

**PERANCANGAN DAN PENERAPAN SISTEM KENDALI KECEPATAN  
MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL  
DERIVATIVE* (PID) DENGAN ARDUINO UNO**

(Skripsi)

Oleh

**Deden Sudrajat  
2017041041**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2025**

## ABSTRAK

### PERANCANGAN DAN PENERAPAN SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* (PID) DENGAN ARDUINO UNO

Oleh

Deden Sudrajat

Penelitian mengenai perancangan dan penerapan sistem kendali kecepatan motor DC dengan menggunakan kendali *Proporsional Integral Derivatif* (PID) berbasisi Arduino Uno telah dilakukan. Data yang dikumpulkan pada penelitian ini meliputi pengukuran kecepatan sensor *optocoupler* motor DC dengan perubahan sinyal 50 hingga 150 PWM. Pada nilai PWM 50, sensor mencatat 344 pulsa per menit, sedangkan pada PWM 150, sensor mencatat nilai sensor sebesar 2853 pulsa per menit. Hal ini menunjukkan bahwa motor DC merespon dengan baik terhadap perubahan sinyal PWM, atau semakin tinggi nilai PWM maka semakin tinggi pula nilai sensornya. Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata total *error* pada kecepatan pengukuran sebesar 0,08%. Keakuratan sensor kecepatan dapat dihitung dengan menghitung tingkat kesalahan, dan rata-rata akurasi keseluruhan sensor adalah 99,92%. Nilai *error* yang dihasilkan masih kurang dari 10%, hal ini didukung dengan nilai presisi yang tinggi. Semakin kecil persentase *error* yang dihasilkan maka kinerja sensor akan semakin baik, begitu pula sebaliknya. Pengujian sistem dilakukan untuk menganalisis kinerja pengontrol PID pada perangkat yang dirancang untuk mencapai nilai  $K_p = 0,7$ ;  $K_i = 0,8$ ;  $K_d = 0,3$ . Sistem kontrol PID untuk motor DC dirancang dan diimplementasikan dengan baik untuk menghasilkan respon yang baik terhadap variasi *setpoint* dari 500 hingga 2600 rpm, menghasilkan waktu penyelesaian yang konstan.

**Kata kunci:** Sistem kendali, motor DC, PWM, PID.

## ABSTRACT

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DC MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM USING PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) METHOD WITH ARDUINO UNO

By

**Deden Sudrajat**

*Research on the design and implementation of a DC motor speed control system using Arduino Uno-based Proportional Integral Derivative (PID) control has been conducted. The data collected in this study include measurements of the speed of the DC motor optocoupler sensor with a signal change of 50 to 150 PWM. At a PWM value of 50, the sensor records 344 pulses per minute, while at PWM 150, the sensor records a sensor value of 2853 pulses per minute. This shows that the DC motor responds well to changes in the PWM signal, or the higher the PWM value, the higher the sensor value. The measurement results show an average total error in the measurement speed of 0,08%. The accuracy of the speed sensor can be calculated by calculating the error rate, and the average accuracy of the entire sensor is 99.92%. The resulting error value is still less than 10%, this is supported by a high precision value. The smaller the percentage of error generated, the better the performance of the sensor, and vice versa. System testing is carried out to analyze the performance of the PID controller on the designed device to achieve the value of  $K_p = 0,7$ ;  $K_i = 0,8$ ;  $K_d = 0,3$ . The PID control system for DC motor is well designed and implemented to produce good response to setpoint variation from 500 to 2600 rpm, resulting in constant settling time.*

**Keywords:** Control system, DC motor, PWM, PID.

**PERANCANGAN DAN PENERAPAN SISTEM KENDALI KECEPATAN  
MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL  
DERIVATIVE* (PID) DENGAN ARDUINO UNO**

**Oleh**

**Deden Sudrajat**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA SAINS**

**Pada**

**Jurusan Fisika**

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2025**

**Judul Skripsi** : Perancangan Dan Penerapan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative (Pid)* dengan Arduino Uno

**Nama Mahasiswa** : Deden Sudrgjat

**Nomor Pokok Mahasiswa** : 2017041041

**Jurusan** : Fisika

**Fakultas** : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

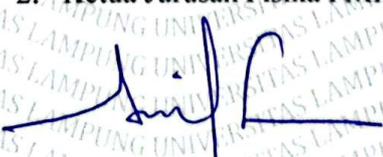
**Pembimbing I**

**Pembimbing II**

  
**Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**  
NIP. 198010102005011002

  
**Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197512192000122003

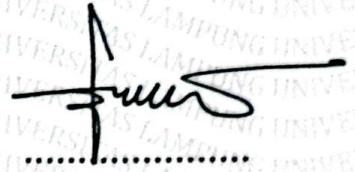
**2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA**

  
**Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.**  
NIP. 197109092000121001

**MENGESAHKAN**

1. **Tim Penguji**

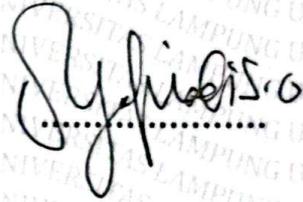
**Ketua : Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.** .....



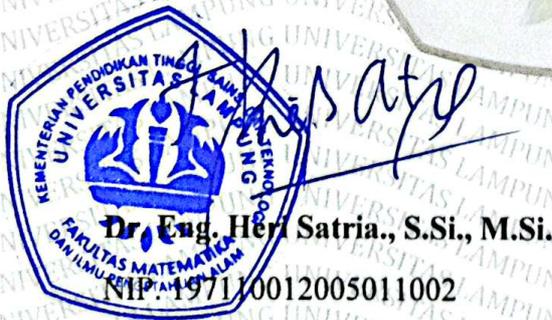
**Sekretaris : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.** .....



**Penguji Bukan Pembimbing : Drs. Syafriadi., M.Si.** .....



2. **Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Dr. Eng. Heri Satria., S.Si., M.Si.**  
NIP. 197110012005011002

**Tanggal Ujian Skripsi: 07 Februari 2025**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam skripsi ini tidak terdapat karya orang lain dan tidak terdapat pendapat atau karya yang ditulis oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar saya bersedia dikenai sanksi secara sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 07 Februari 2025

Penulis,



**Deden Sudrajat**

NPM. 2017041041

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Deden Sudrajat, dilahirkan di Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten pada tanggal 02 Juni 2002. Penulis merupakan anak bungsu dari pasangan Bapak (Alm) Dayong dan Ibu Suerah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN Cikentrung 2 pada tahun 2014, SMPN 1 Cadasari pada tahun 2017, SMAN 13 Pandeglang pada tahun 2020. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2020 melalui jalur SBMPTN. Penulis juga aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA UNILA sebagai anggota pengurus Bidang Saintek (Sains dan Teknologi) sebagai penanggung jawab terhadap program kerja Kajian Sains dan Teknologi (KASET) pada periode 2021. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium PLTS ITERA, dengan judul **“Analisis Pengaruh Iradiasi terhadap Daya Keluaran pada PLTS ITERA 1 MWP”**. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung pada tahun 2023 di Desa Joharan, Kecamatan Putra Rumbia, Kab. Lampung Tengah.

Penulis juga terlibat dalam kegiatan ilmiah sebagai peserta MBKM Penelitian Universitas Lampung pada tahun 2023 dengan topik mengenai **“Implementasi Energi Listrik Sel Galvanis Air Laut dengan Elektroda Tembaga Dilapisi Perak dan Zinc yang Dapat Diregenerasi sebagai Sumber Energi Terbarukan”**. Kemudian untuk tugas akhirnya penulis melakukan penelitian **“Perancangan dan Penerapan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) dengan Arduino Uno”** sebagai tugas akhir di Jurusan Fisika FMIPA UNILA.

## MOTTO

**Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan  
(QS. Al-Insyirah: 6)**

**Bacalah dengan nama Tuhanmu yang menciptakan. Dia telah  
menciptakan manusia dari segumpal darah. Bacalah, dan Tuhanmu  
Yang Maha Pemurah, yang mengajarkan dengan pena. Dia  
mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahui  
(QS. Al-Alaq: 1-5)**

**Barang siapa menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan  
memudahkan menuju Surga  
(Hadist Riwayat Muslim)**

***What I cannot Create, I do not Understand***

(Apa yang tidak bisa saya ciptakan, berarti saya tidak memahaminya)  
(Richard Feynman)

***Tetaplah berjuang demi mencapai tujuan***

(Deden Sudrajat)

## **PERSEMBAHAN**

**Dengan Penuh Rasa Syukur, cinta dan ridho Allah Subhanahu wa ta'ala dan  
Syafaat Nabi Muhammad SAW**

Karya ini dipersembahkan untuk kedua orang tuaku tercinta :

*(Alm) Bapak Dayong & Ibu Suerah*

Terima kasih untuk do'a, motivasi dan usaha yang selalu di berikan demi  
kesuksesan putranya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat  
Universitas sebagai Sarjana

*Kakak-Kakaku serta Keluarga Besar*

Terima kasih atas segala dukungan yang telah di berikan sehigga dapat tetap  
bertahan dalam keadaan suka maupun duka

*Keluarga Besar dan Teman-Teman Jurusan Fisika FMIPA*

*UNILA*

Atas kebersamaan dan dukungan selam perkuliahan

Serta Almamater Tercinta

*UNIVERSITAS LAMPUNG*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Perancangan dan Penerapan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative (PID)* Berbasis **Arduino Uno**”** yang merupakan syarat meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Energi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung dan juga untuk melatih mahasiswa untuk berfikir cerdas dalam penulisan karya ilmiah ini.

Pada penulisan skripsi ini, penulis menyadari adanya kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga sampai skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi pembaca umumnya. Aamiin

Bandar Lampung, 07 Februari 2025

**Deden Sudrajat**

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Perancangan dan Penerapan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC menggunakan Metode *Proportional Integral Derivative (PID)* dengan Arduino Uno”**. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis berterima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T sebagai Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan dorongan selama penyusunan skripsi ini.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti., S.Si., M.Si sebagai Dosen Pembimbing II, yang telah membantu, memberikan arahan, bimbingan dan saran penulis dalam menyusun skripsi ini
3. Bapak Drs. Syafriadi., M.Si sebagai Dosen Pembahas, yang telah memeberikan arahan kritikan, saran dan dukungannya selama penulis mengerjakan skrips ini.
4. Ibu Dra. Dwi Asmi., M.Si., Ph.D sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan arahan dan nasehat selama menjalani perkuliahan.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria., S.Si., M.Si sebagai ketua Dekan FMIPA UNILA.
6. Bapak Arif Surtono., S.Si., M.Si. M. Eng sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA UNILA.
7. Bapak dan Ibu Dosen serta Staff Jurusan Fisika FIMPA UNILA yang telah banyak memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama masa perkuliahan.

8. Orang Tua Penulis, khususnya Ibu Suerah yang telah memberikan semangat, motivasi, serta doa dan dukungan yang selalu terus diberikan kepada penulis.
9. Kakak-Kakak penulis yang telah memberikan semangat, dukungan serta doa kepada penulis.
10. Keluarga Besar penulis yang telah memberikan dukungan dan doa selama menjalani perkuliahan ini kepada penulis.
11. Sahabat dan teman-teman penulis Fauzi Rakhman, Elva Malinda, Sutiana, Aldi Isnur, dan Liza Rahmadany yang telah membantu dan memberi semangat dalam menemani suka dan duka penulis sampai bisa menyelesaikan skripsi ini.
12. Teman teman KBK Energi, rekan-rekan seperjuangan Fisika 2020 FMIPA UNILA yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis ucapkan banyak terima kasih kesemua berbagai pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga Allah SWT memberikan imbalan balasan seluruh kebaikan atas bantuan semua pihak dan semoga Allah SWT selalu mempermudah semua urusannya dalam membantu penulis menyelesaikan skripsi ini

Bandar Lampung, 07 Februari 2025

**Deden Sudrajat**

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iv
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>PERNYATAAN</b> .....	vi
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vii
<b>MOTTO</b> .....	viii
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	x
<b>SANWACANA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	ix
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5

2.1	Penelitian Terkait .....	5
2.2	Motor DC .....	8
2.3	Sistem Kontrol .....	10
2.4	Prinsip Kerja Motor DC .....	13
2.5	Konstruksi Motor DC .....	16
2.6	<i>Proportional, Integral dan Derivative (PID)</i> .....	17
2.7	Sepeda Listrik .....	23
2.8	Arduino Uno .....	26
2.9	Sensor Kecepatan <i>Optocoupler</i> .....	28
2.10	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i> .....	30
2.11	Penerapan Sistem Kendali Motor DC .....	31
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....		33
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian .....	33
3.2	Alat dan Bahan .....	33
3.3	Prosedur Penelitian .....	34
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		41
4.1	Rancangan Sistem Kendali .....	41
4.2	Kinerja Sistem Kendali Kecepatan Motor DC .....	43
4.2.1	Kalibrasi dan Penujian Sensor <i>Optocoupler</i> .....	43
4.2.2	Pengujian Sistem Kontrol tanpa PID dan Kontrol PID pada Variasi Setpoint .....	48
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN</b> .....		59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		60
<b>LAMPIRAN</b> .....		64

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Bentuk dan Simbol Motor DC .....	9
<b>Gambar 2. 2</b> Sistem Kontrol Terbuka dan Tertutup .....	12
<b>Gambar 2. 3</b> Prinsip Kerja Motor DC.....	14
<b>Gambar 2. 4</b> Kaidah Tangan Kanan Gaya Lorentz. ....	15
<b>Gambar 2. 5</b> Diagram Blok Kontrol PID.....	18
<b>Gambar 2. 6</b> Tanggapan Unit Step .....	19
<b>Gambar 2. 7</b> Kurva Respon Bentuk S .....	19
<b>Gambar 2. 8</b> Sistem Loop Tertutup dengan Pengontrol Proporsional.....	20
<b>Gambar 2. 9</b> Osilasi berkelanjutan dengan periode <i>pcr</i> .....	20
<b>Gambar 2. 10</b> Kurva Spesifikasi Respon Transien.....	22
<b>Gambar 2. 11</b> (a) Sepeda listrik jenis <i>pedelec</i> (b) Sepeda listrik jenis <i>throttle</i> .	25
<b>Gambar 2. 12</b> Arduino Uno. ....	27
<b>Gambar 2. 13</b> (a) Rangkaian dasar <i>Optocoupler</i> (b) Bentuk Fisik <i>Optocoupler</i> .	29
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....	35
<b>Gambar 3. 2</b> Diagram Blok Sistem Kontrol .....	36
<b>Gambar 3. 3</b> Blok Diagram Loop Tertutup PID.....	36
<b>Gambar 3. 4</b> Skema Alat Kontrol Motor DC .....	37
<b>Gambar 3. 5</b> Rancangan Hasil Pengujian Sensor Kecepatan .....	38
<b>Gambar 4. 1</b> Rangkain Prototipe Sistem Kendali bagian Luar.....	41
<b>Gambar 4. 2</b> Rangkaian Bagian dalam .....	42
<b>Gambar 4. 3</b> Grafik Hubungan Hasil Pengujian PWM dengan Sensor <i>Optocoupler</i> .....	45
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik Hubungan Hasil Pengujian <i>Tachometer</i> dengan Sensor <i>Optocoupler</i> .....	47
<b>Gambar 4. 5</b> Kontrol tanpa menggunakan PID .....	48

<b>Gambar 4. 6</b> <i>Tunning</i> Awal PID (a) osilasi yang buruk (b) osilasi yang baik ....	51
<b>Gambar 4. 7</b> Respon Motor DC pada Awal <i>Tunning</i> PID.....	52
<b>Gambar 4. 8</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 500 .....	53
<b>Gambar 4. 9</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 800 .....	54
<b>Gambar 4. 10</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 1100 .....	54
<b>Gambar 4. 11</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 1400 .....	55
<b>Gambar 4. 12</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 1700 .....	55
<b>Gambar 4. 13</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 2000 .....	56
<b>Gambar 4. 14</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 2300 .....	56
<b>Gambar 4. 15</b> Pengujian Respon Kecepatan Motor DC dengan Variasi <i>Setpoint</i> 2600 .....	57

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Parameter <i>Tunning</i> metode pertama Zigler-Nichols .....	20
<b>Tabel 2. 2</b> Parameter <i>Tunning</i> metode kedua Zigler-Nichols.....	21
<b>Tabel 3. 1</b> Jadwal Kegiatan Penelitian .....	33
<b>Tabel 3. 2</b> Alat .....	33
<b>Tabel 3. 3</b> Bahan.....	34
<b>Tabel 3. 4</b> Data Pengujian dan Kalibrasi Sensor kecepatan motor DC .....	37
<b>Tabel 3. 5</b> Data Hasil Pengujian dan Perhitungan Kecepatan Sensor .....	39
<b>Tabel 3. 6</b> Hasil <i>Tunning</i> PID.....	39
<b>Tabel 3. 7</b> Hasil Data Respons Kecepatan Motor DC .....	40
<b>Tabel 4. 1</b> Data Pengujian dan Kalibrasi Sensor Kecepatan Motor DC.....	44
<b>Tabel 4. 2</b> Data Hasil Pengujian dan Perhitungan Kecepatan Sensor .....	46
<b>Tabel 4. 3</b> Respon Kecepatan Motor DC pada tiap <i>Setpoint</i> .....	53
<b>Tabel 4. 4</b> Data Hasil Pengujian Respon Kecepatan Motor DC.....	58

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, transportasi terus berkembang pesat, perkembangan ini telah menghasilkan sebuah alat transportasi dengan menggunakan motor listrik maupun sepeda listrik sebagai penggerak utamanya (Papafotiou *et al.*, 2014). Hal ini bisa dilihat dari banyaknya kendaraan modern dan praktis yang tersedia untuk digunakan. Salah satu kasusnya adalah sepeda listrik. Sepeda listrik adalah kendaraan yang memiliki dua buah roda yang salah satu rodanya digerakan dengan motor listrik dan pedal. Jika mesin motor tidak menyala, bisa digunakan dengan cara mengayuh pedal seperti sepeda biasa. Ketika motor listrik dinyalakan sepeda dapat berjalan hanya dengan menarik *throttle* gas pada setang sepeda. Jika *throttle* gas ditarik, sepeda akan bergerak dengan kecepatan yang diinginkan (Tianur *et al.*, 2023).

Motor listrik mampu mengubah energi menjadi energi mekanik elektromagnetik, sehingga motor listrik menjadi penggerak dalam sistem transportasi yang ramah lingkungan. Motor listrik arus searah (DC) memiliki kemampuan untuk menghasilkan torsi besar dan dengan mudah mengatur kecepatannya, tetapi karena menggunakan sikat dan komutator. Motor ini memerlukan perawatan secara teratur tidak seperti motor AC tidak memerlukan perawatan. Aplikasi motor listrik dalam sistem transportasi harus memiliki torsi yang besar dan dapat diatur kecepatannya dengan mudah (Riyadi, 2018).

Sepeda listrik kini banyak tersedia di pasar Indonesia. Rata-rata motor listrik yang dijual saat ini tidak memiliki integrasi gawai, sehingga tidak bisa dipantau atau dikendalikan dari jarak jauh. Sepeda listrik komersial dapat beroperasi dalam

mode manual. Pedal seperti sepeda biasa, menggunakan motor listrik sebagai penggerakannya. Potensi target pasar sepeda listrik adalah anak-anak sekolah. Sistem pemantauan jarak jauh ini memungkinkan orang tua memantau lokasi anaknya, memantau kecepatan sepeda yang digunakan anaknya, dan mengontrol kecepatan tertinggi sepeda dari jarak jauh. Bersepeda merupakan bagian dari gaya hidup sehat bagi orang dewasa. Salah satu tujuan bersepeda saya adalah membakar kalori. Saat ini sepeda listrik yang ada di pasaran tidak dapat menampilkan kalori yang terbakar saat menggunakan sepeda. Solusi yang digunakan adalah dengan menggunakan aplikasi pihak ketiga (Cahyono *et al.*, 2022).

Sepeda listrik telah diketahui dikalangan masyarakat dan telah menyadari dampak negatif penggunaan mesin berbahan bakar fosil dan mulai menganjurkan penggunaan sepeda. Sepeda tidak hanya memberikan dampak positif bagi kesehatan penggunanya terutama melalui olah raga, namun juga tidak menimbulkan polusi. Saat ini banyak kelompok pecinta sepeda yang tersebar di berbagai kota di Indonesia kerap berkumpul untuk melakukan kampanye menyerukan penggunaan alat transportasi sehat tersebut. Mulai dari sepeda jadoel Onthel (lama) hingga penggemar sepeda modern yang sangat mahal. Beberapa pemerintah daerah juga telah mengumumkan kebijakan untuk mendukung bersepeda guna mengurangi polusi udara, yang sudah merupakan hal yang serius. Sepeda listrik juga menjadi alternatif pengganti sepeda manual. Bedanya, sepeda listrik menggunakan listrik yang dapat diisi ulang memakai baterai. Sepeda listrik tidak mengeluarkan suara dan tidak mengeluarkan asap karena menggunakan energi listrik (Taufani, 2021).

Ada banyak sistem kontrol yang dapat digunakan pada jenis kendaraan, untuk mendapatkan keseimbangan dan kestabilan pada kendaraan sepeda listrik diperlukan sebuah sistem kontrol PID (Dong *et al.*, 2015). Sistem pengendalian motor DC Pengontrol PID telah PID menjadi pengontrol populer untuk meningkatkan respons sistem kontrol *loop* tertutup karena menawarkan kinerja yang jelas dan sederhana serta kemudahan implementasi dan penggunaan. Salah satu peran penting pengontrol PID terlihat jelas dalam penerapannya pada motor

arus searah (DC). Masalah utama dengan motor DC adalah untuk mengontrol dan menstabilkan kecepatan sudut, yaitu kecepatan motor DC, dalam nilai referensi, namun dalam beberapa kasus mungkin terdapat kelemahan karena beban, yang dapat mempengaruhi perlambatan rotasi. Hal ini dapat memperlambat kecepatan tidak dijaga secara konstan. Lambatnya motor DC juga dipengaruhi oleh tingkat tegangan masukan. Jika ingin meningkatkan kecepatan motor DC dapat dilakukan pula dengan menaikkan nilai masukan tegangannya pada motor DC agar kecepatan motor DC stabil. Masalah pengendalian kecepatan motor DC ini dapat diatasi dengan menerapkan pengendali dengan beberapa metode seperti pengendali PID agar dapat mencapai kestabilan dan memperbaiki respon sistem yang diinginkan. Pengendali PID ini memiliki 3 parameter, yaitu parameter kontrol *Proportional* (P), parameter kontrol *Integral* (I), dan parameter kontrol *Derivative* (D). Masing-masing parameter tersebut memiliki keunggulan tertentu (Putera *et al.*, 2022).

Berdasarkan penjelasan di atas, mendorong penulis untuk membuat sistem kontrol PID motor DC untuk mengetahui kinerja sistem dalam pengaturan kecepatan motor DC termasuk waktu penyelesaian, akurasi dan kestabilan. Dalam penelitian ini akan dibuat sebuah sistem kontrol PID motor DC yang dapat meningkatkan kinerja motor DC pada sepeda listrik dengan mengatur variabel-variabel kontrol seperti kecepatan, dengan menggunakan algoritma PID. Penelitian ini berfokus pada parameter optimal untuk pengaturan PID guna meningkatkan respons waktu dan mengurangi kondisi yang melampaui set point. Metode simulasi digunakan untuk menguji kinerja sistem kontrol yang diusulkan, dengan tujuan akhir untuk merancang dan mengimplementasikan cara sistem pengaturan kecepatan menggunakan kontrol PID motor DC.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan dan penerapan sistem kendali menggunakan kontrol PID untuk motor DC sehingga dapat menghasilkan respon sesuai dengan *setpoint* yang ditentukan?

2. Bagaimana kinerja sistem dalam pengaturan kecepatan motor DC termasuk waktu penyelesaian, lonjakan dan kesalahan keadaan tunak?

### **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis Motor DC yang digunakan pada penelitian ini adalah Motor DC type MY1016.
2. Implementasi sistem kontrol pada motor DC.
3. Penelitian ini hanya mempertimbangkan penggunaan motor DC sebagai mesin penggerak utama pada sepeda.
4. Penelitian ini hanya membatasi penggunaan logaritma kontrol PID .
5. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode PID.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui rancangan dan penerapan sistem kendali menggunakan kontrol PID untuk motor DC sehingga dapat menghasilkan respon sesuai dengan *setpoint* yang ditentukan.
2. Mengetahui kinerja sistem dalam pengaturan kecepatan motor DC termasuk waktu penyelesaian, lonjakan dan kesalahan keadaan tunak.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai sistem kontrol PID pada motor DC.
2. Memberikan informasi mengenai implementasi sitem pengaturan kecepatan motor DC menggunakan metode PID.
3. Memberikan pemahaman dalam meningkatkan respons yang cepat dan akurat pada perubahan kecepatan motor DC.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terkait

Menurut Kunchahyo (2024) Motor DC merupakan suatu alat yang dapat mengubah energi listrik DC menjadi energi mekanik. Penerapan engine ini disesuaikan dengan kebutuhan. Salah satu fungsinya adalah digunakan untuk menenagai beban DC seperti aplikasi daya rendah dan cocok digunakan pada kecepatan daya rendah hingga sedang. Kecepatan motor ini harus dikontrol hingga mencapai kecepatan yang dibutuhkan untuk memudahkan penelitian. Salah satunya dengan mengontrol nilai PWM (*Pulse Wide Modulation*) saat mengoperasikan alat. Untuk mencapai kinerja yang konstan, penelitian ini menggunakan pengontrol PID dan Arduino sebagai sistem kontrolnya. Setelah melakukan lima kali percobaan dengan menggunakan kedua metode tersebut, diperoleh hasil yang signifikan dengan mengkaji respon dinamis yang terdapat pada perangkat lunak Matlab. Berdasarkan pengujian performa dengan variabel PID *overshoot*, *steady state error*, dan *settling time* diperoleh hasil yang lebih rendah dibandingkan jika digunakan tanpa PID. Kontrol PID membuat kecepatan motor DC lebih konstan. Metode Ziegler-Nichols untuk menentukan parameter kontrol PID diawali dengan memberikan input *setpoint* sebesar 1000 sebagai langkah awal untuk mendapatkan parameter  $K_c$  dan  $L_c$  untuk menentukan nilai  $K_p$ ,  $K_d$  dan  $K_i$ . Diperoleh nilai  $K_p= 0,0048$ ;  $K_i= 0,0181$ .

Menurut Rosalina *et al.*, (2017) dengan penelitian mengenai motor DC. Motor DC sering digunakan pada pemakaian yang memerlukan rentang kecepatan yang lebar. Selain itu, motor DC juga mempunyai kekurangan yaitu dalam hal pengaturan kecepatan dan besarnya saat putaran awal. Oleh karena itu untuk menekan tingginya telah melebihi pada putaran awal motor dan perlu dilakukan

pengaturan sehingga kecepatan motor sesuai dengan set poin yang diinginkan dengan risetime yang tinggi dan telah melampaui yang lebih kecil. PID merupakan salah satu kontroler untuk mengatur kecepatan motor. Kontrol PID mempunyai kelebihan-kelebihan tertentu untuk mengatur putaran motor yaitu kontrol proporsional mempunyai kelebihan waktu naik yang cepat, kontrol integral mempunyai kelebihan untuk memperkecil kesalahan dan kontrol *derivative* mempunyai kelebihan untuk meredam target yang melampaui atau tidak mencapai sasaran. Untuk itu agar dapat menghasilkan output dengan durasi yang tinggi dan kesalahan yang kecil kita dapat menggabungkan ketiga kontrol tersebut.

Menurut hasil dari penelitian ini didapat hasil respon keluaran Kontrol *Proportional Integral* (PI) maupun PID cukup baik karena kendali PI membutuhkan waktu naik sebesar 0,0069 detik, waktu respons sebesar 0,7314 detik, dan waktu puncak sebesar 0,0347 detik. Sedangkan kendali PID membutuhkan Waktu naik 0,0974 detik, waktu penyelesaian sebesar 0,5963, waktu puncak sebesar 0,1914 detik. Namun kendali PI membutuhkan waktu stabil yang lebih lama yaitu sebesar 2,3 detik. Pengujian menggunakan *open loop*, kendali PI maupun PID menunjukkan bahwa sistem bersifat stabil karena semua bagian nyata dari akar-akar persamaan bernilai negatif.

Pada penelitian Putra *et al.*, (2019) dalam perancangan dan pembuatan sistem penggerak sepeda listrik, digunakan beberapa komponen pendukung untuk mengkonversi energi kinetik dari gesekan roda ban menjadi energi listrik agar dapat digunakan motor sebagai sumber energi penggerak. Untuk menjalankan sepeda listrik, Menggunakan generator DC magnet permanent, BCR, *Charge* PLN, aki, *switching control*, motor DC Seri. Cara kerja dari sepeda listrik pemanfaatan generator DC magnet permanent sebagai sumber energi penggerak. Sepeda adalah kinetik yang dihasilkan dari roda ban membuat generator DC berputar sehingga mengkonversi dari energi gerak menjadi energi listrik. Kemudian dialirkan ke *Baterai Charge Regulator* (BCR), untuk menambah arus yang dipakai. Dalam mendukung penyediaan sumber energi listrik, pada sepeda listrik dipasangkan sambungan biaya dari energi listrik yang bersumber dari PLN,

Sebagai sumber energi alternatif pada sepeda listrik. Energi listrik yang telah dikonversi disimpan ditempat penampungan aki. Listrik yang disimpan di aki, disuplay ke motor, agar motor dapat berputar. Sebelum disuplay ke motor, ada berupa saklar untuk mengatur putaran motor.

Hasil penelitian sepeda listrik menggunakan generator DC magnet permanent 24 Volt dengan daya yang dihasilkan 29 Watt untuk mengkonversi energi kinetik dari putaran roda sepeda menjadi energi listrik. Media penyimpanan energi listrik pada sepeda listrik ini menggunakan 4 buah aki dengan tegangan masing-masing 12 Volt-7,1 Ah. Penulis berhasil merancang dan membuat sepeda listrik dengan sistem penggerak berupa motor DC seri 24 Volt, 350 watt, 14,4 ampere, 3000 rpm. Dari hasil pengujian sepeda listrik dan analisa data, didapatkan daya output untuk menggerakkan sepeda listrik dengan beban 80,6 kg = 316,6954 watt, beban 85,6 kg = 30,7732 watt, beban 90,6 kg = 294,5672 watt. Kecepatan maksimum sepeda tanpa beban adalah 78,53 m/s. Kecepatan rata-rata sepeda dengan beban 80,6 kg = 5,68 m/s, kecepatan sepeda dengan beban 85,6 kg = 5,13 m/s, kecepatan sepeda dengan beban 90,6 kg = 4,70 m/s.

Menurut penelitian Putera *et al.*, (2022) Pengendali PID banyak digunakan untuk memperbaiki respon sistem, karena menawarkan fungsionalitas yang jelas, sederhana, dan kemudahan penerapan serta penggunaan dalam penelitiannya tentang pengendalian kecepatan motord DC menggunakan PID dengan *encoder* sebagai *feedback* PID. Salah satu peranan penting pengendali PID dapat dilihat pengaplikasiannya untuk mengontrol dan menstabilkan kecepatan sudut dalam nilai referensi pada motor arus searah (DC). penelitian ini mengimplementasikan pengendali PID sebagai pengendali kecepatan motor DC sehingga dapat memahami karakteristik masing-masing parameter pengendali PID terhadap kurva respon sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa masing-masing parameter nilai PID memiliki karakteristik yang berbeda pula terhadap respon sistem. Misalnya menambahkan parameter  $K_p$  dapat mempengaruhi berkurangnya kesalahan pada kondisi stabil dan mengurangi waktu naik, namun dapat meningkatkan nilai yang telah melebihi target.

Sedangkan menambahkan parameter  $K_i$  dapat mempengaruhi meningkatnya overshoot, mengurangi waktu naik, dan mengurangi bahkan hampir menghilangkan nilai kesalahan pada kondisi stabil. Lalu, dengan menambahkan parameter  $K_d$  dapat mempengaruhi mengurangnya kelebihan pada *setpoint*, mengurangi waktu naik, dan meningkatkan target yang kurang. Respon sistem yang baik memiliki karakteristik nilai kesalahan pada kondisi stabil sekecil mungkin, nilai waktu naik sekecil mungkin, nilai melebihi batas yang tidak begitu besar, dan nilai waktu penstabilan yang kecil. Maka dari itu kendali PID dapat memperbaiki respon sistem tersebut, dengan catatan, mengetahui pengaruh masing-masing parameter  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  terhadap respon sistem jika diganti-ganti.

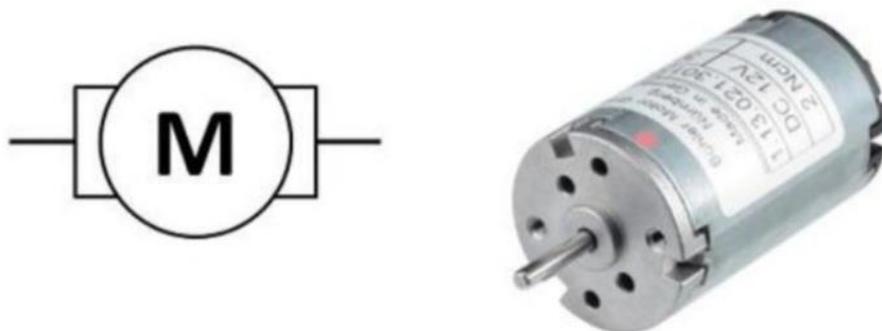
Adapun penelitian mengenai sistem kendali motor listrik dengan metode PID menurut Sipul *et al.*, (2019) penelitian ini merancang sepeda motor listrik dengan menggunakan motor DC. Dalam permasalahannya mengendalikan hentakan pada saat menambah kecepatan sepeda motor sehingga pengendara aman serta nyaman dalam menggunakannya. Dengan metode PID hentakan yang mengakibatkan dari penambahan kecepatan dapat dihilangkan. Hasil penelitian ini penggunaan pengontrolan PID pada motor listrik akan menjaga kestabilan kecepatan motor listrik. Dengan proses kendali parameter PID yang berfungsi untuk mengatur putaran motor BLDC (Brushless DC). Pengujian perubahan set point pada motor BLDC (Brushless DC) menggunakan Simulink matlab. Pada awal jumlah ampere yang dibutuhkan motor untuk menggerakkan roda adalah 18A-20A.

## **2.2 Motor DC**

Motor DC adalah perangkat elektronika yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor DC mengubah energi dengan mengambil daya listrik melalui arus searah yang diubah menjadi rotasi mekanis. Motor DC juga dikenal dengan sebutan motor listrik atau motor arus searah. DC motor dapat diartikan sebagai perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi gerak atau kinetik. Berikut ini adalah contoh atau penggunaan motor DC pada teknologi modern:

1. Aplikasi motor DC sebagai penggerak pintu geser pada otomatisasi sistem monitoring ruangan penyimpanan database menggunakan PLC.
2. Aplikasi penyearah *Thyristor* gelombang penuh satu phasa pada pengendalian arah putaran motor DC untuk membalik arah putaran ke kanan dan putaran ke kiri.
3. Aplikasi motor DC menggunakan *parallel port* dalam rangkaian robot sederhana yang dikendalikan menggunakan komputer dan *parallel port*.

Komponen motor DC terdiri dari *stator*, *armature*, rotor, dan komutator dengan sikat bentuk motor DC dapat diliha pada **Gambar 2.1**. Polaritas berlawanan antara dua medan magnet di dalam motor DC merupakan penyebab adanya perputaran. Komponen utama dari motor DC adalah winding atau lilitan, magnet, rotor, *brushles*, stator, dan sumber arus searah (arus DC). Jika *armature* ditempatkan pada medan magnet yang dihasilkan oleh magnet, *armature* diputar menggunakan arus searah dan akan menghasilkan gaya mekanik. Motor DC merupakan aktuator paling umum yang digunakan untuk menghasilkan gerakan terus-menerus dengan kecepatan putaran mudah dikontrol. Hal ini menjadikan motor DC sangat ideal untuk digunakan dalam aplikasi pengaturan kontrol kecepatan, kontrol tipe servo, dan *positioning*. Motor DC terdiri dari dua bagian penting, yaitu stator (bagian diam) dan rotor (bagian yang berputar). Kedua bagian penting motor ini menghasilkan tiga jenis motor DC, yaitu motor DC *brush*, motor DC *brushless*, dan motor DC *servo* (Daryanto, 2023).



**Gambar 2. 1** Bentuk dan Simbol Motor DC (Naim, 2021)

Motor listrik arus searah atau motor arus searah adalah suatu alat yang mengubah energi listrik menjadi energi kinetik atau gerak. Motor DC ini disebut juga motor DC. Seperti namanya, motor DC memiliki dua terminal dan memerlukan arus searah atau tegangan DC untuk menjalankan motor. Arus searah bersifat konstan dan tidak berubah terhadap waktu, sehingga selalu mempunyai nilai yang sama. Motor listrik DC biasanya digunakan pada peralatan elektronik dan listrik yang menggunakan daya DC, seperti *vibrator* ponsel, kipas DC, bor DC, penggerak robot, printer, peralatan mesin, proses penggulungan pabrik, serta industri kertas dan tekstil (Telaumbanua, 2021).

Motor DC adalah motor yang berputar dengan sudut 360 derajat atau *continously*. Motor DC, seperti namanya, motor DC memerlukan. suplai tegangan DC yang searah pada kumparan medan untuk diubah. menjadi energi mekanik. Semakin besar tegangan DC yang dihubungkan. ke motor DC maka semakin cepat pula putaran dari motor, tetapi ingat jangan terlalu banyak melebihi tegangan maksimal motor DC, jika hal itu terjadi maka spul pada rotor motor DC akan putus akibat terbakar. Saat ini kita akan mencoba untuk mengendalikan kecepatan putar motor DC menggunakan dua metode. Metode pertama adalah menggunakan potensiometer (*resistor variable*) dan metode kedua adalah dengan menggunakan sebuah *IC driver*, yaitu IC L928N (Fahmizal *et al.*, 2022).

Motor DC adalah jenis motor yang menggunakan tegangan searah (DC) yang secara otomatis akan berputar terus-menerus selama motor ini mendapatkan pasokan tegangan. Motor seperti ini biasa digunakan pada mainan yang menggunakan motor atau pada kipas angin DC. Tegangan yang digunakan untuk menggerakkan motor DC bervariasi. Sebagai contoh, terdapat motor DC yang dapat digerakkan dengan baterai 3V, tetapi ada pula yang memerlukan tegangan yang lebih tinggi (Kadir, 2016).

### **2.3 Sistem Kontrol**

Sistem kontrol adalah proses pengaturan/pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga atau dalam suatu kisaran tertentu (Pakpahan, 1994). Dari segi peralatan, sistem kontrol

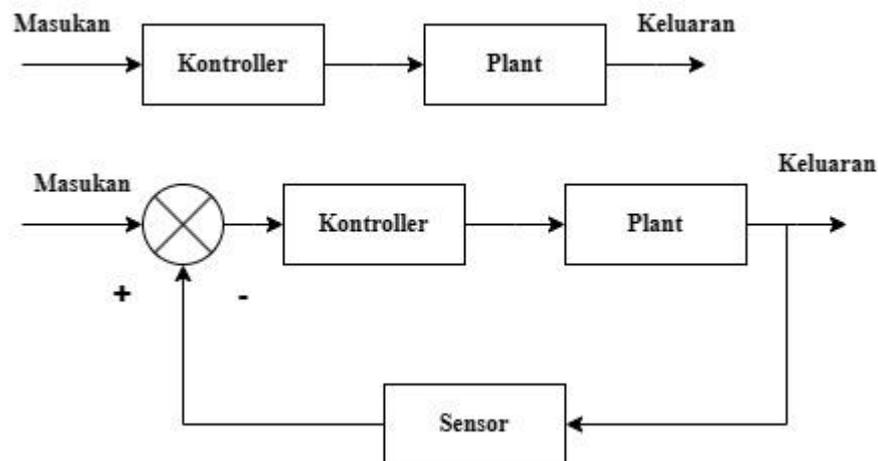
terdiri dari berbagai susunan komponen fisis yang digunakan untuk mengarahkan aliran energi ke suatu mesin atau proses agar dapat menghasilkan prestasi yang diinginkan. Tujuan dari sistem kontrol adalah untuk mendapatkan optimisasi pada fungsi-fungsi pengendalian, yaitu; (a) pengukuran, (b) perbandingan, (c) perhitungan, (d) koreksi. Secara umum sistem kontrol dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- a. Dengan operator (manual) dan otomatis
- b. Jaringan tertutup (closed-loop) dan jaringan terbuka (open-loop)
- c. Kontinyu (analog) dan diskontinyu (digital)
- d. Servo dan regulator
- e. Sumber penggerak; listrik, pneumatis, hidrolik dan mekanis

Pengontrolan secara manual adalah pengontrolan yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator, sedangkan pengontrolan secara otomatis dilakukan oleh mesin-mesin/peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya di bawah pengawasan manusia. Kemudian, sistem kontrol pada jaringan terbuka diindikasikan dengan tidak ada pengaruh/efek antara besaran keluaran dengan masukan, sehingga variabel yang dikontrol tidak dapat dibandingkan terhadap harga yang diinginkan. Sedangkan sistem kontrol pada jaringan tertutup, besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan, sehingga besaran yang dikontrol dapat dibandingkan dengan terhadap harga yang diinginkan melalui alat pencatat. Selanjutnya, perbedaan harga yang terjadi antara besaran yang dikontrol dan penunjukkan alat pencatat digunakan sebagai koreksi yang pada gilirannya akan merupakan sasaran pengontrolan (Sutiarso & Takigawa, 2020).

Sistem kontrol jaringan terbuka adalah sistem tanpa umpan balik, sebaliknya kontrol dengan jaringan tertutup menggunakan suatu tambahan pengukuran dari keluaran aktual untuk membandingkan respon keluaran yang diinginkan. Besaran keluaran yang disebut sinyal umpan balik digunakan untuk meminimumkan kesalahan kontrol (Dorf & Bishop, 1995). Secara teoritis, sistem kontrol umpan balik adalah suatu sistem kontrol yang memiliki tendensi untuk mempertahankan hubungan yang telah diatur dari satu variabel sistem dan lainnya dengan cara membandingkan fungsi-fungsi dari variabel-variabel tersebut. Sistem kontrol

umpan balik diintroduksi untuk mengatasi keterbatasan-keterbatasan yang ada pada sistem kontrol jaringan terbuka. Sistem kontrol terbuka telah diaplikasikan pada perancangan kontrol lintasan traktor tanpa operator, sistem kontrol terbuka dan tertutup bisa di lihat pada **Gambar 2.2** (Sutiarso *et al.*, 2001).



**Gambar 2. 2** Sistem Kontrol Terbuka dan Tertutup (Montoya *et al.*, 2023)

Sistem kontrol manual (kontrol loop terbuka) Sistem kendali manual proses penyesuaian dilakukan secara manual oleh operator dengan mengamati keluaran secara visual. Variabel kontrol kemudian dimodifikasi untuk mempertahankan hasil keluaran. Sistem kendalinya sendiri beroperasi dalam loop terbuka. Artinya sistem kendali tidak dapat melakukan modifikasi variabel untuk mempertahankan hasil keluarannya. Perubahan ini dilakukan secara manual oleh operator setelah mengamati hasil keluarannya dengan menggunakan alat ukur, display, atau sejenisnya. Sistem kendali otomatis (kontrol loop tertutup). Sistem kendali otomatis dapat secara otomatis memodifikasi variabel yang dikontrol karena setelah mengurangkan *setpoint*, loop kendali tertutup dibuat sebagai umpan balik dari keluaran ke masukan. Kontrol loop tertutup ini bersifat otomatis dalam sistem kontrol itu sendiri dan tidak memerlukan modifikasi operator terhadap variabel kontrol. Dengan cara ini, keluaran selalu dijaga dalam keadaan stabil sesuai dengan pengaturan yang ditentukan (Tupalessy *et al.*, 2017).

Adapun sistematis untuk menemukan fungsi alih kontrol *Close Loop* dapat dinyatakan pada **Persamaan 2.1**.

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (2.1)$$

Dengan  $G(s)$  adalah fungsi alih open loop dari motor DC dan  $H(s)$  adalah fungsi alih dari jalur umpan balik (pada kasus ini,  $H(s)=1$  untuk umpan balik. Maka memperhitungkan umpan balik akan persamaan fungsi alih close loop menjadi

**Persamaan 2.2:**

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (2.2)$$

Dengan  $G(s)$  adalah fungsi alih *open loop*, maka menjadi **Persamaan 2.3.**

$$G(s) = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (L_a B + R_a J) s + (R_a B + K_e K_t)} \quad (2.3)$$

Maka fungsi alih *close loop* didapat **Persamaan 2.4:**

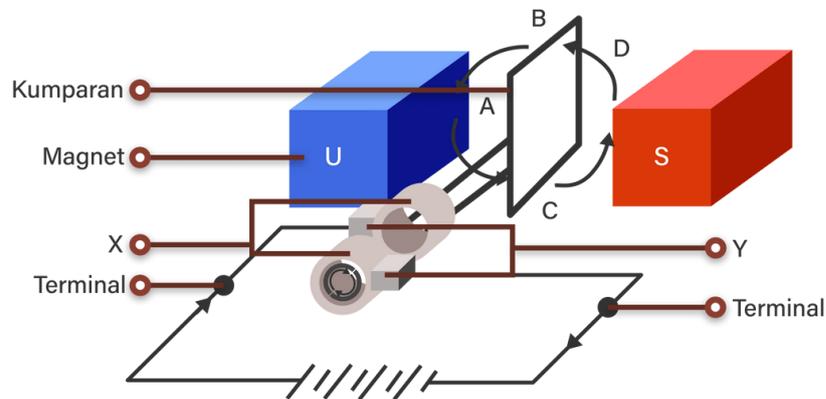
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)} \quad (2.4)$$

Dengan  $C(s)$  adalah fungsi alih pengontrol (PID) dan  $G(s)$  adalah fungsi alih *open loop* dari motor DC.

## 2.4 Prinsip Kerja Motor DC

Motor listrik DC atau motor DC menghasilkan putaran per menit yang biasa disebut dengan RPM (*Revolutions Per Minute*). Membalikkan polaritas listrik motor DC memungkinkan motor berputar searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam. Motor listrik DC tersedia dalam berbagai ukuran dan bentuk kecepatan. Kebanyakan motor listrik DC mencapai kecepatan putaran kurang lebih 3000 hingga 8000 rpm pada tegangan operasi 1,5 V hingga 24 V, namun jika tegangan yang diberikan pada motor listrik DC lebih rendah dari tegangan operasi maka motor DC akan berputar secara perlahan. Sebaliknya tegangan yang lebih tinggi dari tegangan operasi akan menyebabkan motor DC berputar lebih cepat. Namun jika tegangan yang diberikan pada motor DC turun di bawah 50% dari tegangan operasi yang ditentukan, maka motor DC tidak dapat lagi berputar atau berhenti. Sebaliknya, jika tegangan yang dialirkan ke motor DC lebih tinggi dari sekitar 30% tegangan operasi yang ditentukan, motor DC akan menjadi sangat panas dan akhirnya rusak. Ketika motor listrik DC berputar tanpa beban, maka hanya mengkonsumsi listrik atau daya yang sangat sedikit. Namun, ketika suatu beban diterapkan, konsumsi daya meningkat beberapa ratus persen, hingga

lebih dari 1000% (tergantung pada jenis beban yang diterapkan). Oleh karena itu, produsen motor DC biasanya menentukan arus mati untuk motor DC mereka. Arus *Stall* adalah arus pada saat poros motor berhenti akibat beban maksimum. Prinsip kerja motor DC dapat dilihat pada **Gambar 2.2** (Telaumbanua, 2021).



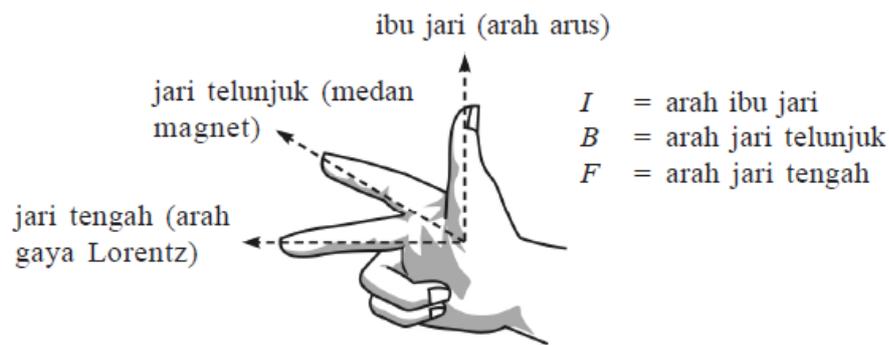
**Gambar 2. 3** Prinsip Kerja Motor DC (Telaumbanua, 2021)

Pada prinsipnya motor listrik DC beroperasi menggunakan fenomena elektromagnetik. Ketika arus mengalir melalui kumparan, sisi utara kumparan bergerak menuju kutub selatan magnet, dan kutub selatan kumparan mengarah ke kutub utara magnet. Pada saat ini, kutub N kumparan dan kutub S magnet, atau kutub S kumparan dan kutub N magnet, saling bersentuhan sehingga menimbulkan saling tarik menarik dan menghentikan pergerakan kumparan (Telaumbanua, 2021).

Prinsip kerja motor DC pertama adalah arus medan (DC) yang mengalir pada belitan medan akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet akan memotong belitan jangkar yang ada di rotor motor DC, kedua adalah rotor dialiri arus listrik. Karena belitan berarus listrik ini berada dalam pengaruh medan magnet, maka pada belitan akan timbul gaya magnet yang selanjutnya akan menimbulkan torsi; dan ketiga adalah jika torsi awal yang dihasilkan lebih besar daripada torsi beban, maka rotor akan berputar. Untuk menentukan arah putaran motor digunakan kaedah *Flamming* tangan kiri. Kutub-kutub magnet akan menghasilkan medan magnet dengan arah dari kutub utara ke kutub selatan. Jika medan magnet memotong sebuah kawat penghantar yang dialiri arus searah dengan empat jari, maka akan timbul gerak searah ibu jari. Gaya ini disebut gaya Lorentz, yang besarnya sama dengan  $F$ . Prinsip motor ketika aliran arus di dalam penghantar

yang berada di dalam pengaruh medan magnet akan menghasilkan gerakan (Sendari *et al.*, 2021).

Selain itu Motor listrik arus searah merupakan suatu alat yang berfungsi mengubah daya listrik arus searah menjadi daya mekanik. Motor listrik arus searah mempunyai prinsip kerja berdasarkan percobaan Lorentz yang menyatakan. “Jika sebatang penghantar listrik yang berarus berada di dalam medan magnet maka pada kawat penghantar tersebut akan terbentuk suatu gaya”. Gaya yang terbentuk sering dinamakan gaya Lorentz. Untuk menentukan arah gaya dapat digunakan kaidah tangan kiri *Flemming* atau kaidah telapak tangan kiri seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.4** melukiskan konstruksi kaidah tangan kiri *Flemming*.



**Gambar 2. 4** Kaidah Tangan Kanan Gaya Lorentz (Bagia & Parsa, 2018).

Jika ibu jari, jari tengah dan jari telunjuk disusun seperti **Gambar 2.4**, garis gaya magnet sesuai dengan arah jari telunjuk, arus yang mengalir pada penghantar searah dengan jari tengah maka, gaya yang terbentuk pada kawat penghantar akan searah dengan arah ibu jari. Jika digunakan kaidah telapak tangan kiri, maka di dalam menentukan arah gaya dapat dikerjakan sebagai berikut: “Telapak tangan kiri direntangkan sedemikian rupa sehingga ibu jari dengan keempat jari yang lain saling tegak lurus. Jika garis gaya magnet menembus tegak lurus telapak tangan, arah arus sesuai dengan arah keempat jari tangan, maka ibu jari akan menunjukkan arah gaya yang terbentuk pada kawat penghantar”. Besarnya gaya dapat ditentukan dengan **Persamaan 2.5**:

$$F = B \times I \times l \sin \theta \quad (2.5)$$

Dengan  $F$  adalah gaya yang terbentuk pada penghantar (Newton),  $I$  adalah Kuat arus yang mengalir (Ampere),  $B$  adalah kerapatan garis gaya magnet ( $\text{Wb/m}^2$ ) dan  $\theta$  adalah Sudut antara garis gaya magnet dengan posisi kawat penghantar (Bagia & Parsa, 2018).

## 2.5 Kontruksi Motor DC

Konstruksi motor DC motor arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/*direct-unidirectional*. Motor DC digunakan pada penggunaan khusus dimana diperlukan penyalaan torque yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas. Motor DC yang memiliki tiga komponen utama, antara lain:

1. Kutub medan, secara sederhana digambarkan bahwa interaksi dua kutub magnet akan menyebabkan perputaran pada motor DC. Motor DC memiliki kutub medan yang stasioner dan dinamo yang menggerakkan bearing pada ruang diantara kutub medan. Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan, yaitu medan kutub utara dan medan kutub selatan. Garis magnetik energi membesar melintasi bukan diantara kutub-kutub dari utara ke selatan. Untuk motor yang lebih besar atau lebih kompleks terdapat satu atau lebih elektromagnet. Elektromagnet menerima listrik dari sumber daya dari luar sebagai penyedia struktur medan .
2. Dinamo, Bila arus masuk menuju dinamo, maka arus ini akan menjadi elektromagnet. Dinamo yang berbentuk silinder, dihubungkan ke as penggerak untuk menggerakkan beban. Untuk kasus motor DC yang kecil, dinamo berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub-kutub, sampai kutub utara dan selatan magnet berganti lokasi. Jika hal ini terjadi, arusnya berbalik untuk merubah kutub-kutub utara dan selatan dinamo.
3. *Commutator*, Komponen ini terutama ditemukan dalam motor DC. Kegunaannya adalah untuk membalikan arah arus listrik dalam dinamo. *Commutator* juga membantu dalam transmisi arus antara dinamo dan sumber daya. Keuntungan utama motor DC adalah sebagai pengendali kecepatan yang tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya. Motor ini dapat dikendalikan dengan mengatur tegangan dinamo, meningkatkan

tegangan dinamo akan meningkatkan kecepatan dan arus medan menurunkan arus medan. Motor arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik memiliki dua buah bagian dasar listrik stator dan rotor. Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor. Keuntungan utama motor DC terhadap motor AC adalah bahwa kecepatan motor AC lebih sulit dikendalikan. Untuk mengatasi kerugian ini, motor AC dapat dilengkapi dengan penggerak frekuensi variabel untuk meningkatkan kendali kecepatan sekaligus menurunkan dayanya. Motor induksi merupakan motor yang paling populer di industri karena keandalannya dan lebih mudah perawatannya (Syamsuar *et al.*, 2011).

#### 4. Sikat (*Brush*)

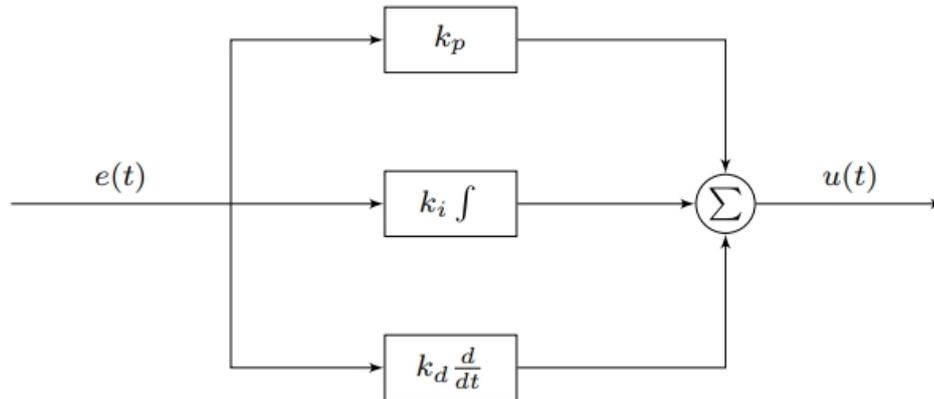
Sikat terbuat dari karbon, graphite, logam graphite atau campuran karbon dan grafit yang dilengkapi dengan pegas penekanan dan kontak sikatnya. Sikat biasanya dipasang dengan menumpangkannya pada sisi komutator untuk menyuplai listrik ke motor (Yuski *et al.*, 2017).

## **2.6 Proportional, Integral dan Derivative (PID)**

Kontroler PID terdiri dari beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol derivative. Masingmasing aksi kontrol ini mempunyai kelebihan-kelebihan tertentu, di mana aksi kontrol proporsional mempunyai kelebihan dapat membuat risetime menjadi lebih cepat (Oghata, 2002).

PID adalah singkatan dari Proportional, Integral, dan Derivative, yang merupakan tiga komponen utama dalam kontrol PID. Kontrol Proportional (P) berkaitan dengan nilai *error* saat ini dan menghasilkan respons yang sebanding dengan besarnya *error*. Penggunaan kontrol P saja dapat mempercepat waktu respons, tetapi sering kali menyisakan *error* keadaan stabil. Komponen Integral (I) dirancang untuk menghilangkan *error* keadaan stabil dengan menyesuaikan nilai kontrol berdasarkan akumulasi *error*, meskipun dapat mempengaruhi karakteristik

respons sistem. Sementara itu, kontrol Derivative (D) berfungsi meningkatkan redaman dan stabilitas sistem dengan memprediksi perubahan *error* di masa depan berdasarkan tingkat perubahan saat ini (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019). Ketiga komponen PID dapat diilustrasikan dalam diagram kontrol seperti pada **Gambar 2.5**.



**Gambar 2.5** Diagram Blok Kontrol PID (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019)

Struktur pengendali PID yang umum digunakan adalah tipe paralel . Tipe paralel jenis pengendali ini memiliki hukum kontrol pada **Persamaan 2.6**.

$$u(t) = K_c \left( e(t) + \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.6)$$

Dengan  $K_p = K_c$  adalah gain proporsional,  $K_i$  adalah waktu integral pengendali dengan  $K_i = \frac{K_c}{T_i}$  dan  $T_d$  adalah waktu turunan pengendali dengan  $K_d = K_c T_d$ .

Representasi ini dikenal sebagai bentuk ideal (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2019).

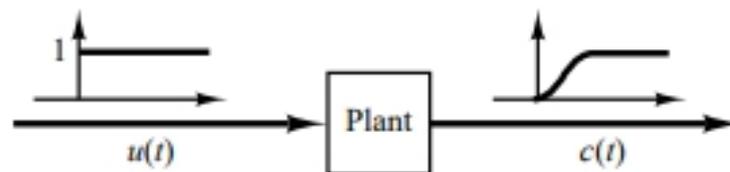
Dalam kawasan Laplace, **Persamaan (2.6)** dapat dituliskan seperti pada **Persamaan 2.7**.

$$C(S) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) e(S) \quad (2.7)$$

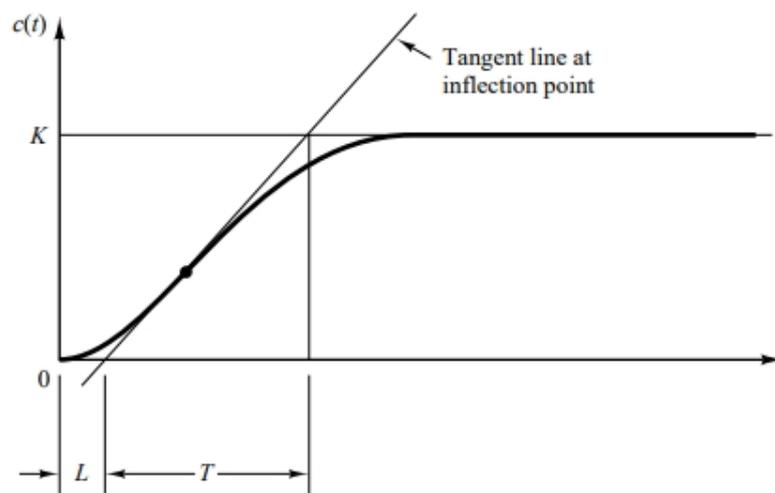
Ziegler dan Nichols mengusulkan aturan untuk menentukan nilai gain proporsional, waktu integral, dan waktu turunan berdasarkan karakteristik respons transien dari suatu sistem. Penentuan parameter pengendali PID atau penyetulan pengendali PID ini dapat dilakukan oleh insinyur di lokasi melalui eksperimen

langsung pada sistem tersebut. (Banyak aturan penyetelan untuk pengendali PID telah diusulkan sejak metode Ziegler–Nichols. Aturan-aturan ini tersedia dalam literatur maupun dari produsen pengendali semacam itu. Ada dua metode yang disebut aturan penyetelan Ziegler–Nichols: metode pertama dan metode kedua.

Pada metode pertama, respons sistem terhadap masukan langkah satuan diperoleh secara eksperimental, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Jika sistem tidak melibatkan pengintegrasian atau pole kompleks-konjugat dominan, maka kurva respons langkah satuan tersebut dapat berbentuk seperti huruf S, seperti terlihat pada **Gambar 2.7**. Metode ini berlaku jika respons terhadap masukan langkah menunjukkan kurva berbentuk S. Kurva respons langkah seperti ini dapat dihasilkan secara eksperimental atau melalui simulasi dinamis dari sistem (Ogata, 2010).



**Gambar 2. 6** Tanggapan Unit Step (Ogata, 2010)



**Gambar 2. 7** Kurva Respon Bentuk S (Ogata, 2010)

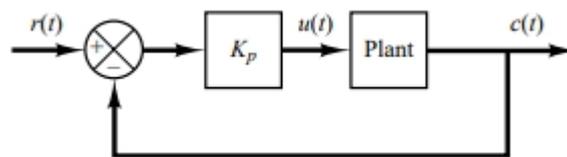
Kurva berbentuk S ini dapat dicirikan oleh dua konstanta, yaitu waktu tunda (delay time) **L** dan konstanta waktu (*time constant*) **T**. Waktu tunda dan konstanta

waktu ditentukan dengan menggambar garis singgung di titik infleksi kurva berbentuk S dan menentukan titik potong garis singgung tersebut dengan sumbu waktu serta garis  $c(t) = K_c(t) = K$ . parameter *Tunning* pertama dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

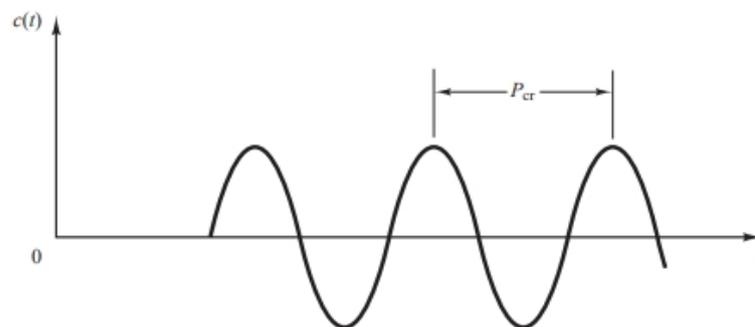
**Tabel 2. 1** Parameter *Tunning* metode pertama Zigler-Nichols

Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Pada metode kedua, pertama-tama kita hanya menggunakan aksi kontrol proporsional seperti pada **Gambar 2.8** dan meningkatkan nilai  $K_p$  dari 0 hingga mencapai nilai kritis  $K_{cr}$ , yaitu nilai di mana keluaran pertama kali menunjukkan osilasi yang berkelanjutan. (Jika keluaran tidak menunjukkan osilasi yang berkelanjutan untuk nilai  $K_p$  berapa pun, maka metode ini tidak dapat diterapkan) (Ogata, 2010). Dengan demikian, gain kritis  $K_{cr}$  dan periode osilasi yang sesuai ditentukan secara eksperimental seperti pada **Gambar 2.9**.



**Gambar 2. 8** Sistem Loop Tertutup dengan Pengontrol Proporsional



**Gambar 2. 9** Osilasi berkelanjutan dengan periode  $p_{cr}$

Ziegler dan Nichols menyarankan agar kita menetapkan nilai parameter sesuai dengan rumus yang ditunjukkan pada **Tabel 2.2**.

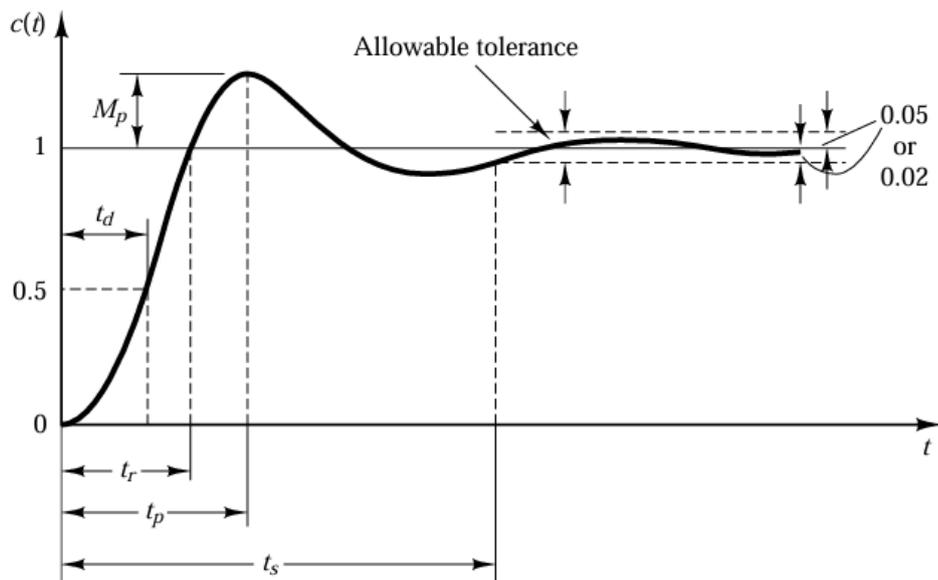
**Tabel 2. 2** Parameter *Tunning* metode kedua Zigler-Nichols

Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$K_c$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Karakteristik kinerja suatu sistem kontrol sering dinyatakan dalam respon transien terhadap input satuan langkah. Ini karena mudah dibuat dan sangat dramatis. (Jika respons terhadap masukan langkah diketahui, respons terhadap masukan apa pun dapat dihitung secara matematis. Respons transien suatu sistem terhadap masukan satuan langkah bergantung pada kondisi awal. Untuk memudahkan perbandingan perilaku transien sistem yang berbeda, biasanya digunakan kondisi awal standar dimana sistem mula-mula diam dan keluaran serta semua turunannya terhadap waktu adalah nol. Hal ini memungkinkan Anda dengan mudah membandingkan perilaku respons banyak sistem. Respons transien dari sistem kendali nyata sering kali menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai kondisi tunak. Saat menentukan respons transien sistem kontrol terhadap masukan satuan langkah, biasanya ditentukan sebagai berikut:

1. Delay time (td)
2. Rise time (tr)
3. Peak time (tp)
4. Maximum overshoot (Mp)
5. Settling time (ts)

Spesifikasi ini dijelaskan di bawah dan diilustrasikan secara grafis pada **Gambar 2.10**.



**Gambar 2. 10** Kurva Spesifikasi Respon Transien (Ogata, 2010)

1. Waktu tunda, ( $t_d$ ): Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan respons untuk pertama kali mencapai setengah dari nilai akhirnya.
2. *Rise time* ( $t_r$ ): *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0% hingga 100% dari nilai akhirnya. Untuk sistem dengan redaman kuadratik, waktu kenaikan 0% hingga 100% biasanya digunakan, dan untuk sistem dengan redaman berlebih, waktu kenaikan 10% hingga 90% biasanya digunakan.
3. Peak time,  $t_p$ : Peak time adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai nilai peak *overshoot* yang pertama.
4. *Overshoot* Maksimum (%),  $M_p$ : *Overshoot* maksimum adalah nilai puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dalam satuan. Jika nilai respons kondisi tunak akhir berbeda dari 1, biasanya digunakan persentase *overshoot* maksimum. Itu didefinisikan sebagai **Persamaan 2.7**:

$$M_p = \frac{td - \text{setpoint}}{\text{setpoint}} \times 100\% \quad (2.8)$$

Jumlah maksimum (persen) *overshoot* secara langsung mengindikasikan stabilitas relatif sistem.

5. Waktu penyelesaian ( $t_s$ ): Waktu penyelesaian adalah waktu yang diperlukan kurva respons untuk mencapai dan tetap berada dalam kisaran

nilai akhir yang ditentukan oleh persentase absolut dari nilai akhir (biasanya 2% atau 5%). Waktu penyelesaian terkait dengan konstanta waktu terbesar dari sistem kontrol, kriteria kesalahan persentase mana yang akan digunakan dapat ditentukan dari tujuan desain sistem yang bersangkutan.

Spesifikasi domain waktu yang baru saja diberikan cukup penting, karena sebagian besar sistem kontrol adalah sistem domain waktu; yaitu, mereka harus menunjukkan respons waktu yang dapat diterima. (Ini berarti bahwa, sistem kontrol harus dimodifikasi sampai respons transien memuaskan) (Ogata, 2010).

## 2.7 Sepeda Listrik

Sepeda listrik atau *e-bike* merupakan salah satu jenis kendaraan listrik yang merupakan pengembangan lebih lanjut dari sepeda tradisional. Jika sepeda tradisional hanya bisa digerakkan dengan menggunakan pedal, maka sepeda listrik memiliki baterai tambahan dan motor listrik untuk transportasinya. Sepeda listrik pertama kali dijual resmi dengan merek Zike oleh Vector Service Limited pada tahun 1992. Sepeda listrik merk Zike merupakan sepeda *portable* yang memiliki berat hingga 11 kg. Zike menawarkan teknologi yang lebih canggih dan efisien dengan menggunakan baterai NiMH, NiCd, atau Li-ion yang lebih ringan dan padat. Pada awal tahun 2000-an, pengembangan lebih lanjut dari baterai lithium-ion terjadi. Baterai ini kemudian digunakan pada salah satu merek *e-bike*, *KillaCycle*. Sepeda listrik *KillaCycle* mampu menempuh jarak 400 meter dalam waktu 7,824 detik dengan kecepatan 168 mil per jam. Pengenalan *KillaCycle* akhirnya bisa menjadi titik awal kelanjutan pengembangan sepeda listrik (Nainggolan *et al.*, 2014).

Kehadiran sepeda listrik membawa pendekatan baru terhadap mobilitas yang telah membentuk sektor transportasi di seluruh dunia. Sepeda listrik sebenarnya dirancang sebagai alat transportasi ramah lingkungan yang mengedepankan penggunaan energi terbarukan. Karena sumber energi sepeda listrik adalah baterai yang dapat diisi ulang, maka emisi dari penggunaan kendaraan listrik adalah: HC (hidrokarbon) 3,57 g/km, CO (karbon dioksida) 3,15 g/km, CO<sub>2</sub> 1,82 g/km dan

2,29g/km NO (nitrogen oksida) dapat dihindari. Sepeda listrik tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga merupakan alat transportasi yang baik untuk menjaga kesehatan tubuh di awal aktivitas, serta merupakan cara paling efektif dan efisien untuk mengatasi penyebab umum seperti kurangnya waktu untuk berolahraga. Pada umumnya, sepeda listrik terdiri dari beberapa komponen selain daripada sepedanya itu sendiri, komponen-komponen tersebut antara lain (Ali & Aji, 2018).

1. Baterai dan *charger*, baterai atau akumulator pada sepeda listrik adalah sumber energi listrik penggerak dinamo. Baterai yang ada di sepeda listrik tentunya adalah baterai yang bisa diisi ulang.
2. Dinamo, adalah alat pada sepeda listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Prinsip kerja dinamo sama dengan generator yaitu memutar kumparan di dalam medan magnet atau memutar magnet di dalam kumparan. Bagian dinamo yang berputar disebut rotor, sementara bagian dinamo yang tidak bergerak disebut stator.
3. *Controller*, berfungsi untuk mengendalikan kecepatan dari sepeda listrik.
4. *Panel Display*, pada sebuah sepeda listrik ini biasanya adalah sebuah layar LCD yang menampilkan kondisi dari sepeda listrik tersebut. Beberapa yang ditampilkan dalam panel display ini diantaranya adalah kecepatan sepeda, suhu dari dinamo dan kondisi baterai.
5. Handle gas, terdapat 2 (dua) jenis variasi pada *handle gas* yaitu model *hendle gas* tarik dan model *thumb throttle*. Handle gas tarik berbentuk *full grip* seperti yang ada pada sepeda motor pada umumnya, sementara handle gas thumb throttle merupakan tuas kecil yang tertelak di bawah bilah pegangan kemudi sebelah kanan yang dioperasikan dengan menggunakan dorongan jempol tangan (Bhavani *et al.*, 2015).

Berdasarkan cara pengoperasiannya, secara umum sepeda listrik dibagi ke menjadi dua tipe:

1. Pedal *Assist/Pedelec*, jenis *pedelec* adalah jenis yang paling umum ditemui. Dalam pengoperasiannya, jenis *pedelec* hanya dapat dioperasikan dengan cara dikayuh seperti sepeda konvensional pada umumnya, sementara motor listrik

yang terdapat dalam jenis sepeda ini berfungsi untuk membantu mengurangi berat dan beban mengayuh pedal sepeda sehingga terasa lebih ringan. Sistem ini bekerja dengan sensor yang terletak pada bagian pedal tanpa menggunakan tuas agar lebih efektif dalam penggunaan motor listrik yang membuat baterai akan semakin irit. Contoh sepeda listrik jenis *pedelec* di Indonesia adalah sepeda listrik merek *Polygon Path-e*, seperti pada **Gambar 2.11 (a)**.

2. Throttle, jenis sepeda listrik satu ini, mirip dengan sepeda motor yang memiliki throttle atau gas di handlebars untuk mengaktifkan motor listriknya. Namun, dengan adanya keberadaan throttle, jenis sepeda ini juga tetap dapat digerakkan menggunakan pedal, apabila tersedia. Pada sepeda listrik jenis throttle biasanya kecepatan yang dihasilkan dibatasi hanya sekitar 15-25 km/jam atau sesuai dengan kebijakan di negara masing-masing. Contoh sepeda listrik jenis *throttle* di Indonesia adalah sepeda listrik merek Migo, seperti **Gambar 2.11 (b)**.



(a)



(b)

**Gambar 2. 11** (a) Sepeda listrik jenis *pedelec* (b) Sepeda listrik jenis *throttle* (Arsari, 2020)

Mengacu pada cara pengoperasian sepeda listrik di atas, sepeda listrik jenis *Pedelec* dioperasikan dengan cara mengayuh, namun tidak serta merta digerakkan oleh tenaga manusia saja. Energi listrik dari baterai juga berperan sebagai energi tambahan untuk memudahkan mengayuh. Sedangkan pada sepeda listrik *throttle*, motor listrik hanya beroperasi saat akselerator dioperasikan, dan motor tidak beroperasi saat pedal dioperasikan, sehingga seluruh tenaga penggerak disuplai oleh tenaga manusia. Namun perlu diingat bahwa pada prinsipnya sepeda dapat

disebut sepeda listrik jika digerakkan dengan bantuan energi listrik. Oleh karena itu, sepeda non-tenaga berbeda dengan sepeda listrik dan sama dengan sepeda konvensional pada umumnya (Arsari, 2020).

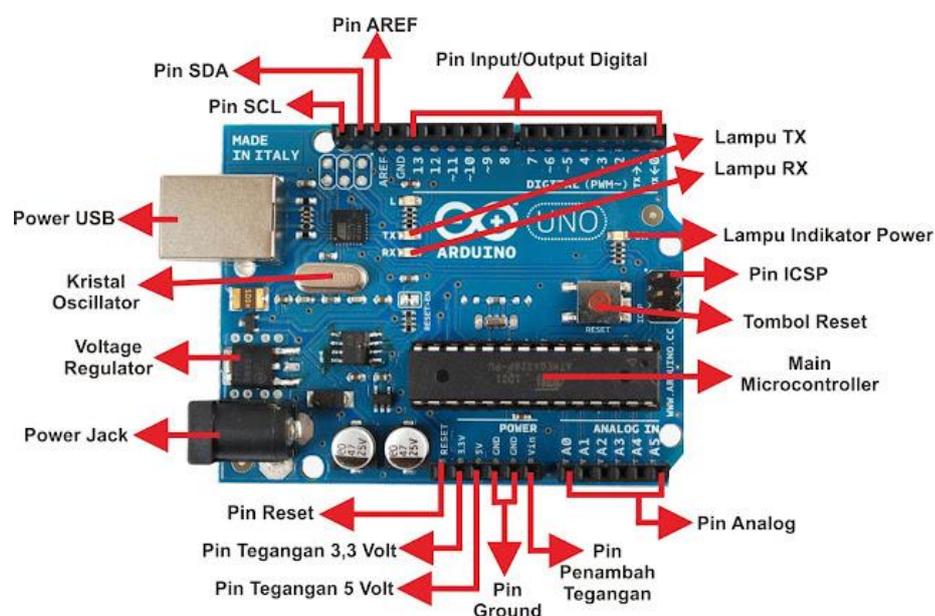
## 2.8 Arduino Uno

Arduino adalah perangkat elektronik open source yang beroperasi seperti mikrokontroler. Arduino dilengkapi dengan prosesor keluarga Atmel AVR. Arduino memiliki perangkat lunak yang menggunakan bahasa pemrograman tertentu. Arduino juga memiliki perangkat lunak kompilasinya sendiri. Ini adalah *open source* dan dapat diunduh dari situs [arduino.cc](https://www.arduino.cc). Perangkat keras Arduino juga bersifat open source, sehingga pengguna dapat mengembangkan papan Arduino sendiri sesuai kebutuhan. Papan Arduino memiliki input data digital dan kemampuan membaca data analog. Papan Arduino juga memiliki kemampuan untuk mengeluarkan data digital dan analog. Bahasa pemrograman yang digunakan mirip dengan sintaks bahasa C, memungkinkan pengguna Arduino untuk membuat beberapa proyek sederhana (motor, LED, data serial) dan proyek kompleks (*Internet of Things*, printer 3D, dan aplikasi canggih lainnya) dapat dikembangkan. Arduino dapat berjalan di komputer dengan sistem operasi Mac, *Windows*, dan *Linux*. Perkembangan Arduino mengalami kemajuan yang sangat pesat karena didukung oleh komunitas online Arduino. Arduino merupakan platform yang paling banyak digunakan karena bersifat *open source*. Kata kunci yang perlu diperhatikan di sini adalah platform, yaitu Arduino adalah kombinasi perangkat lunak dan perangkat keras yang canggih. Pemrograman Arduino didukung oleh IDE (*Integrated Development Environment*) yang membuat pemrograman menjadi menyenangkan. Pemrograman Arduino IDE tidak hanya berfungsi sebagai editor tetapi juga sebagai compiler. Dengan kata lain, Arduino mengubah bahasa tingkat tinggi (bahasa C) menjadi bahasa tingkat rendah (bahasa rakitan) menjadi kode biner yang dapat dieksekusi pada mikrokontroler.

Proses kerja menjadi lebih mudah dan cepat. Program dapat segera diunggah ke penyimpanan. Arduino menjadi semakin populer, sehingga menerima banyak dukungan dari pihak ketiga, termasuk modul pendukung utama. Modul

pendukung yang ada meliputi berbagai jenis sensor, *display*, *keyboard*, motor, dan aktuator. Banyak akademisi dan praktisi yang menggunakan Arduino sebagai referensi untuk mengembangkan proyek profesional. Arduino dikembangkan oleh beberapa ahli dari seluruh dunia, antara lain Massimo Banzi (Milan, Italia), David Cuartielles (Malmö, Swedia), Tom Igoe (New York, AS), Gianluca Martino (Turin, Italia), dan David A.I telah melakukan. Melis (Boston, AS). Beberapa peneliti ini berkontribusi pada pengembangan Arduino. Papan Arduino dijual dalam bentuk paket yang memuat informasi bahwa papan tersebut dapat digunakan oleh siapa saja, tanpa mempertimbangkan segmen masyarakat tertentu (Setiawardhana *et al.*, 2019).

Arduino Uno adalah salah satu produk berlabel Arduino yang menggunakan mikrokontroler Atmega 328. Piranti ini dapat dimanfaatkan untuk membuat rangkaian elektronik dari yang sederhana hingga yang kompleks. Arduino Uno dilengkapi dengan osilator 16 MHz, regulator (pembangkit tegangan) 5 Volt. Pada Arduino Uno terdapat sejumlah pin yaitu 0-13 yang merupakan input digital dan pin A0-A5 yang merupakan input analog. Arduino Uno dilengkapi dengan konektor USB, konektor catu daya, *header* ICSP, dan tombol *reset*, SRAM berukuran 2 KB, flash memory berukuran 32 KB dan EPROM untuk menyimpan data. Pada **Gambar 2. 12** merupakan bentuk dari mikrokontroler Arduino Uno (Winata *et al.*, 2016).



**Gambar 2. 12** Arduino Uno (Winata *et al.*, 2016).

Arduino adalah mikrokontroler papan tunggal *open source* yang dapat diprogram. Platform Arduino saat ini sangat populer dan jumlah pengguna barunya terus bertambah. Karena mudah untuk menggunakan dan menulis kode program. Berbeda dengan kebanyakan papan pemrograman sebelumnya, Arduino tidak lagi memerlukan perangkat keras terpisah (disebut pemrogram atau pengunduh) untuk memuat atau mengunggah kode baru ke mikrokontroler. Anda dapat menggunakan Arduino hanya dengan menggunakan kabel USB. Selain itu, Arduino IDE menggunakan versi bahasa pemrograman C++ yang disederhanakan, sehingga memudahkan dalam mempelajari pemrograman. Arduino akhirnya menjadi papan pemrograman paling populer dan bentuk standar fungsionalitas mikrokontroler dalam paket yang mudah diakses. Perangkat keras dan perangkat lunak Arduino dirancang untuk seniman, desainer, penghobi, peretas, pemula, dan siapa pun yang tertarik dalam membuat objek interaktif atau lingkungan pengembangan. Arduino dapat berinteraksi dengan tombol, LED, motor, speaker, GPS, kamera, internet, *smartphone*, bahkan televisi. Fleksibilitas ini berasal dari kombinasi ketersediaan perangkat lunak Arduino yang gratis, papan perangkat keras yang murah, dan fakta bahwa keduanya mudah dipelajari. Hal ini menciptakan komunitas besar dari sejumlah besar pengguna dengan berbagai kontribusi yang dipublikasikan di berbagai proyek berbasis Arduino (Romadhon & Umam, 2021).

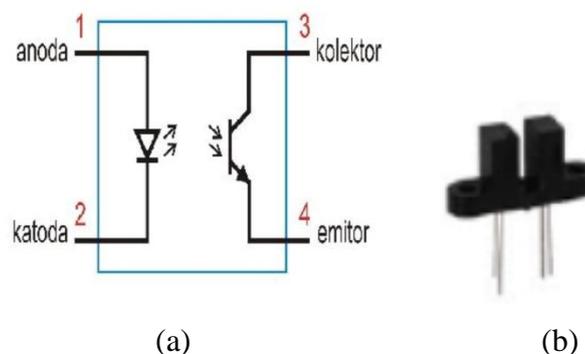
## **2.9 Sensor Kecepatan *Optocoupler***

Sensor adalah perangkat yang mendeteksi perubahan besaran fisika seperti gaya, tekanan, arus, cahaya, dan suhu. Perubahan kuantitas ini dianalisis dan diubah menjadi keluaran yang dapat dipahami manusia. Sensor diklasifikasikan sebagai transduser masukan karena dapat mengubah energi fisik seperti gaya, cahaya, dll menjadi sinyal listrik. Jenis sensor yang digunakan pada motor listrik adalah sensor *Efek Hall* yang digunakan sebagai sensor kecepatan (RPM). Sensor kecepatan digunakan untuk mencatat kecepatan suatu benda bergerak. Kemudian diolah menjadi format sinyal listrik. Kecepatan poros motor diukur dengan sensor pickup magnetik yang dipasang pada poros. Ketika kutub selatan magnet mendekati sensor, tegangan keluaran meningkat, dan ketika kutub utara mendekati

sensor, tegangan keluaran menurun. Selama poros berputar, tegangan keluaran menghasilkan frekuensi pulsa/sinyal yang dapat digunakan untuk menentukan kecepatan poros (Hamdani, 2021).

*Optocoupler* adalah piranti elektronika yang memanfaatkan sinar sebagai pemicu on-off. Opto berarti optik dan coupler berarti pemicu. Jadi dapat diartikan bahwa *optocoupler* merupakan suatu komponen yang bekerja berdasarkan picu cahaya optik, yang terdiri atas dua bagian yaitu transmitter dan receiver.

1. Transmitter dibangun dari sebuah LED infra merah yang cahaya tidak terlihat oleh mata telanjang. Jika dibandingkan dengan menggunakan LED biasa, LED infra merah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap sinyal tampak.
2. Receiver dibangun dari sebuah phototransistor yaitu suatu transistor yang peka terhadap tenaga cahaya. Spektrum infra merah yang merupakan sumber cahaya menghasilkan energi panas yang lebih besar dari cahaya tampak. Dasar rangkaian ditunjukkan pada gambar 2 dan bentuk fisiknya ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.



**Gambar 2. 13** (a) Rangkaian dasar *Optocoupler* (b) Bentuk Fisik *Optocoupler* (Subito & Rizal, 2012)

Proses penginderaan pada sensor kecepatan merupakan proses kebalikan dari motor, di mana poros/benda yang berputar di dalam generator menghasilkan tegangan yang sebanding dengan kecepatan putaran benda. Kecepatan sering diukur menggunakan sensor yang mendeteksi pulsa magnetik (induksi) yang terjadi ketika medan magnet dihasilkan. Misalnya *speedometer*. Alat ini mengukur kecepatan sepeda Anda dalam kilometer per jam. Proses yang digunakan dalam

sensor kecepatan merupakan proses kebalikan dari suatu motor, di mana suatu poros atau object yang berputar pada suatu generator akan menghasilkan suatu tegangan yang sebanding dengan kecepatan putaran object (Widharma & Wiranata, 2022).

Prinsip kerja dari *optocoupler* adalah, jika antara phototransistor dan LED terhalang maka phototransistor tersebut akan off sehingga keluaran dari kolektor akan berlogika high. Sebaliknya jika antara Phototransistor dan LED tidak terhalang maka phototransistor tersebut akan on sehingga keluarannya akan berlogika low. Dipasaran, *optocoupler* tersedia dengan tipe 4N25/4N35 dan mempunyai tegangan isolasi 7500 Volt dengan kemampuan maksimal LED dialiri arus maju sebesar 3A (Subito & Rizal, 2012).

### **2.10 Pulse Width Modulation (PWM)**

PWM adalah singkatan dari *Pulse Width Modulation* dan merupakan teknik yang biasa digunakan untuk mengontrol catu daya peralatan listrik, yang sebenarnya diterapkan oleh pemutus sirkuit elektronik. Metode PWM merupakan suatu metode pengaturan kecepatan di mana persentase lebar pulsa yang tinggi diatur dalam periode sinyal gelombang persegi berupa tegangan periodik, diproses oleh mikrokontroler dan dikirimkan ke driver motor sebagai pengontrol kecepatan (Fikri & Endryansyah, 2019).

PWM adalah teknik untuk memperoleh sinyal analog dari perangkat digital. Faktanya, sinyal PWM dapat dihasilkan dengan berbagai cara dapat menggunakan metode analog, tetapi menggunakan rangkaian op-amp atau metode digital. Pada metode analog setiap perubahan PWM terjadi dengan sangat lancar, namun pada metode digital setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri. Resolusi adalah banyaknya perubahan nilai pada PWM. Misalnya resolusi PWM adalah 8 bit, berarti nilai PWM berubah sebesar  $2^8 = 256$ , berkisar antara 0 hingga 255. Ini mewakili siklus tugas 0 hingga 100 dari keluaran PWM. Modulasi lebar pulsa (PWM) dicapai/diperoleh dengan bantuan sebuah gelombang kotak yang mana siklus kerja (*duty cycle*) gelombang dapat diubah-ubah untuk mendapatkan sebuah tegangan keluaran yang bervariasi yang merupakan nilai

rata-rata dari gelombang tersebut. Di bawah ini merupakan rumus yang digunakan untuk mencari modulasi lebar pulsa (Lubis & Yanie, 2022).

PWM adalah metode pengendalian daya yang terkait dengan catu daya. Selain fungsi PWM yang digunakan untuk pengontrol daya, PWM juga dapat digunakan sebagai pengontrol gerak pada perangkat elektronik seperti motor servo. Berdasarkan nama "*Pulse Width Modulation*" lebar sinyal tegangan diubah dalam aplikasi. Sistem kendali PWM ini merupakan sistem digital dan jauh lebih efisien dibandingkan sistem tradisional. Komponen yang biasa digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM adalah jenis IC digital yaitu IC 555 dan mikrokontroler (Susilo & Maghfiroh, 2022).

PWM adalah metode yang umumnya memanipulasi lebar sinyal yang diwakili oleh pulsa dalam suatu periode untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Contoh aplikasi PWM antara lain modulasi data untuk komunikasi, pengendalian daya atau tegangan yang masuk ke suatu beban, pengatur tegangan, efek audio dan amplifikasi, dan aplikasi lainnya. Aplikasi PWM berbasis mikrokontroler umumnya berupa pengendalian kecepatan motor DC, pengendalian motor servo, pengaturan kecerahan LED, dll. Sinyal PWM biasanya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, tetapi lebar pulsa berbeda. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang tidak termodulasi. Ini berarti frekuensi gelombang sinyal PWM tetap, namun siklus kerjanya bervariasi (antara 0% dan 100%). PWM adalah teknik untuk memperoleh sinyal analog dari perangkat digital. Faktanya, sinyal PWM dapat dihasilkan dengan berbagai cara, termasuk metode analog dan digital menggunakan rangkaian penguat operasional. Pada metode analog, setiap perubahan PWM terjadi dengan sangat lancar, namun pada metode digital, setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi PWM itu sendiri. Resolusi adalah banyaknya variasi perubahan nilai PWM (Ilman *et al.*, 2018).

## **2.11 Penerapan Sistem Kendali Motor DC**

Sistem kendali motor DC memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi teknologi modern di seluruh dunia. Di bidang industri, motor DC banyak

digunakan untuk mengontrol kecepatan dan torsi pada *conveyor belt*, mesin pemotong, dan sistem otomatisasi lainnya. Kendali presisi menggunakan algoritma seperti PID memungkinkan sistem menjaga kecepatan konstan, bahkan ketika beban berubah, sehingga meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi. Dalam bidang transportasi, motor DC menjadi komponen utama dalam kendaraan listrik, seperti mobil listrik, sepeda listrik, dan kereta metro. Sistem kendali pada motor ini dirancang untuk memberikan akselerasi halus, efisiensi energi, dan kestabilan kecepatan pada berbagai kondisi jalan (Barorah Dhiya' *et al.*, 2022).

Di bidang robotika, motor DC digunakan untuk menggerakkan roda, lengan robot, dan bagian lainnya yang memerlukan kontrol gerakan presisi. Algoritma kendali seperti PID memungkinkan robot bergerak dengan akurat dan stabil, sehingga cocok untuk aplikasi seperti pemindahan barang, navigasi otomatis, dan robot kolaboratif. Dalam perangkat rumah tangga, motor DC digunakan pada kipas angin, blender, dan mesin cuci. Sistem kendali sederhana pada perangkat ini memungkinkan penyesuaian kecepatan dan efisiensi energi. Selain itu, di bidang kesehatan, motor DC dengan kontrol presisi digunakan dalam alat-alat medis seperti pompa infus otomatis, yang membutuhkan aliran cairan yang konstan dan aman. Sementara itu, dalam otomasi pertanian, motor DC diterapkan pada drone penyemprot tanaman dan sistem irigasi otomatis untuk mengontrol aliran air dan pupuk secara efisien. Secara umum, keberhasilan implementasi sistem kendali motor DC sangat bergantung pada algoritma kendali yang digunakan. PID menjadi pilihan populer karena mampu mengatasi gangguan eksternal, menjaga stabilitas sistem, dan memberikan respons cepat terhadap perubahan beban atau input (Martin, 2021).

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei s.d. Agustus 2024 dengan rentang waktu yang mencakup beberapa bulan untuk menjamin keakuratan dan kelengkapan dalam proses penelitian. Tahapan penelitian ini terdiri dari studi literatur, perancangan sistem kontrol, simulasi kontrol PID, persiapan alat dan bahan, pengujian alat, pengambilan data, analisis data dan pembuatan laporan. Penelitian ini dilaksanakan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Jadwal penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

**Tabel 3. 1** Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan			
		Mei	Juni	Juli	Agustus
1	Perancangan Alat	■			
2	Penelitian Alat	■			
3	Pembuatan Alat	■	■		
4	Pengambilan Data		■	■	■
5	Analisis Data		■	■	■

#### 3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

**Tabel 3. 2** Alat

No	Nama Alat	Fungsi
1	<i>Controller</i> Sepeda Listrik	Sebagai aliran daya dari baterai ke motor DC
2	Motor DC MY1016	Sebagai objek pengujian atau objek kontrol
3	Laptop	Untuk membuat program dan mengolah data
4	Kabel USB	Mengunggah program ke papan Arduino uno
5	Tachometer DT-2234C+	Mengukur putaran dalam satuan RPM
6	Multimeter	Mengukur tegangan, arus, dan hambatan

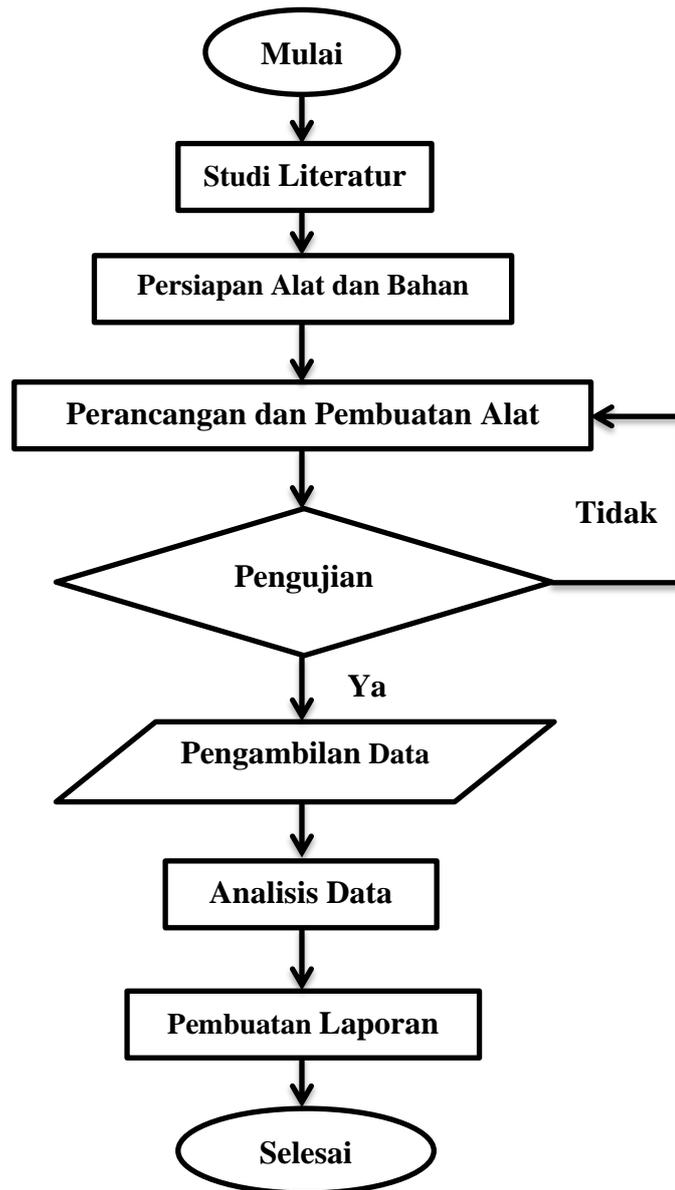
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

**Tabel 3.3** Bahan

No	Nama Bahan	Fungsi
2	Arduino Uno	Mengontrol algoritma control PID dan mengetahui sinyal keluaran ke inverter motor
3	Kabel Penghubung	Penghubung komponen ke komponen lain
4	Baterai Aki	Untuk menyediakan daya motor DC dan sistem kontrol PID
5	Matlab/Simulink	Untuk simulasi sistem kontrol PID
6	Arduino IDE	Membuat Program sistem kontrol kecepatan
7	Papan Breadboard	Untuk menyusun komponen sistem kontrol
8	Keypad	Untuk memasukan set point
9	Sensor Optocoupler	Pengukur kecepatan
10	LCD	Menampilkan proses pemilihan kecepatan dan waktu kerja alat
11	Kunci kontak sepeda listrik	Untuk menyalakan rangkaian
12	Solder	Untuk menempelkan timah pada logam yang digunakan
13	Bor	Untuk melubangi alat kontrol Arduino
14	Timah	Untuk menempelkan logam pada alat yang digunakan
15	Disk Encoder	Untuk mengitung jumlah putaran pada sesnsor

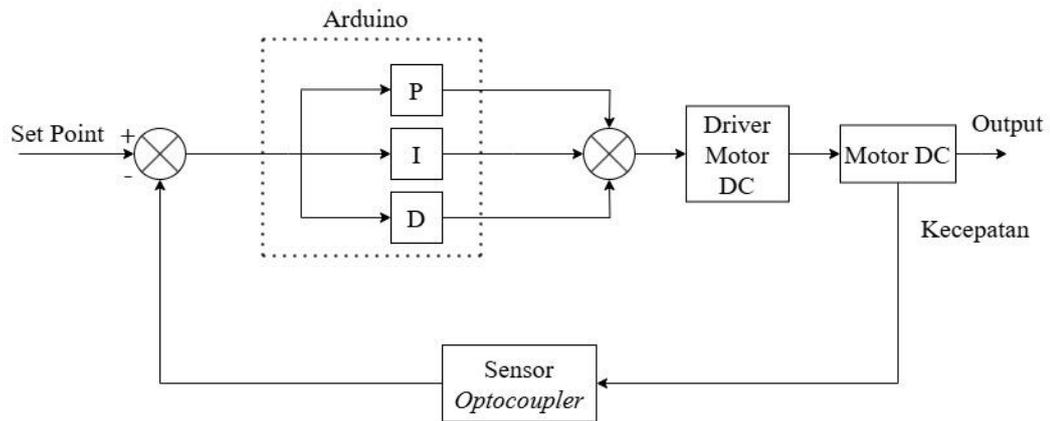
### 3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap perancangan dan pembuatan sistem kontrol motor DC, tahap pengujian kecepatan, tahap perancangan alat, pengambilan data dan analisis data. Secara keseluruhan, tahapan perancangan sistem pengaturan motor DC menggunakan metode PID pada sepeda listrik disajikan dalam diagram alir yang ditunjukkan seperti pada **Gambar 3.1**.



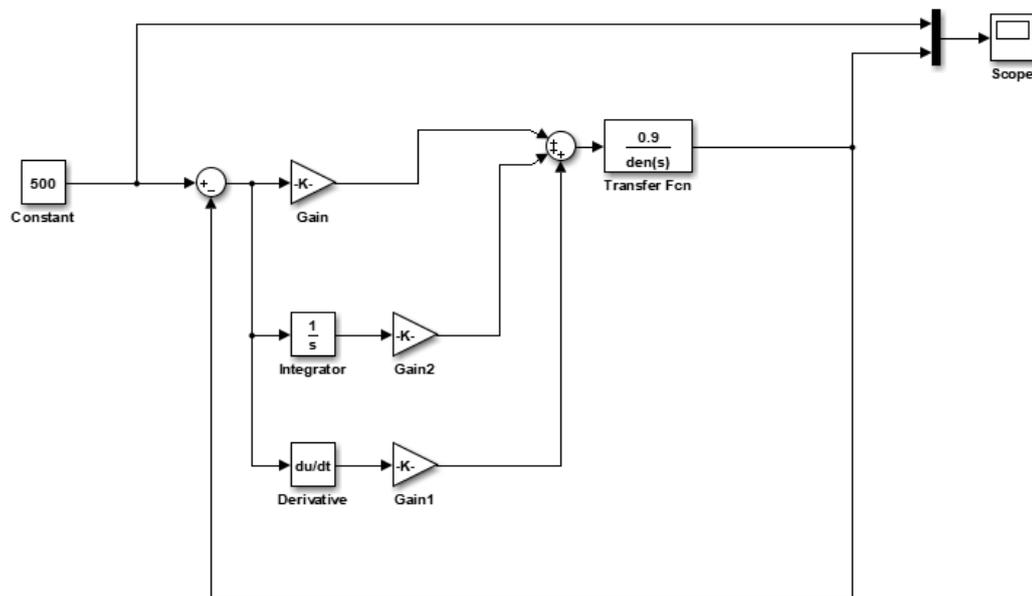
**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

1. Dalam tahapan perancangan sistem kontrol PID motor DC yaitu memahami sistem yang akan dikendalikan. Identifikasi model sistematis sistem tersebut untuk mendapatkan pemahaman yang baik mengenai responnya terhadap perubahan input. Setelah itu, memilih metode tuning yang sesuai untuk mengatur parameter PID seperti  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  guna untuk mencapai keseimbangan yang optimal antara respon cepat, kestabilan dan minimisasi *overshoot*. Diagram blok sistem ini dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



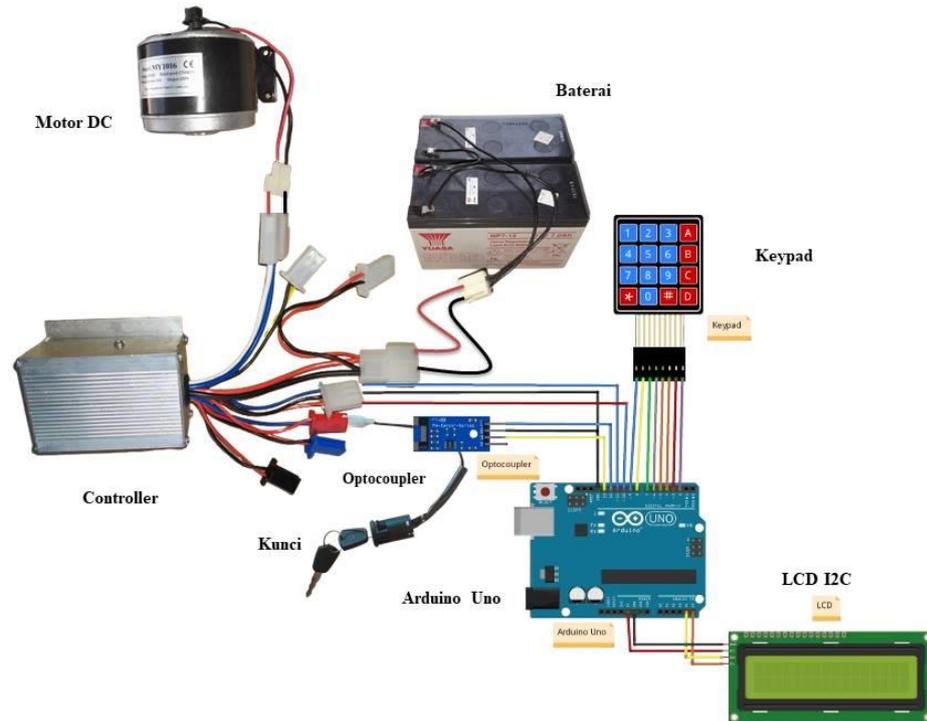
**Gambar 3. 2** Diagram Blok Sistem Kontrol

Adapun perancangan diagram close loop pada simulasi menggunakan matlab/simulink berfungsi untuk melakukan simulasi terhadap pengujian yang akan dilakukan dan berfungsi untuk menguji respon  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dengan set point yang telah ditentukan seperti pada **Gambar 3.3**.



**Gambar 3. 3** Blok Diagram Loop Tertutup PID

Dalam perancangan perangkat lunak yang dibutuhkan komputer dilengkapi dengan *software* *Arduino Integral Development Environment* (IDE) untuk mendesain perangkat lunak dan juga sebagai *driver* dari mikrokontroler Arduino uno yang berfungsi untuk koneksi perangkat komputer. Adapun skema rangkaian pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.



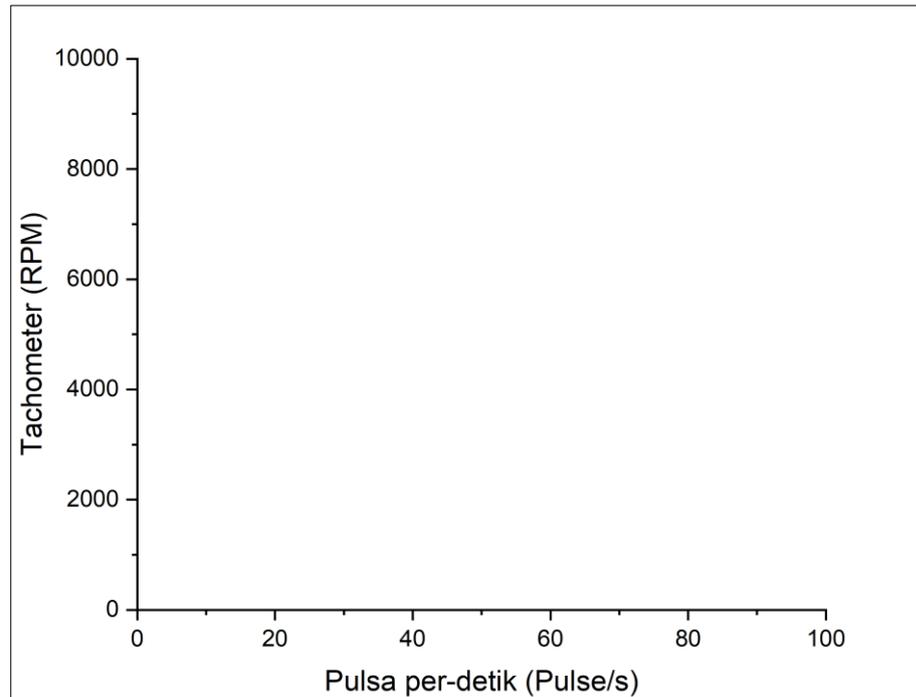
**Gambar 3. 4** Skema Alat Kontrol Motor DC

2. Tahapan pengujian dan kalibrasi sensor kecepatan motor DC untuk sepeda listik, yaitu melibatkan persiapan dan pengaturan lingkungan uji. Sensor kecepatan yang terpasang pada motor DC dikonfigurasi dan dihubungkan ke sistem kontrol, selanjutnya, serangkaian pengujian dilakukan dengan memvariasikan kecepatan referensi untuk mengamati respons sensor terhadap perubahan tersebut. Data yang akan diujikan seperti pembacaan sensor kecepatan *optocoupler* dapat dituliskan pada **Tabel 3.4**. Selama pengujian, juga dilakukan evaluasi mengenai ketepatan sensor dalam membaca kecepatan dan responnya.

**Tabel 3. 4** Data Pengujian dan Kalibrasi Sensor kecepatan motor DC

No	Tachometer (RPM)	Pulsa Per Detik (pulses/s)			Rata-Rata (pulses/s)
		1	2	3	
1					
2					
-					
-					
-					
10					

3. Data hasil pengujian sensor kecepatan yang telah diperoleh kemudian dianalisis. Data pengamatan yang diperoleh akan disajikan ke dalam bentuk kurva grafik yang di tunjukkan pada **Gambar 3.5**. Hasil analisis tersebut dapat digunakan untuk memperoleh persamaan pengaruh kecepatan pulsa per detik. Sehingga sensor tidak lagi mengeluarkan *output* pulsa per detik, namun sudah menjadi bentuk RPM.



**Gambar 3. 5** Rancangan Hasil Pengujian Sensor Kecepatan

Data hasil kalibrasi pengukuran kecepatan dapat digunakan untuk mengkonversi satuan sensor yang awalnya pulsa per detik menjadi RPM. Data hasil pengujian yang diperoleh akan dihitung presentase kesalahan (kesalahan), akurasi dan presisi dari sensor dalam pengujian tersebut, dengan menggunakan **Persamaan (3.1)-(3.3)**.

$$\%Error = \frac{Y-X_n}{Y} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\%Akurasi = \left(1 - \left|\frac{Y-X_n}{Y}\right|\right) \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\%Presisi = \left[1 - \left|\frac{X_n - \bar{X}_n}{\bar{X}_n}\right|\right] \times 100\% \quad (3.3)$$

Dengan  $Y$  adalah nilai parameter referensi,  $X_n$  adalah nilai parameter terukur ke  $n$ ,  $\bar{X}_n$  adalah rata-rata nilai parameter  $n$  terukur.

**Tabel 3. 5** Data Hasil Pengujian dan Perhitungan Kecepatan Sensor

No	Set Point (RPM)	Sensor (RPM)	Kesalahan (%)	Akurasi (%)	Presisi (%)
1					
2					
-					
-					
20					

4. Tahapan pengujian kontrol PID dilakukan dengan tujuan mendapatkan nilai ideal antara konstanta *Proportional*, *Integral* dan *Derivative*. Dengan reaksi sistem, pengujian yang dilakukan agar mendapat nilai respon yang ideal. Pengujian PID mempunyai batasan nilai referensi dan nilai  $K_p=1-10$ ,  $K_i=0-1$  dan  $K_d=0-1$ . Setelah alat sudah memperoleh hasil kalibrasi dan pengujian yang baik, dapat dilakukan *Tunning* PID untuk memperoleh hasil putaran rotor yang lebih stabil. Proses *Tunning* PID ini dilakukan dengan *trial dan error* atau menggunakan *PID Tunning* di Matlab hingga mendapat hasil yang diinginkan. Hasil *Tunning* PID terbaik tiap *set point* ditampilkan pada **Tabel 3.6**.

**Tabel 3. 6** Hasil *Tunning* PID

No	Set Point (RPM)	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1				
2				
-				
-				
20				

5. Tahapan pengumpulan data respon kecepatan motor DC, yaitu eksperimen dilakukan dengan mengatur berbagai kecepatan referensi pada motor dan merekam respon aktual yang dihasilkan oleh sistem. Sensor kecepatan yang terpasang pada motor DC membantu mengukur kecepatan aktual, sedangkan parameter PID dikonfigurasi untuk mencapai keseimbangan yang optimal antara respon cepat dan minimisasi *overshoot*. Selama pengujian, data

seperti pada waktu setting, presentasi *overshoot* dan kesalahan *steady-state* direkam untuk setiap pengaturan parameter PID dan kecepatan referensi data tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.7**.

**Tabel 3. 7** Hasil Data Respons Kecepatan Motor DC

No	Setpoint (RPM)	$K_p$	$K_i$	$K_d$	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error (rpm)
1							
2							
3							
4							
5							

dengan *setpoint* adalah kecepatan yang diinginkan untuk dicapai oleh motor DC selama pengujian (RPM),  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  adalah parameter tuning PID selama pengujian, *Overshoot* presentase *overshoot* dari kecepatan referensi (%), *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai dan tetap dalam batas toleransi dari nilai referensi (s), dan *Steady-state error* selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan sistem pada kondisi *steady-state* (rpm).

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian sistem kendali PID dan pembahasan data hasil pengukuran kecepatan sensor yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali PID pada motor DC telah dirancang dan diterapkan dengan berhasil, sehingga dapat dihasilkan respon motor DC sesuai *setpoint* dengan variasi *setpoint* 500 sampai 2600 RPM.
2. Hasil kinerja telah diuji bahwa sistem ini sehingga mampu mengatur kecepatan motor DC dengan kontrol PID dengan nilai  $K_p = 0,7$ ;  $K_i = 0,8$ ;  $K_d = 0,3$  menghasilkan performa yang baik, dilihat pada waktu penyelesaian, lonjakan dan kesalahan keadaan tunak.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat dilakukan lebih lanjut yaitu menggunakan sensor kecepatan yang memiliki resolusi tinggi untuk mendapat nilai putaran motor yang lebih presisi misalnya menggunakan sensor *rotary encoder* dan gunakan motor DC yang cukup baik untuk menghasilkan kecepatan yang cepat seperti Motor DC *Brushless*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, I. A., & Aji, D. (2018). Pemanfaatan Putaran Roda Sepeda Guna Menghasilkan Energi Listrik. *Seminar Nasional-XVII Rekayasa Dan Aplikasi Teknik Mesin Di Industri Kampus ITENAS*.
- Arsari, D. T. (2020). Legalitas Penggunaan Sepeda Listrik Sebagai Alat Transportasi Menurut Perspektif Hukum Pengangkutan Di Indonesia. *Jurist-Diction*, 3(3), 903-920.
- Bagia, I. N., & Parsa, I. M. (2018). *Motor-Motor Listrik untuk Mahasiswa dan Umum*. CV. Rasi Terbit.
- Barorah Dhiya', U., Anifah, L., Buditjahjanto, G., & Endryansyah. (2022). Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Conveyor dengan Metode Kontrol PID. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(Universitas Negeri Surabaya), 332–342.
- Bhavani, T., Kumar, K. S., Kumar, k. D., & Udai, S. (2015). Novel Design Of Solar Electric Bicycle with Pedal Assistance. *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 2(4), 104–108.
- Cahyono, M. R. A., Ita Mariza, & Surya Wirawan. (2022). Sistem Pemantauan dan Pengendalian Sepeda Listrik Berbasis Internet of Things. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 11(1), 53–60.
- Daryanto. (2023). *Teknik Elektronika*. PT. Bumi Aksara.
- Díaz-Rodríguez, I. D., Han, S., & Bhattacharyya, S. P. (2019). Analytical Design of PID Controllers. In *Springer Nature Switzerland AG*.
- Dong, X., Guan, W., & Meng, X. (2015). Implication of Dynamic Unbalance to the Inertial Accelerometer Calibration with Vibrafuge. *Procedia Engineering*, 99, 1185–1189.
- Dorf, R. ., & Bishop, R. . (1995). *Modern Control System*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc.
- Fahmizal, Mayub, A., Arrofik, M., & Ruciyanti, F. (2022). *Mudah Belajar*

*Arduino engan Pendekatan Berbasis Fritzing, Tinkercard dan Proteus*. Publisher.

Fikri, A. A., & Endryansyah. (2019). Sistem Pengaturan PID Motor DC Sebagai Penggerak Mini Conveyor Berbasis Matlab. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(2), 293–301.

Halim, F. R., Suwandi, & Suhendi, A. (2016). Rancang Bangun Syringe Pump Menggunakan Motor Stepper Designing And Realizing An Arduino Based Syringe Pump With Stepper Motor. *E-Proceeding of Engineering*, 3(2), 2078–2085.

Hamdani, I. (2021). *Modul Pembelajaran Mobil Listrik Ex Katana*. Pusat Pengembangan Pendidikan dan Penelitian Indonesia.

Ilman, A. F., Widarsono, K., Jauhari, M., & Humaira, F. M. (2018). Rancang Bangun Perlatan Pengaturan Kecepatan Motor BLDC menggunakan Pulse With Modulation (PWM). *Jurnal Techno Bahari*, 5(2), 37–44.

Kadir, A. (2016). *Simulasi Arduino*. PT. Elex Media Komputindo.

Kuncahyo, R. F. D. (2024). Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Menggunakan PID Controller. *Jurnal Teknik Elektro*, 13(2), 135–143.

Lubis, F. B., & Yanie, A. (2022). Implementasi Pulse Width Modulation (PWM) pada Penyaluran Limbah Cair Pupuk Kelapa Sawit Berbasis Arduino. *Journal of Electrical Technology*, 7(2), 39–46.

Martin, M. (2021). Sistem kendali posisi motor DC menggunakan state feedback controller dan real-time operating system. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 1(1), 69–78.

Montoya, F., Irwanto, I., & Prastyo, O. H. D. (2023). Sistem Kendali Jumlah Cycle Pada Mesin Cooling Bed Dalam Proses Pendinginan Produk Baja Profil (Section Mill). *Teknika*, 8(2), 47–57.

Naim, M. (2021). *Buku Ajar Sistem Kontrol dan Kelistrikan Mesin* (M. Nasrudin (ed.)). PT. Nasya Expanding Management.

Nainggolan, B., Inaswara, F., Pratiwi, G., & Ramadhan, H. (2014). Rancang Bangun Sepeda Listrik Menggunakan Panel Surya Sebagai Pengisi Baterai. *Politeknologi*.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering Fifth Edition* (Fifth). Prentice-Hall, Inc.

Oghata, K. (2002). *Modern Control Engineering Fourth Edition*. Prentice-Hall, Inc.

- Pakpahan, S. (1994). *Kontrol Otomatik-Teori dan Penerapan Edisi-2*. Erlangga.
- Papafotiou, G., Kley, J., & Papadopoulos, K. G. (2014). *Model Predictive Direct Torque Control — Part II : Implementation and Experimental Evaluation*.
- Pratama, M. R. (2022). Sistem Kecepatan Motor DC dengan Metode PWM. *Repoteknologi.Id*, 2(7), 1–19.
- Putera, N., Aditya, M. R., & Hidayat, R. (2022). Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan Pengendali PID dengan Encoder sebagai Feedback. *STRING (Satuan Tulisan Riset Dan Inovasi Teknologi)*, 7(1), 50-56.
- Putra, H., Jie, S., & Djohar, A. (2019). Perancangan Sepeda Listrik Dengan Menggunakan Motor Dc Seri. *Jurnal Fokus Elektroda : Energi Listrik, Telekomunikasi, Komputer, Elektronika Dan Kendali*, 4(2), 1-5.
- Riyadi, S. (2018). Peran Motor Listrik pada Transportasi Ramah Lingkungan. *Jurnal PRAXIS*, 1(1), 13–23.
- Romadhon, A. S., & Umam, F. (2021). *Project Sistem Kontrol Berbasis Arduino*. Media Nusa Kreative.
- Rosalina, Qosim, I., & Mujirudin, M. (2017). Analisis Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative). *Seminar Nasional Teknoka*, 2(2502), 89–94.
- Sendari, S., Wirawan, I. M., & Nasrulloh, M. (2021). *Sensor Tranduser*. Ahlimedia Press.
- Setiawardhana, Wasista, S., & Saraswati, D. A. (2019). *19 Jam Belajar Cepat Arduino Edisi Revisi* (N. Syamsiyah (ed.)). Bumi Aksara.
- Sipul, Y. U. D., Prasetya, D. A., Nachrowie, & Dirgantara, W. (2019). Control System Kendali Kecepatan Sepeda Motor Listrik dengan Metode PID. *JASIEK*, 1(1), 45–49.
- Subito, M., & Rizal. (2012). Menggunakan Sensor Optocoupler Dan Mikrokontroler AT89S52. *Jurnal Ilmiah Foristek*, 2(2), 184–189.
- Susilo, D., & Maghfiroh, A. M. (2022). Sensor Pengukur Kecepatan Putaran Motor Berbasis Mikrokontroler AT-Mega 8535. *ELECTRA : Electrical Engineering Articles*, 3(01), 43-50.
- Sutiarso, L., & Takigawa, T. (2020). Desain Sistem Kontrol Umpan Balik Pada Lintasan Traktor Tanpa Operator. *Agritech*, 22(4), 167–171.
- Sutiarso, L., Takigawa, T., & Koike, M. (2001). *Pengembangan Sistem Kontrol*

*Navigasi untuk Traktor Pertanian Tanpa Sensor*. Prosding Seminar Nasional Inovasi Alat dan Mesin Pertanian untuk Agribisnis B3P.

- Syamsuar, S., Wibawaningrum, R., & Makarim, H. (2011). Cara Kerja Dan Penggunaan Motor Direct Current ( DC ). *Peneliti Pusat Teknologi Industri Dan Sistem Transportasi BPPT*, 23, 509–523.
- Taufani, M. R. (2021). *Teknologi Ramah Lingkungan* (M. Al Wustho (ed.)). Penerbit Nuasa Cendekia.
- Telaumbanua, M. (2021). *Buku Ajar Pengantar Teknologi Instrumentasi Teknik Pertanian*. PT. Nasya Expanding Management.
- Tianur, Nurcahyo, M. B. A., Rahmawaty, M., & Jaenudin, J. (2023). *Rancang Bangun Sepeda Listrik Menggunakan Motor DC Brushless*. 9(1), 151–159.
- Tupalessy, J., Pattiapon, D. R., & Loppies, E. (2017). Perancangan Sistem Kontrol Menggunakan PLC CP 1L dengan I/O=6/4 untuk Menggerakkan Mesin AC maupun DC. *Jurnal Simetrik*, 7(1), 37–40.
- Waluyo, W., Fitriansyah, A., & Syahrial, S. (2013). Analisis Penalaan Kontrol PID pada Simulasi Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Berbeban menggunakan Metode Heuristik. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 1(2), 79-92.
- Widharma, I. G. S., & Wiranata, L. F. (2022). *Mikrokontroler dan Aplikasi*. Wawasan Ilmu.
- Winata, P. P. T., Wijaya, I. W. A., & Suartika, I. M. (2016). Rancang Bangun Sistem Monitoring Output dan Pencatatan Data pada Panel Surya Berbasis Mikrokontroler. *E-Journal SPEKTRUM*, 3(1), 1–6.
- Yuski, M. N., Hadi, W., & Saleh, A. (2017). Rancang Bangun Jangkar Motor DC ( The Rotor of DC Motor Design ). *Berkala Saintek*, 2, 98–103.