berada dalam rentang yang dapat diterima di sekitar setpoint. *Tolerance band* dinyatakan sebagai batas atas dan batas bawah dari nilai setpoint. Pada penelitian ini, *tolerance band* digunakan sebagai dasar dalam menentukan kestabilan dan *settling time* sistem.

Dalam evaluasi sistem kendali, *tolerance band* digunakan sebagai batas penyimpangan yang masih dapat diterima dari nilai setpoint. Pada penelitian ini, batas toleransi suhu ditetapkan sebesar $\pm 3^{\circ}\text{C}$ terhadap setpoint 40°C , sedangkan batas toleransi kelembapan ditetapkan sebesar $\pm 5\%$ terhadap setpoint 60% . Batas tersebut digunakan sebagai kriteria evaluasi untuk menilai kemampuan sistem mempertahankan kondisi proses di sekitar nilai yang ditentukan.

7) Persentase Keberhasilan

Persentase keberhasilan digunakan untuk mengetahui proporsi data pengukuran yang berada dalam rentang *tolerance band* terhadap seluruh data pengujian. Persentase keberhasilan dihitung dengan persamaan:

$$P = \frac{N_{\text{dalam toleransi}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad 2-7$$