

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan pada tugas akhir yang sebelumnya telah direalisasikan dengan judul “Rancang Bangun Prototipe *Automated Rubber Tyred Gantry Crane* Berbasis Mikrokontroler Arduino dan Aplikasi *Blynk*”, akan lebih dioptimalkan pada bagian *spreader* dan kontrol yang sebelumnya dinilai kurang presisi sehingga mengakibatkan besarnya selisih lokasi akhir dan lokasi perkiraan. Oleh karena itu, pentingnya mempelajari beberapa penilitan lain untuk mendukung konsep pengoptimalan.

- a. Penelitian yang berjudul “Rancang Bangun Prototipe *Automated Rubber Tyred Gnatry Crane* Berbasis Mikrokontroler Arduino dan Aplikasi *Blynk*”[1]. Penelitian ini merupakan tugas akhir kakak tingkat yang mengembangkan prototipe *gantry crane* otomatis berbasis mikrokontroler Arduino yang dilengkapi dengan beberapa sensor seperti sensor *rotary encoder*, sensor *reed switch*, dan *limit switch* untuk menghindari tabrakan dengan objek di sekitar crane serta dilengkapi dengan modul *WiFi* ESP8266 (Wemos D1 Mini) untuk fitur kontrol jarak jauh yang terintegrasi dengan aplikasi *Blynk*. Sistem ini memungkinkan crane bergerak secara aman dan efisien dalam lingkungan kerja industri. Arduino digunakan sebagai pusat kendali, mengontrol aktuator dan menerima data dari sensor jarak untuk mengelola pergerakan crane secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi Arduino, sensor dan ESP8266 efektif dalam meningkatkan keselamatan dan akurasi operasional crane.
- b. Penelitian yang berjudul “Implementasi Sensor MPU 6050 untuk Mengukur Keseimbangan *Self Balancing Robot* Menggunakan Kontrol PID” [2]. Penelitian ini mengimplementasikan sensor MPU-6050 yang mengintegrasikan akselerometer dan giroskop tiga sumbu (x, y, z) dalam satu chip sebagai pendeteksi sudut kemiringan secara *real-time* pada sistem *self balancing robot* berbasis Arduino Mega 2560. Sensor MPU-6050 dikombinasikan dengan

algoritma kendali PID dengan nilai tuning ideal $K_p=70$, $K_d=250$, dan $K_i=1,9$ untuk meminimalkan error sudut kemiringan secara berkelanjutan. Hasil penelitian membuktikan bahwa robot mampu mempertahankan keseimbangan pada bidang miring hingga sudut 30° dan sensor MPU-6050 terbukti andal sebagai referensi perubahan sudut gerak dengan akurasi tinggi. Penelitian ini menjadi acuan dalam pemilihan sensor dan metode kendali untuk mendeteksi sudut ayunan *spreader* pada sistem anti-ayunan berbasis Arduino dalam tugas akhir ini.

- c. Penelitian yang berjudul “Sistem Kendali *Anti Sway Gantry Crane* Menggunakan Metode PID” [3]. Penelitian ini menunjukkan bahwa kendali PID dengan nilai $K_p=1$ dan $K_d=8$ untuk sudut ayunan mampu mempercepat waktu kestabilan dari 82 detik menjadi hanya 7,8 detik. Implementasi kontroler PID pada sistem *gantry crane* terbukti efektif dalam meredam ayunan beban secara signifikan. Penelitian ini menjadi referensi utama dalam perancangan sistem anti-ayunan berbasis kendali PID yang akan diterapkan pada prototipe *Automated RTG Crane* dalam tugas akhir ini.

Sistem “Rancang Bangun Sistem *Anti-Tilt Spreader* Berbasis Kendali PID dan Aplikasi Blynk Pada Prototipe *Automated RTG Crane*” dirancang untuk meminimalisir ayunan dan kemiringan *spreader* yang berlebih, efisiensi kerja alat, dan keselamatan pekerjaan. Dari penelitian sebelumnya, terdapat beberapa kekurangan yang disempurnakan pada tugas akhir ini khususnya pada bagian *spreader*. Pada tugas akhir ini, akan digunakan konfigurasi dua motor *pulley* yang bergerak secara independen dan dikontrol oleh *motor driver* L298N dengan tujuan mereduksi ayunan secara signifikan. Lalu dengan menambahkan sistem kendali umpan balik untuk meredam osilasi secara aktif seperti PID berbasis sensor gyro diharapkan dapat menghasilkan prototipe *RTG crane* yang lebih presisi dan stabil.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Rubber Tyred Gantry (RTG) Crane



Gambar 2. 1 Rubber Tyred Gantry (RTG) Crane

Rubber Tyred Gantry (RTG) Crane merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan di terminal peti kemas untuk kegiatan bongkar muat dan penumpukan kontainer di *Container Yard (CY)*, seperti yang terlihat pada **Gambar 2. 1 Rubber Tyred Gantry (RTG) Crane**. RTG crane bergerak di atas roda karet (*rubber tyre*) sehingga memiliki fleksibilitas dan mobilitas tinggi di area lapangan penumpukan tanpa memerlukan jalur rel permanen seperti pada jenis *Rail Mounted Gantry (RMG)*. Keunggulan ini menjadikan RTG crane lebih fleksibel dalam konfigurasi lapangan dan banyak digunakan di pelabuhan modern di Indonesia, termasuk di Terminal Peti Kemas Tanjung Priok Jakarta dan Terminal Teluk Lamong Surabaya.

Menurut Sitepu & Maulana, (2019), RTG crane tersusun atas beberapa subsistem mekanik dan elektrik utama yang saling terintegrasi untuk membentuk sistem pengangkat peti kemas yang aman dan efisien. Subsistem-subsistem tersebut antara lain adalah:

1. *Portal Structure*, yaitu rangka utama baja berbentuk portal yang menopang seluruh komponen crane
2. *Spreader*, yaitu alat pencengkeram peti kemas yang dapat menyesuaikan ukuran ISO container 20 hingga 40 kaki

3. *Hoisting Mechanism*, yaitu mekanisme pengangkat yang menggerakkan *spreader* secara vertikal menggunakan motor *hoist* dan drum tali baja
4. *Trolley Mechanism*, yaitu kereta berjalan di atas rel pada portal yang menggerakkan *hoisting assembly* secara horizontal
5. *Travel Drive System*, yaitu sistem penggerak roda karet yang memungkinkan keseluruhan *crane* berpindah posisi di lapangan penumpukan
6. *Cabin Operator* dan sistem kontrol elektrik terpusat.

[5] menyatakan bahwa RTG *crane* modern telah mengintegrasikan sistem sensor dan kontrol otomatis untuk meningkatkan akurasi penumpukan dan keselamatan operasi. Sistem *antiswing* diperlukan untuk meredam ayunan *spreader* akibat percepatan atau perlambatan gerakan *trolley* dan *travel*, karena ayunan yang tidak terkendali dapat berbahaya dan memperlambat produktivitas. Dalam konteks penelitian dan edukasi, miniatur RTG crane digunakan sebagai platform pengujian berbagai algoritma kontrol, sistem deteksi posisi berbasis *encoder*, serta sistem *monitoring* jarak jauh berbasis IoT sebelum diterapkan pada sistem *crane* skala penuh di pelabuhan.

2.2.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah sistem komputer lengkap yang terintegrasi dalam satu chip semikonduktor tunggal (*single chip microcomputer*). Berbeda dengan mikroprosesor yang hanya berisi unit pemrosesan pusat (CPU) saja dan membutuhkan komponen memori dan I/O eksternal, mikrokontroler telah mengintegrasikan seluruh komponen utama sebuah sistem komputer di dalamnya, yaitu CPU, memori program (Flash/ROM), memori data (RAM), memori non-volatil (EEPROM), serta berbagai periferal input/output seperti *timer/counter*, ADC (*Analog-to-Digital Converter*), DAC, UART, SPI, I2C, dan PWM generator. Integrasi komponen yang tinggi ini menjadikan mikrokontroler solusi yang sangat kompak, hemat daya, dan ekonomis untuk aplikasi sistem kendali tertanam (*embedded system*).

Mikrokontroler dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria. Berdasarkan lebar bus data, mikrokontroler dibagi menjadi tipe 8-bit (seperti keluarga AVR ATmega, MCS-51, dan PIC16), 16-bit (seperti MSP430 dan PIC24), serta 32-bit (seperti ARM Cortex-M dan ESP32). Berdasarkan arsitekturnya, dikenal arsitektur CISC (*Complex Instruction Set Computer*) dan RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Mikrokontroler berbasis RISC seperti AVR umumnya lebih cepat karena sebagian besar instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*. Berdasarkan cara penyimpanan program, dikenal tipe ROM, EPROM, EEPROM, dan *Flash Memory*, di mana *Flash Memory* saat ini paling dominan karena mendukung pemrograman ulang (*reprogramming*) berkali-kali tanpa peralatan khusus.

[6] mengemukakan bahwa dalam pemilihan mikrokontroler untuk suatu aplikasi, beberapa faktor teknis yang harus dipertimbangkan meliputi: jumlah dan jenis pin I/O yang dibutuhkan, kapasitas memori *Flash* dan RAM, kecepatan *clock*, ketersediaan periferal komunikasi serial (UART, SPI, I2C), kemampuan ADC dan resolusinya, tegangan operasi, konsumsi arus, serta ketersediaan *library* dan dukungan ekosistem pengembangan. Mikrokontroler keluarga AVR ATmega yang digunakan pada platform Arduino saat ini menjadi salah satu yang paling populer di kalangan mahasiswa, peneliti, dan pelaku industri kecil di Indonesia karena kemudahan pemrograman dan ekosistem yang lengkap.

2.2.3 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan pengembangan (*development board*) mikrokontroler *open-source* yang berbasis chip ATmega2560 buatan *Microchip Technology*. Arduino Mega 2560 merupakan versi yang lebih besar dan bertenaga dibandingkan Arduino Uno, dirancang untuk proyek-proyek yang membutuhkan lebih banyak pin I/O, kapasitas memori yang lebih besar, serta koneksi komunikasi serial yang lebih banyak. Papan ini sangat populer digunakan dalam bidang robotika, sistem otomasi, pengembangan prototipe elektronik, dan berbagai proyek penelitian di perguruan tinggi Indonesia. Arduino Mega 2560 memiliki spesifikasi teknis lengkap sebagaimana disajikan pada **Tabel 2 – 1**.

Tabel 2 – 1 Spesifikasi Arduino MEGA 2560

Parameter	Keterangan
Mikrokontroler	ATmega2560
Tegangan Operasi	5V
Tegangan Input (<i>Recommended</i>)	7 - 12V
Tegangan Input (Limit)	6 - 20V
Pin Digital I/O	54 pin (15 pin <i>support</i> PWM)
Pin Analog Input	16 pin (resolusi 10-bit, 0-5V)
Arus DC per Pin I/O	40 mA
Arus DC Pin 3.3V	50 mA
Memori <i>Flash</i>	256 KB (8 KB untuk <i>bootloader</i>)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Frekuensi <i>Clock</i>	16 MHz
<i>Port</i> UART <i>Hardware</i>	4 <i>port</i> (Serial0, Serial1, Serial2, Serial3)
<i>Port</i> SPI	1 <i>port</i> (pin 50, 51, 52, 53)
<i>Port</i> I2C	1 <i>port</i> (pin 20 SDA, 21 SCL)
Dimensi PCB	101.52 mm x 53.3 mm
Berat	37 gram

Keunggulan utama Arduino Mega 2560 dibandingkan *board* Arduino lainnya terletak pada ketersediaan 4 *port* UART *hardware* yang memungkinkan komunikasi serial simultan dengan beberapa perangkat secara bersamaan, seperti modul *Bluetooth*, modul *Wi-Fi*, GPS, dan *display serial*. Selain itu, memori *Flash* sebesar 256 KB memberikan ruang yang cukup untuk program yang kompleks termasuk penerapan algoritma kontrol PID, protokol komunikasi, dan pengelolaan

beberapa aktuator sekaligus. Arduino Mega 2560 juga kompatibel dengan sebagian besar *shield* Arduino yang dirancang untuk Arduino Uno, sehingga memperluas kemampuan *hardware* tanpa biaya besar.

2.2.4 Arduino IDE (*Integrated Development Environment*)

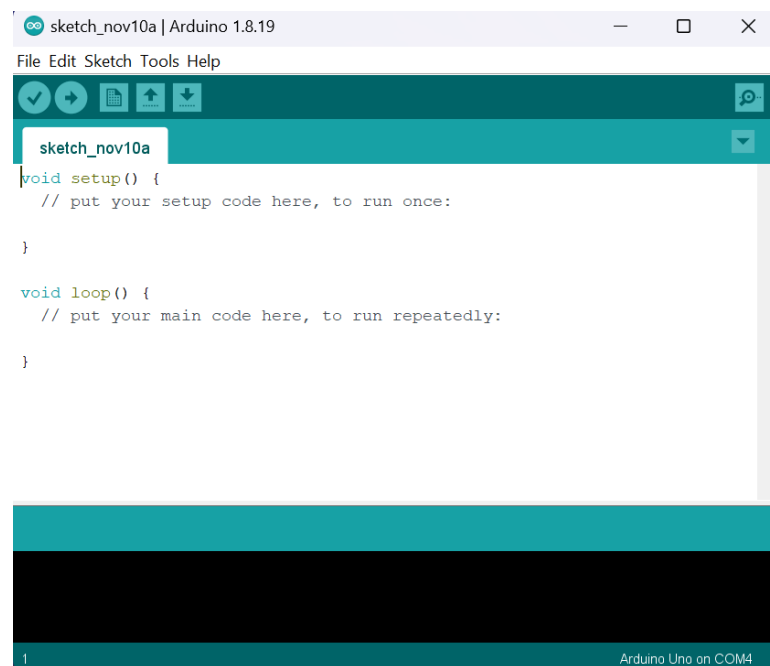
Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak *open-source* yang menjadi lingkungan pengembangan resmi untuk memprogram papan Arduino. Arduino IDE menyediakan antarmuka yang terintegrasi mencakup editor teks untuk penulisan kode, *compiler* untuk mengubah kode menjadi instruksi mesin (biner), *uploader* untuk mengunggah program ke papan Arduino melalui koneksi USB, serta *Serial Monitor* dan *Serial Plotter* untuk *debugging* dan visualisasi data. Perangkat lunak ini tersedia untuk sistem operasi Windows, macOS, dan Linux secara gratis.

Bahasa pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE merupakan turunan dari bahasa C/C++ yang telah disederhanakan dengan menambahkan berbagai fungsi bawaan (*built-in functions*) dan abstraksi *hardware* sehingga lebih mudah dipelajari. Program Arduino disebut "*sketch*" dan memiliki struktur dasar yang terdiri dari beberapa bagian utama sebagai berikut:

1. Bagian deklarasi global, yaitu area di luar fungsi manapun yang digunakan untuk mendefinisikan variabel global, konstanta, dan menyertakan *header file library*
2. Fungsi *setup()*, yaitu fungsi yang hanya dijalankan sekali ketika mikrokontroler pertama kali dinyalakan atau direset, digunakan untuk inisialisasi pin, komunikasi serial, dan konfigurasi awal
3. Fungsi *loop()*, yaitu fungsi yang dijalankan berulang-ulang secara terus-menerus selama mikrokontroler beroperasi, berisi logika program utama yang berjalan secara *looping* atau berulang.

Menambahkan bahwa Arduino IDE versi 2.x yang merupakan versi terbaru telah membawa peningkatan signifikan dibandingkan versi 1.x, antara lain: fitur *autocomplete (code completion)* yang membantu penulisan kode lebih cepat dan mengurangi kesalahan sintaks, *syntax highlighting* dengan skema warna yang lebih informatif, *debugger* terintegrasi untuk analisis program secara langsung pada

hardware, *Board Manager* untuk pengelolaan dukungan berbagai jenis *board* secara mudah, serta *Library Manager* yang memungkinkan pencarian dan instalasi ribuan *library* dari repositori Arduino secara *online*. Ekosistem *library* Arduino yang sangat luas mencakup *library* untuk hampir semua jenis sensor, aktuator, modul komunikasi, dan *display* yang umum digunakan. Tampilan Arduino IDE dapat dilihat pada **Gambar 2. 2**.



Gambar 2. 2 Tampilan Arduino IDE

2.2.5 Aplikasi Blynk

Blynk merupakan platform *Internet of Things* (IoT) lengkap yang menyediakan tiga komponen utama secara terintegrasi, yaitu:

1. Blynk *Cloud Server* sebagai infrastruktur *backend* yang menangani penyimpanan data, autentikasi perangkat, dan *routing* pesan antara aplikasi *mobile* dengan perangkat *hardware*
2. Blynk *App* sebagai antarmuka pengguna berbasis *mobile* (Android dan iOS) yang memungkinkan pembuatan *dashboard* kontrol dan *monitoring* secara visual
3. Blynk *Library* yang diinstal pada mikrokontroler untuk memfasilitasi komunikasi perangkat *hardware* ke *server* Blynk melalui jaringan *Wi-*

Fi atau jaringan seluler. Blynk mendukung berbagai platform *hardware* termasuk Arduino (dengan tambahan modul *Wi-Fi*), ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, dan puluhan platform lainnya.

Cara kerja aplikasi Blynk dapat dijelaskan melalui alur komunikasi berikut: perangkat *hardware* yang terkoneksi ke internet mengirimkan data ke Blynk *Cloud Server* menggunakan protokol TCP/IP melalui *library* Blynk. Aplikasi Blynk pada *smartphone* pengguna terhubung ke *server* yang sama dan secara *real-time* menerima dan menampilkan data tersebut pada *widget* yang telah dikonfigurasi. Sebaliknya, saat pengguna menekan tombol atau menggerakkan *slider* pada aplikasi, perintah kontrol dikirimkan dari *smartphone* ke *server* dan diteruskan ke perangkat *hardware* hampir secara instan. Mekanisme komunikasi ini disebut sebagai Virtual Pin, yaitu saluran data virtual bernomor (V0 hingga V255) yang menghubungkan *widget* di aplikasi dengan variabel atau fungsi pada program mikrokontroler (Saefullah., 2015)

(Maulana & Trisnawan (2022) menyatakan bahwa Blynk IoT (versi 2.0) yang merupakan generasi terbaru platform ini membawa sejumlah fitur penting yang tidak tersedia pada versi sebelumnya, yaitu: *Web Dashboard* yang memungkinkan *monitoring* dan kontrol melalui *browser* komputer selain *smartphone*; *Automations* yang memungkinkan pembuatan aturan otomatis berbasis waktu atau *event* (contoh: matikan aktuator otomatis jika sensor mendeteksi kondisi tertentu); *Device Management* untuk pengelolaan banyak perangkat dalam satu akun; serta *Data Streams* sebagai konsep baru manajemen aliran data yang lebih terstruktur. Keseluruhan fitur ini menjadikan Blynk salah satu platform IoT yang paling komprehensif dan mudah digunakan untuk pengembangan prototipe sistem *monitoring* dan kontrol di Indonesia.

2.2.6 Wemos S2 Mini ESP32-S2FN4R2

Wemos S2 Mini adalah modul pengembangan mikrokontroler berukuran kecil (*mini form factor*) yang dikembangkan oleh Wemos *Electronics* dan berbasis *chip System-on-Chip* (SoC) ESP32-S2FN4R2 dari *Espressif Systems*. Modul

Wemos S2 Mini yang terlihat pada **Gambar 2. 3** ini merupakan penerus dari Wemos D1 Mini yang berbasis ESP8266, dengan peningkatan yang sangat signifikan terutama pada kemampuan pemrosesan (prosesor LX7 single-core vs LX106 single-core), jumlah GPIO yang tersedia, kemampuan USB OTG native, serta aspek keamanan (*security features*). Wemos S2 Mini sangat cocok digunakan sebagai node IoT, modul komunikasi Wi-Fi, maupun *standalone* controller untuk proyek-proyek *embedded* berukuran kecil.



Gambar 2. 3 Wemos S2 Mini ESP32-S2FN4R2

Menurut [9], spesifikasi teknis lengkap Wemos S2 Mini dengan *chip* ESP32-S2FN4R2 disajikan pada **Tabel 2 – 2**.

Tabel 2 – 2 Spesifikasi WeMos S2 Mini ESP32-S2FN4R2

Parameter	Keterangan
SoC (<i>Chip</i> Utama)	ESP32-S2FN4R2 (<i>Espressif Systems</i>)
Prosesor	Xtensa LX7 <i>Single-Core</i> 32-bit
Kecepatan <i>Clock</i>	Hingga 240 MHz
Konektivitas Nirkabel	<i>Wi-Fi</i> 802.11 b/g/n, 2.4 GHz
Memori <i>Flash Internal</i>	4 MB (QSPI <i>Flash</i>)
Memori PSRAM	2 MB (QSPI PSRAM)
Jumlah GPIO	27 pin GPIO yang dapat diakses
GPIO Multifungsi	Digital I/O, PWM, UART, SPI, I2C, I2S, ADC, DAC

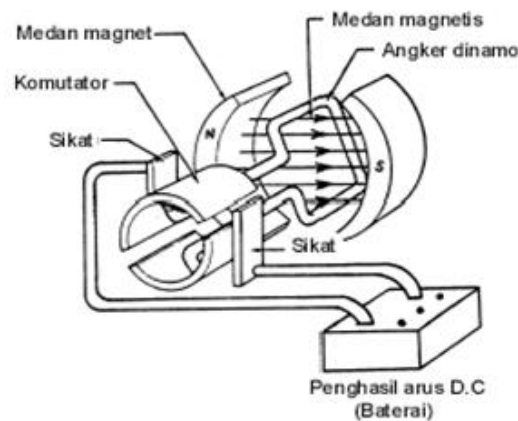
Parameter	Keterangan
ADC (<i>Analog to Digital</i>)	2 x ADC SAR 12-bit (20 <i>channel</i>)
DAC (<i>Digital to Analog</i>)	2 x DAC 8-bit
USB	USB 1.1 OTG/CDC <i>native</i> (USB-C <i>connector</i>)
Tegangan Operasi	3.3V (input USB 5V)
Arus Operasi Aktif (<i>Wi-Fi</i>)	~310 mA (<i>peak</i>)
Arus <i>Deep Sleep</i>	~20 uA
Dimensi Modul	34.3 mm x 25.4 mm
Antarmuka Pemrograman	USB-C (tanpa konverter UART eksternal)
Antena	PCB <i>antenna onboard</i>

Salah satu keunggulan paling menonjol dari ESP32-S2 dibandingkan ESP8266 adalah kehadiran USB OTG *native*, yang berarti pemrograman dan komunikasi data dapat dilakukan langsung melalui port USB-C tanpa memerlukan *chip* konverter USB-to-UART tambahan seperti CH340 atau CP2102. Hal ini menyederhanakan desain *hardware* dan mengurangi jumlah komponen. Selain itu, ESP32-S2 mendukung fitur keamanan tingkat lanjut seperti *secure boot*, *flash encryption*, dan RSA-3096 *hardware accelerator*, sehingga cocok untuk aplikasi IoT yang memerlukan perlindungan data. Wemos S2 Mini banyak digunakan dalam penelitian IoT di Indonesia sebagai pengganti ESP8266 D1 Mini yang sudah tidak lagi dikembangkan secara aktif [10].

2.2.7 DC Geared Motor

DC *Geared Motor* atau motor DC berreduksi adalah aktuator elektromekanis yang terdiri dari dua komponen utama yang terintegrasi menjadi satu unit, yaitu motor DC (motor listrik arus searah) dan *gearbox* (sistem transmisi roda gigi). Motor DC mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanis berupa putaran, sedangkan *gearbox* bertugas mentransmisikan putaran tersebut

dengan rasio reduksi tertentu untuk menghasilkan kecepatan output yang lebih rendah dan torsi yang lebih besar. Kombinasi ini menjadikan *DC Geared Motor* sangat ideal untuk berbagai aplikasi yang memerlukan kecepatan putar rendah namun gaya puntir tinggi. Komponen pada *DC Geared Motor* dapat dilihat pada **Gambar 2. 4.**



Gambar 2. 4 Komponen Motor DC

Prinsip kerja motor DC didasarkan pada Hukum Gaya Lorentz yang menyatakan bahwa konduktor berarus listrik yang ditempatkan dalam medan magnet akan mengalami gaya mekanis. Pada motor DC, rotor (*armature*) yang membawa lilitan kawat ditempatkan dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen atau elektromagnet (stator). Ketika arus mengalir melalui lilitan rotor, gaya Lorentz yang timbul akan menghasilkan torsi yang memutar rotor. Komutator dan sikat karbon (*brush*) berperan untuk membalik arah arus secara periodik sehingga putaran rotor berlangsung secara kontinyu dalam satu arah. Kecepatan putar (n) motor DC berbanding lurus dengan tegangan suplai (V) dan berbanding terbalik dengan fluks magnet dan tahanan *armature*.

Gearbox pada *DC Geared Motor* umumnya menggunakan susunan roda gigi spur, *helical*, atau *planetary*. *Gearbox planetary (epicyclic)* banyak dipilih untuk aplikasi yang membutuhkan rasio reduksi tinggi dalam dimensi yang kompak, karena distribusi beban pada beberapa planet *gear* menghasilkan kapasitas

torsi yang lebih besar dan efisiensi mekanis yang lebih baik dibandingkan susunan roda gigi konvensional. Parameter-parameter penting *DC Geared Motor* yang harus diperhatikan dalam proses seleksi untuk suatu aplikasi disajikan pada **Tabel 2 – 3**.

Tabel 2 – 3 Spesifikasi *DC Geared Motor* YGY6138-R528C

Parameter	Keterangan
Model	YGY6138-R528C
Jenis Penguatan Medan	Magnet Permanen (PMDC)
Tipe	<i>Brushed DC Gear Motor</i>
Tegangan	DC 12V
Arus Tanpa Beban	0.18 A
Kecepatan Tanpa Beban	65 rpm
Kecepatan (Efisiensi Maksimum)	55.5 rpm
<i>Weight</i>	170 grams
Arus (Efisiensi Maksimum)	0.17 A
Torsi (Efisiensi Maksimum)	512.8 mN·m / 5.17 kg·cm
Daya Keluaran (<i>Output Power</i>)	0.6 W
Torsi Tertahan (<i>Stall Torque</i>)	706 mN·m / 7.20 kg·cm
Arus Tertahan (<i>Stall Current</i>)	3,1 A
Rasio <i>Gear</i>	104:1
Jenis <i>Encoder</i>	<i>Magnetic rotary encoder, dual channel</i> (AB)
Resolusi <i>Encoder</i>	1152 pulsa/putaran <i>output shaft</i>
Tegangan Input <i>Encoder</i>	3.3 – 5 Volt
Koneksi <i>Encoder</i>	6 kabel (AB <i>encoder channel</i>)

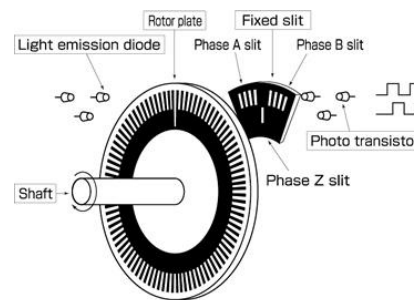
2.2.8 Rotary Encoder

Rotary encoder adalah sensor elektromekanis atau optoelektronik yang berfungsi mengubah besaran fisik berupa posisi sudut rotasi (*angular position*) atau gerakan putar menjadi sinyal listrik digital yang dapat dibaca dan diproses oleh

mikrokontroler atau sistem kontrol lainnya. Sensor ini digunakan secara luas pada berbagai sistem yang membutuhkan umpan balik (*feedback*) posisi dan kecepatan putaran secara *real-time*, seperti pada motor servo, robot industri, mesin CNC (*Computer Numerical Control*), sistem steering kendaraan otomatis, dan berbagai peralatan otomasi presisi lainnya.

Berdasarkan jenis outputnya rotary *encoder* dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu:

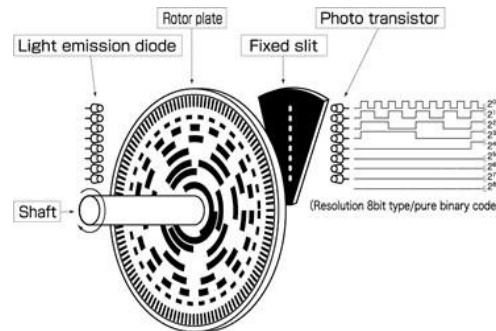
a. *Incremental Rotary Encoder*



Gambar 2. 5 Struktur *Incremental Rotary Encoder*

Jenis *encoder* pada **Gambar 2. 5** menghasilkan pulsa digital setiap kali poros berputar sebesar sudut diskrit tertentu. *Incremental encoder* tidak menyimpan informasi posisi absolut, sehingga memerlukan proses *homing* (pencarian titik referensi nol) setiap kali sistem dinyalakan. Keunggulannya adalah harga yang lebih terjangkau, antarmuka yang lebih sederhana, dan resolusi yang dapat ditingkatkan melalui teknik *decoding*. *Incremental encoder* umumnya memiliki dua *channel* output utama (*channel A* dan *channel B*) yang berbeda fasa 90 derajat (*quadrature*), serta sebuah *channel Z* (*index pulse*) yang menghasilkan satu pulsa per revolusi sebagai penanda posisi referensi.

b. *Absolute Rotary Encoder*



Gambar 2. 6 Struktur *Absolute Rotary Encoder*

Jenis *encoder* pada **Gambar 2. 6** secara langsung menghasilkan kode digital unik yang merepresentasikan posisi sudut absolut poros pada setiap saat, tanpa memerlukan proses *homing*. *Absolute encoder* tersedia dalam *format single-turn* (untuk posisi dalam satu putaran penuh) dan *multi-turn* (untuk posisi dalam beberapa putaran). Keunggulan utamanya adalah tidak kehilangan informasi posisi meskipun sistem dimatikan dan dinyalakan kembali. Namun harganya jauh lebih mahal dan antarmuka datanya lebih kompleks (menggunakan format biner, *Gray code*, atau protokol serial khusus seperti SSI atau BiSS).

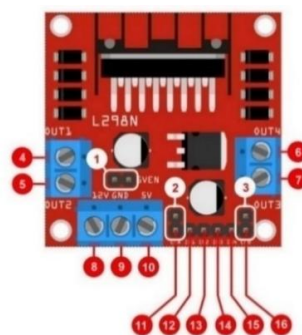
Pada *incremental encoder* dengan output quadrature, resolusi efektif dapat ditingkatkan melalui teknik *decoding* sebagai berikut:

- a. *1x decoding*: hanya menghitung tepi naik (*rising edge*) *channel A*, menghasilkan PPR pulsa per revolusi
- b. *2x decoding*: menghitung tepi naik dan turun *channel A*, menghasilkan 2x PPR
- c. *4x decoding*: menghitung semua tepi (naik dan turun) pada kedua *channel A* dan *B*, menghasilkan 4x PPR. Sebagai contoh, *encoder* dengan spesifikasi 500 PPR akan menghasilkan resolusi efektif 2000 *counts per revolution* menggunakan teknik *4x decoding*, setara dengan resolusi sudut sebesar $360/2000 = 0.18$ derajat per *count*.

2.2.9 Motor Driver H-Bridge L298N

Motor Driver L298N adalah modul pengendali motor berbasis IC L298N yang mengimplementasikan topologi rangkaian H-Bridge (disebut juga *full-bridge*)

untuk mengendalikan arah dan kecepatan motor DC atau motor *stepper*. Nama "H-Bridge" berasal dari bentuk topologi rangkaiannya yang menyerupai huruf H, di mana motor ditempatkan sebagai palang horizontal di tengah, dan keempat kaki huruf H masing-masing berisi *switch* transistor. IC L298N dari STMicroelectronics mengintegrasikan dua buah H-Bridge sekaligus dalam satu chip (*dual full-bridge*), sehingga dapat mengendalikan dua motor DC secara independen atau satu motor *stepper* bipolar dalam satu waktu.



Gambar 2. 7 Pin pada Motor Driver H-Bridge L298N

Prinsip kerja rangkaian H-Bridge pada **Gambar 2. 7** adalah sebagai berikut: dari empat *switch* transistor yang membentuk huruf H (disebut S1, S2, S3, S4), hanya dua *switch* yang boleh aktif secara bersamaan (tidak boleh S1-S2 atau S3-S4 aktif bersamaan karena akan menyebabkan *short circuit*). Ketika S1 dan S4 aktif, arus mengalir dari kiri ke kanan melalui motor sehingga motor berputar dalam satu arah. Ketika S2 dan S3 aktif, arus mengalir dari kanan ke kiri melalui motor sehingga motor berputar dalam arah sebaliknya. Ketika semua *switch* tidak aktif atau S1-S3 atau S2-S4 aktif bersamaan, motor akan melakukan pengereman (*braking*). Kecepatan motor dikendalikan dengan memberikan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) pada pin *Enable*, di mana *duty cycle* PWM menentukan tegangan rata-rata yang diterima motor. Spesifikasi teknis modul L298N menurut [11] disajikan pada **Tabel 2 – 4**.

Tabel 2 – 4 Spesifikasi Teknis Motor Driver H-Bridge L298N

Parameter	Keterangan
IC Driver Utama	L298N (STMicroelectronics)

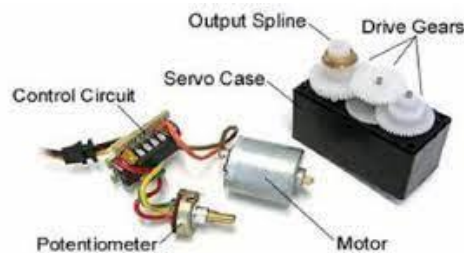
Parameter	Keterangan
Tegangan Logik (Vss)	5V
Tegangan <i>Supply</i> Motor (Vs)	5V - 46V DC
Arus <i>Output</i> per <i>Channel</i>	Maksimum 2A (<i>peak</i> 3A)
Jumlah <i>Channel</i> (Motor)	2 <i>channel</i> (Motor A dan Motor B)
Daya Disipasi Maksimum	25 Watt (pada suhu 75°C)
Tegangan Input Logik Tinggi	Min. 2.3V
Tegangan Input Logik Rendah	Maks. 1.5V
Kontrol Kecepatan	Melalui sinyal PWM pada pin <i>Enable</i>
Kontrol Arah	Melalui pin IN1/IN2 (Motor A) dan IN3/IN4 (Motor B)
Proteksi	Dioda <i>flyback</i> (<i>freewheeling diode</i>) untuk proteksi <i>back-EMF</i>
Regulator <i>Onboard</i>	Regulator 5V onboard (untuk tegangan <i>supply</i> motor > 12V)
Dimensi Modul	Sekitar 43 mm x 43 mm x 27 mm

2.2.10 Motor Servo

Motor servo adalah aktuator elektromekanis yang menggabungkan motor DC atau AC dengan sistem pengendalian posisi *closed-loop* (umpan balik tertutup) yang terintegrasi di dalam satu unit. Sistem kontrol internal motor servo terdiri dari:

1. Motor DC sebagai elemen penggerak utama.
2. *Gearbox* untuk mereduksi kecepatan dan meningkatkan torsi output.
3. Sensor posisi (umumnya potensiometer putar) yang mengukur posisi sudut aktual poros output secara kontinyu.

4. Rangkaian kontroler elektronik yang membandingkan posisi aktual dengan posisi yang diperintahkan dan menghasilkan sinyal koreksi untuk menggerakkan motor menuju posisi yang diinginkan. Sistem ini membentuk *loop* kontrol proporsional yang menjamin motor servo mencapai dan mempertahankan posisi yang diperintahkan.



Gambar 2. 8 Komponen Motor Servo

Gambar 2. 8 adalah Motor servo RC (jenis yang umum digunakan pada aplikasi robotika dan hobi) dikendalikan menggunakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan karakteristik sebagai berikut: frekuensi sinyal sebesar 50 Hz (periode 20 ms), lebar pulsa antara 1 ms hingga 2 ms. Posisi sudut poros servo ditentukan oleh lebar pulsa sinyal PWM yang diterima, dengan pemetaan umumnya sebagai berikut: pulsa 1 ms = posisi 0 derajat (batas kiri penuh), pulsa 1.5 ms = posisi 90 derajat (posisi tengah/netral), dan pulsa 2 ms = posisi 180 derajat (batas kanan penuh). Nilai lebar pulsa yang tepat dapat sedikit berbeda antar merek dan model motor servo.

Motor servo memiliki dua jenis utama berdasarkan kemampuan putarannya, yaitu:

1. Servo Standar (*Standard Servo*), yaitu servo yang pergerakannya dibatasi pada rentang sudut tertentu, umumnya 0 derajat hingga 180 derajat atau 0 derajat hingga 270 derajat. Servo jenis ini digunakan untuk aplikasi yang memerlukan kontrol posisi sudut seperti pada *steering robot*, *gripper*, dan aktuator katup.
2. Servo Kontinu (*Continuous Rotation Servo*), yaitu servo yang telah dimodifikasi atau dirancang khusus untuk dapat berputar 360 derajat secara terus-menerus. Pada servo kontinu, lebar pulsa PWM tidak lagi menentukan posisi sudut melainkan kecepatan dan arah putaran: pulsa

1.5 ms = berhenti, pulsa < 1.5 ms = berputar searah jarum jam dengan kecepatan proporsional, pulsa > 1.5 ms = berputar berlawanan arah jarum jam. Parameter penting dalam pemilihan motor servo antara lain torsi (kg.cm atau N.m), kecepatan tanpa beban (detik per 60 derajat), tegangan operasi, dan jenis konektor yang digunakan. [12]

Pada protipe *Rubber Tyred Gantry (RTG) Crane* ini menggunakan servo yang berfungsi sebagai *spreader*. Spesifikasi lengkap dari servo ditampilkan pada **Tabel 2 – 5**.

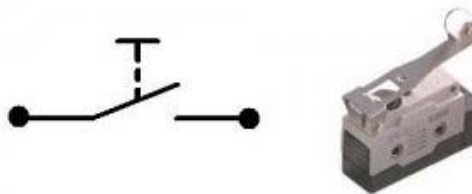
Tabel 2 – 5 Spesifikasi Servo TowerPro MG996R

Parameter	Keterangan
Tipe	TowerPro MG996R
Berat	55 g
Dimensi	40.7 × 19.7 × 42.9 mm
<i>Stall Torque</i> (4.8V)	9.4 kg·cm
<i>Stall Torque</i> (6.0V)	11 kg·cm
Kecepatan Operasi (4.8V)	0.19 detik/60°
Kecepatan Operasi (6.0V)	0.15 detik/60°
Tegangan Operasi	4.8 ~ 6.6 V
Jenis Gear	<i>Metal gear</i>
Rentang Suhu	0 ~ 55 °C
<i>Dead Band Width</i>	1 μs
Arus saat <i>Idle</i>	10 mA
Arus Tanpa Beban	170 mA
Arus saat <i>Stall</i>	1400 mA

2.2.11 *Limit Switch*

Limit switch adalah perangkat elektromekanis yang termasuk dalam kategori sensor posisi diskrit, yaitu sensor yang hanya memiliki dua kondisi output: aktif (*ON*) atau tidak aktif (*OFF*). *Limit switch* bekerja secara otomatis ketika suatu objek atau komponen mekanis bergerak menyentuh atau menekan aktuatornya,

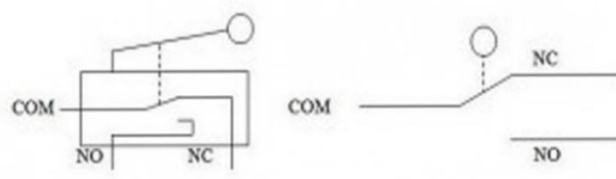
mengubah kondisi kontak listrik di dalamnya. Nama "*limit switch*" mencerminkan fungsi utamanya, yaitu sebagai pembatas (*limiter*) pergerakan mekanis untuk memastikan komponen tidak bergerak melampaui batas yang telah ditentukan dalam desain sistem.



Gambar 2. 9 Simbol dan Bentuk Fisik *Limit Switch*

Secara konstruksi *limit switch* pada **Gambar 2. 9** terdiri dari tiga bagian utama yang saling berkaitan, yaitu:

1. Aktuator Mekanis, yaitu bagian yang menonjol keluar dari bodi *limit switch* dan bersentuhan langsung dengan objek bergerak. Terdapat berbagai jenis aktuator yang tersedia sesuai kebutuhan aplikasi, antara lain: *plunger (push button)* untuk deteksi objek yang datang dari arah lurus, *roller lever arm* untuk deteksi objek yang datang dari sudut tertentu dengan pengurangan gaya aktuasi, *adjustable roller lever* untuk fleksibilitas sudut yang dapat disetel, *whisker* atau *coil spring* untuk aplikasi yang memerlukan sensitivitas tinggi dengan gaya aktuasi yang sangat kecil, dan *rotating roller plunger* untuk aplikasi *bidirectional*.
2. Bodi (*Housing*), yaitu casing pelindung yang terbuat dari material keras (plastik *engineering* atau logam) yang di dalamnya terdapat mekanisme kontak listrik dan pegas pengembali (*return spring*). Bodi juga berfungsi sebagai pelindung terhadap debu, air, dan benturan mekanis sesuai rating IP (*Ingress Protection*) yang dimilikinya.
3. Terminal Koneksi, yaitu titik sambungan kabel listrik pada *limit switch*.



Gambar 2. 10 Kontruksi dan Simbol *Limit Switch*

Kontak listrik pada *limit switch* pada **Gambar 2. 10** tersedia dalam tiga konfigurasi standar, yaitu:

1. NO (*Normally Open*): kondisi default kontak terbuka (sirkuit tidak terhubung), akan menutup (sirkuit terhubung) ketika aktuator ditekan.
2. NC (*Normally Closed*): kondisi *default* kontak tertutup (sirkuit terhubung), akan membuka (sirkuit tidak terhubung) ketika aktuator ditekan.
3. SPDT (*Single Pole Double Throw*) atau *Common*: memiliki satu terminal *Common* (C), satu terminal NO, dan satu terminal NC sekaligus. Konfigurasi SPDT memberikan fleksibilitas tertinggi karena dapat digunakan sebagai NO maupun NC sesuai kebutuhan rangkaian. Dalam aplikasi sistem keselamatan, kontak NC lebih disukai karena kegagalan kabel (putus) akan memberikan kondisi OPEN yang sama seperti saat *limit switch* aktif, sehingga sistem akan berhenti secara otomatis (*fail-safe*).

2.2.12 Power Supply

Power supply atau catu daya adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengonversi energi listrik dari sumber utama (umumnya tegangan AC 220V dari jaringan PLN) menjadi tegangan dan arus DC yang sesuai dengan kebutuhan komponen elektronik yang disuplai. Kualitas *power supply* sangat menentukan keandalan dan kestabilan keseluruhan sistem elektronik yang menggunakannya, karena tegangan yang tidak stabil, *ripple* yang berlebih, atau proteksi yang tidak memadai dapat menyebabkan kegagalan fungsi hingga kerusakan permanen pada komponen.

Pada prototipe ini menggunakan *Switched-Mode Power Supply* (SMPS). Secara umum, SMPS terdiri dari lima bagian utama yang bekerja secara terintegrasi, yaitu:

a. Penyearah dan Filter Input AC

Tegangan AC dari sumber listrik diubah menjadi DC menggunakan rangkaian dioda jembatan. Hasilnya berupa tegangan DC berdenyut yang kemudian

diratakan oleh kapasitor untuk mengurangi *risk* dan menghasilkan DC yang lebih stabil.

b. Saklar (*Chopper*)

Tegangan DC yang telah diratakan diputus dan disambung secara cepat oleh saklar elektronik, berupa transistor daya seperti MOSFET. Proses ini bekerja pada frekuensi tinggi untuk meningkatkan efisiensi serta memungkinkan penggunaan komponen berukuran kecil.

c. Transformator *Step-Down*

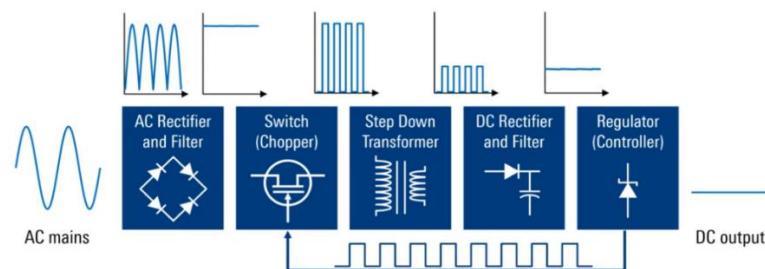
Arus yang telah dimodulasi dialirkan ke transformator berfrekuensi tinggi untuk menurunkan level tegangan. Karena bekerja pada frekuensi tinggi, transformator dapat dibuat lebih kecil dari transformator biasa.

d. Penyearah dan Filter Output DC

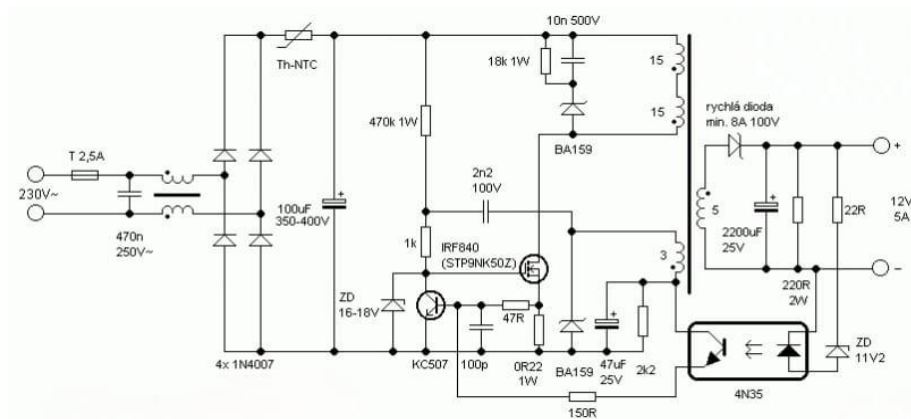
Tegangan bolak-balik yang dihasilkan oleh gulungan sekunder transformator disearahkan kembali menggunakan dioda kecepatan tinggi atau penyearah sinkron. Tegangan tersebut kemudian disaring menggunakan kapasitor untuk menghasilkan keluaran DC yang halus dan minim *risk*.

e. Regulator dan Umpan Balik (*Feedback*)

Untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran, sistem umpan balik digunakan. Sistem ini memantau tegangan output dan secara otomatis mengatur kerja saklar sesuai dengan variasi beban atau fluktuasi pada tegangan input.



Gambar 2. 11 Blok Diagram *Power Supply*



Gambar 2. 12 Rangkaian *Power Supply*

Secara keseluruhan, **Gambar 2. 11 & Gambar 2. 12** menjelaskan proses kerja *Switched-Mode Power Supply* dimulai dari penyearahan dan penyaringan awal tegangan AC, kemudian di-*switching* menjadi sinyal berfrekuensi tinggi, dan dikonversi oleh transformator berukuran kecil. Tegangan keluaran dari transformator disearahkan kembali dan disaring untuk menghasilkan arus DC yang stabil. Kestabilan tegangan tersebut dijaga oleh sistem umpan balik (*feedback*) yang menyesuaikan kerja saklar berdasarkan perubahan beban maupun fluktuasi pada tegangan input. *SMPS* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan catu daya linier, dengan keunggulan berupa ukuran yang lebih ringkas serta panas yang lebih rendah, sehingga banyak diterapkan dalam perangkat elektronik modern.

2.2.13 Modul *Stepdown* LM2596



Gambar 2. 13 Modul *Step Down* LM2596

Modul *step-down* LM2596 pada **Gambar 2. 13** adalah konverter tegangan DC-DC yang mengimplementasikan topologi *Buck Converter* (konverter penurun tegangan) menggunakan IC *switching* regulator LM2596 sebagai elemen kendali utamanya. *Buck converter* atau *step-down converter* bekerja dengan cara mengalihkan (*switching*) switch semikonduktor (transistor) secara periodik pada

frekuensi tinggi. Ketika *switch ON*, arus mengalir dari sumber melalui induktor ke beban; ketika *switch OFF*, induktor mempertahankan aliran arus melalui dioda *freewheeling*. Nilai rata-rata tegangan output dikendalikan oleh *duty cycle switching*, yaitu rasio waktu *ON* terhadap periode total. Dengan mengatur *duty cycle*, tegangan output dapat diatur menjadi berapa pun nilainya antara nol hingga tegangan input, sehingga disebut penurun (*step-down*) tegangan. Spesifikasi teknis IC LM2596 dan modul *step-down* berbasisnya disajikan secara lengkap pada **Tabel 2 – 6**.

Tabel 2 – 6 Spesifikasi Modul *Step Down* LM2569

Parameter	Keterangan
IC Regulator Utama	LM2596 (Texas Instruments / ON Semiconductor)
Topologi Konverter	<i>Buck (Step-Down)</i>
Frekuensi <i>Switching</i>	150 kHz (tetap / <i>fixed frequency</i>)
Tegangan Input (V_{in})	4.5V - 40V DC
Tegangan Output (V_{out})	1.23V - 37V DC (<i>adjustable</i>)
Arus Output Maksimum	3A kontinyu (<i>peak</i> 4A sesaat)
Efisiensi Konversi	77% - 92% (tergantung kondisi operasi)
Akurasi Tegangan Output	+/- 4% dari tegangan yang diset
Penyesuaian V_{out}	Potensiometer presisi pada modul
Proteksi <i>Thermal</i>	<i>Thermal shutdown</i> otomatis
Komponen Pasif <i>Onboard</i>	Induktor, kapasitor filter, dioda Schottky
Dimensi Modul (umum)	Sekitar 43 mm x 21 mm x 14 mm
Indikator LED	LED <i>power indicator onboard</i>

Keunggulan utama modul *step-down* LM2596 dibandingkan regulator linier (seperti LM7805) adalah efisiensi yang jauh lebih tinggi. Sebagai perbandingan, pada kondisi input 12V dan output 5V dengan arus beban 1A, regulator linier LM7805 akan membuang daya $(12-5) \times 1 = 7$ Watt sebagai panas sehingga

membutuhkan *heatsink* besar, sedangkan modul LM2596 hanya membuang sekitar 0.5-1 Watt. Kekurangan modul LM2596 adalah tegangan output yang mengandung riak (*ripple*) yang lebih besar dibandingkan regulator linier, sehingga untuk aplikasi yang sangat sensitif terhadap *noise* (seperti rangkaian penguat sinyal audio atau sensor presisi tinggi) diperlukan filter tambahan. Untuk aplikasi digital seperti mikrokontroler, modul *Wi-Fi*, dan *driver* motor, tingkat *ripple* yang dihasilkan modul LM2596 umumnya masih dalam batas toleransi yang dapat diterima.

2.2.14 Metode PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) adalah algoritma kontrol umpan balik (*feedback control*) yang bekerja berdasarkan prinsip: sistem secara terus-menerus mengukur nilai aktual variabel yang dikendalikan (*Process Variable* / PV), membandingkannya dengan nilai yang diinginkan (*Setpoint* / SP), dan menghasilkan sinyal koreksi (*Control Output* / u) berdasarkan selisih antara keduanya yang disebut *error* ($e = SP - PV$). Sinyal koreksi ini kemudian dikirimkan ke aktuator (motor, *valve*, *heater*, dan sebagainya) untuk menggerakkan *plant* menuju *setpoint*. Kontroler PID menggabungkan tiga mode aksi kontrol yang bekerja secara paralel dan saling melengkapi untuk menghasilkan respons sistem yang optimal.

Persamaan matematis kontroler PID ideal dalam domain waktu kontinyu dapat ditulis sebagai:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \text{INTEGRAL}[e(t)dt] + K_d \cdot (de(t)/dt)$$

Keterangan:

$u(t)$ = sinyal output kontroler (sinyal kontrol)

$e(t)$ = error pada waktu t, yaitu selisih *setpoint* dan nilai aktual ($e = SP - PV$)

K_p = konstanta proporsional (Proportional Gain)

K_i = konstanta integral (Integral Gain)

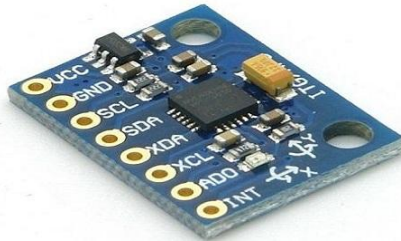
K_d = konstanta derivatif (Derivative Gain).

Ogata yang diterjemahkan oleh Edi Leksono (2010) menjelaskan karakteristik dan fungsi masing-masing komponen aksi kontrol PID sebagai berikut:

1. Aksi Proporsional (P): Menghasilkan sinyal kontrol yang besarnya sebanding (proporsional) dengan nilai *error* saat ini: $u_P(t) = K_p \cdot e(t)$. Aksi P mempercepat respons sistem dan mengurangi *error*, namun tidak dapat mengeliminasi *steady-state error* (*offset*) sepenuhnya. Semakin besar K_p , semakin cepat respons namun semakin rentan terhadap osilasi dan ketidakstabilan.
2. Aksi Integral (I): Mengintegrasikan (mengakumulasi) *error* dari waktu ke waktu: $u_I(t) = K_i \cdot \int e(t)dt$. Aksi I bertugas mengeliminasi *steady-state error* yang tersisa dari aksi proporsional karena terus menambah sinyal kontrol selama masih ada *error*, meskipun *error* tersebut kecil. Namun aksi I yang terlalu besar dapat menyebabkan *wind-up* (akumulasi berlebih) dan respons yang lambat.
3. Aksi Derivatif (D): Bereaksi terhadap laju perubahan *error* (kecepatan perubahan): $u_D(t) = K_d \cdot (de(t)/dt)$. Aksi D bersifat prediktif, yaitu mencoba mengantisipasi perubahan *error* di masa depan berdasarkan tren perubahannya saat ini. Aksi D meredam osilasi, memperbaiki stabilitas, dan mempercepat *settling time*. Kelemahannya adalah sangat sensitif terhadap noise pada sinyal pengukuran karena diferensiasi memperkuat komponen frekuensi tinggi.

Dalam implementasi digital pada mikrokontroler, persamaan PID harus diturunkan ke bentuk diskrit. Bentuk diskrit (*positional* PID) yang umum digunakan adalah: $u[n] = K_p \cdot e[n] + K_i \cdot T_s \cdot \text{SIGMA}(e[i]) + (K_d/T_s) \cdot (e[n] - e[n-1])$, di mana T_s adalah waktu *sampling* (detik), $e[n]$ adalah *error* pada sampel ke- n , dan $e[n-1]$ adalah *error* pada sampel sebelumnya. Metode *tuning* parameter PID (K_p , K_i , K_d) yang populer di kalangan peneliti Indonesia antara lain metode Ziegler-Nichols Terbuka (*open-loop step response*), metode Ziegler-Nichols Tertutup (*closed-loop ultimate gain*), metode Cohen-Coon, dan metode *trial-and-error* terstruktur dengan panduan kurva respons.

2.2.15 Sensor Gyro MPU-6050



Gambar 2. 14 Sensor Gyro MPU-6050

MPU-6050 pada **Gambar 2. 14** adalah sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) 6-axis yang dikembangkan oleh InvenSense (kini bagian dari TDK Corporation). Sensor ini mengintegrasikan dua sensor inersia utama dalam satu kemasan chip tunggal berukuran 4 mm x 4 mm x 0.9 mm, yaitu:

1. Akselerometer 3-axis MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*), yang mengukur percepatan linier pada tiga sumbu (X, Y, Z) termasuk percepatan gravitasi bumi (g). Data akselerometer dapat digunakan untuk menghitung sudut kemiringan (*tilt angle*) relatif terhadap arah gravitasi bumi.
2. Giroskop 3-axis MEMS, yang mengukur kecepatan sudut (*angular rate / angular velocity*) pada tiga sumbu rotasi (Roll/X, Pitch/Y, Yaw/Z) dengan satuan derajat per detik (deg/s). Data giroskop diintegrasikan terhadap waktu untuk mendapatkan sudut rotasi. Kombinasi data dari kedua sensor ini memungkinkan penentuan orientasi (*attitude*) benda dalam ruang tiga dimensi secara akurat.

Menurut Solichin & Nurhayati, 2018), spesifikasi teknis lengkap sensor MPU-6050 disajikan pada **Tabel 2 – 7**.

Tabel 2 – 7 Spesifikasi Sensor MPU-6050

Parameter	Keterangan
Produsen	InvenSense / TDK Corporation
Jenis Sensor	IMU 6-axis (Akselerometer + Giroskop)
Teknologi MEMS	MEMS <i>Capacitive</i> (akselerometer & giroskop)
Antarmuka Komunikasi	I2C (hingga 400 kHz) / SPI (hingga 1 MHz)
Alamat I2C	0x68 (pin AD0 = LOW) atau 0x69 (pin AD0 = HIGH)
Resolusi ADC	16-bit untuk akselerometer dan giroskop
<i>Full-Scale Range</i> Akselerometer	+/-2g, +/-4g, +/-8g, +/-16g (<i>configurable</i>)
Sensitivitas Akselerometer (FSR +/- 2g)	16384 LSB/g
<i>Full-Scale Range</i> Giroskop	+/-250, +/-500, +/-1000, +/-2000 deg/s (<i>configurable</i>)
Sensitivitas Giroskop (FSR +/-250)	131 LSB/(deg/s)
Tegangan Supply (VDD)	2.375V - 3.46V
Tegangan Logik I/O (VLOGIC)	1.8V atau VDD
Konsumsi Daya (Normal Mode)	3.9 mA
Konsumsi Daya (<i>Sleep Mode</i>)	5 uA
Sensor Suhu Internal	Ada (output register suhu)
<i>Digital Motion Processor</i> (DMP)	Ada (untuk sensor fusion internal)
Ukuran Chip	4 mm x 4 mm x 0.9 mm

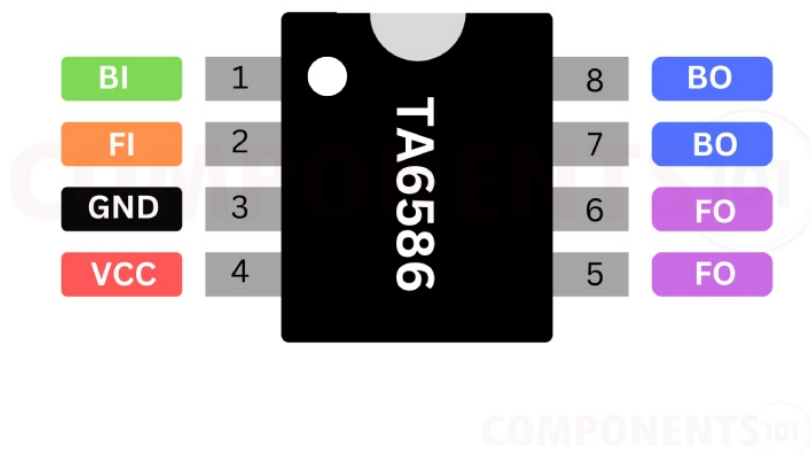
Data mentah (raw data) dari MPU-6050, khususnya sudut kemiringan yang diperoleh dari integrasi data giroskop, mengalami akumulasi error yang dikenal

sebagai *gyroscope drift* seiring berjalannya waktu. Sebaliknya, sudut kemiringan yang dihitung dari data akselerometer menggunakan fungsi arktan (atan2) memang bebas dari *drift* namun sangat rentan terhadap gangguan percepatan linier dan getaran mekanis. Oleh karena itu, untuk mendapatkan estimasi sudut yang akurat, stabil, dan bebas drift digunakan teknik sensor fusion, yaitu penggabungan cerdas data dari kedua sensor. Dua metode yang paling umum digunakan adalah:

1. *Complementary Filter*: metode sederhana yang menggabungkan sudut akselerometer (dengan bobot rendah) dan sudut integral giroskop (dengan bobot tinggi) menggunakan filter frekuensi tinggi dan rendah komplementer. Persamaannya: $\text{Sudut} = \alpha \times (\text{Sudut_prev} + \text{Giroskop} \times dt) + (1-\alpha) \times \text{Sudut_Akselerometer}$, dengan α biasanya 0.95-0.98.
2. Kalman Filter: metode statistik optimal yang lebih kompleks namun menghasilkan estimasi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan model *noise* dari masing-masing sensor secara matematis. Pada platform Arduino, library MPU6050 dari Jeff Rowberg serta *library* Kalman Filter yang tersedia mempermudah implementasi sensor fusion ini secara praktis [14].

2.2.16 Motor Driver TA6586

Motor Driver TA6586 adalah modul pengendali motor DC berbasis IC *driver* tunggal (*single H-Bridge*) yang berfungsi mengatur arah putaran sekaligus kecepatan satu motor DC dalam satu modul. Berbeda dengan L298N yang menggunakan pin *enable* terpisah untuk mengatur kecepatan dan dua pin arah (*IN1/IN2*) untuk mengatur arah putaran, TA6586 menggunakan skema kendali yang lebih sederhana melalui dua pin masukan, yaitu BI (*Backward Input*) dan FI (*Forward Input*), di mana sinyal PWM diberikan langsung pada salah satu dari kedua pin tersebut sesuai arah putaran yang diinginkan, sementara pin lainnya diberi logika rendah (*LOW*). Secara fisik, dapat dilihat dari **Gambar 2. 15**.



Gambar 2. 15 IC Motor Driver TA6586

Prinsip kerja TA6586 didasarkan pada rangkaian *H-Bridge internal* yang tersusun dari transistor MOSFET, serupa dengan L298N, namun dengan efisiensi *switching* yang lebih tinggi karena berbasis MOSFET dibandingkan transistor bipolar pada L298N. Ketika sinyal PWM diberikan pada pin FI dan pin BI diberi logika *LOW*, motor berputar searah (*forward*) dengan kecepatan yang sebanding dengan *duty cycle* PWM yang diberikan. Sebaliknya, ketika sinyal PWM diberikan pada pin BI dan pin FI diberi logika *LOW*, motor berputar berlawanan arah (*backward*). Apabila kedua pin diberi logika *LOW* secara bersamaan, motor akan berhenti bebas (*coast*), sedangkan apabila kedua pin diberi logika *HIGH* secara bersamaan, motor akan melakukan pengereman (*brake*). Karena arah dan kecepatan dikendalikan melalui satu sinyal PWM pada satu pin aktif, jumlah pin kendali yang dibutuhkan pada mikrokontroler menjadi lebih sedikit dibandingkan L298N untuk jumlah motor yang sama. Spesifikasi teknis modul TA6586 disajikan pada **Tabel 2–8**.

Tabel 2 - 8 Spesifikasi IC Motor Driver TA6586

Parameter	Keterangan
IC Driver Utama	TA6586
Tegangan Logik	3,3V – 5V

Parameter	Keterangan
Tegangan <i>Supply Motor</i>	4,5V – 18V DC
Arus Output Maksimum	$\pm 3,6$ A (kontinu), hingga 6,5A (<i>peak</i>)
Jumlah <i>Channel</i> (Motor)	1 <i>channel</i> (1 motor per modul)
Kontrol Arah dan Kecepatan	Melalui dua pin PWM: BI (mundur) dan FI (maju)
Frekuensi PWM yang Didukung	Hingga 20kHz
Proteksi	Proteksi arus lebih (<i>overcurrent</i>) dan panas berlebih (<i>overheat</i>) bawaan IC

2.2.17 Sensor *Infrared*

Sensor infrared adalah komponen elektronika yang dapat mengidentifikasi cahaya inframerah (infrared, IR) dan mendeteksi keberadaan suatu benda melalui pemantulan cahaya tersebut [15]. Sensor ini pada dasarnya terdiri atas dua bagian utama, yaitu pemancar (IR transmitter) berupa dioda yang memancarkan sinar inframerah, dan penerima (IR receiver) berupa fototransistor yang berfungsi menangkap pantulan radiasi tersebut [16]. Ketika radiasi inframerah yang dipancarkan mengenai suatu objek di depannya, sebagian radiasi akan dipantulkan kembali dan diterima oleh fototransistor, sehingga menghasilkan keluaran sinyal yang menandakan keberadaan objek tersebut.



Gambar 2. 16 Sensor *Infrared*

Prinsip kerja rangkaian sensor infrared pada **Gambar 2. 16** di atas adalah ketika cahaya inframerah pantulan diterima oleh fototransistor, energi cahaya tersebut akan diubah menjadi arus listrik pada bagian basis fototransistor, sehingga basis akan berperilaku layaknya saklar yang menutup (switch closed) secara sesaat

dan fototransistor menjadi aktif (berlogika LOW). Kondisi keluaran inilah yang kemudian dibaca oleh mikrokontroler sebagai indikasi keberadaan benda pada jarak deteksi sensor [16]. Sensor infrared saat ini juga banyak tersedia dalam bentuk modul terintegrasi (*IR Detector Photomodule*) yang telah menggabungkan pemancar, penerima, dan rangkaian penguat sinyal dalam satu papan, sehingga lebih praktis diaplikasikan pada berbagai sistem pendeteksi objek berbasis mikrokontroler [15]. Pada penelitian ini, sensor infrared digunakan sebagai sensor batas tambahan pada bagian pulley, menggantikan fungsi limit switch pada titik tertentu yang secara mekanis sulit dijangkau oleh sensor sentuh konvensional. Karakteristik umum sensor infrared sebagai pendeteksi benda disajikan pada **Tabel 2 – 9**.

Tabel 2 - 9 Spesifikasi Sensor *Infrared*

Parameter	Keterangan
Tegangan Kerja	3,3V – 5V DC
Arus Kerja	$\pm 20\text{mA}$
Jarak Deteksi	2 cm – 30 cm
Sudut Deteksi	$\pm 35^\circ$
Jenis Keluaran	Digital (HIGH/LOW)
Indikator	LED
Dimensi	3,2 cm x 1,4 cm
Jumlah Pin	3 pin (VCC, GND, OUT)