

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Permasalahan parkir di kawasan perkotaan terus meningkat seiring bertambahnya jumlah kendaraan, sementara ketersediaan lahan parkir cenderung terbatas. Kondisi ini menimbulkan antrean di pintu masuk, waktu pencarian slot yang lama, serta kendaraan yang berputar mencari tempat parkir kosong. Fenomena kendaraan yang “*cruising for parking*” telah dibahas dalam penelitian transportasi dan dinilai berkontribusi terhadap kemacetan di area urban [6].

Dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut, berbagai penelitian telah mengembangkan konsep *smart parking system*, yaitu sistem parkir yang memanfaatkan sensor dan mikrokontroler untuk memantau ketersediaan slot parkir secara otomatis. Penelitian oleh Wahyudi [4] misalnya, mengimplementasikan sistem parkir cerdas berbasis RFID dan sensor ultrasonik dengan dukungan IoT untuk menampilkan kondisi slot parkir secara real-time [7]. Namun, pendekatan ini masih menggunakan sensor per-slot sehingga kurang efisien apabila jumlah slot parkir semakin banyak karena meningkatkan kompleksitas pemasangan serta kebutuhan perangkat keras.

Selain *smart parking* berbasis slot, solusi lain yang banyak dikembangkan untuk lahan terbatas adalah sistem parkir vertikal otomatis. Salah satu modelnya adalah *rotary parking system*, yaitu sistem parkir dengan slot kendaraan yang bergerak secara vertikal berputar seperti *conveyor* sehingga dapat menambah kapasitas parkir tanpa perlu memperluas lahan [4]. Penelitian Rajapasha [5] mengembangkan *prototype rotary parking* berbasis mikrokontroler dengan sensor *infrared* sebagai pendeteksi dan pengendali mekanisme putaran slot. Sistem tersebut berhasil menjalankan mekanisme *rotary*, namun penentuan slot kosong masih bergantung pada pembacaan sensor inframerah yang bersifat linear dan belum memiliki verifikasi visual untuk memastikan kondisi slot benar-benar kosong.

Seiring perkembangan *embedded system*, beberapa penelitian mulai menerapkan *computer vision* dalam sistem parkir untuk mendeteksi slot kosong berdasarkan citra kamera. Pendekatan ini dinilai lebih adaptif dibanding sensor

linear karena dapat membaca kondisi slot berdasarkan informasi visual [9]. Namun, penerapan *computer vision* pada sistem *embedded* memiliki keterbatasan sumber daya sehingga umumnya menggunakan metode ringan seperti *thresholding*, analisis area (ROI), atau perbandingan intensitas piksel. Dalam hal ini, penggunaan modul ESP32-CAM menjadi alternatif yang lebih murah dan realistis untuk pengolahan citra sederhana dibandingkan penggunaan Open CV penuh yang membutuhkan komputasi lebih besar [10].

2.2. Rotary Parking System

Smart parking system merupakan konsep sistem parkir modern yang memanfaatkan teknologi otomasi, sensor, serta komunikasi data untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan parkir. *Smart parking* dirancang agar pengguna dapat memperoleh informasi kondisi parkir secara cepat, seperti ketersediaan slot, proses masuk–keluar kendaraan, hingga pencatatan data kendaraan. Sistem ini berkembang sebagai respons terhadap permasalahan parkir konvensional yang masih banyak terjadi di kawasan perkotaan, seperti proses pencarian slot parkir yang memakan waktu, antrean kendaraan di pintu masuk, dan ketergantungan terhadap petugas parkir [10].



Gambar 2. 1 Mekanisme *Rotary Parking* vertikal [22]

Secara umum, tujuan utama *smart parking* adalah mengurangi waktu pencarian slot parkir, menekan kepadatan kendaraan di area parkir, serta meningkatkan kenyamanan dan keamanan sistem. Dalam beberapa kajian, kendaraan yang berputar mencari slot parkir (*parking search traffic*) menjadi salah satu penyebab kemacetan lokal di kawasan padat, sehingga *smart parking* dinilai relevan untuk diterapkan sebagai solusi pada lingkungan urban [11]. Selain itu, penerapan *smart parking* juga memberikan manfaat bagi pengelola parkir karena data kendaraan dan ketersediaan slot dapat dicatat serta dimonitor secara lebih terstruktur.

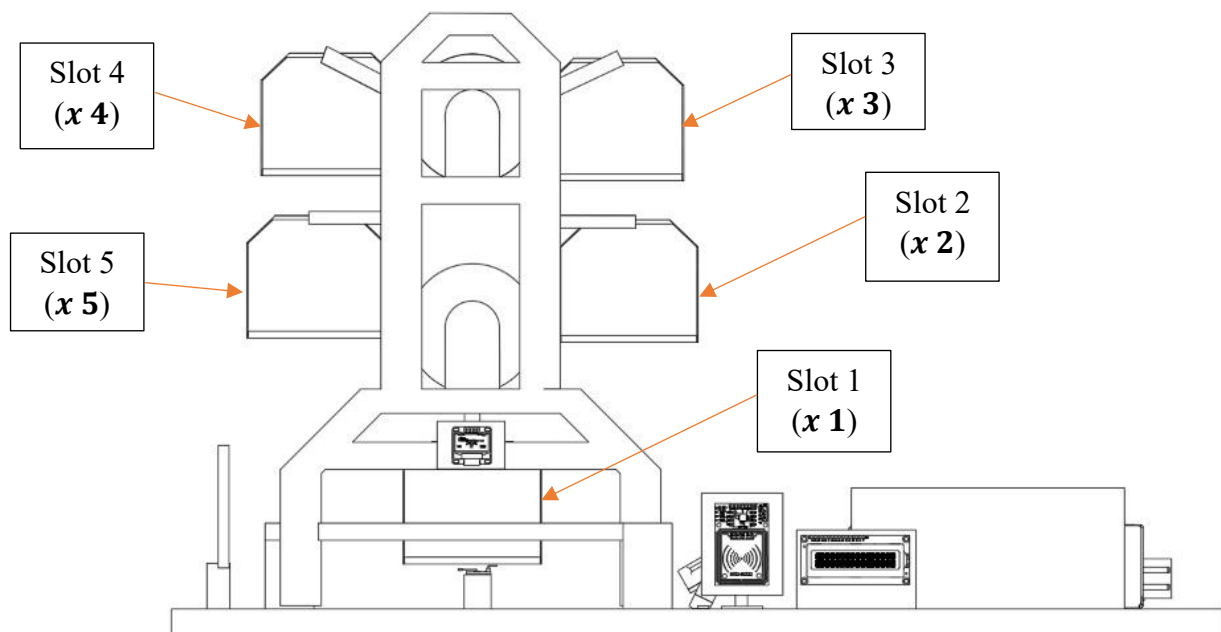
Smart parking system biasanya dibangun melalui integrasi perangkat keras dan perangkat lunak. Dari sisi perangkat keras, sistem dapat menggunakan sensor jarak seperti ultrasonik, Sensor *Hall Effect*, RFID sebagai identifikasi pengguna, kamera sebagai sensor visual, serta mikrokontroler sebagai pengendali utama. Dari sisi perangkat lunak, *smart parking* umumnya terhubung dengan sistem IoT untuk mengirimkan data parkir ke server, *database*, atau antarmuka monitoring secara *real-time*. Pendekatan berbasis IoT ini menjadi tren karena mampu meningkatkan fleksibilitas sistem, terutama dalam pengelolaan data slot parkir dan histori kendaraan [12].

Berdasarkan metode deteksi ketersediaan slot, *smart parking* dapat dibagi menjadi beberapa pendekatan. Pendekatan pertama adalah metode berbasis sensor per-slot, yaitu setiap slot parkir diberi sensor untuk mendeteksi apakah slot tersebut terisi atau kosong. Pendekatan ini mudah diterapkan pada skala kecil, namun menjadi kurang efisien ketika jumlah slot bertambah banyak karena membutuhkan sensor dalam jumlah besar serta *wiring* yang kompleks [13]. Pendekatan kedua adalah metode berbasis RFID, yaitu RFID digunakan untuk mengidentifikasi kendaraan atau pengguna yang masuk dan keluar sehingga proses akses dapat berjalan lebih cepat dan data pengguna dapat disimpan secara otomatis. Pendekatan ketiga adalah metode berbasis pengolahan citra (*image processing*), yaitu menggunakan kamera untuk memantau slot parkir dan melakukan deteksi slot kosong atau terisi secara visual.

Pendekatan berbasis kamera memiliki keunggulan dalam fleksibilitas, karena satu kamera dapat digunakan untuk memantau beberapa slot sekaligus tanpa perlu memasang sensor pada setiap slot. Selain itu, metode ini dapat menjadi verifikasi visual untuk meningkatkan akurasi keputusan sistem. Penelitian-penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa pendekatan *computer vision* dan *deep learning* dapat meningkatkan akurasi deteksi okupansi slot parkir, terutama jika dibandingkan dengan metode berbasis sensor sederhana yang terkadang sensitif terhadap noise atau perubahan kondisi lingkungan [14]. Namun demikian, metode berbasis kamera memerlukan algoritma pengolahan citra serta pengaturan pencahayaan yang cukup agar deteksi berjalan stabil.

2.3 Kinematika Perpindahan Posisi Slot pada Rotary Parking

Mekanisme pergerakan platform vertikal pada *rotary parking system* dikendalikan melalui pendekatan kontrol sekuensial yang mengatur tahapan pemindahan keranjang secara berurutan. Pengendalian gerak putar platform didasarkan pada perhitungan selisih posisi fisik keranjang agar keranjang target dapat berpindah menuju titik akses masuk atau keluar secara presisi.



Gambar 2. 2 Penomoran posisi slot

Secara kinematika, perpindahan posisi langkah slot dihitung berdasarkan selisih antara indeks posisi slot tujuan terhadap indeks posisi slot saat ini:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (2.1)$$

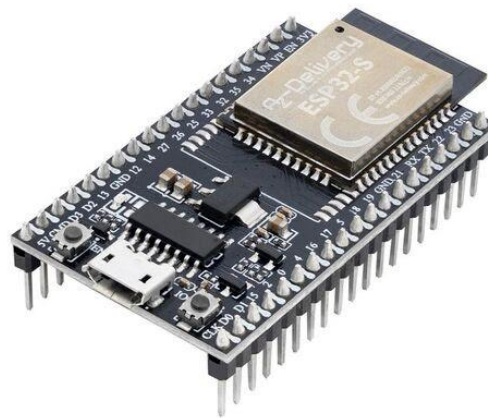
Keterangan:

- Δx = Besarnya perpindahan langkah slot (*displacement steps*)
- x_1 = Nomor indeks posisi slot awal yang sedang berada di titik akses (*current slot*)
- x_2 = Nomor indeks posisi slot target yang dituju (*target slot*)

Dalam implementasi perangkat keras, nilai Δx merepresentasikan jumlah pulsa digital yang harus dibaca oleh mikrokontroler ESP32 dari sensor *Hall Effect*. Setiap kali rangka keranjang melintas, medan magnet neodmium memicu sensor *Hall Effect* untuk menghasilkan sinyal masukan yang dihitung sebagai satu satuan langkah perpindahan slot. Ketika akumulasi hitungan pulsa tersebut telah memenuhi nilai Δx , ESP32 Master menginstruksikan penghentian daya motor DC melalui driver motor, sehingga keranjang parkir berhenti tepat pada posisi bibir gerbang akses.

2.4. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *System on Chip (SoC)* yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan banyak digunakan dalam pengembangan sistem *embedded* serta *Internet of Things (IoT)*. Modul ini dilengkapi dengan prosesor *dual-core* Tensilica Xtensa LX6 yang mampu bekerja hingga frekuensi 240 MHz, sehingga memiliki kemampuan pemrosesan data yang relatif tinggi untuk kelas mikrokontroler. Selain itu, ESP32 telah terintegrasi dengan modul WiFi dan Bluetooth, memori SRAM internal, serta berbagai antarmuka komunikasi dalam satu *chip*, sehingga memudahkan pengembangan sistem yang membutuhkan konektivitas dan pengolahan data secara simultan [15].



Gambar 2. 3 Mikrokontroler ESP32 DevKit V4 [23]

Gambar 2. 3 memperlihatkan modul pengembangan ESP32 DevKit V4 tampak atas. Pada modul ini terlihat komponen utama berupa modul ESP32-WROOM-32 yang dilengkapi pelindung logam (*metal shield*), antenna Wi-Fi terintegrasi di bagian ujung papan, serta tombol *EN/Reset* dan *Boot*. Di bagian sisi kiri dan kanan papan pengembang terdapat deretan pin *header* GPIO (*General Purpose Input/Output*) yang memudahkan koneksi kabel *jumper* ke sensor, aktuator, maupun rangkaian catu daya. Selain itu, terdapat porta *Micro-USB* dan IC konverter USB-to-UART pada bagian bawah papan yang berfungsi untuk proses pengunggahan kode program dari komputer sekaligus sebagai alternatif input daya. Karakteristik teknis dan spesifikasi detail dari mikrokontroler ESP32 tersebut disajikan pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Arduino

Parameter	Spesifikasi
Tipe Modul	ESP32 DevKit V1 (ESP32-WROOM-32)
Prosesor	Dual-core Tensilica LX6
<i>Clock Speed</i>	Hingga 240 MHz
Tegangan Operasi	3.3V
Tegangan Input (VIN)	5V–12V

Jumlah GPIO	±30 Pin
Koneksi Nirkabel	WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2
ADC	12-bit
Fitur Tambahan	PWM, SPI, I2C, UART

Dibandingkan dengan mikrokontroler generasi sebelumnya seperti Arduino Uno, ESP32 menawarkan keunggulan dalam hal jumlah GPIO, kecepatan pemrosesan, serta dukungan *multitasking*. ESP32 mendukung berbagai protokol komunikasi seperti UART, SPI, I2C, PWM, ADC, dan DAC yang memungkinkan integrasi dengan berbagai sensor maupun aktuator. Fleksibilitas ini menjadikan ESP32 banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan sistem kendali berbasis mikrokontroler, termasuk sistem otomasi dan monitoring berbasis IoT. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa ESP32 memiliki performa yang stabil dan efisien dalam pengendalian perangkat keras secara *real-time* dengan konsumsi daya yang relatif rendah [16].

Pada tugas akhir ini, ESP32 berperan sebagai pengendali utama dalam sistem *smart rotary parking*. ESP32 bertugas membaca sinyal dari Sensor *Hall Effect* yang digunakan sebagai penghitung posisi (*counter*) slot selama mekanisme *rotary* berputar, menerima *input* dari *push button* sebagai pemicu proses sistem, serta mengirimkan sinyal kontrol ke *driver* motor L298N untuk mengatur arah dan pergerakan motor DC 12V. Selain itu, ESP32 juga mengendalikan motor servo yang berfungsi sebagai palang parkir serta melakukan koordinasi dengan modul ESP32-CAM dalam proses pemilihan slot parkir kosong. Dengan kemampuan pemrosesan yang cukup cepat dan dukungan fitur *multitasking*, ESP32 mampu menjalankan logika sistem secara terstruktur dan *real-time*, sehingga pergerakan *rotary* dapat dikontrol dengan lebih akurat dan sistem dapat bekerja secara sinkron antara deteksi slot dan mekanisme perputaran.

2.5. Modul ESP32-CAM

ESP32-CAM merupakan modul pengembangan berbasis mikrokontroler ESP32 yang telah terintegrasi dengan kamera digital, umumnya menggunakan sensor OV2640. Modul ini dirancang untuk aplikasi sistem tertanam (*embedded system*) yang membutuhkan kemampuan akuisisi citra dengan biaya relatif rendah dan konsumsi daya yang efisien. ESP32-CAM memiliki spesifikasi prosesor yang sama dengan ESP32 pada umumnya, yaitu *dual-core* Xtensa LX6 dengan frekuensi hingga 240 MHz, serta mendukung konektivitas WiFi. Dengan adanya dukungan kamera dan komunikasi nirkabel dalam satu modul, ESP32-CAM menjadi solusi praktis untuk implementasi sistem berbasis pengolahan citra skala kecil hingga menengah [15].



Gambar 2. 4 ESP32-CAM AI-Thinker OV2640 [24]

Gambar 2. 4 memperlihatkan modul pengembangan ESP32-CAM buatan AI-Thinker tampak atas. Pada bagian tengah modul terpasang sensor kamera OV2640 beresolusi 2 megapiksel yang terhubung melalui soket pita fleksibel (FPC). Di bagian atas kamera terdapat slot kartu MicroSD yang dapat digunakan untuk penyimpanan eksternal data citra, serta sebuah lampu LED berwarna putih terang (*flash*) di sisi kanan kamera yang dapat difungsikan sebagai sumber pencahayaan tambahan saat pengambilan gambar. Pada bagian tepi kiri dan kanan modul terdapat deretan pin *header* koneksi yang mencakup pin catu daya (5V dan 3.3V), jalur *ground*, pin komunikasi serial UART (U0TXD dan U0RXD), serta sejumlah pin GPIO yang dapat digunakan untuk antarmuka kendali dan transmisi

data ke mikrokontroler lain. Rincian karakteristik teknis dan spesifikasi lengkap dari modul ESP32-CAM tersebut dirangkum pada Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi ESP32-CAM

Parameter	Spesifikasi
Tipe Modul	ESP32-CAM (AI-Thinker)
Sensor Kamera	OV2640 2MP
Resolusi Maksimum	1600 x 1200
Tegangan Operasi	5V
Memori	4MB PSRAM
Koneksi	±30 Pin
Koneksi Nirkabel	WiFi 802.11 b/g/n
Fitur Tambahan	MicroSD Slot

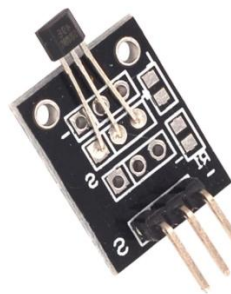
Dalam pengembangan sistem *smart rotary parking* pada tugas akhir ini, ESP32-CAM digunakan sebagai perangkat untuk melakukan pemindaian visual terhadap slot parkir. Kamera ditempatkan pada bagian atas mekanisme *rotary* sehingga mampu menangkap kondisi seluruh slot parkir dalam satu sudut pandang tetap. Gambar yang diperoleh kemudian diproses menggunakan metode pengolahan citra sederhana yang disesuaikan dengan keterbatasan komputasi perangkat *embedded*. Metode yang digunakan meliputi konversi citra ke *grayscale*, proses *thresholding* untuk memisahkan objek berdasarkan intensitas cahaya, serta analisis jumlah piksel pada area tertentu (*region of interest*) untuk menentukan apakah suatu slot dalam kondisi kosong atau terisi.

Pendekatan ini dipilih karena implementasi algoritma pengolahan citra berbasis OpenCV penuh umumnya membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar dan lebih cocok dijalankan pada komputer atau *single-board computer* seperti Raspberry Pi. Dalam konteks sistem *embedded* berbasis mikrokontroler, penggunaan metode pengolahan citra ringan lebih efisien dan tetap mampu menghasilkan keputusan yang cukup akurat untuk skala *prototype* [16]. Beberapa penelitian di bidang *embedded vision system* juga menunjukkan bahwa integrasi

modul kamera dengan mikrokontroler berperforma menengah seperti ESP32 dapat digunakan untuk aplikasi monitoring dan deteksi objek sederhana secara *real-time* dengan konsumsi daya rendah [17].

2.6. Sensor Hall Effect

Sensor *Hall Effect* adalah transduser elektronik yang berfungsi mendeteksi kehadiran dan besaran medan magnet di sekitarnya, lalu mengubahnya menjadi sinyal tegangan listrik. Dalam aplikasi sistem tertanam (*embedded system*), sensor ini umumnya dikemas dalam bentuk *Integrated Circuit* (IC) yang terintegrasi dengan *Schmitt Trigger*. Komponen ini memungkinkan sensor untuk menghasilkan keluaran logika digital (HIGH atau LOW) secara stabil saat terpapar ambang batas medan magnet tertentu. Dibandingkan dengan sensor optik seperti inframerah, sensor *Hall Effect* dinilai lebih unggul dalam aplikasi mekanik berat karena kebal terhadap gangguan debu, pelumas, dan fluktuasi intensitas cahaya [1].



Gambar 2. 5 Hall effect Sensor A3144 [25]

Gambar 2. 5 memperlihatkan modul sensor *Hall Effect* berbasis IC A3144 yang terpasang pada sebuah papan sirkuit cetak. Pada bagian ujung atas modul terdapat komponen sensor utama berupa transistor tiga kaki dengan permukaan datar yang berfungsi sebagai area sensitif penerima paparan fluks magnetik. Papan modul dilengkapi dengan rangkaian pendukung seperti resistor *pull-up*, kapasitor penyaring gangguan, serta sebuah lampu LED indikator yang akan menyala saat sensor mendeteksi kutub medan magnet yang sesuai. Di bagian bawah papan sirkuit tersedia tiga pin *header* antarmuka berjarak standar (2,54 mm), yang terdiri dari pin VCC untuk input catu daya 3,3V hingga 5V, pin GND sebagai titik referensi pembumian bersama, serta pin sinyal keluaran digital (S/DO) yang dihubungkan langsung ke pin GPIO mikrokontroler guna mengirimkan pulsa logika secara

diskrit. Karakteristik teknis dan batasan operasional dari modul sensor *Hall Effect* tersebut dirangkum pada Tabel 2. 3.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Hall effect Sensor A3144

Parameter	Spesifikasi
Tipe Komponen	Digital Hall Effect Switch (Contoh: IC A3144)
Tegangan Operasi	3.3V – 5V DC
Sinyal Keluaran	Logika Digital (HIGH / LOW)
Target Deteksi	Medan Magnet (Neodymium)
Karakteristik Fisik	Non-contact sensing, tahan debu, dan anti-noise optik

Pada perancangan *rotary parking system* ini, sensor *Hall Effect* diimplementasikan sebagai penghitung posisi (*counter*). Sebuah magnet neodymium dipasang secara presisi pada setiap rangka slot parkir. Saat motor DC memutar struktur *rotary*, magnet tersebut akan melintasi sensor dan menghasilkan pulsa digital yang dikirimkan ke ESP32. Sinyal ini diproses oleh sistem kontrol sekuensial untuk mencatat dan memastikan posisi slot secara akurat saat berada di titik akses [2]. Penggunaan sensor magnetik ini bertujuan untuk mensinkronkan pergerakan mekanik dengan proses validasi visual oleh ESP32-CAM secara presisi tanpa risiko pembacaan palsu [3].

2.7. Motor DC

Motor DC merupakan aktuator listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gerak rotasi. Dalam sistem *smart rotary parking*, motor DC digunakan sebagai penggerak utama mekanisme rotasi vertikal yang membawa slot parkir berputar secara terkontrol. Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara arus listrik dan medan magnet yang menghasilkan gaya elektromagnetik sehingga poros motor berputar. Karakteristik kecepatan dan torsi motor DC dipengaruhi oleh tegangan suplai dan arus yang diberikan, sehingga pengaturan parameter listrik secara langsung memengaruhi performa mekanik sistem [19].



Gambar 2. 6 Motor DC Gearbox JG25-370 [26]

Gambar 2. 6 memperlihatkan struktur fisik motor DC tipe JG25-370 yang terintegrasi langsung dengan kotak roda gigi reduksi (*gearbox* silinder). Pada bagian belakang terdapat tabung bodi motor listrik DC utama yang dilengkapi dua terminal terminal solder tembaga untuk koneksi kutub positif dan negatif catu daya dari modul *driver*. Bagian tengah merupakan silinder *spur gearbox* logam yang berfungsi mereduksi kecepatan putar putaran dinamo serta melipatgandakan torsi keluarannya. Pada ujung depan tampak poros keluaran (*output shaft*) berbahan baja tahan karat dengan profil potongan *D-shaft*, yang memudahkan penguncian puli penggerak (*pulleys*) menggunakan baut penahan agar tidak selip saat memutar beban rantai atau sabuk mekanisme *rotary*. Spesifikasi teknis dan batasan kerja operasional dari motor DC *gearbox* JG25-370 tersebut dicantumkan pada Tabel 2. 4.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Motor DC Gearbox JG25-370

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Kerja	6–12V DC
Tegangan Nominal	12V DC
Kecepatan Tanpa Beban	100–300 RPM
Torsi	± 3 –10 kg.cm
Arus Beban Penuh	1 – 2 A
Arus Tanpa Beban	100–300 mA

Untuk memungkinkan pengendalian arah dan kecepatan putaran, motor DC pada sistem ini dikombinasikan dengan modul *driver* motor berbasis *H-Bridge*,

seperti L298N atau sejenisnya. Konfigurasi H-Bridge memungkinkan perubahan polaritas tegangan pada terminal motor sehingga arah putaran dapat dikendalikan secara dua arah (*clockwise* dan *counterclockwise*). Penggunaan *driver* motor juga penting karena mikrokontroler seperti ESP32 tidak mampu menyuplai arus besar secara langsung ke motor. Dengan adanya *driver*, sistem dapat mengontrol motor secara aman dan efisien tanpa membebani rangkaian logika [20].

Penggunaan motor DC dalam sistem parkir otomatis dan sistem otomasi berbasis IoT telah banyak dikembangkan karena kemudahannya dalam integrasi dengan mikrokontroler serta fleksibilitas pengendalian arah dan kecepatan. Dalam *sistem rotary parking*, motor harus memiliki torsi yang cukup untuk menopang beban mekanisme vertikal, sehingga pemilihan spesifikasi seperti tegangan kerja, arus nominal, daya, serta rasio *gearbox* menjadi faktor penting dalam proses perancangan. Dengan kombinasi motor DC, driver motor, dan sistem kontrol berbasis ESP32, mekanisme *rotary* dapat bergerak secara otomatis menuju slot yang dipilih berdasarkan hasil deteksi sensor dan sistem pengolahan data.

Dalam perancangan sistem ini, diperlukan analisis perhitungan untuk memastikan motor DC yang digunakan mampu menggerakkan beban pada mekanisme *rotary*. Salah satu parameter penting adalah kecepatan sudut motor yang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.2)$$

di mana ω merupakan kecepatan sudut (rad/s) dan N adalah kecepatan putaran motor dalam satuan RPM. Selain kecepatan, parameter penting lainnya adalah torsi motor yang diperlukan untuk menggerakkan beban pada sistem *rotary*. Torsi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$T = F \times r \quad (2.3)$$

dengan gaya F diperoleh dari:

$$F = m \times g \quad (2.4)$$

di mana m adalah massa beban (kg) dan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/s²).

Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa motor DC yang digunakan harus memiliki kemampuan torsi dan daya yang cukup untuk menggerakkan sistem rotary secara stabil. Oleh karena itu, pemilihan motor DC *gearbox* menjadi solusi yang tepat karena mampu menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan motor DC biasa.

Selain itu, kecepatan putaran motor menjadi parameter penting dalam menentukan performa sistem. Kecepatan motor DC umumnya dinyatakan dalam satuan RPM (*Revolutions Per Minute*), yang dapat dikonversi menjadi kecepatan sudut menggunakan hubungan:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.5)$$

di mana ω adalah kecepatan sudut (rad/s) dan N adalah kecepatan putaran motor (RPM).

Sebagai contoh, jika motor yang digunakan memiliki kecepatan sebesar 100 RPM, maka kecepatan sudutnya dapat dihitung sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = 10.47 \text{ rad/s} \quad (2.6)$$

Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk satu kali putaran penuh dapat dihitung dengan:

$$t = \frac{60}{N} \quad (2.7)$$

Sehingga untuk motor dengan kecepatan 100 RPM diperoleh:

$$t = \frac{60}{100} = 0.6 \text{ detik} \quad (2.8)$$

Motor DC merupakan aktuator utama dalam sistem penggerak yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran. Dalam pengoperasiannya, besar kecilnya torsi dan kecepatan motor dipengaruhi oleh tegangan dan arus yang diberikan.

Pada sistem ini, pengaturan tegangan motor dilakukan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM merupakan teknik pengaturan daya dengan cara mengubah lebar pulsa sinyal digital sehingga menghasilkan tegangan rata-rata yang berbeda-beda pada motor.

Secara matematis, tegangan rata-rata yang diterima motor dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.9)$$

Dengan V_{out} = tegangan keluaran (Volt), D = duty cycle PWM (0–1 atau 0–100%), dan V_{in} = tegangan sumber (Volt).

Tegangan yang diberikan ke motor akan mempengaruhi arus yang mengalir. Hubungan antara tegangan dan arus mengikuti hukum Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.10)$$

Dengan I = arus (Ampere), V = tegangan (Volt), dan R = resistansi (Ohm).

Selanjutnya, torsi motor DC berbanding lurus dengan arus yang mengalir pada kumparan motor. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$T = k \cdot I \quad (2.11)$$

Dengan keterangan T = torsi (Nm), k = konstanta motor, I = arus (Ampere)

Selain itu, secara mekanik torsi juga dapat dihitung berdasarkan gaya (F) dan jari-jari (r) putaran:

$$T = F \times r \quad (2.12)$$

Dengan gaya yang bekerja dirumuskan sebagai:

$$F = m \times g \quad (2.13)$$

Sehingga diperoleh persamaan torsi:

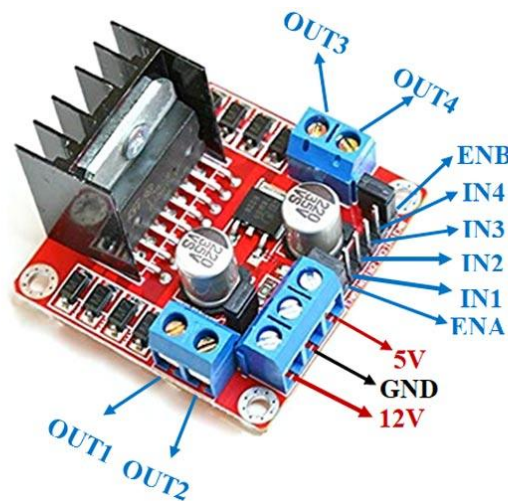
$$T = m \times g \times r \quad (2.14)$$

Berdasarkan hubungan tersebut, dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai *duty cycle* PWM akan meningkatkan tegangan rata-rata yang diberikan ke motor, sehingga arus yang mengalir juga meningkat dan menghasilkan torsi yang lebih besar. Oleh karena itu, pengaturan PWM menjadi faktor penting dalam memastikan motor mampu menggerakkan beban sesuai kebutuhan sistem.

2.8. Driver L298N Motor

Driver motor L298N merupakan modul pengendali motor berbasis rangkaian H-Bridge yang berfungsi untuk mengatur arah dan kecepatan putaran motor DC.

Modul ini dirancang untuk menangani arus dan tegangan yang lebih besar dibandingkan kemampuan keluaran langsung dari mikrokontroler. Secara umum, L298N mampu mengendalikan dua motor DC secara independen dengan sistem kendali logika digital [31].



Gambar 2. 7 Driver L298N [27]

Gambar 2. 7 memperlihatkan modul pengendali motor berbasis IC L298N yang dilengkapi dengan *heatsink* aluminium berwarna hitam di bagian tengah untuk membuang panas saat menangani beban arus tinggi. Di sekeliling modul terpasang blok terminal sekrup (*screw terminal*) biru, meliputi terminal blok masukan catu daya (12V, GND, dan keluaran regulator 5V) pada sisi depan, serta dua pasang terminal keluaran motor (OUT1–OUT2 di sisi kiri dan OUT3–OUT4 di sisi kanan) yang terhubung langsung ke aktuator motor DC. Pada sisi tepi kanan modul terdapat deretan pin *header* kontrol logika, yang terdiri dari pin IN1, IN2, IN3, dan IN4 untuk penentuan arah putaran, serta pin *Enable* (ENA dan ENB) yang dapat dihubungkan dengan sinyal modulasi lebar pulsa (PWM) dari mikrokontroler untuk mengatur kecepatan putar motor secara halus. Rincian karakteristik teknis dan spesifikasi operasional dari modul driver L298N tersebut dirangkum pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Driver L298N

Parameter	Spesifikasi
Tipe Driver	Dual H-Bridge
Tegangan Motor	5V–35V
Tegangan Logika	5V
Arus Maksimum	2A per <i>channel</i>
Jumlah Channel	2 Motor DC
Kontrol	IN1, IN2, IN3, IN4
Fitur	Enable Pin (PWM Speed Control)

Rangkaian H-Bridge memungkinkan perubahan arah arus yang mengalir ke motor, sehingga motor dapat berputar searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam. Selain itu, kecepatan motor dapat dikontrol menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM), di mana lebar pulsa sinyal digital dari ESP32 menentukan rata-rata tegangan efektif yang diterima motor. Teknik ini memungkinkan sistem melakukan percepatan dan perlambatan secara bertahap untuk mengurangi hentakan mekanis pada struktur *rotary*.

Dalam sistem *smart rotary parking*, L298N berfungsi sebagai antarmuka antara ESP32 dan motor DC. ESP32 mengirimkan sinyal logika untuk menentukan arah serta sinyal PWM untuk mengatur kecepatan, kemudian L298N meneruskan daya dari sumber tegangan eksternal ke motor sesuai perintah tersebut. Dengan demikian, *driver* motor tidak menghasilkan gerakan secara langsung, tetapi berperan sebagai penguat daya dan pengendali arus agar motor dapat bekerja sesuai instruksi sistem kontrol.

Dalam pengaturan kecepatan motor, digunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan oleh mikrokontroler ESP32. PWM bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa sinyal digital untuk mengontrol tegangan rata-rata yang diberikan ke motor. Nilai PWM memiliki rentang tertentu tergantung resolusi yang digunakan. Pada ESP32, PWM umumnya memiliki resolusi 8-bit, sehingga nilai PWM berada pada rentang:

$$PWM_{max} = 2^8 - 1 = 255 \quad (2.15)$$

Hubungan antara duty cycle dan nilai PWM dapat dinyatakan sebagai:

$$Duty Cycle = \frac{PWM}{255} \times 100\% \quad (2.16)$$

Sebagai contoh:

Jika nilai PWM = 128, maka:

$$Duty Cycle = \frac{128}{255} \times 100\% \approx 50\% \quad (2.17)$$

Artinya motor akan berputar dengan sekitar 50% dari kecepatan maksimum.

Hubungan antara PWM dan kecepatan motor dapat diasumsikan linier, sehingga:

$$RPM_{aktual} = Duty Cycle \times RPM_{maks} \quad (2.18)$$

Sebagai contoh, jika motor memiliki kecepatan maksimum 100 RPM dan diberikan PWM sebesar 50%, maka:

$$RPM_{aktual} = 0.5 \times 100 = 50 \text{ RPM} \quad (2.19)$$

Dengan menggunakan metode PWM, sistem dapat mengatur kecepatan motor secara halus untuk menghindari hentakan saat proses start dan stop, sehingga meningkatkan kestabilan mekanisme *rotary*.

2.9. Power Supply

Sistem catu daya merupakan bagian penting dalam perancangan sistem *smart rotary parking* karena berfungsi sebagai penyedia energi listrik untuk seluruh komponen, mulai dari mikrokontroler, sensor, modul kamera, hingga aktuator motor DC. Stabilitas tegangan dan arus yang diberikan sangat mempengaruhi kinerja serta keandalan sistem secara keseluruhan. Gangguan pada catu daya dapat menyebabkan sistem reset, kesalahan pembacaan sensor, atau bahkan kerusakan komponen elektronik [22].



Gambar 2. 8 *Power Supply* 12V 10A [28]

Gambar 2. 8 memperlihatkan unit catu daya mode sakelar (*switching power supply*) dengan selungkup pelindung logam berlubang sarang lebah (*honeycomb*) yang berfungsi mengalirkan panas secara konveksi alami. Di sisi samping kiri unit terdapat deretan terminal sekrup berpenutup transparan untuk koneksi listrik, yang mencakup terminal masukan tegangan bolak-balik AC (fasa, netral, dan *ground* pengaman) serta sepasang terminal keluaran tegangan searah DC (+V dan -V/GND). Di dekat deretan terminal tersebut juga terdapat potensiometer *trimmer* (ADJ) kecil untuk melakukan kalibrasi halus tegangan keluaran serta lampu indikator LED yang menandakan kondisi operasional aktif. Label spesifikasi pabrikan tertera di bagian atas selungkup, memberikan informasi mengenai nilai tegangan nominal dan batas kapasitas arus keluaran yang disuplai. Karakteristik teknis dan batasan elektrik dari *power supply* 12V tersebut dicantumkan pada Tabel 2. 6.

Tabel 2. 6 Spesifikasi *Power Supply* 12V

Parameter	Spesifikasi
Tegangan <i>Output</i>	12V DC
Arus <i>Output</i>	7A
Regulator Tambahan	Step-down 5V
Jenis	<i>Switching Power Supply</i>

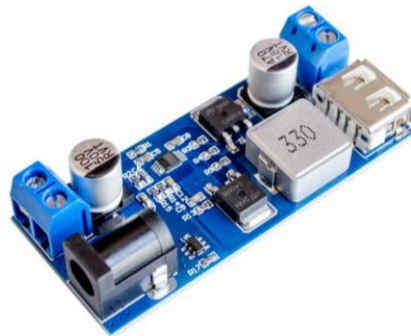
Pada sistem ini digunakan sumber tegangan utama yang disesuaikan dengan kebutuhan motor DC, umumnya berada pada rentang 9–12V. Tegangan tersebut kemudian diregulasi menggunakan modul *step-down (buck converter)* untuk menghasilkan tegangan 5V dan 3.3V yang dibutuhkan oleh ESP32, ESP32-CAM, serta Sensor *Hall Effect*. Regulasi tegangan diperlukan karena ESP32 bekerja pada logika 3.3V dan tidak toleran terhadap tegangan 5V secara langsung pada *pin input/output*. Oleh karena itu, pemisahan jalur catu daya antara rangkaian logika dan rangkaian motor menjadi aspek penting untuk mencegah gangguan noise akibat beban induktif motor.

Motor DC sebagai beban induktif dapat menghasilkan lonjakan arus (*current spike*) dan gangguan elektromagnetik saat proses start atau stop. Untuk meminimalkan gangguan tersebut, sistem catu daya dirancang dengan mempertimbangkan kapasitor filter pada jalur suplai serta penggunaan *driver* motor (L298N) sebagai isolator arus antara motor dan mikrokontroler. Pendekatan ini sesuai dengan praktik umum dalam perancangan sistem kendali berbasis mikrokontroler untuk menjaga kestabilan sinyal kontrol [21].

2.10. Step Down LM2596

Step-down converter LM2596 merupakan modul DC-DC buck converter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan *input* menjadi tegangan *output* yang lebih rendah sesuai kebutuhan sistem. Modul ini banyak digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler untuk menyesuaikan tegangan sumber daya agar sesuai dengan spesifikasi komponen yang digunakan [1].

Pada sistem *Smart Rotary Parking*, modul LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan dari *power supply* menjadi tegangan yang stabil sebesar 5V yang digunakan untuk menyuplai ESP32, LCD, dan motor *servo*. Penggunaan *step-down converter* ini bertujuan untuk menjaga kestabilan tegangan serta mencegah kerusakan komponen akibat tegangan yang tidak sesuai.



Gambar 2. 9 Step Down LM2596 [29]

Gambar 2. 9 memperlihatkan modul DC-DC *step-down converter* berbasis IC regulator LM2596. Pada papan sirkuit berwarna biru tersebut terdapat komponen induktor toroid/daya (bertuliskan 330) dan dua buah kapasitor elektrolit di sisi masukan serta keluaran yang berfungsi meratakan riak tegangan (*voltage ripple*). Di sudut papan tersedia blok terminal sekrup (*screw terminal*) biru dan soket DC *barrel jack* untuk jalur masuk tegangan (*input*), serta terminal sekrup dan soket USB di sisi berlawanan untuk penyaluran tegangan keluaran (*output*) 5V. Sebuah potensiometer *trimmer* multiturn berwarna biru dengan sekrup kuning terpasang di bagian tengah modul, yang berfungsi untuk menyetel dan mengunci nilai tegangan keluaran secara presisi sesuai kebutuhan rangkaian logika sistem. Karakteristik teknis dan parameter spesifikasi dari modul *step down* LM2596 ini dirangkum pada Tabel 2. 7.

Tabel 2. 7 Spesifikasi Step Down LM2596

Parameter	Spesifikasi
Tipe Modul	DC-DC Step-Down LM2596
Tegangan <i>Input</i>	4V – 40V DC
Tegangan <i>Output</i>	1.25V – 35V DC
Arus Maksimum	3A
Frekuensi <i>Switching</i>	150 kHz

Modul ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi yang tinggi serta kemampuan menghasilkan tegangan *output* yang stabil sehingga sangat cocok digunakan pada sistem *embedded* dan IoT [2]. Cara kerja modul LM2596

didasarkan pada prinsip *buck converter*, yaitu dengan menurunkan tegangan *input* melalui proses *switching* menggunakan komponen internal seperti transistor, diode, induktor, dan kapasitor. Tegangan *output* diatur dengan memanfaatkan potensiometer yang terdapat pada modul. Pada sistem yang dirancang, tegangan dari *power supply* terlebih dahulu masuk ke modul LM2596. Selanjutnya, tegangan tersebut diturunkan menjadi 5V dan disalurkan ke ESP32, LCD, serta motor *servo*. Dengan adanya modul ini, sistem mendapatkan suplai tegangan yang stabil sehingga kinerja komponen menjadi lebih optimal. Penggunaan LM2596 dalam sistem ini juga membantu mengurangi fluktuasi tegangan yang dapat menyebabkan gangguan pada mikrokontroler, seperti *restart* atau *error* pada sistem.

2.11. Kapasitor Elektrolit

Kapasitor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk medan elektrostatik selama durasi tertentu dan melepaskannya kembali saat dibutuhkan oleh rangkaian. Pada perancangan sistem terintegrasi yang melibatkan mikrokontroler berbasis frekuensi radio serta aktuator mekanik, kapasitor polar jenis elektrolit (*Electrolytic Capacitor*) memegang peran krusial sebagai penyangga tegangan (*reservoir*) sekaligus peredam gangguan frekuensi rendah (*decoupling*). Kehadiran kapasitor ini bertujuan untuk menjaga kestabilan rel tegangan suplai 5V DC agar tidak berfluktuasi ketika beban transien aktif secara bersamaan.



Gambar 2. 10 Kapasitor Elektrolit 1000 μ F 50v [31]

Gambar 2. 10 memperlihatkan bentuk fisik kapasitor polar jenis elektrolit silindris radial. Pada selubung bodi luar berwarna hitam tertera label spesifikasi nilai kapasitansi sebesar 1000 μ F dan batas toleransi tegangan kerja maksimal hingga 50V. Pada salah satu sisi bodi silinder terdapat garis strip putih vertikal yang

menandai letak kaki elektroda terminal negatif, sedangkan terminal positif ditandai dengan kaki kawat penghubung yang berukuran relatif lebih panjang. Kedua kaki kawat ini dipasang secara paralel sedekat mungkin pada rel daya VCC dan GND modul ESP32-CAM serta motor servo guna menyerap fluktuasi arus transien. Parameter spesifikasi dan karakteristik teknis dari komponen kapasitor elektrolit tersebut dirangkum pada Tabel 2. 8.

Tabel 2. 8 Spesifikasi Kapasitor Elektrolit 1000 μ F 50V

Parameter	Spesifikasi
Nilai Kapasitansi	1000 μ F
Tegangan Kerja Maksimum	50 V DC
Tegangan Operasi Sistem	5 V DC
Toleransi Kapasitansi	$\pm 20\%$
Rentang Suhu Operasional	-40°C hingga $+105^{\circ}\text{C}$

Kapasitor elektrolit 1000 μ F 50V ini berfungsi sebagai penyangga tegangan sekaligus peredam gangguan frekuensi rendah pada jalur suplai daya 5V DC sistem. Dalam pengoperasiannya, modul ESP32-CAM sering menarik arus sesaat yang tinggi (sekitar 300 mA hingga 500 mA) saat modul kamera OV2640 memindai citra dan modul transmisi nirkabel aktif, yang rentan memicu penurunan tegangan mendadak (*voltage brownout*) hingga menyebabkan modul melakukan *restart* otomatis secara berulang. Di sisi lain, motor servo penggerak palang pintu juga menghasilkan lonjakan arus awal dan induksi gangguan balik saat mulai bergerak dari sudut 0° ke 90° . Pemasangan kapasitor 1000 μ F secara paralel sedekat mungkin pada rel daya VCC dan GND kedua beban dinamis tersebut berfungsi menyimpan cadangan muatan lokal yang siap dilepaskan seketika saat terjadi tarikan arus mendadak, meratakan riak tegangan (*voltage ripple*), serta melindungi kestabilan tegangan logika mikrokontroler agar proses verifikasi visual dan komunikasi data tetap berjalan tanpa mengalami malafungsi atau *reset* sistem.