

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN ROBOT PENDULUM TERBALIK BERODA DUA
DENGAN KENDALI PID**

Disusun dan diajukan oleh
MUHAMMAD NASARUDDIN RACHMAT
D411 16 510



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

HALAMAN JUDUL

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN ROBOT PENDULUM TERBALIK BERODA DUA
DENGAN KENDALI PID**

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD NASARUDDIN RACHMAT

D411 16 510



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**RANCANG BANGUN ROBOT PENDULUM TERBALIK BERODA DUA DENGAN
KENDALI PID**

Disusun dan diajukan oleh :

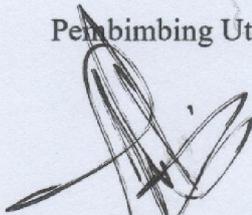
MUHAMMAD NASARUDDIN RACHMAT

D411 16 510

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 20 April 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

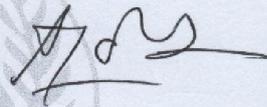
Menyetujui

Pembimbing Utama



Muh Anshar, ST. M.Sc(Research), Ph. D
NIP. 19770817 200501 1 003

Pembimbing Pendamping



Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T.
NIP. 19720908 199702 2 001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. H. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 0

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Nasaruddin Rachmat
NIM : D41116510
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Rancang Bangun Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 20 April 2022



Yang Menyatakan

Muhammad Nasaruddin Rachmat

ABSTRAK

MUHAMMAD NASARUDDIN RACHMAT. *Rancang Bangun Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID* (dibimbing oleh Muh Anshar dan Ejah Umraeni S.)

Inverted pendulum (pendulum terbalik) merujuk pada suatu pendulum yang digantung dengan pusat massa berada di atas titik gantungnya dengan memiliki masalah utama bagaimana mempertahankan pendulum di sekitar titik seimbang agar tidak terjatuh dan menjaga posisi pendulum terbalik tetap pada lintasan. Penelitian ini berfokus pada merancang bangun robot pendulum terbalik beroda dua dengan kendali PID untuk menstabilkan sudut *pitch* pendulum tetap di sekitar titik seimbang dan serta menjaga posisi robot tetap berada pada lintasan. Implementasi kendali PID pada robot pendulum terbalik beroda dua berbasis *microcontroller* dengan menggunakan *Accelerometer/gyro* sensor dan *Rotary encoder* serta *stepper motor* sebagai aktuator. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan kendali PID mampu menstabilkan sudut *pitch* pada 0 derajat ketika diberi gangguan dengan konstanta PID $K_p = 9$ $K_i = 1,3$ $K_d = 10$ *settling time* yang dibutuhkan 1,05 – 3 sekon, dan *overshoot* sebesar 0 – 3 derajat, serta mampu mempertahankan posisi robot pada lintasan ketika diberi gangguan dengan konstanta PID $K_p = 0,25$ $K_i = 0$ $K_d = 0.15$, *settling time* yang dibutuhkan 6,7 – 12,9 sekon, dan simpangan posisi akhir terhadap *setpoint* sebesar 0,5 – 0,9 centimeter.

Kata kunci : *Inverted pendulum, Robot pendulum terbalik beroda dua, Kendali PID*

ABSTRACT

MUHAMMAD NASARUDDIN RACHMAT. *Design and Build a Two-Wheel Inverted Pendulum Robot with PID Control* (dibimbing oleh Muh Anshar dan Ejah Umraeni S.)

Inverted pendulum refers to a pendulum that is suspended with its center of mass above its hanging point with the main problem of how to keep the pendulum around its balance point so as not to fall and keep the inverted pendulum position on the track. This research focuses on designing a two-wheeled inverted pendulum robot with PID control to see the pitch angle of the pendulum stays around the balance point and keeps the robot position on the track. Implementation of PID control on a two-wheeled inverted pendulum robot based on a microcontroller using an accelerometer/gyro sensor and a rotary encoder and a stepper motor as an actuator. From the results of the tests that have been carried out the PID control is able to find the angle at 0 degrees when the disturbance with the PID constant $K_p = 9$, $K_i = 1.3$, $K_d = 10$ settling time required is 1.05 - 3 seconds, and overshoot is 0 - 3 degrees, and is able to maintain the robot's position on the track when disturbed by the PID constant $K_p = 0.25$ $K_i = 0$ $K_d = 0.15$, the required settling time is 6.7 - 12.9 seconds, and the final position deviation from the setpoint is 0.5 - 0,9 centimeters.

Key words : Inverted pendulum, Two wheel reverse pendulum robot, PID control

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya kepada kami sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Penyusunan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka pemenuhan salah satu syarat menutup Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tak lupa pula kami mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah meluangkan waktunya untuk membantu selama masa perkuliahan hingga pada proses penyelesaian tugas akhir ini.

Kami selaku pelaku penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan serta masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kami membuka kesempatan kepada pembaca untuk memberikan kritik dan saran yang membangun untuk perkembangan penelitian ini dan perkembangan diri penulis sendiri. Semoga kesalahan dan kekurangan tersebut dapat menjadi pelajaran bagi kita semua.

Akhir kata, melalui tugas akhir ini kami berharap dapat turut serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dapat dimanfaatkan untuk kemaslahatan umat. Semoga apa yang telah kita usahakan dapat bernilai ibadah dan mendapatkan berkah dari-Nya.

Makassar, 20 April 2022

Muhammad Nasaruddin Rachmat

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	2
1. 3 Tujuan Penelitian	2
1. 4 Batasan Masalah	3
1. 5 Manfaat Penelitian	3
1. 6 Metode Penelitian	3
1. 7 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2. 1 Pendulum Terbalik Beroda Dua	5
2. 2 Pengendali PID	11
2.2.1 Metode <i>Tuning</i> PID	13
2. 3 Robot	13
2. 3. 1 <i>Non-mobile</i> Robot	14
2. 3. 2 <i>Mobile</i> Robot	14
2. 4 Perangkat Kontroler	14
2. 4. 1 Komputer	14
2. 4. 2 <i>Embedded system</i>	14
2. 5 Sensor	16

2. 5. 1 IMU (Inertial Measurement Unit) Sensor	17
2. 5. 2 <i>Incremental Rotary Encoder</i>	19
2. 6 Aktuator	20
2. 6. 1 Motor DC	20
2. 6. 2 Stepper Motor	21
2. 6. 3 <i>Servo motor</i>	22
2. 7 Filter	23
2. 7. 1 <i>High-Pass Filter</i>	23
2. 7. 2 <i>Low-Pass Filter</i>	23
2. 7. 3 <i>Complementary filter</i>	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN	25
3. 1 Rancangan Umum	25
3. 2 Alat dan Bahan	27
3. 3 Perancangan Sistem Perangkat Keras	28
3. 3. 1 Perancangan Sistem Mekanik	28
3. 3. 2 Perancangan Sistem Elektronika	30
3. 4 Perancangan Sistem Perangkat Lunak	32
3. 4. 1 Implementasi PID pada <i>ATMega 328p</i>	34
3. 4. 2 Kalkulasi Sudut <i>Pitch</i> dari MPU6050	34
3. 4. 3 Kalkulasi Posisi dari <i>Rotary Encoder</i>	35
3. 5 Tuning Konstanta PID	35
3. 6 Rancangan Pengujian	36
3. 6. 1 Pengujian Pembacaan Sensor MPU6050	36
3. 6. 2 Pengujian Pembacaan Posisi pada Lintasan Menggunakan <i>Rotary Encoder</i>	36
3. 6. 3 Pengujian Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID Mempertahankan Kestabilan Sudut <i>Pitch</i>	36
3. 6. 4 Pengujian Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID Mempertahankan Posisi pada <i>Setpoint</i> Lintasan	37
3. 6. 5 Pengujian Kendali PID Mempertahankan Posisi pada Lintasan dengan Pengaturan <i>Setpoint</i> Posisi	37

BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4. 1	Hasil Pengujian Sensor MPU6050	38
4. 2	Hasil Pengujian Pembacaan Posisi pada Lintasan Menggunakan <i>Rotary Encoder</i>	40
4. 3	Hasil <i>Manual Tuning</i> PID Sudut <i>Pitch</i> pada Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua	41
4. 4	Hasil Pengujian Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID Mempertahankan Kestabilan Sudut <i>Pitch</i>	43
4. 5	Hasil Pengujian Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID Mempertahankan Posisi pada Lintasan	46
4. 6	Hasil Pengujian Kendali PID Mempertahankan Posisi pada Lintasan dengan Pengaturan <i>Setpoint</i> Posisi	49
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	52
5. 1	Kesimpulan	52
5. 2	Saran	52
	DAFTAR PUSTAKA	54

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Struktur Fisik Pendulum Terbalik	5
Gambar 2.2 Struktur Fisik Pendulum Terbalik Beroda Dua	6
Gambar 2.3 Uraian Analisa Dinamis pada Pendulum Terbalik Beroda Dua	7
Gambar 2.4 Diagram Sistem Kendali PID	11
Gambar 2.5 Metode Manual Tuning Konstanta PID (Van der Zalm, 2004)	13
Gambar 2.6 Struktur Pembangun Microcontroller	15
Gambar 2.7 Tata Letak Kaki Beserta Fungsinya pada ATmega 328p	16
Gambar 2.8 Struktur Elektro-Mekanis IMU Sensor	18
Gambar 2.9 IMU Sensor MPU6050	18
Gambar 2.10 Hall Effect Sensor Incremental Rotary Encoder	19
Gambar 2.11 Sinyal Output Quadrature Encoder	20
Gambar 2.12 Struktur Sederhana dari Motor DC	21
Gambar 2.13 Struktur Bipolar Stepper Motor (Virgala, Kelemen, Gmitterko, & Lipták, 2015)	21
Gambar 2.14 Struktur Sederhana Servo Motor	22
Gambar 2.15 Complementary Filter (Pititeeraphab, 2016)	24
Gambar 3.1 Rancangan Umum Sistem Kendali Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap-tahap Perancangan	27
Gambar 3.3 Rancangan Mekanik Pendulum Terbalik Beroda Dua	29
Gambar 3.4 Bagan Sistem Elektronika Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua	30
Gambar 3.5 Skema Rangkaian Hubung Sistem Elektronika	31
Gambar 3.6 Diagram Alir Implementasi Tahap kalibrasi dan Inisiasi Robot Pendulum dengan Kendali PID	32
Gambar 3.7 Diagram Alir Kerja Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua	33
Gambar 4.1 Respon Pembacaan Sudut Pitch dengan Sensor MPU6050	39
Gambar 4.2 Respon Robot pada Percobaan Manual Tuning Konstanta PID	42
Gambar 4.3 Respon Robot dengan Kendali PID Mempertahankan Kestabilan Sudut Pitch	44

Gambar 4.4 Respon Hasil Pengujian Robot dengan Kendali PID Mempertahankan Posisi	47
Gambar 4.5 Respon Hasil Pengujian Kendali PID dengan Pengaturan Setpoint Posisi	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 spesifikasi <i>ATMega 328p</i>	16
Tabel 3.1 Alat dan bahan	28
Tabel 4.1 Hasil Pembacaan dan Kalkulasi Sudut Pitch Sensor MPU6050	38
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Rotary Sensor	40
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Posisi Secara Teori	41
Tabel 4.4 Hasil Tuning Konstanta PID Secara Manual	41
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kendali PID Mempertahankan Kestabilan Sudut Pitch	43
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Robot dengan Kendali PID Mempertahankan Posisi dan Perbandingan dengan Menggunakan Alat Ukur	48
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Posisi dan Respon Parameter PID Kendali Posisi	51

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
ADC	Konverter <i>Analog to Digital</i>
DAC	Konverter <i>Digital to Analog</i>
IMU	<i>Inertial measurement unit</i>
MEMS	<i>micro-electro-mechanical system</i>
LPF	<i>Low Pass Filter</i>
HPF	<i>High Pass Filter</i>
g	Konstanta gravitasi
$m / cm / mm$	Satuan panjang (meter)
$^{\circ}$	Derajat sudut (<i>degree</i>)
$counter_{enc}$	Hasil <i>counting</i> pulsa dari sinyal <i>encoder</i>
\pm	Kurang atau lebih dari

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pendulum terbalik atau *inverted pendulum* merupakan sebuah masalah klasik dalam teori kendali. Istilah pendulum terbalik merujuk pada model mekanis pendulum yang memiliki pusat massa di atas titik gantungnya. Dilihat dari karakteristiknya pendulum terbalik ialah suatu sistem yang tidak stabil dan tidak linier, Sehingga pendulum terbalik menjadi favorit dan sering digunakan untuk menguji suatu sistem kendali oleh para peneliti dalam bidang ilmu fisika, dinamika, maupun kontrol (Lundberg & Barton, 2010).

Masalah utama pada pendulum terbalik adalah bagaimana mempertahankan pendulum tetap berada di sekitar titik seimbang dengan beban yang berada di atas titik gantungnya. contoh sederhana pendulum terbalik ada pada batang sapu terbalik yang diseimbangkan dengan jari telunjuk. untuk dapat menyeimbangkan sapu yang berdiri pada jari, maka usaha yang dilakukan berupa menggerakkan jari telunjuk maju mundur atau kiri kanan jika usaha tidak dilakukan, maka sapu terbalik akan terjatuh. Masalah berikutnya ketika sapu terbalik terus menerus diseimbangkan maka akan terjadi perpindahan posisi jari telunjuk sehingga lambat laun posisi sapu akan terus menjauh dari titik awalnya. *Tracking* posisi harus dapat dilakukan karena dalam aplikasinya lintasan pendulum terbalik memiliki batas atau diberi batas, Maka diperlukan usaha berikutnya untuk menjaga posisi agar tetap dalam batas lintasan atau tetap pada posisi pada posisi tertentu (Ayenew & Sukhavasi, 2017).

Terapan sistem pendulum terbalik mulai banyak digunakan pada militer, industri maupun kehidupan sehari-hari seperti sistem navigasi roket, peluru kendali, *drone multicopter*, robot *humanoid*, maupun kendaraan *two wheel human transporter* yang saat ini banyak dikembangkan. Dalam teknik kontrol pendulum terbalik dengan tambahan beberapa komponen berupa aktuator, sensor, dan sebuah sistem pengendali membentuk sistem terpadu pendulum terbalik yang terkendali (Lima, Goncalves, Costa, & Moreira, 2006).

Pengendali PID merupakan salah satu metode kendali yang telah banyak digunakan pada sistem kontrol industri dalam setengah abad terakhir (Lima, Goncalves, Costa, & Moreira, 2006). Pengendali PID merupakan sistem kendali SISO (*single input single output*) yang memiliki struktur dan proses komputasi yang sederhana, Sehingga dapat diimplementasikan pada berbagai sistem termasuk sistem pendulum terbalik. Pengendali PID dapat digunakan untuk menstabilkan pendulum terbalik di sekitar titik seimbangannya. Sedangkan untuk mengendalikan posisi pada lintasan dan sudut *pitch* pada pendulum terbalik dapat digunakan sebuah pengendali PID tambahan yang dikonfigurasi secara bertingkat (Nusantoro, Muslim, , & C, 2012).

Dari uraian masalah tersebut maka penulis mengangkat judul penelitian : “*Rancang Bangun Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua dengan Kendali PID*”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka permasalahan yang menjadi objek penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang desain robot pendulum terbalik beroda dua dengan kendali PID ?
2. Bagaimana kinerja kendali PID untuk mempertahankan kestabilan sudut *pitch* pendulum pada sistem pendulum terbalik beroda dua?
3. Bagaimana kinerja kendali PID bertingkat untuk mempertahankan *setpoint* posisi pada lintasan robot pendulum terbalik beroda dua ?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menghasilkan *prototipe* robot pendulum terbalik beroda dua dengan kendali PID.
2. Menguji kinerja kendali PID untuk mempertahankan kestabilan sudut *pitch prototipe* robot pendulum terbalik beroda dua.
3. Menguji kinerja kendali PID untuk mempertahankan *setpoint* posisi pada lintasan *prototipe* robot pendulum terbalik beroda dua.

1.4 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Pada penelitian dalam merancang robot pendulum terbalik beroda dua tidak mengacu pada model dinamis dari pendulum terbalik beroda dua.
2. Sistem pendulum terbalik beroda dua menggunakan *stepper motor*.
3. Pada penelitian ini terbatas pada mengendalikan sudut *pitch* θ pendulum, dan posisi pada lintasan robot pendulum terbalik beroda dua.
4. Metode *tuning* konstanta PID ditentukan dengan cara manual.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Meningkatkan kemampuan dalam berfikir dan menambah wawasan terkait tentang penerapan teori yang sebelumnya diperoleh dari mata kuliah.
2. Hasil Penelitian dapat menjadi pertimbangan dan rujukan bagi penelitian lain.

1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah
Merupakan tahap mengumpulkan dan mengidentifikasi masalah yang akan diangkat dengan menentukan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan batasan masalah.
2. Studi Literatur
Studi literatur merupakan kajian yang dilakukan untuk mendapatkan informasi terkait dengan penelitian sehingga dihasilkan landasan teori yang kuat yang dapat menunjang penelitian.
3. Rancang bangun perangkat keras dan perangkat lunak
Pembuatan sistem mekanik dari pendulum terbalik dan implementasi kendali PID pada *microcontroller ATmega 328p*.

4. Analisis Data

Melakukan analisis terhadap Unjuk kerja sistem kendali PID pada sistem yang telah dibangun.

1.7 Sistematika Penulisan

Penyusunan sistematika penulisan pada penelitian ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang akan digunakan sebagai penunjang dalam penelitian ini.

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi penjelasan mengenai tahapan perancangan sistem kendali PID, perancangan sistem mekanik, perancangan perangkat keras, dan perancangan perangkat lunak pada penelitian ini.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menampilkan data dan analisis hasil pengujian sistem yang telah dibuat.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

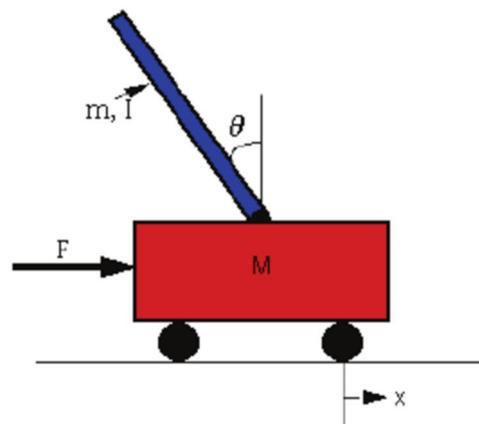
Bab ini berisi kesimpulan penelitian ini dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

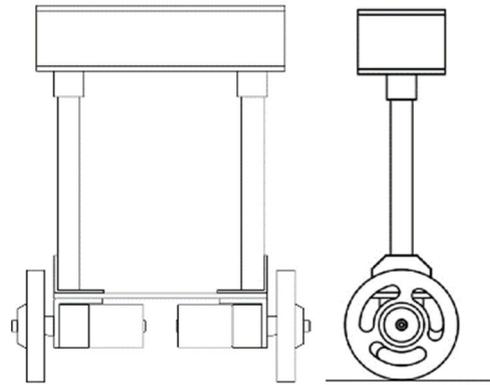
2.1 Pendulum Terbalik Beroda Dua

Pendulum terbalik merupakan sebuah pendulum yang memiliki pusat massa di atas titik gantung atau titik pivotnya. Dilihat dari fisik, penyusun Pendulum terbalik terdiri dua bagian, yaitu suatu batang pendulum dan suatu kereta pembawa (*cart*). Batang pendulum terletak di atas kereta pembawa dengan satu sendi yang bebas dalam satu derajat kebebasan, Sedangkan kereta pembawa dapat bergerak bebas pada lintasan sumbu horizontal (Lundberg & Barton, 2010). Struktur fisik dasar pendulum terbalik dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Struktur Fisik Pendulum Terbalik

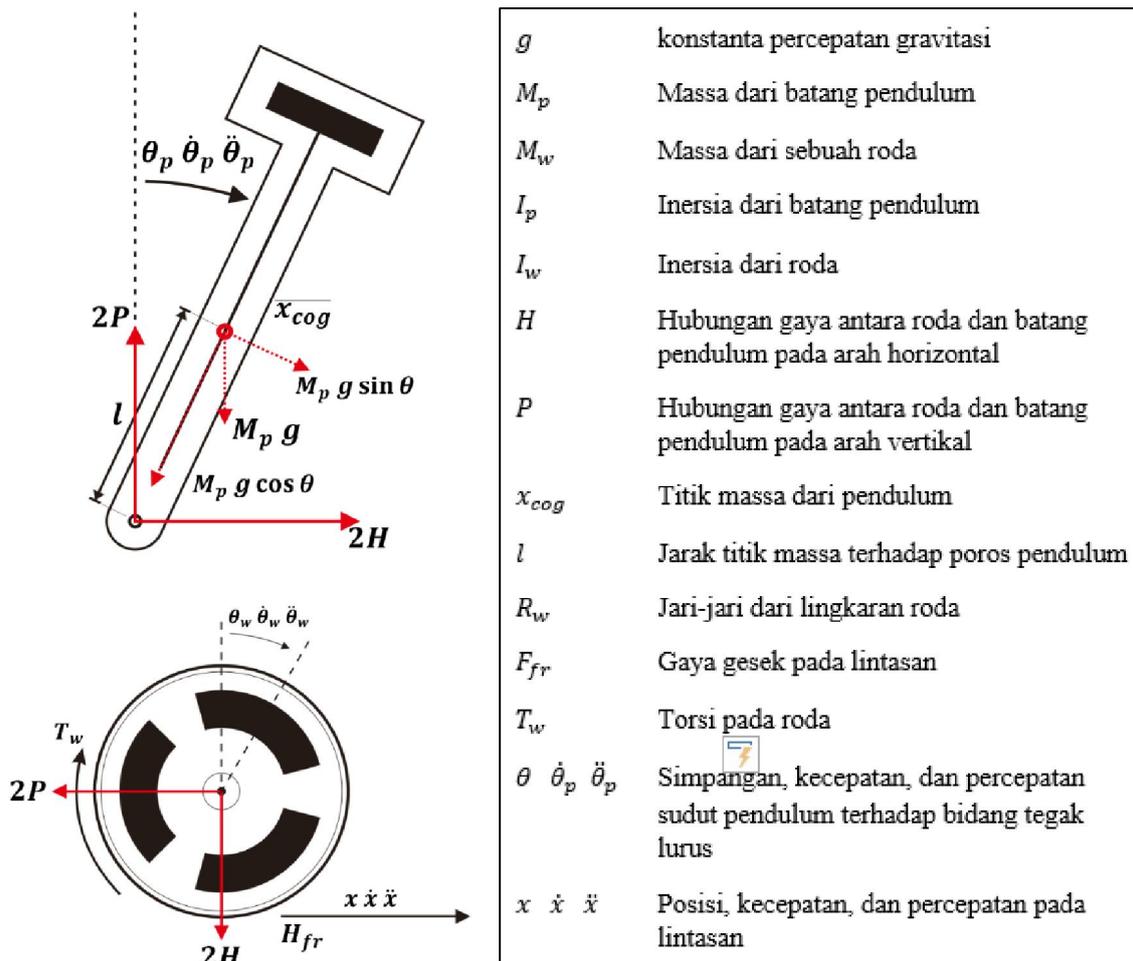
Pendulum terbalik beroda dua merupakan salah satu pengembangan dari konsep pendulum terbalik. Pada pendulum terbalik beroda dua kereta pembawa (*cart*) terdiri atas dua buah roda penggerak dan titik gantung atau titik pivot pendulum terbalik terhubung langsung dengan poros roda penggerak (Pathak, Franch, & Agrawal, 2005). Struktur fisik dasar pendulum terbalik beroda dua dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Struktur Fisik Pendulum Terbalik Beroda Dua

Pendulum terbalik beroda dua merupakan sistem tidak linear dan tidak stabil, sehingga membutuhkan sistem pengendali untuk menstabilkan pendulum tersebut di sekitar titik seimbang. Untuk melakukan pengendalian pada pendulum dibutuhkan beberapa komponen yaitu aktuator (roda penggerak), sensor, dan sistem pengendali. Pada pendulum terbalik beroda dua untuk menggerakkan pendulum menuju titik seimbangnya dengan cara dengan memberi putaran pada roda penggerak sehingga akan timbul gaya pada poros gantung pendulum yang membuat pendulum dapat bergerak mendekat atau menjauh dari titik seimbangnya. Untuk mengetahui besar simpangan posisi antara pendulum dan titik seimbangnya, dibutuhkan sebuah sensor posisi yang dapat membaca simpangan dalam satuan derajat. Selanjutnya sistem pengendali yang akan melakukan pengendalian pada pendulum terbalik beroda dua dengan menjaga pendulum berada di titik seimbangnya (Li, Yang, & Fan, 2013).

Pendulum terbalik beroda dua dimodelkan dengan melakukan analisa jumlahan gaya dan torsi yang bekerja pada kedua roda dan batang pendulum. Dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut uraian analisa gaya dan torsi yang bekerja pada robot.



Gambar 2.3 Uraian Analisa Dinamis pada Pendulum Terbalik Beroda Dua

Persamaan gaya yang bekerja pada roda dapat didefinisikan

$$M_w \ddot{x} = F_{fr} - F_R \quad (2.1)$$

Sedangkan Persamaan torsi pada roda adalah

$$I_w \ddot{\theta}_w = T_R - F_{fr} R_w \quad (2.2)$$

Dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh hubungan antara gaya yang bekerja pada roda dari torsi yang dihasilkan pada roda dengan hubungan F_{fr} , sehingga diperoleh persamaan dinamis roda pada roda kiri

$$M_w \ddot{x} = \frac{-I_w \ddot{\theta}_w + T_R}{R_w} - F_R \quad (2.3)$$

Dan pada roda kanan dapat dituliskan

$$M_w \ddot{x} = \frac{-I_w \ddot{\theta}_w + T_L}{R_w} - F_L \quad (2.4)$$

Karena robot pendulum terbalik terdiri dari dua roda dan menghasilkan arah gaya yang sama maka dapat diperoleh persamaan dinamis pada poros yang terhubung roda

$$2 \left(M_w + \frac{I_w}{R^2} \right) \ddot{x} = \frac{2 T_w}{R_w} - 2F \quad (2.5)$$

Sedangkan jumlah gaya yang bekerja pada batang pendulum terhadap sumbu horizontal adalah

$$M_p \ddot{x}_{cog} = 2F \quad (2.6)$$

Di mana perpindahan posisi titik massa (*center of gravity*) pendulum terhadap sumbu horizontal dapat didefinisikan

$$x_p = x + l \sin \theta_p \quad (2.7)$$

Sedangkan persamaan percepatan linier terhadap sumbu horizontal di titik massa dapat didefinisikan

$$\ddot{x}_{cog} = \ddot{x} - l \sin \theta_p \dot{\theta}_p^2 + l \cos \theta_p \ddot{\theta}_p \quad (2.8)$$

Sehingga persamaan gaya dapat dijabarkan adalah

$$M_p (\ddot{x} - l \sin \theta_p \dot{\theta}_p^2 + l \cos \theta_p \ddot{\theta}_p) = 2F \quad (2.9)$$

Sedangkan jumlah gaya yang bekerja pada sumbu vertikal adalah

$$M_p \ddot{y}_{cog} = M_p g - 2P \quad (2.10)$$

$$(M_p l \sin \theta_p) \ddot{\theta}_p + (M_p l \cos \theta_p) \dot{\theta}_p^2 = M_p g - 2P \quad (2.11)$$

Jumlahan torsi pada titik massa (*center of gravity*)

$$I_p \ddot{\theta}_p = 2Pl \sin \theta_p - 2Fl \cos \theta_p - 2T_w \quad (2.12)$$

Sehingga dapat diperoleh persamaan dinamis pada batang pendulum

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\theta}_p = (M_p g l) \sin \theta_p - (M_p l \sin \theta_p) \ddot{x} - 2T_w \quad (2.13)$$

Dapat pula diperoleh hubungan persamaan dinamis roda dengan gaya yang bekerja pada batang pendulum sebagai berikut

$$\left[M_p + 2 \left(M_w + \frac{J_w}{R^2} \right) \right] \ddot{x} = (M_p l \sin \theta_p) \dot{\theta}_p^2 - (M_p l \cos \theta_p) \ddot{\theta}_p + \frac{2}{R} T_w \quad (2.14)$$

Dari kedua persamaan tersebut dapat di substitusi sehingga dapat diperoleh persamaan sebagai berikut

$$\ddot{x} = \left[M_p + 2 \left(M_w + \frac{J_w}{R^2} \right) - \frac{(M_p l \cos \theta_p)^2}{M_p l^2 + I_p} \right]^{-1} \left((M_p l \sin \theta_p) \dot{\theta}_p^2 - \frac{(M_p l)^2 g \sin \theta_p \cos \theta_p}{M_p l^2 + I_p} \right) \theta_p + 2 \left(\frac{1}{R} + \frac{M_p l \cos \theta_p}{M_p l^2 + I_p} \right) T_w \quad (2.15)$$

$$\ddot{\theta}_p = \left[I_p + M_p l^2 - \frac{(M_p l \cos \theta_p)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right]^{-1} M_p l \sin \theta_p \left(g + \frac{M_p l \cos \theta_p (\dot{\theta}_p)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right) - 2 \left(R + \frac{M_p l \cos \theta_p}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right) \frac{T_w}{R} \quad (2.16)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan non-linear sehingga untuk melakukan pengendalian menggunakan pengendali linear maka perlu dilakukan linearisasi yaitu dengan meninjau pendulum terbalik pada posisi seimbang dan pendulum bergerak di sekitar titik equilibrium-nya, sehingga dengan mengasumsikan (Kung, 2019)

$$\sin \theta_p \approx \theta_p; \quad \cos \theta_p \approx 1; \quad \dot{\theta}_p^2 \approx 0$$

Maka diperoleh persamaan linear dari sistem pendulum terbalik beroda dua sebagai berikut

$$\ddot{x} = \left[M_p + 2 \left(M_w + \frac{J_w}{R^2} \right) - \frac{(M_p l)^2}{M_p l^2 + I_p} \right]^{-1} \left(-\frac{(M_p l)^2 g}{M_p l^2 + I_p} \right) \theta_p \quad (2.17)$$

$$+ 2 \left(\frac{1}{R} + \frac{M_p l}{M_p l^2 + I_p} \right) T_w$$

$$\ddot{\theta} = \left[I_p + M_p l^2 - \frac{(M_p l)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right]^{-1} M_p g l \theta_p - 2 \left(R + \frac{(M_p l)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right) \frac{T_w}{R} \quad (2.18)$$

Dapat diasumsikan

$$A = M_p + 2 \left(M_w + \frac{J_w}{R^2} \right) - \frac{(M_p l)^2}{M_p l^2 + I_p} \quad (2.19)$$

$$B = I_p + M_p l^2 - \frac{(M_p l)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \quad (2.20)$$

$$C_1 = \frac{1}{A} \left(\frac{(M_p l)^2 g}{M_p l^2 + I_p} \right) \quad (2.21)$$

$$C_2 = \frac{2}{A} \left(\frac{1}{R} + \frac{M_p l}{M_p l^2 + I_p} \right) \quad (2.22)$$

$$C_3 = \frac{M_p g l}{B} \quad (2.23)$$

$$C_4 = \frac{2}{BR} \left(R + \frac{(M_p l)^2}{M_p + 2 \left(\frac{I_p}{R^2} \right)} \right) \quad (2.24)$$

Sehingga persamaan tersebut dapat pula dituliskan

$$\ddot{x} = -C_1 \theta_p + C_2 T_w \quad (2.25)$$

$$\ddot{\theta}_p = C_3 \theta_p - C_4 T_w \quad (2.26)$$

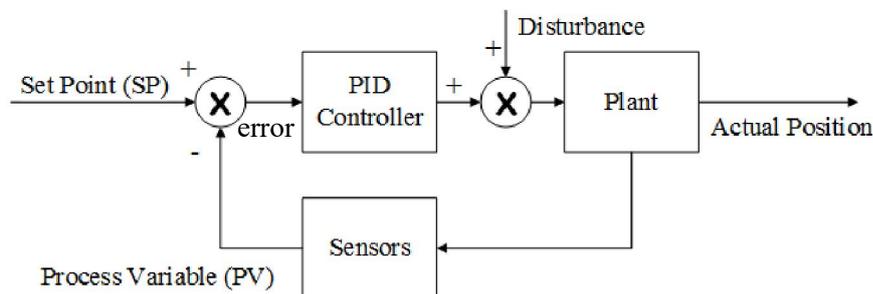
Dari persamaan tersebut dapat diubah ke dalam bentuk *state-space*

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \\ 0 \\ -C_4 \end{bmatrix} T_w \quad (2.27)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \\ \phantom{\dot{x}} \\ \\ \phantom{\dot{\theta}_p} \end{bmatrix}$$

2.2 Pengendali PID

Pengendali PID adalah pengendali yang sering digunakan dibidang industri, robotika maupun *home automation*. Kendali PID merupakan suatu kendali yang sederhana dan dikategorikan sebagai kendali *Single Input single Output* (SISO). Kendali merupakan kendali daur tertutup dan bekerja dengan cara mengoreksi keluaran suatu sistem dengan melakukan perhitungan selisih antara *set point* atau sinyal masukan dan keadaan sistem saat ini yang diumpun balik sehingga memperoleh nilai *error* kemudian nilai *error* dikalkulasi pada pengendali PID, sehingga mengeluarkan sinyal berupa usaha untuk mengurangi nilai *error* pada sistem tersebut (Visioli, 2006). Diagram pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai berikut.



Gambar 2.4 Diagram Sistem Kendali PID

PID bekerja dengan tiga komponen pengendali utamanya yaitu komponen *proportional*, *integral*, dan *derivative*. *Proportional* memiliki keluaran berdasarkan nilai *error* saat ini. Komponen *integral* menghasilkan keluaran berdasarkan jumlah *error* saat ini dan *error* sebelumnya. Sedangkan komponen *derivative* memiliki keluaran berdasarkan selisih *error* saat ini dan *error* sebelumnya. Keluaran yang

dihasilkan tiap komponen akan dijumlahkan sehingga menghasilkan bobot sinyal keluaran $u(t)$ yang akan di umpan pada *plant* atau sistem yang akan dikendalikan (Johnson & Moradi, 2005). Bentuk persamaan umum pengendali PID dapat dinyatakan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.28)$$

Pengaplikasian PID pada sistem digital sering menggunakan diskrit PID secara sederhana (Tim, 2000). Persamaan PID dapat dirumuskan pada Persamaan 2.2 berikut

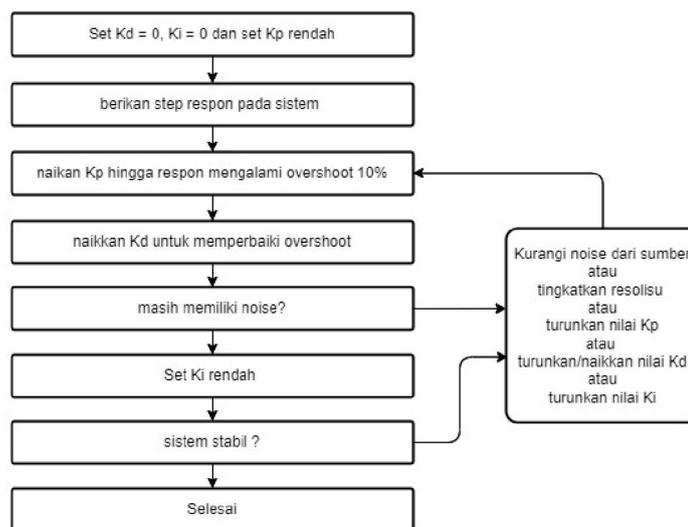
$$\text{output PID} = K_p e_t + K_i (e_t + e_{(t-1)}) + K_d (e_t - e_{(t-1)}) \quad (2.29)$$

Untuk mendapatkan kendali PID yang memiliki performa baik dibutuhkan pengaturan gain atau konstanta yang tepat pada komponen *proportional* (K_p), *integral* (K_i), dan *derivative* (K_d). Dalam pengaturan konstanta PID ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dari *respon* keluaran sistem yang dikendalikan, berikut beberapa parameter yang perlu diperhatikan.

1. *Rise time*, merupakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai dari kondisi awal menuju nilai *setpoint*.
2. *Overshoot*, merupakan nilai maksimum dari *respon* sistem ketika menuju stabil pada *setpoint*.
3. *Settling time*, didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sistem hingga mencapai kondisi *steady state*.
4. *Steady-state error*, merupakan selisih antara keluaran sistem saat kondisi *steady state* dengan *setpoint*.
5. *Stability*, merupakan *respon* suatu sistem untuk tetap bertahan pada posisi *steady-state* ketika mencapai *setpoint*.
6. *Steady state*

2.2.1 Metode *Tuning* PID

Untuk mendapatkan respon sistem yang baik diperlukan sebuah pengaturan atau *tuning* pada konstanta PID. Beberapa metode *tuning* banyak dijumpai yang telah sering diaplikasikan pada dunia industri. salah satunya adalah metode *manual tuning* atau *trial and error method* yaitu dengan cara melakukan percobaan *tuning* berulang-ulang kali secara manual hingga diperoleh konstanta yang memiliki respon sistem terbaik (Van der Zalm, 2004). Adapun tahap-tahap manual *tuning* yang umum digunakan dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 2.5 Metode *Manual Tuning* Konstanta PID (Van der Zalm, 2004)

2.3 Robot

Kata robot berasal dari bahasa Czech (Ceko), *robot* yang berarti pekerja atau kuli. Robot merupakan suatu perangkat mekanik yang mampu menjalankan pekerjaan fisik atas kendali manusia atau otomatis dengan program yang telah terpasang ataupun dengan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*). Robot dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi fisiknya yaitu *non-mobile* robot dan *mobile* robot.

2. 3. 1 Non-mobile Robot

Non-mobile robot merupakan robot yang tidak dapat berpindah secara keseluruhan dari posisinya. Robot *Arm* atau robot lengan adalah salah satu contoh *non-mobile* robot.

2. 3. 2 Mobile Robot

Mobile robot merupakan robot yang dapat bergerak dengan berpindah secara keseluruhan bagian robot karena memiliki alat untuk bergerak. Mobile robot dapat diklasifikasi berdasar sistem penggerakannya yaitu robot beroda dan robot berkaki. Robot beroda bergerak menggunakan roda yang digerakkan oleh aktuator, sedangkan robot berkaki menggunakan mekanik yang dibentuk sedemikian rupa layaknya mekanisme gerak seperti kaki makhluk hidup yang juga digerakkan oleh aktuator.

2. 4 Perangkat Kontroler

Perangkat kontroler atau *controller* merupakan sebuah perangkat keras yang digunakan untuk mengendalikan suatu sistem yang dapat menerima masukan, mengolah data dan, menghasil keluaran.

2. 4. 1 Komputer

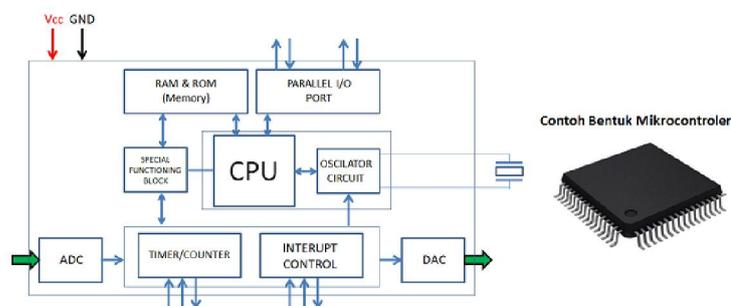
Komputer merupakan perangkat yang terdiri dari beberapa komponen *hardware* dan *software* yang saling terhubung dengan fungsi komputasi secara generik yang menerima masukan, mengolah data dan, menghasil keluaran. Komputer memiliki *user interface* yang bersahabat bagi pengguna sehingga dalam fungsi pengontrolan komputer dapat digunakan secara mudah dan luas. Contoh sistem komputer yang terus dikembangkan dari tahun ke tahun seperti *Personal Computer, workstation computer* (Vahid & Givargis, 1999).

2. 4. 2 Embedded system

Embedded system merupakan sistem yang terdiri dari beberapa komponen yang tertanam pada perangkat yang dikendalikannya dan dibuat berdasarkan tujuan khusus. Berbeda dengan komputer, *embedded system* dibuat dengan kebutuhan

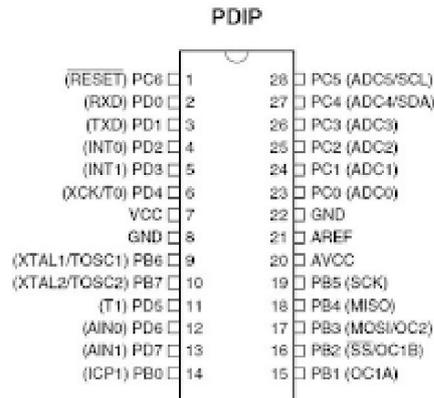
spesifik serta fungsi kerja yang telah didefinisikan untuk melakukan pengontrolan pada perangkat yang dikendalikannya dan memiliki *user interface* yang terbatas pada pengguna. Contoh penerapan embedded system atau sistem tertanam seperti printer, kamera, *vending machine*, dan *robotic application* (Vahid & Givargis, 1999).

Microcontroller merupakan salah satu embedded system yang terdiri dari beberapa komponen yang tertanam dalam satu keping *chip* yang dapat diprogram dengan fungsi tertentu microcontroller terdiri dari beberapa komponen seperti *microprocessor*, *memory*, *port I/O* dan beberapa *peripheral* seperti ADC, *Serial port*, *Timer DAC*, dan *peripheral* lainnya yang mendukung fungsi pengontrolan. Gambar 2.5 berikut menunjukkan contoh komponen pembangun sebuah *microcontroller*.



Gambar 2.6 Struktur Pembangun *Microcontroller*

ATMega 328p merupakan salah satu jenis *microcontroller* dengan arsitektur dasar RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). *Microcontroller ATMega 328p* memiliki instruksi dasar 8-bit yang memiliki 23 *pin I/O*. Gambar 2.6 berikut menunjukkan konfigurasi *pin* pada *ATMega 328p*.



Gambar 2.7 Tata Letak Kaki Beserta Fungsinya pada *ATMega 328p*

ATMega 328p bekerja pada tegangan 5v dengan frekuensi *clockspeed* 16Mhz. *Microcontroller* ini memiliki beberapa jenis komunikasi serial antara lain, UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), IIC (*Inter-Integrated Circiut*), SPI (*Serial Peripheral Interface*). Berikut adalah tabel lengkap spesifikasi dari *ATMega 328p*.

Tabel 2.1 spesifikasi *ATMega 328p*

<i>ATMega 328p</i>	
<i>Arsitektur</i>	RISC
<i>Clockspeed</i>	16MHz
<i>Voltage</i>	5 Volt
<i>Flash Memory</i>	32 Kbyte
SRAM	1 Kbyte
EEPROM	1 Kbyte
Digital I/O	23 pin
Analog	6 channel ADC
<i>Serial communication</i>	UART, IIC, SPI
<i>Timer</i>	Timer0, Timer1, Timer2
<i>PWM Output</i>	6 channel PWM

2.5 Sensor

Sensor merupakan perangkat yang mampu menerjemahkan fenomena pada lingkungan ke dalam besaran elektrik sehingga dapat diolah oleh sistem elektronika.

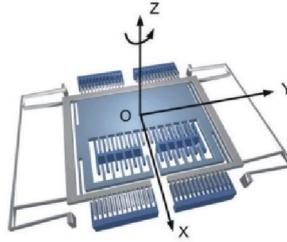
Dalam ilmu robotika sensor sebagai indra pada robot untuk mengenali indikasi-indikasi fisik pada lingkungan robot yang akan diterima oleh perangkat kontroler.

2. 5. 1 IMU (Inertial Measurement Unit) Sensor

Inertial measurement unit merupakan suatu unit pengukuran kecepatan, arah serta posisi suatu benda dengan menggunakan *gyroscope* dan *accelerometer*. *Gyroscope* sendiri merupakan unit pengukur kecepatan sudut dan posisi sudut dalam tiga sumbu derajat kebebasan, sedangkan *accelerometer* ialah unit pengukur kecepatan/percepatan linier serta perubahan posisi dan arah dalam tiga sumbu derajat kebebasan (Ahmad, Ghazilla, Khairi, & Kasi , 2013).

Sensor IMU dijumpai pada navigasi pesawat dan mulai banyak digunakan pada berbagai bidang industri dan dalam kehidupan sehari-hari seperti, pada navigasi pesawat, navigasi roket, navigasi satelit, pada *mobile robot*, bahkan *smartphone* hingga *camera gimbal* (Ahmad, Ghazilla, Khairi, & Kasi , 2013) (Zhao & Wang, 2012).

IMU bekerja dengan menggunakan prinsip *micro-electro-mechanical system* (MEMS) di mana sebuah penghantar bekerja secara mekanis dan elektrik, perubahan keadaan mekanis yang diakibatkan oleh gaya dari lingkungan mengakibatkan perubahan perilaku elektrik sehingga menghasilkan pengukuran dalam sinyal listrik. Dapat diumpamakan pada dua buah batang bermuatan yang diletakkan pada sebuah bidang datar, ketika bidang tersebut dimiringkan maka salah satu batang akan bergerak mendekati batang lainnya sehingga terjadi perubahan perilaku elektrik berupa nilai kapasitansi antara kedua batang tersebut berubah. Sistem MEMS ini dibuat dalam bentuk mikro yang tertanam yang terintegrasi dalam satu paket *chip* (Zhao & Wang, 2012). berikut adalah salah satu contoh struktur elektro-mekanis dari IMU (*Inertial measurement unit*) sensor.



Gambar 2.8 Struktur Elektro-Mekanis IMU Sensor

Salah satu jenis IMU sensor adalah MPU6050 produk dari *Invensense* yang memiliki *gyroscope* dan *accelerometer* masing-masing dalam tiga sumbu derajat kebebasan. Bentuk fisik sensor MPU6050 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.9 IMU Sensor MPU6050

Keluaran dari *gyroscope* dan *accelerometer* dapat dilakukan kalkulasi untuk mendapatkan posisi sudut absolut dalam tiga sumbu derajat kebebasan. Untuk melakukan kalkulasi sudut pitch dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

$$\text{sudut } \theta_{acc} = \left(\tan^{-1} \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (2.30)$$

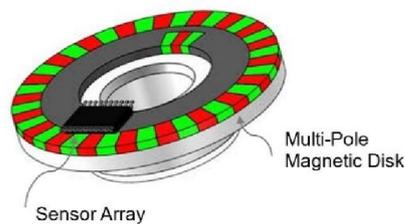
sudut θ_{acc} merupakan hasil sudut *pitch* yang diperoleh dari perhitungan *accelerometer* dalam satuan derajat dan a_x, a_y, a_z merupakan nilai percepatan linier dalam satuan m/s^2 yang juga dipengaruhi dengan percepatan gravitasi $g = 9.8 m/s^2$. Adapun untuk mendapatkan nilai sudut dari keluaran *gyroscope* dapat dirumuskan dalam Persamaan 2.4 berikut.

$$\text{sudut } \theta_{gyro} = gyro_{output} * dt_{sampling} \quad (2.31)$$

θ_{gyro} merupakan *output* sudut *pitch* dalam derajat, $gyro_{output}$ adalah output kecepatan sudut dalam satuan derajat per sekon dari sensor, dan $dt_{sampling}$ merupakan periode yang dibutuhkan dalam mencuplik data dari sensor.

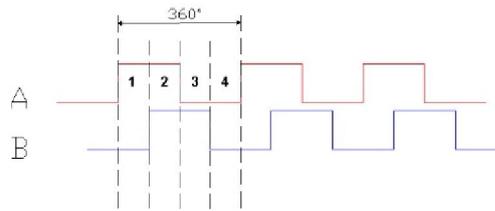
2. 5. 2 *Incremental Rotary Encoder*

Incremental rotary encoder atau pembuat kode putar tambahan merupakan salah satu jenis *rotary encoder* yang digunakan untuk mengukur posisi, kecepatan, dan arah dari sebuah benda yang berputar pada poros (David Rapos, 2016). *Incremental rotary encoder* memiliki banyak jenis, salah satunya menggunakan sifat medan magnet yang sering disebut sebagai *hall effect sensor Incremental rotary encoder* (David Rapos, 2016) (Wu, Chen, & Wu, 2014).



Gambar 2.10 *Hall Effect Sensor Incremental Rotary Encoder*

Jenis sensor ini terdiri dari sebuah piringan magnet (*magnetic disk*) yang memiliki *multi-pole* magnet dan sebuah *hall effect* sensor yang dapat membaca besar medan magnet serta polaritas medan tersebut. Dalam aplikasinya sering digunakan dua *hall effect* sensor digital yang dipasang 90° terhadap fasa gelombang medan magnet yang dihasilkan dari putaran piringan magnet, sehingga diperoleh keluaran sinyal berupa *quadrature* sinyal atau sinyal dengan empat keadaan dalam 2-bit keluaran sinyal digital (Wu, Chen, & Wu, 2014). Berikut adalah bentuk keluaran sinyal *quadrature* dari dua buah *hall effect sensor*.



Gambar 2.11 Sinyal Output Quadrature Encoder

Untuk menghitung posisi rad sebuah roda dapat dikalkulasi dengan menggunakan Persamaan 2.32 berikut.

$$posisi (rad) = \frac{value_{enc}}{2 \times ppr} 2\pi \quad (2.32)$$

Dimana pada Persamaan 2.5 $posisi (rad)$ adalah posisi dalam sudut radian, $value_{enc}$ adalah nilai *incremental counter*, dan ppr adalah resolusi *pulse per revolution* dari *rotary encoder*. Sedangkan untuk menghitung posisi pada lintasan dari pembacaan encoder dapat dirumuskan pada persamaan 2.33 berikut.

$$posisi (m) = posisi_{rad} * r \quad (2.33)$$

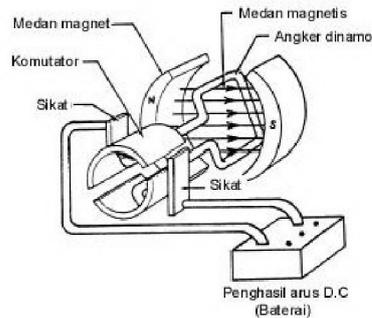
Yang mana $posisi (m)$ adalah posisi dalam satuan meter, $posisi_{rad}$ adalah posisi sudut dalam radian, dan r jari-jari roda yang. Persamaan ini berlaku bagi *rotary encoder* yang dipasang langsung pada poros roda bertumpu pada lintasan.

2. 6 Aktuator

Merupakan perangkat elektromekanik yang menghasilkan daya mekanis berupa gerakan. Beberapa jenis aktuator yang sering digunakan pada di antaranya *motor DC*, *stepper motor*, dan *motor servo*.

2. 6. 1 Motor DC

Motor DC (*direct current*) merupakan salah satu jenis motor listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik. Motor DC terdiri dari beberapa bagian utama antara lain stator yang biasanya berupa magnet permanen, rotor, dan komutator. Berikut adalah gambar struktur sederhana pada motor DC.

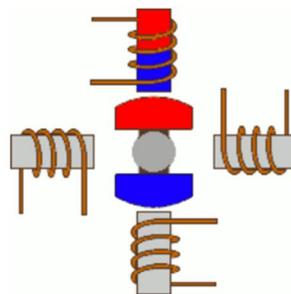


Gambar 2.12 Struktur Sederhana dari Motor DC

2. 6. 2 Stepper Motor

Stepper motor merupakan salah satu jenis dari *synchronous motor* (motor sinkron), Hal ini dikarenakan *stepper motor* memiliki kecepatan putaran rotor yang sinkron terhadap kecepatan putar medan magnet. *Stepper motor* memiliki kelebihan tersendiri dibanding *synchronous motor* jenis lainnya, yaitu *stepper motor* dapat bergerak secara presisi dalam setiap posisi step-step radian sehingga *stepper motor* dapat dikendalikan posisi radianya tanpa menggunakan umpan balik posisi (Virgala, Kelemen, Gmitterko, & Lipták, 2015).

Stepper motor merupakan motor DC tanpa komutasi mekanik sehingga dibutuhkan rangkaian elektronik sebagai komutasi untuk menghasilkan medan magnet yang berputar pada stator. Berikut adalah struktur dasar *Stepper motor* tipe *hybrid* dengan dua *phase coil* (Virgala, Kelemen, Gmitterko, & Lipták, 2015).



Gambar 2.13 Struktur Bipolar Stepper Motor (Virgala, Kelemen, Gmitterko, & Lipták, 2015)

Stepper motor memiliki jumlah step per satu putaran yang dapat diketahui dari *mechanical data stepper motor* tersebut. Untuk mengendalikan posisi rotor *stepper* dapat dilakukan dengan mengetahui resolusi besar sudut radian per step.

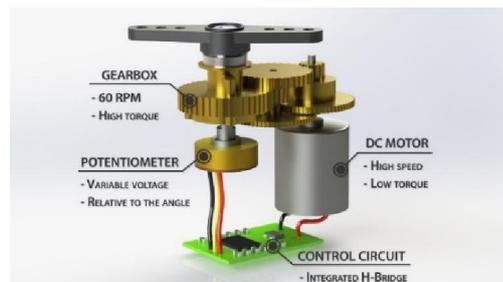
$$\alpha = \frac{2\pi}{\text{step satu putaran}} \quad (2.34)$$

$$\text{posisi radian} = n \alpha \quad (2.35)$$

Dari persamaan 2.34 tersebut dapat dihitung posisi radian dari jumlah step yang dicapai (n) pada *stepper motor* dikali dengan resolusi per satu step (α). Sedangkan untuk memperoleh besar kecepatan putar rotor dapat diperoleh dengan menghitung posisi radian yang dicapai dalam satu waktu tertentu (Zhang, Wang, Qian, & Yi, 2018).

2. 6. 3 Servo motor

Servo motor pada dasarnya merupakan sebuah motor magnet permanen biasa hanya saja *servo motor* memiliki kemampuan yang baik dalam mengatasi perubahan yang cepat. Perubahan yang dimaksud adalah perubahan posisi, sudut, kecepatan dan akselerasi. *Servo motor* biasanya terdiri dari sebuah motor permanen magnet dan sensor *encoder motor/potentiometer*. Berikut ada struktur sederhana dari *servo motor*.



Gambar 2.14 Struktur Sederhana *Servo Motor*

Servo motor merupakan tipe pengendalian motor close loop dengan *feedback encoder sensor* untuk dapat melakukan pengendalian posisi, sudut, kecepatan, dan akselerasi.

2. 7 Filter

Filter atau penyaring merupakan sebuah sistem yang bertujuan untuk meloloskan sinyal dibutuhkan pada frekuensi tertentu dan menghambat sinyal pada rentang frekuensi tertentu. Filter dapat diterapkan dalam bentuk *hardware* maupun dapat diterapkan dalam bentuk *software*. Filter sering diaplikasikan pada rangkaian pengkondisian sinyal keluaran sensor, rangkaian pemancar dan penerima radio frekuensi maupun pada rangkaian elektronika daya.

2. 7. 1 High-Pass Filter

High-pass filter atau biasa disebut HPF adalah merupakan salah satu jenis filter atau penyaring yang melewatkan sinyal frekuensi tinggi dan menghambat sinyal frekuensi rendah. HPF sering digunakan untuk menapis sinyal yang mengalami gangguan frekuensi rendah seperti sinyal keluaran dari *gyroscope* yang memiliki *drift* atau perubahan sinyal secara perlahan (Ayenew & Sukhavasi, 2017).

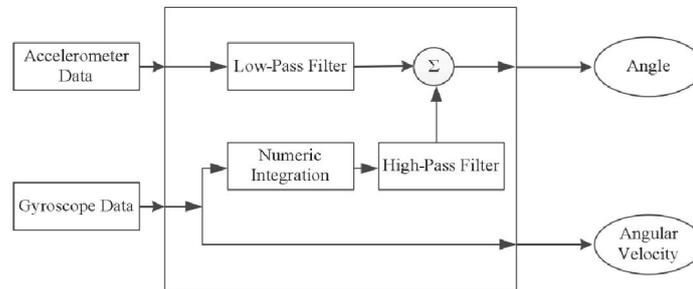
2. 7. 2 Low-Pass Filter

Low-pass filter atau biasa disebut LPF adalah merupakan salah satu jenis filter atau penyaring yang melewatkan sinyal frekuensi rendah dan menghambat sinyal frekuensi tinggi. HPS sering digunakan untuk menapis sinyal yang mengalami gangguan frekuensi rendah contohnya seperti sinyal keluaran dari *accelerometer* yang sangat sensitif sehingga memiliki banyak derau frekuensi tinggi (Ayenew & Sukhavasi, 2017).

2. 7. 3 Complementary filter

Complementary filter merupakan salah satu metode filter sinyal untuk menghilangkan *noise* atau derau yang terdapat pada sinyal. Salah satu penggunaan *Complementary filter* yang sering digunakan adalah untuk memfilter sinyal

gyroscope dan *accelerometer* dari IMU sensor untuk mendapatkan sinyal roll pitch yaw yang terbebas dari derau (Pititeeraphab, 2016).



Gambar 2.15 *Complementary Filter* (Pititeeraphab, 2016)

Complementary filter terdiri dari *low pass filter* yang akan meloloskan sinyal frekuensi rendah sedangkan akan akan *blocking sinyal* frekuensi tinggi pada sinyal *accelerometer*, dan terdiri dari *high pass filter* yang akan meloloskan sinyal frekuensi tinggi sedangkan akan melakukan *blocking* sinyal frekuensi rendah pada output siyal *gyroscope* (Fahmi, Maulana, & Kurniawan, 2017).