

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sampah Organik

Sampah organik merupakan jenis sampah yang berasal dari sisa makhluk hidup, baik dari tumbuhan maupun hewan, yang dapat terurai secara alami melalui proses biologis oleh mikroorganisme. Dalam skala rumah tangga, sampah organik umumnya terdiri dari sisa sayuran, buah-buahan, kulit buah, daun-daunan, serta sisa bahan dapur lainnya. Karakteristik utama sampah organik adalah memiliki kandungan air yang relatif tinggi serta mudah mengalami proses pembusukan apabila tidak dikelola dengan baik.

Penumpukan sampah organik yang tidak tertangani dapat menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan. Proses pembusukan yang terjadi secara tidak terkontrol dapat menghasilkan bau tidak sedap, cairan lindi, serta gas rumah kaca seperti metana. Selain itu, timbunan sampah organik juga dapat menjadi tempat berkembangnya mikroorganisme patogen serta hama yang berpotensi mengganggu kesehatan masyarakat (Sufiyanto et al., 2023).

Di sisi lain, sampah organik memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali melalui proses pengolahan menjadi kompos. Kompos merupakan hasil dekomposisi bahan organik yang dapat digunakan sebagai pupuk alami untuk memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kesuburan tanaman. Oleh karena itu, pengolahan sampah organik melalui proses pengomposan menjadi salah satu solusi yang efektif dalam mengurangi jumlah sampah sekaligus menghasilkan produk yang bermanfaat.

2.1.2 Pengomposan Aerob

Pengomposan aerob merupakan proses penguraian bahan organik yang berlangsung dengan adanya suplai oksigen. Dalam proses ini, mikroorganisme aerob memanfaatkan oksigen untuk menguraikan material organik menjadi senyawa yang lebih stabil seperti karbon dioksida, air, serta biomassa mikroorganisme.

Proses pengomposan aerob dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain suhu, kelembapan, dan ketersediaan oksigen (Ezeogu et al., 2017). Suhu berperan sebagai indikator aktivitas mikroorganisme selama proses dekomposisi berlangsung. Pada fase tertentu, suhu kompos dapat meningkat akibat aktivitas metabolisme mikroorganisme. Kelembapan juga menjadi faktor penting karena mikroorganisme membutuhkan air untuk menjalankan proses metabolisme. Namun, kadar air yang terlalu tinggi dapat menghambat masuknya oksigen ke dalam material kompos.

Ketersediaan oksigen menjadi faktor yang sangat penting dalam pengomposan aerob. Apabila suplai oksigen tidak mencukupi, proses penguraian dapat berubah menjadi proses anaerob yang menghasilkan bau tidak sedap serta memperlambat pembentukan kompos. Oleh karena itu, sistem pengadukan diperlukan untuk menjaga distribusi oksigen di dalam material kompos sehingga proses pengomposan dapat berlangsung secara optimal.

2.1.3 Sistem Pengomposan 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 (Wahyudi & Budiyanto, 2024).

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).

2.1.4 Sistem Pencacahan Sampah Organik

Pencacahan merupakan tahap awal dalam proses pengolahan sampah organik sebelum dilakukan pengomposan. Tujuan utama proses pencacahan adalah untuk memperkecil ukuran material sehingga luas permukaan bahan organik menjadi lebih besar. Peningkatan luas permukaan ini memungkinkan mikroorganisme memiliki area kontak yang lebih luas dengan material organik sehingga proses dekomposisi dapat berlangsung lebih cepat.

Hubungan antara luas permukaan dan volume partikel dapat dijelaskan melalui rasio luas permukaan terhadap volume. Untuk partikel yang diasumsikan berbentuk bola, luas permukaan dan volume dapat dinyatakan sebagai:

$$A = 4\pi r^2 \quad 2.1$$

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad 2.2$$

Dengan

A = luas permukaan bola

V = volume bola

R = jari-jari bola

Sehingga rasio luas permukaan terhadap volume adalah:

$$\frac{A}{V} = \frac{3}{r} \quad 2.3$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran partikel bahan organik, maka rasio luas permukaan terhadap volume akan semakin besar sehingga proses penguraian oleh mikroorganisme dapat berlangsung lebih optimal.

Dalam sistem pengolahan sampah organik, mekanisme pencacahan umumnya menggunakan prinsip pemotongan oleh pisau yang berputar. Berdasarkan mekanisme kerjanya, mesin pencacah dapat dibedakan menjadi beberapa jenis seperti *shredder*, *crusher*, dan *chopper*. Pada pengolahan sampah organik skala rumah tangga, mekanisme yang umum digunakan adalah tipe *chopper*, yaitu pencacahan menggunakan pisau berputar dengan kecepatan tinggi.

Material yang diproses pada komposter rumah tangga umumnya berupa bahan organik lunak seperti sayuran, buah, dan daun. Oleh karena itu, sistem pencacah lebih mengandalkan kecepatan putar pisau untuk menghasilkan gaya potong terhadap material. Prinsip kerja ini serupa dengan mekanisme pada blender atau *food processor* yang menggunakan motor berkecepatan tinggi untuk memotong bahan organik.

Pada penelitian ini, sistem pencacah dirancang menggunakan motor DC berkecepatan tinggi yang menggerakkan pisau pencacah secara langsung. Mekanisme ini diharapkan mampu memperkecil ukuran sampah organik sebelum masuk ke ruang pengomposan sehingga proses pengomposan pada komposter aerob tertutup dapat berlangsung lebih cepat dan merata.

2.1.5 Sistem Pengadukan pada Komposter

Pengadukan merupakan salah satu komponen penting dalam sistem komposter aerob karena berfungsi untuk menjaga distribusi oksigen, suhu, dan kelembapan di dalam material kompos. Pada proses pengomposan aerob, mikroorganisme memerlukan suplai oksigen yang cukup agar proses dekomposisi dapat berlangsung secara optimal. Tanpa pengadukan yang memadai, material kompos dapat membentuk zona anaerob yang menyebabkan proses penguraian menjadi tidak optimal serta menimbulkan bau tidak sedap.

Selain berfungsi meningkatkan aerasi, pengadukan juga membantu mencampur material kompos sehingga proses dekomposisi dapat berlangsung lebih merata. Material kompos yang berada di bagian dalam dan bagian luar wadah dapat tercampur secara berkala sehingga aktivitas mikroorganisme menjadi lebih stabil di seluruh bagian material.

Secara mekanik, sistem pengaduk pada komposter biasanya terdiri dari poros yang dipasang dengan bilah pengaduk di dalam tabung komposter. Ketika poros berputar, bilah pengaduk akan menghasilkan gaya geser terhadap material kompos sehingga material dapat tercampur dan berpindah posisi di dalam wadah.

Material kompos memiliki karakteristik sebagai media semi-padat yang bersifat tidak homogen. Oleh karena itu, sistem pengaduk akan mengalami tahanan mekanik selama proses pengadukan berlangsung. Besarnya tahanan pada sistem pengaduk dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain massa material kompos, kepadatan dan kadar air, diameter wadah, bilah pengaduk, serta kecepatan putar poros pengaduk. Semakin besar volume dan kepadatan material kompos, maka gaya tahanan yang bekerja pada bilah pengaduk akan semakin besar sehingga kebutuhan torsi pada sistem penggerak juga meningkat.

Hubungan antara gaya tahanan dan torsi pada poros pengaduk dapat dinyatakan sebagai:

$$T = F \times r \quad 2.4$$

Dengan

T = torsi (Nm)

F = gaya tahanan material kompos (N)

r = jari-jari lengan pengaduk (m)

Daya mekanik yang dibutuhkan untuk memutar sistem pengaduk dapat dinyatakan sebagai:

$$P = T \times \omega \quad 2.5$$

dengan

P = daya mekanik (Watt)

T = torsi (Nm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Pada sistem komposter skala rumah tangga, pengaduk umumnya dirancang bekerja pada kecepatan rendah dengan torsi yang cukup besar untuk mengatasi tahanan material kompos. Oleh karena itu, motor penggerak biasanya menggunakan motor dengan gearbox yang mampu menghasilkan

torsi lebih besar dibandingkan motor tanpa reduksi.

Dalam penelitian ini, mekanisme pengaduk dirancang menggunakan motor DC dengan *gearbox* tipe *worm gear*. Penggunaan *gearbox* memungkinkan motor menghasilkan torsi yang lebih besar pada kecepatan putar yang lebih rendah sehingga sesuai untuk menggerakkan sistem pengaduk pada komposter aerob tertutup.

2.1.6 Kontrol PID

Kontrol PID (Proportional–Integral–Derivative) merupakan salah satu metode pengendalian yang banyak digunakan dalam sistem kontrol industri untuk mengatur suatu variabel agar dapat mengikuti nilai referensi yang diinginkan. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan tiga komponen utama, yaitu proportional (P), integral (I), dan derivative (D), yang berfungsi untuk memperbaiki respon sistem terhadap perubahan kondisi operasi.

Dalam sistem kontrol PID, sinyal kendali dihasilkan berdasarkan nilai eror, yaitu selisih antara nilai *setpoint* yang diinginkan dengan nilai keluaran sistem. Ketiga komponen kontrol tersebut bekerja secara bersama-sama untuk meminimalkan eror sehingga keluaran sistem dapat mencapai dan mempertahankan nilai *setpoint* yang telah ditentukan.

Secara matematis, persamaan umum kontrol PID dapat dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.6$$

dengan:

- $u(t)$: sinyal kendali yang diberikan ke sistem
- $e(t)$: eror antara *setpoint* dan keluaran sistem
- K_p : konstanta penguat proportional
- K_i : konstanta penguat integral
- K_d : konstanta penguat derivative

Komponen proportional (P) menghasilkan sinyal kendali yang sebanding dengan besar eror yang terjadi pada sistem. Komponen integral (I) berfungsi menghilangkan eror pada kondisi *steady-state* dengan

mengakumulasi nilai eror terhadap waktu. Sementara itu, komponen derivative (D) bekerja berdasarkan laju perubahan eror sehingga dapat meningkatkan stabilitas sistem dan membantu meredam overshoot.

Dalam penerapan kontrol PID, nilai parameter K_p , K_i , dan K_d perlu ditentukan melalui proses yang disebut tuning. Beberapa metode tuning yang umum digunakan antara lain metode Ziegler–Nichols, trial and error, serta metode berbasis pemodelan sistem. Metode trial and error dilakukan dengan mengubah nilai parameter pengendali secara bertahap hingga diperoleh respon sistem yang diinginkan. Metode ini sederhana, tetapi hasilnya sangat bergantung pada pengalaman pengguna.

Metode Ziegler–Nichols merupakan metode penalaan yang banyak digunakan karena memberikan parameter awal pengendali secara sistematis. Metode ini terdiri atas dua pendekatan, yaitu:

- 1) Metode I (*Reaction Curve Method*), yaitu penalaan berdasarkan respon *open-loop* terhadap masukan tangga (*step input*) untuk memperoleh parameter waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T).
- 2) Metode II (*Ultimate Gain Method*), yaitu penalaan pada sistem *closed-loop* dengan menaikkan nilai K_p hingga diperoleh osilasi berkelanjutan. Nilai *ultimate gain* (K_u) dan *ultimate period* (P_u) kemudian digunakan untuk menghitung parameter pengendali sesuai aturan Ziegler–Nichols.

2.1.7 Karakteristik Respon Transient

Respon transien merupakan respon sistem sejak diberikan masukan hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*). Karakteristik respon transien digunakan untuk mengetahui kinerja suatu sistem kendali berdasarkan kecepatan respon, kestabilan, dan ketelitian sistem. Beberapa parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi respon transien yaitu *rise time*, *percent overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*.

a. Rise time

Rise time (t_r) adalah waktu yang dibutuhkan oleh keluaran sistem untuk naik dari 10% hingga 90% ke target (*setpoint*) untuk pertama kalinya.

Semakin kecil nilai *rise time*, semakin cepat sistem mencapai nilai yang diinginkan.

Secara matematis, *rise time* dapat dihitung menggunakan persamaan

$$t_r = t_{90\%} - t_{10\%} \quad (2.7)$$

dengan:

- t_r = *rise time* (detik)
- $t_{10\%}$ = waktu saat keluaran mencapai 10% dari nilai akhir
- $t_{90\%}$ = waktu saat keluaran mencapai 90% dari nilai akhir

b. *Percent Overshoot*

Percent overshoot merupakan parameter yang menunjukkan seberapa besar keluaran sistem melampaui nilai target atau *setpoint* selama respons transien. *Overshoot* terjadi ketika nilai keluaran mencapai nilai puncak yang lebih besar daripada nilai yang ditetapkan sebelum respons menuju kondisi tunak (National Instruments, 2006)

(Ningsih et al., 2024), menggunakan nilai puncak respons dan nilai *setpoint* dalam menentukan *maximum overshoot*. Pada penelitian tersebut, nilai akhir respons dinyatakan sebagai nilai *setpoint*. (Ningsih et al., 2024). Berdasarkan konsep tersebut, *percent overshoot* pada penelitian ini dihitung berdasarkan nilai maksimum kecepatan motor terhadap nilai *setpoint*.

Rumus yang digunakan dinyatakan:

$$\%OS = \frac{RPM_{max} - SP}{SP} \times 100\%$$

Keterangan:

$\%OS$ = persentase overshoot (%)

RPM_{max} = nilai maksimum kecepatan motor pada respons transien (RPM)

SP = nilai *setpoint* kecepatan motor (RPM)

Sebagai contoh, apabila *setpoint* sebesar 10 RPM dan nilai maksimum respons mencapai 11,5 RPM, maka:

$$\begin{aligned} \%OS &= \frac{11,5 - 10}{10} \times 100\% \\ \%OS &= 15\% \end{aligned}$$

Dengan demikian, respons maksimum motor mengalami overshoot sebesar 15% terhadap nilai *setpoint*.

c. *Settling Time*

Settling time merupakan waktu yang diperlukan oleh respons sistem untuk mencapai daerah toleransi di sekitar nilai target dan selanjutnya tetap berada di dalam daerah tersebut. (National Instruments, 2006).

Pada penelitian ini digunakan kriteria toleransi sebesar $\pm 7\%$ terhadap nilai *setpoint*. Penggunaan *setpoint* sebagai nilai acuan disesuaikan dengan tujuan sistem pengendalian, yaitu mencapai dan mempertahankan kecepatan motor pada nilai yang telah ditetapkan.

Batas bawah daerah toleransi:

$$B_{bawah} = SP - (0,07 \times SP)$$

Batas atas daerah toleransi:

$$B_{atas} = SP + (0,07 \times SP)$$

Sehingga:

$$B_{bawah} = 0,93 \times SP$$

$$B_{atas} = 1,07 \times SP$$

Untuk *setpoint* sebesar 10 RPM:

$$B_{bawah} = 0,93 \times 10 = 9,3 \text{ RPM}$$

$$B_{atas} = 1,07 \times 10 = 10,7 \text{ RPM}$$

Dengan demikian, daerah toleransi yang digunakan adalah:

$$9,3 \text{ RPM} \leq \text{RPM}(t) \leq 10,7 \text{ RPM}$$

Settling time ditentukan dari waktu ketika respons kecepatan motor masuk ke dalam rentang $\pm 7\%$ dari *setpoint* dan selanjutnya tetap berada dalam rentang tersebut.

d. *Steady-State Error*

Steady-state error merupakan selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai keluaran sistem setelah respons mencapai kondisi tunak. Parameter ini digunakan untuk mengetahui tingkat ketepatan sistem dalam mempertahankan keluaran terhadap nilai yang diinginkan (National Instruments, 2006).

Pada penelitian ini, *steady-state error* dihitung berdasarkan selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai rata-rata kecepatan motor pada kondisi tunak.

Rumus steady-state error:

$$e_{ss} = SP - y_{ss}$$

Untuk menyatakan *steady-state error* dalam bentuk persentase:

$$e_{ss}(\%) = \frac{|SP - y_{ss}|}{SP} \times 100\%$$

Keterangan:

e_{ss} = steady-state error

$e_{ss}(\%)$ = persentase steady-state error (%)

SP = nilai *setpoint* kecepatan motor (RPM)

y_{ss} = nilai rata-rata kecepatan motor pada kondisi tunak (RPM)

Sebagai contoh, apabila *setpoint* sebesar 10 RPM dan rata-rata kecepatan motor pada kondisi tunak sebesar 9,6 RPM, maka:

$$e_{ss}(\%) = \frac{|10 - 9,6|}{10} \times 100\%$$
$$e_{ss}(\%) = 4\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan motor pada kondisi tunak memiliki penyimpangan sebesar 4% terhadap nilai *setpoint*.

2.1.8 Sensor Optical Incremental Encoder

Sensor optical incremental encoder merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur kecepatan maupun jumlah putaran suatu poros dengan memanfaatkan prinsip pemutusan cahaya. Sensor ini bekerja menggunakan sumber cahaya inframerah dan elemen penerima cahaya yang dipisahkan oleh sebuah piringan berputar yang disebut encoder disk. Piringan tersebut memiliki sejumlah celah atau lubang yang tersusun melingkar dan dipasang pada poros yang akan diukur putarannya.

Ketika poros berputar, encoder disk akan ikut berputar sehingga celah pada piringan secara periodik melewati celah sensor optik. Pada saat lubang disk berada di antara pemancar dan penerima cahaya, cahaya inframerah dapat melewati celah tersebut dan diterima oleh phototransistor. Sebaliknya, ketika bagian piringan yang tidak berlubang melewati sensor, cahaya akan

terhalang sehingga sinyal yang diterima berubah. Perubahan kondisi ini menghasilkan sinyal digital berupa pulsa yang dapat dibaca oleh mikrokontroler.

Jumlah pulsa yang dihasilkan dalam satu putaran bergantung pada jumlah celah yang terdapat pada encoder disk. Semakin banyak jumlah celah pada disk, maka resolusi pembacaan putaran akan semakin tinggi. Data pulsa yang dihasilkan sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan kecepatan putar dalam satuan revolutions per minute (RPM). Perhitungan kecepatan putar dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

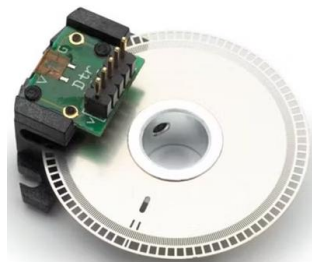
$$RPM = \frac{N}{P} \times 60 \quad 2.12$$

dengan:

RPM = kecepatan putar poros (revolutions per minute)

N = jumlah pulsa yang terdeteksi selama waktu pengukuran (pulsa/detik)

P = jumlah celah pada encoder disk



Gambar 2. 1 Sensor *Optical Incremental Encoder*¹

Sensor optical incremental encoder banyak digunakan pada sistem kendali motor karena mampu memberikan sinyal umpan balik yang cukup akurat terhadap perubahan kecepatan putaran. Selain itu, sensor ini memiliki respon yang cepat serta tidak memerlukan kontak mekanik secara langsung dengan objek yang diukur sehingga tingkat keausan komponen relatif kecil.

¹*OpticalIncrementalEncoder*.(n.d.).<https://image.madeinchina.com/202f0j0hjMolcYDnUks/OpticalEncoderSensorIncrementalEncoderMetalEncoder-Disc.webp>

Pada penelitian ini, sensor optical incremental encoder digunakan untuk membaca kecepatan putar poros pengaduk komposter. Encoder disk dipasang pada poros pengaduk, sedangkan sensor optik ditempatkan padaudukan tetap di dekat disk sehingga celah disk dapat melewati slot sensor. Pulsa yang dihasilkan kemudian dibaca oleh mikrokontroler Arduino Mega dan digunakan sebagai sinyal umpan balik dalam sistem kontrol PID untuk menjaga kecepatan putar pengaduk tetap mendekati nilai *setpoint* yang telah ditentukan.

2.1.9 Motor DC

Motor DC merupakan perangkat elektromekanik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik arus searah (Direct Current) menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros motor. Motor DC banyak digunakan pada berbagai sistem otomasi karena memiliki struktur yang relatif sederhana serta mudah dikendalikan, khususnya dalam pengaturan kecepatan putar.

Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara arus listrik dan medan magnet. Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan yang berada di dalam medan magnet, akan timbul gaya yang disebut gaya Lorentz. Gaya ini menyebabkan kumparan mengalami dorongan sehingga rotor motor dapat berputar. Putaran rotor kemudian diteruskan ke poros motor sehingga menghasilkan gerakan mekanik.

Energi listrik yang diberikan pada motor DC dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = V \times I \quad 2.13$$

dengan:

P = daya listrik (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = arus listrik (Ampere)

Energi listrik tersebut kemudian diubah menjadi energi mekanik berupa torsi dan kecepatan putar pada poros motor. Hubungan antara daya mekanik, torsi, dan kecepatan sudut dapat dinyatakan sebagai:

$$P = T \times \omega \quad 2.14$$

dengan:

P = daya listrik (Watt)

T = Torsi (Nm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Motor DC memiliki keunggulan dalam kemudahan pengaturan kecepatan. Kecepatan putar motor dapat dikendalikan dengan mengatur tegangan yang diberikan ke motor atau menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Metode PWM bekerja dengan mengatur lebar pulsa sinyal sehingga tegangan rata-rata yang diterima motor dapat diubah tanpa mengubah sumber tegangan utama.

Dalam penelitian ini, motor DC digunakan sebagai aktuator utama pada sistem komposter, yaitu pada mekanisme pencacah dan pengaduk. Motor DC dipilih karena memiliki karakteristik pengaturan kecepatan yang sederhana serta dapat dikendalikan menggunakan mikrokontroler melalui driver motor.

2.1.10 Driver Motor

Driver motor merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dan motor. Mikrokontroler seperti Arduino hanya mampu menghasilkan sinyal logika dengan arus yang sangat kecil, sehingga tidak cukup untuk menggerakkan motor secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan driver motor yang berfungsi untuk memperkuat arus dan tegangan yang dibutuhkan oleh motor.

Pengaturan kecepatan motor DC umumnya dilakukan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Metode PWM bekerja dengan memberikan sinyal digital berupa pulsa dengan periode tertentu yang diatur lebar pulsanya. Lebar pulsa ini disebut sebagai *duty cycle*, yaitu perbandingan antara waktu sinyal berada pada kondisi aktif (ON) terhadap periode total sinyal.

Duty cycle dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad 2.15$$

dengan:

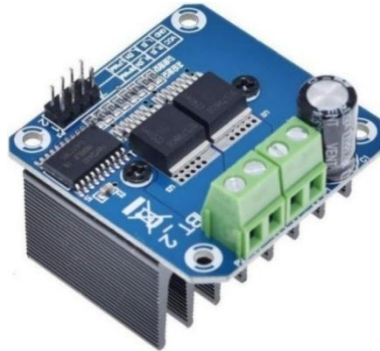
Duty Cycle = persentase waktu sinyal aktif (%)

$t_{(on)}$ = waktu sinyal berada pada kondisi ON

T = periode total sinyal PWM

Semakin besar nilai duty cycle, maka semakin besar tegangan rata-rata yang diberikan ke motor sehingga kecepatan putar motor akan meningkat. Sebaliknya, jika nilai duty cycle semakin kecil maka tegangan rata-rata yang diterima motor juga semakin kecil sehingga kecepatan motor menurun.

Dalam penelitian ini, driver motor digunakan untuk mengendalikan motor DC pada sistem komposter. Driver motor menerima sinyal PWM dari mikrokontroler Arduino dan mengatur suplai daya yang diberikan ke motor. Dengan menggunakan driver motor, motor dapat dikendalikan secara lebih stabil serta mampu menangani arus yang lebih besar dibandingkan jika motor dihubungkan langsung ke mikrokontroler.



Gambar 2. 2 Motor Driver ²

2.1.11 RTC (Real time Clock)

Real time Clock (RTC) merupakan modul pewaktu elektronik yang berfungsi untuk menyimpan dan menghitung waktu secara aktual, meliputi detik, menit, jam, hari, tanggal, bulan, hingga tahun. RTC digunakan pada sistem tertanam yang memerlukan pengendalian atau pencatatan berbasis waktu nyata (*real time*). Berbeda dengan timer internal pada mikrokontroler yang hanya bekerja selama sistem mendapatkan catu daya, modul RTC dilengkapi dengan sumber daya cadangan berupa baterai. Dengan adanya baterai tersebut, perhitungan waktu tetap berjalan meskipun catu daya utama

²*Driverbts7960*.https://m.mediaamazon.com/images/I/61CR25nB3hL._AC_SL1010_.jpg

terputus. Hal ini memungkinkan sistem untuk mempertahankan data waktu secara kontinu tanpa perlu dilakukan pengaturan ulang setiap kali perangkat dinyalakan kembali.



Gambar 2. 3 RTC DS3231³

Secara prinsip kerja, RTC memanfaatkan osilator kristal dengan frekuensi standar 32.768 kHz sebagai referensi waktu. Sinyal osilasi ini dibagi secara internal untuk menghasilkan pulsa satu detik, yang kemudian digunakan untuk menghitung satuan waktu lainnya seperti menit dan jam melalui sistem register internal. Data waktu tersebut disimpan dalam register dan dapat dibaca atau diatur oleh mikrokontroler. Dalam sistem tertanam, komunikasi antara RTC dan mikrokontroler umumnya menggunakan protokol serial seperti I2C. Melalui komunikasi ini, mikrokontroler dapat membaca nilai waktu yang tersimpan maupun melakukan pengaturan awal waktu sesuai kebutuhan sistem. Protokol I2C menggunakan dua jalur komunikasi, yaitu jalur data (SDA) dan jalur clock (SCL), sehingga memungkinkan pertukaran data secara sinkron.

Secara umum, modul RTC terdiri dari rangkaian osilator, register waktu dan kalender, serta sistem manajemen sumber daya cadangan. Kombinasi komponen tersebut memungkinkan RTC mempertahankan perhitungan waktu secara stabil dan berkelanjutan, sehingga banyak digunakan pada sistem yang membutuhkan fungsi penjadwalan atau pengaturan berbasis interval waktu.

³RTCD3231. <https://i.pinimg.com/originals/1e/57/b4/1e57b4dc679ca71e453cf0cde880ae6c.png>

2.1.12 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 merupakan papan mikrokontroler berbasis chip ATmega2560 yang dirancang untuk aplikasi sistem tertanam (embedded system) dengan kebutuhan jumlah input-output yang relatif banyak. Dibandingkan dengan papan Arduino lainnya, Arduino Mega 2560 memiliki jumlah pin digital dan analog yang lebih banyak sehingga sesuai untuk sistem yang melibatkan beberapa sensor dan aktuator sekaligus.

Secara umum, Arduino Mega 2560 bekerja pada tegangan logika 5 V dan dapat diberi catu daya melalui konektor USB atau sumber eksternal dengan rentang tegangan yang direkomendasikan antara 7–12 V. Mikrokontroler ATmega2560 yang digunakan memiliki arsitektur 8-bit dengan frekuensi kerja 16 MHz. Memori yang tersedia terdiri dari 256 KB flash memory untuk penyimpanan program, 8 KB SRAM untuk penyimpanan data sementara, serta 4 KB EEPROM untuk penyimpanan data non-volatile.

Dari sisi input-output, Arduino Mega 2560 menyediakan 54 pin digital, di mana 15 pin di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM. Selain itu, tersedia 16 pin analog input dengan resolusi 10-bit yang digunakan untuk membaca sinyal analog dari sensor. Jumlah pin yang cukup banyak ini memungkinkan sistem mengendalikan beberapa motor, membaca sensor, serta mengoperasikan modul tambahan tanpa memerlukan ekspansi I/O tambahan.

Arduino Mega 2560 juga dilengkapi beberapa port komunikasi serial, antara lain UART (4 kanal serial hardware), SPI, dan I2C (TWI). Keberadaan beberapa kanal komunikasi ini memudahkan integrasi dengan modul eksternal seperti driver motor, modul display, maupun sensor digital.

Dalam sistem penggerak motor, Arduino Mega 2560 berfungsi sebagai pusat kendali yang menghasilkan sinyal logika untuk mengatur arah putar serta sinyal PWM untuk mengatur kecepatan motor melalui driver. Sinyal PWM dihasilkan dengan memanfaatkan timer internal mikrokontroler, sehingga lebar pulsa dapat diatur sesuai kebutuhan sistem.

Dengan kapasitas memori yang cukup besar, jumlah pin yang banyak, serta kemampuan menghasilkan sinyal PWM dan komunikasi serial yang

lengkap, Arduino Mega 2560 sesuai digunakan pada sistem pencacah dan pengaduk komposter yang memerlukan pengendalian beberapa aktuator dan perangkat pendukung secara bersamaan.



Gambar 2. 4 Arduino Mega 2560⁴

2.1.13 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 Arduino lainnya. 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.

⁴ArduinoMega2560https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560_R3_Fronte.jpg

Dalam pengembangan sistem otomatisasi seperti komposter Aerob Tertutup, 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, driver, serta motor agitator. 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. 5 Arduino IDE⁵

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengolahan sampah organik melalui proses pengomposan telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan, mulai dari optimasi ukuran bahan, desain mekanisme pencacah, sistem pengadukan, sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), hingga penerapan metode pengendalian kecepatan motor. Berbagai penelitian tersebut menjadi dasar dalam pengembangan sistem komposter yang lebih efektif, efisien, dan otomatis.

Penelitian oleh Los (2017), berfokus pada pengaruh ukuran bahan cacahan terhadap kualitas kompos yang dihasilkan dari sampah daun kering. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan ukuran cacahan menjadi 1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm selama proses pengomposan selama 30 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran cacahan 1 cm menghasilkan kualitas kompos terbaik dengan rasio C/N sebesar 11,194 serta memenuhi standar pengujian

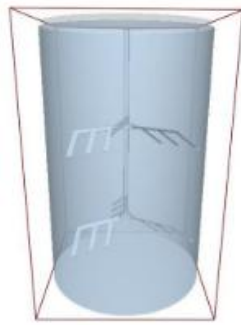
⁵ArduinoIDE.(n.d.).<https://elcomteam.com/wpcontent/uploads/2021/07/arduino-software.png>

mikrobiologi (Los, 2017). Penelitian ini menunjukkan bahwa ukuran bahan memiliki pengaruh terhadap efektivitas proses dekomposisi, namun belum membahas mekanisme pencacahan maupun sistem otomatisasi pada komposter.

Pada sistem pengomposan, Rochaeni et al. (2024) meneliti pengaruh frekuensi pengadukan terhadap proses pengomposan aerob menggunakan kecepatan motor konstan sebesar 10 RPM. Variasi frekuensi pengadukan yang digunakan yaitu satu, dua, dan enam kali per hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi pengadukan dua kali sehari mampu menghasilkan kondisi termofilik yang lebih stabil serta menghasilkan kualitas kompos yang memenuhi standar SNI 19-7030-2004.(Rochaeni et al., 2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa frekuensi pengadukan merupakan salah satu faktor penting dalam proses pengomposan, namun belum membahas sistem pengaturan kecepatan motor pengaduk.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Vechera et al. (2020) mengkaji pengaruh kecepatan putar pengaduk terhadap proses pengomposan pada komposter drum tertutup. Penelitian tersebut membandingkan beberapa variasi kecepatan putar dan menunjukkan bahwa kecepatan 10 RPM mampu mempercepat pencapaian fase termofilik serta menghasilkan suhu maksimum yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan lainnya (Vechera et al., 2020). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kecepatan putar pengaduk mempengaruhi efektivitas proses pengomposan, namun belum menerapkan sistem pengendalian kecepatan secara otomatis.

Dalam penelitian mengenai desain mekanisme pengaduk, Wang et al. (2024) menganalisis tiga jenis bilah pengaduk, yaitu enhanced blade, paddle blade, dan ribbon blade menggunakan metode *Discrete Element Method* (DEM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa enhanced blade menghasilkan distribusi partikel yang lebih homogen serta laju aliran material yang lebih tinggi dibandingkan kedua jenis bilah lainnya (Wang et al., 2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa desain bilah pengaduk mempengaruhi efektivitas pencampuran material, namun masih sebatas simulasi sehingga belum diterapkan pada sistem komposter yang sebenarnya.



Gambar 2. 6 Konfigurasi Bilah Pengaduk Tipe *Enhanced Blade*
(Wang et al., 2024)

Selain pengembangan pada aspek mekanik, Wahyudi & Budiyanto (2024) mengembangkan sistem monitoring suhu dan kelembapan komposter berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem yang dikembangkan memungkinkan pemantauan kondisi kompos secara real-time menggunakan mikrokontroler dan jaringan internet (Wahyudi & Budiyanto, 2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem monitoring digital mampu meningkatkan kemudahan dalam pengawasan proses pengomposan, namun belum mengintegrasikan mekanisme pencacahan, pengadukan, maupun sistem kendali motor.

Pada bidang sistem kendali, Putera & Hidayat (2022) mengimplementasikan metode Proportional Integral Derivative (PID) untuk mengendalikan kecepatan motor DC menggunakan sensor Optical Incremental Encoder sebagai umpan balik pada sistem kontrol tertutup. Kecepatan motor yang dibaca Optical Incremental Encoder dibandingkan dengan nilai *setpoint* untuk menghasilkan sinyal kesalahan (error) yang diproses oleh pengendali PID sehingga menghasilkan sinyal PWM sebagai pengatur kecepatan motor (Putera & Hidayat, 2022). Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter K_p berpengaruh terhadap kecepatan respon sistem, K_i berfungsi mengurangi steady-state error, sedangkan K_d mampu meredam overshoot sehingga sistem menjadi lebih stabil. Penelitian tersebut membuktikan bahwa metode PID efektif digunakan dalam pengendalian kecepatan motor DC, namun belum diterapkan pada sistem pengaduk komposter.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Penelitian
Los (2017)	Pengaruh ukuran cacahan	Eksperimen	Ukuran cacahan 1 cm menghasilkan kualitas kompos terbaik
Rochaeni dkk. (2024)	Frekuensi pengadukan	Eksperimen	Pengadukan dua kali sehari memberikan hasil terbaik
Vechera dkk. (2020)	Kecepatan pengaduk	Eksperimen	Kecepatan 10 RPM memberikan proses pengomposan paling optimal
Wang dkk. (2024)	Desain bilah pengaduk	Simulasi DEM	Enhanced blade menghasilkan pencampuran paling baik
Wahyudi & Budiyanto (2024)	Monitoring komposter berbasis IoT	IoT	Monitoring suhu dan kelembapan secara real-time
Putera & Hidayat (2022)	Pengendalian kecepatan motor DC menggunakan PID	PID	Kecepatan motor dapat dikendalikan dengan respon yang stabil

Berdasarkan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu pada Tabel 2.1, dapat diketahui bahwa penelitian-penelitian tersebut telah membahas berbagai aspek yang berkaitan dengan proses pengomposan, seperti ukuran bahan cacahan, desain mekanisme pencacah, sistem pengadukan, monitoring berbasis IoT, serta pengendalian kecepatan motor menggunakan metode PID. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih mengembangkan masing-masing subsistem secara terpisah sehingga belum menghasilkan suatu sistem komposter yang terintegrasi.

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya karena mengintegrasikan mekanisme pencacahan dan pengadukan pada komposter aerobik tertutup skala rumah tangga serta menerapkan sistem pengendalian kecepatan motor pengaduk berbasis PID menggunakan sensor Optical Incremental Encoder sebagai umpan balik. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan sistem pengolahan sampah organik yang lebih kompak, otomatis, serta mampu mempertahankan kecepatan pengaduk.