

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Pengereman Kaliper

Sistem pengereman pada kendaraan terdiri dari beberapa komponen yang saling mendukung agar proses pengereman dapat berlangsung dengan optimal. Salah satu komponen penting dalam sistem tersebut adalah kaliper rem (*caliper*). Tanpa adanya kaliper, mekanisme pengereman tidak akan bekerja secara efektif, sehingga kondisi komponen ini harus selalu dijaga agar tetap berfungsi dengan baik. Kaliper berperan sebagai bagian yang membantu mengontrol kecepatan dan pergerakan kendaraan saat pengereman berlangsung. Berikut fungsi kaliper:

- 1) Mengatur Laju Kecepatan Mobil,
- 2) Mengendalikan Mobil saat Proses Pengereman Berlangsung,
- 3) Mengurangi Jarak Pengereman,
- 4) Bertugas Menekan Piringan Cakram,
- 5) Mengoptimalkan Proses Pengereman,
- 6) Menambah Gaya Dorong pada Cakram Rem.

Pada Gambar 2.1 menunjukkan bentuk dari kaliper rem (Admin SUZUKI, 2024).



Gambar 2.1 Bentuk Fisik Kaliper Rem

2.1.2 Torsi

Torsi merupakan besaran dalam fisika yang menggambarkan efek puntiran atau momen gaya yang bekerja pada suatu benda terhadap sumbu putarnya. Besaran ini menjadi salah satu parameter penting dalam perancangan berbagai sistem mekanik, termasuk kendaraan bermotor maupun peralatan industri, karena berkaitan langsung dengan kemampuan benda untuk berotasi.

Secara umum, torsi dapat dipahami sebagai hasil perkalian antara gaya yang diberikan dengan jarak lengan gaya terhadap titik putar. Hubungan matematis yang menyatakan torsi tersebut dapat dituliskan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2-1.

$$\tau = F \times r \quad 2-1$$

Di mana τ = torsi (Nm), F = gaya yang bekerja tegak lurus terhadap lengan torsi (N), dan r = jarak lengan gaya dari titik poros atau sumbu rotasi (m).

2.1.3 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse width modulation atau yang disebut *pulse duration modulation* adalah metode untuk merendahkan rata-rata *power* yang dikirim oleh sinyal elektrik. PWM menggunakan pulsa persegi panjang yang lebarnya dimodulasi sehingga menghasilkan variasi nilai rata-rata bentuk gelombang. Jika kita mempertimbangkan sinyal pulsa $f(t)$, dengan periode T , nilai Y -min rendah, nilai Y -maks tinggi, dan siklus kerja D , maka didapatkan rata-rata sinyal keluaran yang dapat dilihat pada Persamaan 2-2.

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad 2-2$$

Dalam pengaplikasiannya, PWM sering digunakan untuk mengontrol *servo-mechanisms* (Naganetra et al., 2019). Motor servo merupakan jenis motor listrik yang porosnya dapat dikontrol dengan akurasi tinggi. Poros motor servo dapat berputar pada sudut yang dibutuhkan. Struktur motor servo terdiri dari motor DTC, *gearbox* dengan poros, dan pengontrol dengan sensor yang diperlukan (encoder, sensor posisi, dll.). Penggunaan PWM untuk mengendalikan motor servo didasarkan pada prinsip – prinsip berikut:

- 1) PWM menghasilkan pulsa dengan lebar yang bervariasi dengan periode yang berbeda-beda, yang dapat dilihat pada Persamaan 2-3.

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{period}} \times 100 \quad 2-3$$

Di mana D – durasi pulsa, T_{ON} – waktu *ON* dari sinyal, dan T_{period} – total periode dari satu *cycle* yang ditunjukkan pada Persamaan 2-4.

$$f = \frac{1}{T_{period}} \quad 2-4$$

Di mana f – frekuensi PWM

2) Untuk mengontrol kecepatan dari motor servo, lebar pulsa itu berubah, mengizinkan regulasi dari *power supply* ke motor yang disajikan pada Persamaan 2-5.

$$PW = D(PW_{max} - PW_{min}) + PW_{min} \quad 2-5$$

Di mana PW – lebar pulsa dan PW_{max} dan P_{min} – maksimum dan minimum lebar pulsa yang didukung oleh motor servo.

3) Kontrol posisi dari motor servo itu memungkinkan penggunaan *feedback*. Untuk menyesuaikan posisi, tegangan yang dipakai untuk motor setelah sinyal PWM dikonversi menghasilkan sinyal kontrol. Disajikan pada Persamaan 2-6.

$$\alpha = D(\alpha_{max} - \alpha_{min}) + \alpha_{min} \quad 2-6$$

Di mana α – posisi sudut motor servo dan α_{max} dan α_{min} – maksimum dan minimum sudut dari motor servo.

Metode ini sudah meningkatkan popularitas berdasarkan sederhananya pengimplementasian dan rendahnya dana. Gambar 2.2 menunjukkan bentuk fisik dari motor servo (Autsou et al., 2024).



Gambar 2.2 Bentuk Fisik Motor Servo

2.1.4 Akurasi

Akurasi merupakan parameter yang menunjukkan seberapa dekat hasil suatu pengukuran terhadap nilai sebenarnya dari besaran yang diukur. Dalam konteks pengukuran, akurasi berkaitan erat dengan tingkat ketidakpastian yang dimiliki oleh suatu alat ukur. Penentuan akurasi dilakukan untuk mengetahui besarnya kemungkinan kesalahan yang muncul selama proses pengukuran menggunakan alat tersebut (Santoso, 2017). Tingkat akurasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-7.

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad 2-7$$

Di mana:

TP (*True Positive*) = Data positif yang diprediksi benar

TN (*True Negative*) = Data negatif yang diprediksi benar

FP (*False Positive*) = Data negatif yang diprediksi salah

FN (*False Negative*) = Data positif yang diprediksi salah

2.1.5 Error

Error dalam pengukuran merujuk pada selisih antara nilai yang terbaca oleh sensor dan nilai sebenarnya dari besaran yang diukur. Perbedaan ini menunjukkan adanya ketidakakuratan pada sensor, yang dapat disebabkan oleh ketidakandalan dalam memberikan data, gangguan kinerja, atau kemungkinan kerusakan teknis. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan data yang dihasilkan menjadi kurang tepat, bahkan hilang, sehingga memengaruhi performa sistem secara keseluruhan. Persentase *error* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-8.

$$\text{Persentase Error} = \left(\frac{|\text{Eksperimental} - \text{Diterima}|}{\text{Diterima}} \right) \times 100\% \quad 2-8$$

2.1.6 Statistika

Statistika merupakan cabang ilmu yang membahas proses perencanaan, pengumpulan, pengolahan, analisis, hingga penafsiran dan penyajian data. Secara sederhana, statistika dapat dipahami sebagai ilmu yang berkaitan dengan pengelolaan dan pemanfaatan data (Anwar, 2009). Salah satu konsep dasar dalam statistika adalah nilai rata-rata. Rata-rata termasuk ukuran yang bersifat operasional karena dapat dihitung secara langsung dari sekumpulan data menggunakan Persamaan 2-9.

$$X = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Xi}{n} \right) \quad 2-9$$

Di mana:

X = rata-rata

n = banyaknya data

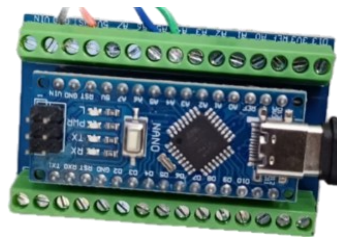
Xi = nilai data ke-i

2.1.7 Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan suatu jenis mikroprosesor yang telah dilengkapi dengan memori serta fitur *input* dan *output* (I/O) dalam satu chip terpadu.

Perangkat ini digunakan pada sistem tertanam (*embedded system*) dan saat ini menjadi komponen yang sangat umum dalam berbagai aplikasi teknologi, salah satunya adalah ATmega328P. Mikrokontroler tersebut digunakan pada papan Arduino dan telah dilengkapi dengan berbagai fungsi periferan untuk mendukung pengoperasiannya (Pasquale, 2025).

Arduino sendiri adalah *platform* elektronik bersifat *open source* yang terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak yang dirancang agar mudah digunakan. Papan Arduino mampu menerima berbagai jenis input, seperti sinyal dari sensor cahaya, tekanan tombol, hingga data dari internet, kemudian memprosesnya menjadi *output*, misalnya menggerakkan motor, menyalakan LED, atau mengirimkan informasi secara daring. Proses pemrograman Arduino dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Arduino/C++ (Arduino, 2018). Disajikanlah bentuk fisik dari Arduino Nano pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bentuk Fisik Arduino Nano

2.1.8 Layar Antarmuka

Layar antarmuka merupakan komponen yang banyak dijumpai, terutama dalam industri komputer. Pada awal perkembangannya, layar antarmuka pertama yang digunakan adalah jenis digital sederhana. Salah satu bentuk yang dianggap berhasil pada masa awal ialah layar non-CRT, seperti yang terdapat pada kalkulator, laptop, serta berbagai perangkat portabel lainnya. Sebagian besar tampilan tersebut digunakan dalam aplikasi *embedded*, yaitu sebagai bagian yang menyatu langsung dengan produk dan bukan sebagai perangkat periferan terpisah. Perkembangan ini kemudian menantang penggunaan layar CRT dan mendorong peralihan menuju antarmuka digital yang lebih luas (Myers, 2002).

Saat ini, berbagai industri telah memanfaatkan layar antarmuka, salah satunya monitor portabel yang umum digunakan untuk menampilkan informasi

secara visual. Monitor berfungsi dengan menerima sinyal dari kartu grafis, kemudian mengolahnya menjadi gambar atau teks yang dapat dilihat oleh pengguna. Bentuk fisik monitor portabel ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bentuk Fisik Monitor Portabel

2.1.9 Joystick

Joystick merupakan perangkat masukan pada komputer yang umumnya berbentuk tuas atau batang kendali yang dapat digerakkan ke berbagai arah. Selain model berbentuk tongkat, terdapat pula *joystick* dengan desain kotak atau persegi yang terbuat dari plastik dan dilengkapi dengan tuas serta sejumlah tombol untuk mengontrol pergerakan objek pada layar komputer. Perangkat ini mampu mengirimkan perintah arah dalam dua maupun tiga dimensi ke sistem komputer. Bentuk fisik *joystick* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bentuk Fisik Joystick

2.1.10 LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR merupakan teknologi yang menggabungkan penggunaan laser dengan sistem deteksi fotoelektrik. Perangkat ini memanfaatkan sinar laser sebagai sumber cahaya untuk memancarkan pulsa berfrekuensi tinggi ke suatu objek, kemudian pantulan sinyal tersebut diterima kembali oleh detektor foto. Dari prinsip kerjanya, LiDAR memiliki kesamaan dengan radar gelombang mikro konvensional. Perbedaannya terletak pada media yang digunakan, di mana LiDAR memanfaatkan laser, misalnya dengan panjang gelombang 532 nm atau 1064 nm untuk mengukur jarak, arah, serta mengidentifikasi objek berdasarkan

posisi, kecepatan radial, pola hamburan, dan karakteristik lainnya (Wang et al., 2024). Disajikan bentuk fisik LiDAR pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Bentuk Fisik LiDAR

2.1.11 Sensor Encoder

Encoder merupakan salah satu jenis sensor yang berfungsi mengubah gerakan mekanik, baik berupa putaran maupun pergeseran linier, menjadi sinyal listrik digital yang kemudian dapat diproses oleh sistem kendali. Perangkat ini banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi seperti robotika, mesin CNC, motor servo, dan sistem otomasi lainnya (Badan Pangan Nasional, 2023). Secara umum, encoder bekerja berdasarkan dua prinsip utama, yaitu optik atau magnetik:

- 1) *Optical Encoder* memanfaatkan piringan yang memiliki pola transparan dan tidak transparan. Pergerakan piringan tersebut dideteksi oleh sensor optik yang terdiri dari LED dan *photodetector* untuk menghasilkan sinyal.
- 2) *Magnetic Encoder* menggunakan sensor berbasis medan magnet, seperti sensor efek Hall atau sensor magnetoresistif, untuk mendeteksi perubahan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor bermagnet.

2.1.12 Kamera

Kamera merupakan perangkat yang berfungsi merekam atau menangkap gambar dengan memanfaatkan cahaya. Istilah kamera berasal dari kata *camera obscura*, yaitu sebuah ruang atau kotak kedap cahaya yang dilengkapi dengan lensa untuk memfokuskan cahaya ke satu titik, mirip dengan prinsip kerja kaca pembesar. Seiring perkembangan teknologi, berbagai jenis kamera digital telah tersedia di pasaran dan dapat dibedakan berdasarkan mekanisme serta sistem kerja yang digunakan (Srivastav, 2021).

Salah satu contohnya adalah Intel Realsense, yang dikembangkan sebagai bagian dari teknologi *Human-Computer Interaction (HCI)*. Dalam bidang HCI

sendiri terdapat beberapa cabang, seperti *User Interface (UI)* dan *User Experience (UX)*. Intel Realsense hadir sebagai inovasi di ranah tersebut, mengikuti jejak teknologi sebelumnya seperti Kinect yang dikembangkan oleh PrimeSense serta Leap Motion oleh Leap. Kamera Intel Realsense dilengkapi dengan berbagai fitur, antara lain analisis wajah, pelacakan mata dan ekspresi, finger tracking, pengenalan suara untuk mengendalikan perangkat, background subtraction, hingga dukungan untuk aplikasi *augmented reality* (Sepiyanto Didit, 2017). Bentuk fisik dari kamera Realsense dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Bentuk Fisik Kamera Realsense

2.1.13 You Only Look Once (YOLO)

YOLO merupakan salah satu algoritma deteksi objek yang banyak digunakan dalam bidang *computer vision* karena mampu bekerja dengan cepat sekaligus mempertahankan tingkat akurasi yang baik. Algoritma ini pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Redmon dan timnya pada tahun 2016 melalui makalah berjudul “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection” (Redmon et al., 2016).

Prinsip kerja YOLO adalah membagi citra masukan menjadi beberapa bagian berbentuk *grid* berukuran $S \times S$. Setiap sel pada *grid* tersebut bertugas memprediksi sejumlah *bounding box*, nilai keyakinan/*confidence score*, serta probabilitas kelas objek yang terdeteksi. Berbeda dengan metode deteksi objek lainnya yang memproses bagian gambar secara terpisah, YOLO melakukan deteksi seluruh objek dalam satu kali proses (*forward pass*). Pendekatan ini memungkinkan sistem melakukan deteksi objek secara waktu nyata dengan kecepatan yang tinggi.

2.1.14 Robot Operating System (ROS)

ROS adalah sistem operasi robot yang bersifat *open source*. ROS menyediakan berbagai pustaka dan alat bantu untuk membantu pengembang perangkat lunak dalam membuat aplikasi robotika. ROS menawarkan abstraksi perangkat keras, driver perangkat, pustaka perangkat lunak, visualisasi, sistem komunikasi pesan, manajemen paket, dan lain sebagainya. Tujuan utamanya

adalah untuk mendukung penggunaan ulang kode dalam penelitian dan pengembangan robotika. Saat ini, banyak robot yang sudah menggunakan ROS, mulai dari robot udara dan darat hingga humanoid dan kendaraan bawah air. Selain itu, ROS juga sudah mendukung banyak sensor populer yang digunakan dalam robotika seperti *Inertial Measurement Unit (IMU)*, *Global Positioning System (GPS)*, kamera, dan laser yang semuanya sudah dapat diakses melalui driver yang tersedia luas dalam sistem ROS (Serrano, 2011).

2.1.15 *Mini Personal Computer (PC)*

Mini PC adalah versi ringkas dari *personal computer*. Berbeda dengan komputer tradisional yang memakan cukup banyak ruang, *mini PC* cukup kecil untuk diletakkan di belakang monitor dan cukup untuk tugas sehari-hari seperti menjelajahi web, menggunakan aplikasi perkantoran, dan memutar media. Karena ukurannya yang kecil, *mini PC* sering menggunakan komponen hemat daya, yang membuatnya lebih tenang dan lebih efisien energi dibandingkan dengan komputer berukuran besar (Lenovo, n.d.).

Intel NUC (*Next Unit of Computing*) adalah sebuah komputer mini (*mini PC*) berforma tinggi yang dikembangkan oleh Intel Corporation. Perangkat ini dirancang untuk memberikan kapabilitas komputasi seperti desktop dalam ukuran yang jauh lebih ringkas. Meskipun bentuk fisiknya kecil, Intel NUC mendukung berbagai aplikasi komputasi intensif, mulai dari otomasi industri hingga sistem robotika. Intel NUC sering dimanfaatkan sebagai komputer utama untuk menjalankan perangkat lunak seperti ROS. Karena memiliki arsitektur x86_64 dan dukungan penuh terhadap sistem operasi (Portugal et al., 2024). Disajikan bentuk fisik dari Intel Nuc pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk Fisik Intel Nuc

2.1.16 Sistem Catu Daya

Untuk memperoleh listrik, diperlukan daya AC komersial yang dikirim dari pembangkit listrik. Namun, *Integrated Circuit* (IC) dan komponen elektronik yang digunakan di dalam peralatan otomasi kantor, peralatan otomasi pabrik, dan perangkat elektronik lainnya tidak beroperasi dengan tegangan AC tersebut, bahkan dapat rusak akibat tegangan tinggi. Tegangan DC yang stabil dibutuhkan untuk mengoperasikan IC dan komponen elektronik tersebut. Perangkat yang mengubah daya AC komersial menjadi daya DC yang teratur disebut *Regulated DC Power Supply*.

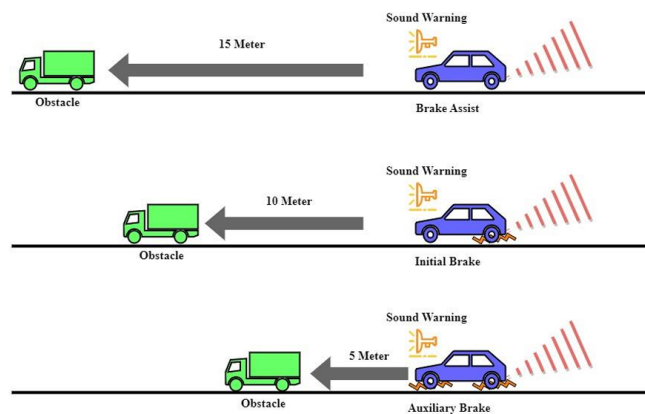
Baterai Litium Polimer juga dikenal sebagai Li-Po. Dalam dunia robotika sering digunakan baterai LiPo. Baterai LiPo menggunakan elektrolit polimer kering, yang merupakan lapisan plastik tipis. Pertukaran ion terjadi karena lapisan film ini berlapis-lapis di antara anoda dan katoda. Metode ini memungkinkan pembuatan baterai LiPo dalam berbagai bentuk dan ukuran. Disajikan bentuk fisik baterai LiPo pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Bentuk Fisik Baterai LiPo

2.2 Penelitian Terdahulu

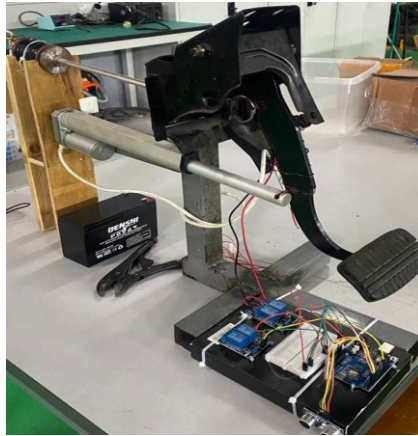
Penelitian yang dilakukan oleh (Rakhi Pete & Dr. Manik Deosarkar, 2024) membahas mengenai sistem “*Automatic Braking System*”. Pada penelitian tersebut digunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi jarak terhadap objek di depan kendaraan, modul Bluetooth sebagai media komunikasi antara pengguna melalui perangkat seluler dengan sistem ABS, dan motor driver untuk menggerakkan motor. Buzzer sebagai indikator suara peringatan, serta layar Nokia sebagai antarmuka pengguna. Mekanisme kerja sistem ABS yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 2.10 (Rakhi Pete & Dr. Manik Deosarkar, 2024).



Gambar 2.10 Cara Kerja Sistem ABS

Berdasarkan Gambar 2.10, sensor ultrasonik akan mengukur jarak kendaraan terhadap halangan di depan. Buzzer mulai memberikan peringatan ketika jarak mencapai sekitar 15 meter. Sistem pengereman kemudian mulai bekerja secara efektif pada jarak sekitar 10 meter untuk roda belakang, sedangkan pengereman pada roda depan menjadi optimal ketika jarak kendaraan dengan halangan mencapai sekitar 5 meter.

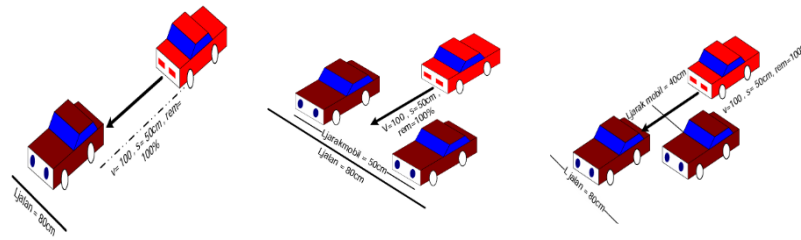
Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh (Ataur et al., 2024) berjudul “*Autonomous Servo-Electro Braking System for High-Speed EV*”, mengembangkan sistem pengereman otonom dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller (FLC)* sebagai pengendali utama. FLC tersebut diimplementasikan pada Arduino Uno. Sistem ini menggunakan sensor jarak berbasis LiDAR (ultrasonik) untuk mendeteksi halangan, sementara aktuator yang digunakan berupa relai yang berfungsi mengaktifkan dan menonaktifkan motor linier serta aktuator elektromagnetik yang memberikan tarikan pada pedal rem. Rancangan mekaniknya dapat dilihat pada Gambar 2.11 (Ataur et al., 2024).



Gambar 2.11 Rancangan Mekanik Autonomous Braking System for EV

Metode yang diterapkan dalam penelitian tersebut menggunakan FLC untuk mengatur suplai arus ke solenoid dan motor aktuator. Ketika sensor tidak mendeteksi adanya halangan, sistem akan menjaga agar interaksi pengemudi dengan pedal rem dapat diminimalkan. Selain itu, terdapat penelitian lain yang juga memanfaatkan Fuzzy Logic sebagai pengendali utama, yaitu penelitian oleh (Hartono et al., 2019) dengan judul “Otomatisasi Sistem Pengereman Mobil menggunakan Sensor Jarak”. Penelitian ini menggunakan mobil prototipe yang dilengkapi dengan sensor ultrasonik untuk mengukur jarak terhadap objek serta motor servo sebagai aktuator pengereman.

Pada penelitian tersebut dilakukan pula pengujian melalui simulasi dengan 3 skenario yang berbeda, yaitu satu objek yang menghalangi mobil (a) sedang berhenti dan mobil (b) yang telah terintegrasi dengan pengereman otomatis melaju dengan kecepatan 100%, pada jarak 50cm Mobil (b) akan melakukan pengereman 100%; skenario selanjutnya yaitu dua objek yang menghalangi dimana mobil (a) dan (b) sedang berhenti dan mobil (c) yang telah terintegrasi dengan pengereman otomatis dapat melaju diantara mobil karena tidak terdeteksi adanya jarak untuk pengereman. Dan skenario terakhir yaitu dua objek yang menghalangi, di mana mobil (a) berada di depan mobil (c), sedangkan mobil (b) berada di sebelah kiri. Mobil (c), yang telah terintegrasi dengan pengereman otomatis, melaju dengan kecepatan 100%. Ilustrasi dari simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 2.12 (Hartono et al., 2019).



Gambar 2.12 Skenario Sistem Pengereman menggunakan Sensor Jarak

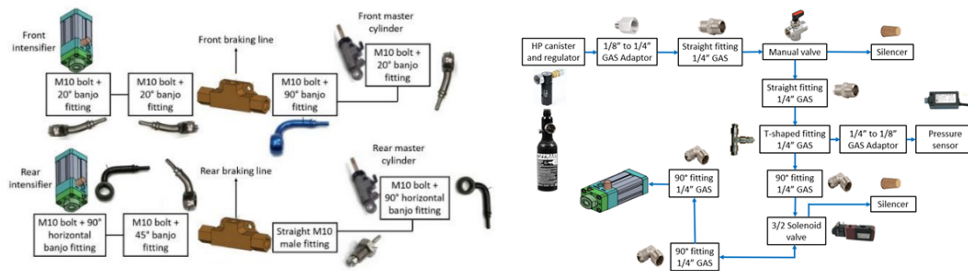
Penelitian lain yang memanfaatkan sensor LiDAR sebagai alat pengukur jarak dilakukan oleh (Ramaprabha et al., 2022) dengan judul “*Autonomous Braking System Using Linear Actuator*”. Pada penelitian tersebut, sistem bekerja dengan memanfaatkan mikrokontroler yang menerima data dari sensor LiDAR. Ketika mesin kendaraan dinyalakan, LiDAR mulai mendeteksi jarak terhadap objek di sekitarnya dan mengirimkan informasi tersebut ke Arduino untuk diproses lebih lanjut. Kendaraan akan terus bergerak atau berakselerasi hingga sistem mendeteksi adanya penghalang atau potensi tabrakan. Model perangkat keras berupa aktuator dan kendaraan yang digunakan dalam penelitian tersebut ditampilkan pada Gambar 2.13 (Ramaprabha et al., 2022).



Gambar 2.13 Model Perangkat Keras

Selain itu, terdapat penelitian yang berfokus pada *Emergency Braking System* berjudul “*Remote Emergency Braking System For Autonomous Racing Electric Vehicles*” oleh (Sorrentino et al., 2021). Sistem yang dikembangkan dirancang untuk menghentikan kendaraan secara otomatis ketika terjadi kondisi kegagalan, seperti kesalahan pada sensor, hilangnya kendali kendaraan, atau perintah penghentian dari operator jarak jauh. Mekanisme pengereman menggunakan kombinasi sistem pneumatik dan hidrolik, dengan sumber energi berupa udara bertekanan tinggi yang dikonversi menjadi tekanan hidrolik untuk mengaktifkan rem. Karena penelitian ini menitikberatkan pada kondisi darurat, dibutuhkan sistem pengereman yang memiliki respons dan daya henti yang kuat,

sehingga dipilihlah mekanisme pneumatik-hidrolik. Rangkaian pneumatik-hidrolik dapat dilihat pada Gambar 2.14 (Sorrentino et al., 2021).



Gambar 2.14 Rangkaian Hidrolik (Kiri) dan Pneumatik (Kanan)

Sebagai acuan dalam menentukan keterbaruan penelitian, Tabel 2.1. memaparkan kelebihan dan kekurangan dari beberapa penelitian terdahulu.

Tabel 2.1 Tabel Penelitian Terdahulu

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Kelebihan	Kekurangan
1	(Rakhi Pete & Dr. Manik Deosarkar, 2024)	<i>Automatic Braking System</i>	Sistem mampu bekerja mulai dari jarak 15 meter dengan baik dengan <i>forward</i> maupun <i>reverse sensor</i> .	Pengereman yang dilakukan masih menggunakan energi dari elektro, yang kekuatan pengeremannya tidak kuat.
2	(Ataur et al., 2024)	<i>Autonomous Servo-Electro Braking System for High-Speed EV</i>	Sistem menggunakan 2 aktuator, yaitu motor elektromagnetik yang mampu menekan beban sebesar 80 N dan motor linier yang mampu menekan beban sebesar 500 N.	Untuk sistem <i>autonomous</i> -nya, totalnya diperlukan waktu untuk mengaktifkan pedal rem untuk jarak 8,89 cm selama 2,74 detik.
3	(Hartono et al., 2019)	Otomatisasi Sistem Pengereman Mobil menggunakan Sensor Jarak	Sistem mampu bekerja dengan 3 skenario yang berbeda dan dapat memaksimalkan fungsi pengereman dari 3 skenario yang dibuat.	Sistem yang dibuat tidak dapat diaplikasikan untuk kendaraan yang sebenarnya karena menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 yang memiliki sensitivitas rendah sehingga jarak yang dapat diukur pun terlalu pendek.
4	(Ramaprabha et al., 2022)	<i>Autonomous Braking System Using Linear Actuator</i>	Sistem yang dirancang dapat dipakai dalam 3 situasi yang berbeda, seperti metode kinematik yang menentukan	Sistem terlalu bergantung pada LiDAR, di mana akurasi dapat berkurang dalam kondisi cuaca buruk seperti hujan maupun

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Kelebihan	Kekurangan
			jarak pengereman pada jalan kering, kondisi jalan licin, dan metode <i>work-energy</i> .	debu.
5	(Sorrentino et al., 2021)	<i>Remote Emergency Braking System For Autonomous Racing Electric Vehicles</i>	Sistem yang dirancang dapat mencapai perlambatan $>8 \text{ m/s}^2$ (bahkan hingga $21,8 \text{ m/s}^2$ dalam kondisi ideal) sehingga cocok digunakan pada keadaan balap.	Pengujian dan validasi hanya dilakukan melalui simulasi MATLAB dan uji statistik. Masih belum dilakukan pengujian pada trek dengan kecepatan tinggi maupun uji dinamis.

Berdasarkan hasil studi literatur terhadap beberapa penelitian sebelumnya, mayoritas sistem pengereman otomatis untuk kendaraan otonom masih memiliki keterbatasan dalam aspek integrasi, keandalan aktuasi, dan fleksibilitas pengendalian. Beberapa studi menggunakan aktuator elektromagnetik atau motor linier untuk menekan pedal rem, namun pendekatan ini dinilai kurang efisien dari sisi respons waktu dan keterhubungan dengan sistem kontrol yang modular. Selain itu, sebagian besar sistem yang dikembangkan masih bergantung pada mikrokontroler tanpa integrasi langsung dengan *framework* robotika seperti Robot Operating System (ROS), yang menyebabkan keterbatasan dalam kemampuan komunikasi secara *real-time* pada sistem. Selain itu, antarmuka pengguna dalam sistem-sistem tersebut belum dirancang secara interaktif maupun mendukung kontrol mode ganda (otomatis/manual) secara dinamis.

Oleh karena itu, dibutuhkan suatu pengembangan sistem pengereman otomatis yang:

- 1) Menggunakan pendekatan pengereman langsung pada kaliper berbasis servo.
- 2) Terintegrasi secara penuh dalam ekosistem ROS 2 untuk mendukung komunikasi *real-time* dan kontrol terdistribusi.
- 3) Didukung antarmuka pengguna interaktif untuk mode kendali yang adaptif.
- 4) Memiliki sistem deteksi hambatan menggunakan LiDAR dan kamera.