

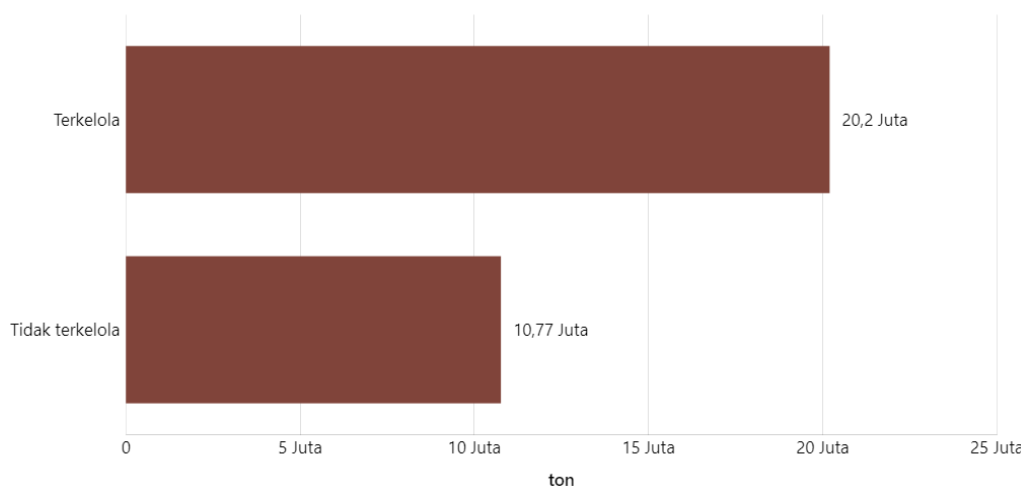
BAB II

DASAR TEORI

2.1 Sampah

Sampah merupakan salah satu masalah yang tengah dihadapi oleh Indonesia. Indonesia sendiri pun merupakan negara ke-5 tertinggi sebagai penghasil sampah di dunia. Berdasarkan data yang telah diterbitkan dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan 30,97 ton sampah pada tahun 2023. Data tersebut belum lengkap dikarenakan sampai 17 Juli 2024 data sampah yang masuk baru berasal dari 280 kabupaten/kota, sedangkan Indonesia memiliki total 514 kabupaten/kota.

Pada data sampah yang telah tercatat, 20,2 juta ton (65,24%) diantaranya berstatus terkelola, sedangkan 10,77 juta ton (34,76%) tidak terkelola [7]. Data tersebut akan terus meningkat di setiap tahunnya dengan selalu bertambahnya populasi manusia yang tinggal di Indonesia.



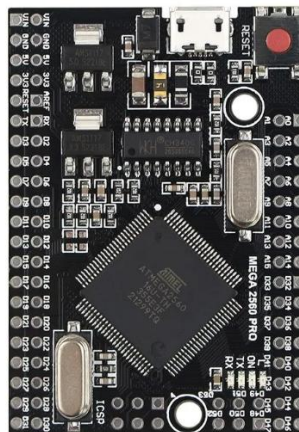
Gambar 2.1 Timbulan Sampah di Indonesia pada Tahun 2023

Pada penelitian Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) menunjukkan adanya jumlah peningkatan pada volume sampah plastik yang berlangsung pada masa pandemik *Covid-19* yang disebabkan oleh adanya pembatasan sosial yang membuat masyarakat melakukan pembelian *online* secara besar-besaran. Peningkatan kemasan plastik ini meningkat sebanyak 96% dengan sejalanannya peningkatan transaksi belanja online sebesar 62% [8].

2.2 Arduino Mega 2560 Pro

Arduino Mega 2560 Pro Mini merupakan sebuah papan mikrokontroler yang menggunakan ATmega2560 sebagai inti pengolah utamanya. Dengan memiliki 54 pin digital I/O, termasuk 14 pin yang mendukung output PWM, serta 16 pin input analog dan 4 port komunikasi UART, papan ini dirancang untuk aplikasi yang membutuhkan kontrol yang kompleks dan kemampuan komunikasi yang luas. Operasinya pada tegangan 5V dengan rentang tegangan masukan yang bisa diatur antara 7 hingga 12V, memungkinkan adaptabilitas yang luas untuk berbagai kebutuhan penggunaan. Arduino Mega 2560 Pro Mini juga dilengkapi dengan 256 KB flash memory, dengan 8 KB yang diperuntukkan untuk bootloader, serta SRAM sebesar 8 KB, sehingga mampu menampung program dan data dengan kapasitas yang cukup besar untuk berbagai aplikasi elektronik.

Keunggulan utama dari Arduino Mega 2560 Pro Mini terletak pada kombinasi pin I/O digital dan analog yang melimpah, yang sangat bermanfaat dalam mengendalikan berbagai jenis perangkat dan sensor. Dukungan output PWM yang luas memungkinkan pengaturan yang presisi untuk kontrol kecepatan motor, intensitas cahaya, dan aplikasi lain yang memerlukan modulasi sinyal dengan akurasi tinggi. Sementara itu, fitur komunikasi UART yang handal memudahkan integrasi dengan sensor jarak, GPS, dan perangkat komunikasi lainnya. Dengan semua fitur ini, Arduino Mega 2560 Pro Mini tidak hanya cocok untuk pengembangan prototipe elektronik, tetapi juga menjadi pilihan ideal untuk proyek-proyek yang membutuhkan pengendalian yang tepat dan dapat diandalkan [9].



Gambar 2.2 Arduino Mega 2560 Pro

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Mega 2560 Pro

Komponen	Spesifikasi
Mikrokontroler	Atmega2560
Tegangan Operasi	5V
Tegangan Masukan	7-12V
Batas Tegangan Masukan	6-20V
Pin Digital I/O	54 Pin (15 pin Output PWM)
Pin Input Analog	16 pin
Jumlah Pin Analog IN	16
Arus DC per Pin I/O	20mA
Arus DC pin 3.3V	50 mA
Flash Memory	256 KB (8 KB bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock SPEEDLED	16 MHz
LED Built in	13
Dimensi	55 x 37 mm
Berat	37 gram

2.3 LCD 16x2

LCD 16x2 ini merupakan salah satu komponen yang berfungsi untuk menampilkan suatu data, baik berupa karakter maupun huruf. LCD ini adalah *display* yang menggunakan teknologi CMOS *logic* yang dimana ini bekerja dengan

tidak menghasilkan cahaya, melainkan memantulkan cahaya yang berada di sekelilingnya.

Prinsip dari cara kerja LCD 16x2 ini dengan menggunakan lapisan film yang berisi kristal cair yang penempatannya diantara dua lempeng kaca yang sudah di pasang elektroda logam transparan. Ketika sebuah tegangan dicatukan pada beberapa pasang elektroda, molekul-molekul kristal cair akan menyusun agar cahaya yang mengenainya akan terserap. Hasil penyerapannya itulah yang akan membentuk huruf atau angka yang sesuai dengan bagian yang akan diaktifkan [10].



Gambar 2.3 LCD 16x2

2.4 Solid-State Relay 25DD

Solid-State Relay (SSR) 25DD adalah saklar elektronik berbasis semikonduktro yang digunakan sebagai pengganti dari saklar elektromekanis. Perbedaan dengan relay mekanik biasa ialah kecepatan switching yang lebih tinggi, tidak menimbulkan percikan (arcing), bebas suara, serta umur pakai yang lebih lama karena tidak memiliki bagian mekanis.

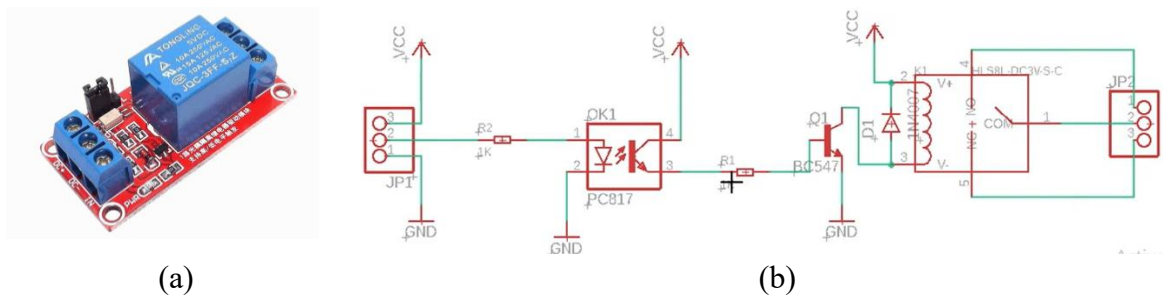
Pada konfigurasi DC-to-DC, SSR menggunakan input berupa optoisolator (seperti LED inframerah GaAlAs) yang mengendalikan MOSFET di sisi output. Saat menerima sinyal input dari mikrokontroler, optoisolator mengaktifkan MOSFET sehingga arus DC dapat mengalir dari sumber ke beban [11].



Gambar 2.4 Solid-State Relay 25DD

2.5 Relay 5V

Relay 5V merupakan jenis golongan saklar yang akan beroperasi dengan menggunakan prinsip elektromagnetik yang dimanfaatkan untuk dapat menggerakkan kontaktor guna menyambungkan suatu rangkaian secara tidak langsung. Terbuka dan tertutupnya sebuah kontaktor ini dikarenakan adanya efek induksi magnet yang dihasilkan dari kumparan induktor yang dialiri arus. Perbedaan antara relay dengan saklar ialah pergerakan kontaktor pada saklar dalam kondisi on ataupun off dilakukan secara manual tanpa perlu adanya arus Listrik, sedangkan relay memerlukan arus Listrik [12].



Gambar 2.5 Relay 5V (a) Komponen, (b) Skematik Komponen

Rangkaian yang skematik pada Gambar 2.6 adalah relay *single channel* dengan kontrol menggunakan *optocoupler*. Relay *single channel* ini memiliki input yang terhubung ke LED indikator untuk menunjukkan status aktif. Input ini mengendalikan *optocoupler*, yang berfungsi sebagai isolasi antara sinyal input dan rangkaian utama. Saat input aktif, optocoupler menyalakan transistor NPN yang bertindak sebagai saklar untuk mengaktifkan relay. Relay kemudian mengendalikan beban yang terhubung pada outputnya. Dioda pelindung dipasang pada kumparan relay untuk mencegah kerusakan akibat tegangan balik. Rangkaian ini juga dilengkapi dengan resistor untuk membatasi arus pada LED dan transistor.

2.6 Thermistor

Thermistor merupakan salah satu jenis resistor yang memiliki nilai resistansi atau hambatannya dipengaruhi oleh suhu. Thermistor merupakan sebuah singkatan dari Thermal Resistor yang dimana resistor berarti sebuah tahanan sedangkan thermal berarti panas. Resistor sendiri pun memiliki 2 jenis yaitu ada Thermistor PTS (*Positive Temperature Coefficient*) ada juga Thermistor NTC

(*Negative Temperature Coefficient*). Pada pembuatan alat ini akan menggunakan Thermistor dengan tipe NTC dengan resistansi 100K [13].



Gambar 2.6 Thermistor

2.7 *Hot-End*

Hot end ialah sebuah komponen pada mesin 3D printer yang dimana memiliki fungsi untuk melelehkan filamen agar dapat mudah dibentuk menjadi suatu objek maupun produk. *Hot end* bekerja dengan mengeroll filamen yang masih berbentuk padat dan pada saat mengenai hot end yang bersuhu cukup panas, maka akan melelehkan filamen lalu akan disalurkan melalui *nozzle* [13].



Gambar 2.7 Hot end

Tabel 2.2 Spesifikasi Hot end

Komponen	Spesifikasi
Voltage	12 V
Power	40 W
Lead Material	Stainless Steel

2.8 *Stepdown* LM2596

Modul LM2596 DC-DC *Stepdown* ialah sebuah regulator yang memiliki fungsi untuk menurunkan tegangan DC ke DC dengan pengaturan yang fleksibel. Modul tersebut dapat menerima tegangan input berkisaran 4V hingga 40V, Tegangan output yang dapat dihasilkan disesuaikan berkisaran antara 1,23V hingga 35V. Arus maksimum yang dapat diterima oleh modul ini mencapai 2A serta juga dilengkapi dengan fitur proteksi berupa pembatasan arus jika terjadinya short. [14]



Gambar 2.8 LM2596 Stepdown Module

2.9 Motor Stepper NEMA 17

Motor stepper NEMA 17 merupakan motor DC yang dapat dikendalikan dengan menggunakan pulsa digital. Motor stepper ini memiliki rotor dan stator yang dilengkapi dengan kumparan membentuk *electromagnet*. Cara kerja pada motor stepper ini mirip dengan interaksi magnet yang dimana setiap ujungnya memiliki kutub yang berbeda. Jika pada kutub stator (*electromagnet*) dan kutub pada rotor (magnet permanen) maka keduanya akan saling tolak menolak dan menyebabkan rotor berputar. Perputaran ini bisa bergerak searah jarum jam maupun berlawanan jarum jam karena bergantung pada kutub yang terbentuk. Pulsa-pulsa digital yang dikirimkan akan diterjemahkan oleh motor stepper seperti yang ada di Gambar 2.9 menjadi *step* (Gerakan Langkah), sesuai dengan urutan kombinasi pulsa yang diterima [15].



Gambar 2.9 Motor Stepper NEMA 17

Tabel 2.3 Spesifikasi Motor Stepper NEMA 17

Komponen	Spesifikasi
Tipe Motor	NEMA 17 17HS4401
Tegangan kerja	12 V
Arus maksimum	1.5 A
<i>Holding torque</i>	0.4 Nm

Motor stepper tidak hanya menghasilkan gerakan rotasi presisi, tetapi juga diaplikasikan secara langsung dalam sistem mekanik, seperti penggulung filamen. Dalam implementasinya, motor dihubungkan ke poros spool melalui sistem gear untuk meningkatkan torsi output. Agar torsi yang dihasilkan oleh motor dapat ditransmisikan secara optimal, digunakan analisis mekanik berdasarkan perhitungan rasio gear, torsi output, dan gaya tarik.

Rasio gear adalah perbandingan antara jumlah gigi roda gigi yang lebih besar terhadap yang lebih kecil, dihitung dengan rumus:

$$R = \frac{N_{gear\ besar}}{N_{gear\ kecil}} \quad (2.1)$$

Jika sistem menggunakan lebih dari satu tahapan gear, maka rasio totalnya adalah:

$$R_{total} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \quad (2.2)$$

Torsi output yang diterima oleh poros akhir atau spool dapat dihitung dengan:

$$T_{output} = T_{dinamis} \times R_{total} \quad (2.3)$$

Untuk mendapatkan gaya tarik linier pada permukaan spool, digunakan rumus:

$$F = \frac{T_{output}}{r} \quad (2.4)$$

Keterangan:

- F : gaya linier (N)
- T_{output} : torsi akhir (Nm)
- r : jari-jari spool (m)

Gaya tarik kemudian dikonversi ke satuan kilogram menggunakan:

$$F_{kg} = \frac{F}{g} \quad (2.5)$$

dengan $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Perhitungan ini penting untuk memastikan gaya tarik yang dihasilkan cukup untuk menarik filamen hasil ekstrusi dari *hot-end*.

2.10 Driver Motor A4988

Driver A4988 dipilih sebagai driver motor dalam desain ini karena menawarkan efisiensi dan kemudahan dalam penggunaan bersama Arduino. Modul ini hanya memerlukan dua pin input utama, yaitu DIR untuk menentukan arah putaran motor (searah jarum jam atau berlawanan), dan STEP untuk mengontrol kecepatan rotasi melalui pengiriman sinyal *HIGH* dan *LOW* secara bergantian. Hal ini mengurangi jumlah pin yang dibutuhkan pada Arduino, yang sangat praktis mengingat motor stepper bipolar memiliki empat kabel.

Di samping itu, IC A4988 dilengkapi dengan fitur *microstepping* yang memungkinkan motor stepper bergerak lebih halus dan dengan tingkat presisi yang lebih tinggi, membuatnya ideal untuk aplikasi yang memerlukan ketepatan, seperti mesin CNC atau 3D printer. Fitur perlindungan terhadap arus berlebih, panas berlebih, dan hubungan singkat juga menjadikan IC A4988 andal dan aman untuk digunakan, memastikan motor dapat beroperasi dalam kondisi yang optimal tanpa risiko kerusakan [15].



Gambar 2.10 Driver Motor A4988

Setiap driver A4988 dilengkapi trimpot pengatur tegangan referensi (V_{ref}) yang berfungsi untuk mengatur arus maksimal yang dialirkan ke motor. Arus ini perlu dihitung untuk memastikan tidak melebihi spesifikasi motor stepper. Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{8 \times R_{sense}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

- I_{max} : arus maksimum motor (A)
- V_{ref} : tegangan referensi dari trimpot A4988 (V)
- R_{sense} : nilai resistor sense pada driver (Ω)

Setelah diketahui arus aktual yang dapat mengalir ke motor, torsi dinamis ($T_{dinamis}$) motor dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T_{dinamis} = \left(\frac{I_{aktual}}{I_{maks}} \right) \times T_{maks} \quad (2.7)$$

Keterangan:

- $T_{dinamis}$: torsi motor yang sesungguhnya terjadi (Nm)
- I_{aktual} : arus yang diberikan ke motor (A)
- I_{maks} : arus maksimum sesuai spesifikasi motor (A)
- T_{maks} : torsi maksimum dari datasheet motor (Nm)

Nilai torsi dinamis inilah yang nantinya menjadi dasar dalam menghitung gaya Tarik sistem mekanik pada penggulung filamen.

2.11 Power Supply

Power supply merupakan suatu perangkat yang bertugas untuk dapat menyediakan tegangan langsung pada komponen *Electronic Data Process* (EDP) di dalam casing yang dimana memerlukan daya seperti *receiver*, *transmitter*, dan juga perangkat lainnya. *Power supply* sendiri menerima input berupa arus AC 220 volt yang dimana akan diubah menjadi arus DC 12 volt. Pada proses ini akan melibatkan pengubahan arus bolak-balik (AC) menjadi arus Listrik searah (DC). [16].



Gambar 2.11 Power Supply 12V 8.3A

2.12 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik HC-SR04 adalah salah satu jenis sensor jarak non-kontak yang sangat populer dan banyak digunakan dalam berbagai proyek otomasi, robotika, serta sistem deteksi objek. Sensor ini bekerja dengan prinsip gelombang ultrasonik, yaitu gelombang suara berfrekuensi tinggi yang tidak dapat didengar oleh telinga manusia (sekitar 40 kHz). Saat bekerja, sensor akan memancarkan gelombang ultrasonik dari komponen transmitter, yang kemudian akan memantul jika mengenai suatu objek di depannya. Pantulan ini ditangkap kembali oleh receiver, dan selanjutnya mikrokontroler akan menghitung waktu tempuh sinyal tersebut untuk menentukan jarak antara sensor dan objek. Rumus yang digunakan untuk perhitungan jarak adalah:

$$Jarak (cm) = \frac{Waktu\ tempuh\ (\mu s) \times 0.0343}{2} \quad (2.8)$$

Di mana 0.0343 cm/ μ s merupakan kecepatan gelombang suara di udara (343 m/s), dan pembagian 2 dilakukan karena gelombang harus pergi dan kembali (pulang-pergi).

Secara fisik, HC-SR04 memiliki empat pin: VCC sebagai input daya 5V DC, Trig sebagai pin kendali untuk memulai pengukuran, Echo sebagai pin output yang mengirimkan durasi pulsa pantulan ke mikrokontroler, dan GND sebagai *ground*. Sensor ini mampu mengukur jarak dengan akurasi ± 3 mm, dalam rentang antara 2 cm hingga 400 cm, dan memiliki sudut deteksi sekitar 15 derajat. Waktu responnya juga sangat cepat, hanya kurang dari 50 ms, membuatnya sangat ideal untuk aplikasi real-time seperti penghindar rintangan pada robot, sistem parkir otomatis, atau kontrol keamanan berbasis deteksi gerak. Kelebihan lainnya adalah harga yang

murah, kemudahan integrasi dengan Arduino atau mikrokontroler lain, serta konsumsi daya yang rendah sekitar 15 mA. Namun demikian, HC-SR04 sensitif terhadap permukaan yang tidak rata atau menyerap suara, sehingga dalam implementasinya perlu ditempatkan pada posisi strategis agar pembacaan lebih akurat dan stabil [19], [20], [21].



Gambar 2.12 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor Ultrasonik HC-SR04

Spesifikasi	Nilai
<i>Working Voltage</i>	DC 5V
<i>Working Current</i>	15mA
<i>Working Frequency</i>	40Hz
<i>Min Range</i>	2cm
<i>Max Range</i>	4m
<i>Dimension</i>	45x20x15mm

2.13 Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID)

Sistem kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan salah satu metode pengendalian paling umum dan efektif yang digunakan dalam bidang sistem otomasi dan kendali proses. PID bekerja berdasarkan prinsip kontrol umpan balik tertutup (*closed-loop control*), yaitu dengan memonitor secara terus-menerus selisih antara nilai keluaran sistem atau *process variable* (PV) dengan nilai target atau *setpoint* (SP). Selisih ini dikenal sebagai *error*, dan digunakan oleh

pengendali PID untuk menghasilkan sinyal kendali (*control signal*) yang diarahkan ke aktuator agar nilai keluaran sistem tetap berada mendekati nilai *setpoint*. PID diterapkan secara luas dalam aplikasi pengaturan suhu, kecepatan motor, tekanan, ketinggian fluida, dan lain sebagainya [17].

Kunci keberhasilan dari sistem kontrol PID terletak pada gabungan dari tiga aksi kendali: proportional (P), integral (I), dan derivative (D). Aksi proportional menghasilkan sinyal kendali yang sebanding langsung dengan besarnya error pada saat itu. Jika error besar, maka aksi proporsional memberikan koreksi besar pula. Parameter yang mengatur seberapa besar reaksi ini disebut K_p (konstanta proporsional). Aksi ini berguna untuk mempercepat respon sistem (mengurangi *rise time*), namun tidak cukup untuk menghilangkan *steady-state error* atau error jangka panjang. Oleh karena itu ditambahkan aksi integral, yang menghitung akumulasi error dari waktu ke waktu, sehingga kesalahan yang kecil namun terus-menerus dapat dikoreksi. Konstanta yang digunakan adalah K_i , yang harus disetel dengan hati-hati karena nilai K_i yang terlalu besar bisa menyebabkan *overshoot* dan osilasi berlebihan [18].

Aksi terakhir yaitu derivative, bertugas untuk memperkirakan kecepatan perubahan error. Aksi ini bekerja dengan cara menghitung turunan pertama dari error terhadap waktu. Fungsi utamanya adalah untuk menahan atau memperlambat respon sistem agar tidak terlalu agresif. Konstanta K_d digunakan untuk menentukan sensitivitas aksi derivatif. K_d yang tepat akan membantu sistem meredam overshoot dan meningkatkan stabilitas, terutama ketika terjadi gangguan mendadak. Kombinasi tiga parameter ini (K_p , K_i , dan K_d) akan menghasilkan respon sistem yang cepat, akurat, dan stabil jika disetel dengan benar.

Untuk memperoleh nilai parameter PID yang optimal, terdapat beberapa metode penyetelan (*tuning*) seperti manual tuning, Cohen-Coon, Ziegler–Nichols, dan software autotuning. Pada tugas akhir ini digunakan metode Ziegler–Nichols Closed-Loop karena sifatnya yang eksperimental dan cocok digunakan untuk sistem berbasis mikrokontroler seperti Arduino Mega, tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942, dan hingga saat ini masih banyak digunakan

karena kesederhanaannya dalam menghasilkan parameter PID awal yang cukup baik untuk sistem nyata [17].

Dalam metode Ziegler-Nichols Closed Loop, langkah awal yang dilakukan adalah menonaktifkan aksi integral dan derivatif ($K_i = 0$, $K_d = 0$), kemudian meningkatkan nilai K_p secara bertahap mulai dari kecil hingga sistem menunjukkan osilasi berkelanjutan (kontinu) — yaitu kondisi di mana sistem terus-menerus berosilasi tanpa membesar atau mengecil. Nilai K_p saat osilasi tersebut terjadi disebut sebagai *Ultimate Gain* (K_u), sedangkan periode waktu satu siklus osilasi disebut *Ultimate Period* (P_u). Kedua parameter ini digunakan untuk menghitung nilai K_p , K_i , dan K_d sesuai dengan rumus empiris berikut:

- Kontrol P saja:

$$K_p = 0.5 \times K_u \quad (2.9)$$

- Kontrol PI:

$$K_p = 0.45 \times K_u \quad (2.10)$$

$$K_i = \frac{1.2 \times K_p}{P_u} \quad (2.11)$$

- Kontrol PID:

$$K_p = 0.6 \times K_u \quad (2.12)$$

$$K_i = \frac{2 \times K_p}{P_u} \quad (2.13)$$

$$K_d = \frac{K_p \times P_u}{8} \quad (2.14)$$

Nilai-nilai ini digunakan sebagai acuan dasar tuning PID, yang selanjutnya dapat disesuaikan kembali secara manual (*fine tuning*) agar sesuai dengan karakteristik dinamis sistem yang sebenarnya.

Metode Ziegler-Nichols dikenal dapat menghasilkan respon sistem yang cepat dan relatif stabil, meskipun pada beberapa kasus dapat menghasilkan overshoot yang cukup tinggi. Oleh karena itu, setelah tuning awal dilakukan, biasanya diperlukan beberapa iterasi penyesuaian nilai agar sistem memiliki *settling time*, *rise time*, dan *steady-state error* yang sesuai dengan spesifikasi. Studi terdahulu dalam penerapan kontrol suhu berbasis Arduino menunjukkan bahwa metode ini memberikan respons yang baik dalam menjaga suhu tetap stabil meski terjadi fluktuasi input daya [22]. Hal serupa juga dibuktikan oleh penelitian lain

yang mengkaji efektivitas metode ini untuk pengendalian sudut motor DC berbasis PID pada sistem tertanam [23].

2.14 Sistem Orde Satu dan Parameter Waktu

Sistem termal seperti elemen pemanas pada alat daur ulang plastik umumnya dapat dimodelkan sebagai sistem orde satu. Karakteristik sistem ini mengikuti respons eksponensial yang dinyatakan dalam bentuk fungsi alih:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.15)$$

dengan τ sebagai konstanta waktu dan K sebagai gain sistem. Konstanta waktu (τ) merepresentasikan waktu yang dibutuhkan sistem mencapai 63% dari respons akhir. Untuk sistem orde satu, settling time (t_s) dapat dihitung secara mendekati dengan $t_s \approx 4\tau$ [24]

Karena respons termal berjalan lambat dan stabil, kontrol PID sangat sesuai diterapkan. Parameter τ dan t_s digunakan untuk mengevaluasi tuning PID dan memastikan sistem cepat mencapai suhu target dengan fluktuasi minimum.