SINTESIS PEMBANDING ANGKA TARGET HEMAT GERBANG PADA MOBIL PEMBERHENTI OTOMATIS BERBASIS LOGIKA DIGITAL TANPA MIKROKONTROLER

Ita Mubarokah
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang
e-mail: itamubarokah@unpam.ac.id

Farid Bakoro
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: faridbaskoro@unesa.ac.id

Agus Suhendi, Eneng Susilistia Agustini
Program Studi Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pamulang
e-mail: dosen10007@unpam.ac.id , dosen10009@unpam.ac.id

Abstrak

Mobil purwarupa yang berhenti pada jarak tertentu umumnya dikendalikan mikrokontroler sehingga proses pencacahan dan pembandingan tersembunyi di dalam program. Penelitian ini merancang dan menguji sistem pemberhenti otomatis dari logika digital diskret tanpa mikrokontroler, dengan pencacah tiga digit CD4026B, pembanding angka target dari gerbang AND CD4073B dan pembalik 74LS04, pengunci CD4013B, dan penggerak relai. Kontribusinya ialah penerapan minimisasi literal pada keluaran segmen a–g CD4026B beserta bukti kecukupan papan untuk seluruh angka target. Pembanding disintesis dari himpunan literal minimal tiap digit dan diverifikasi dengan simulasi atas 10^6 pasangan (target, hitungan). Seluruh 1.000 angka target (000–999) dapat direalisasikan dengan paling banyak 6 gerbang AND dan 6 pembalik, sedangkan dekode penuh ketujuh segmen membutuhkan 10 gerbang AND dan tidak muat pada papan 9 gerbang AND dan 6 pembalik. Pada 10 angka target dengan 15 percobaan tiap target, mobil berhenti pada angka target dalam 132 dari 150 percobaan (88,0%; selang kepercayaan 95% 81,8–92,3%). Keberhasilan berbeda nyata antar target ($p = 0{,}008$), terutama karena target 35 (60%), tetapi penyebab kegagalan belum dapat dipastikan karena hitungan akhir tidak direkam. Satu pulsa setara 7,25–8,28 cm sehingga jarak berhenti hanya dapat diperkirakan dalam ±6,6%. Rancangan ini dapat dipakai sebagai alat peraga sistem digital berbiaya rendah.
Kata Kunci: gerbang logika, pencacah CD4026B, tujuh segmen, pemberhenti otomatis, resistor pembatas arus.

Abstract

Prototype cars that stop at a preset distance are usually controlled by a microcontroller, which hides counting and comparison inside the program. This study designs and tests an automatic stopping system built from discrete digital logic without a microcontroller: a three-digit CD4026B counter, a target-number comparator made of CD4073B AND gates and 74LS04 inverters, a CD4013B latch, and a relay driver. The contribution is the application of literal minimisation to the CD4026B segment outputs, together with a proof that the board suffices for every target number. The comparator is synthesised from the minimal set of segment literals (a–g) of each digit and verified by simulation over 10^6 (target, count) pairs. All 1,000 target numbers (000–999) can be realised with at most 6 AND gates and 6 inverters, whereas full seven-segment decoding needs 10 AND gates and does not fit the board of 9 AND gates and 6 inverters. In tests at 10 target numbers with 15 trials each, the car stopped at the target number in 132 of 150 trials (88.0%; 95% confidence interval 81.8–92.3%). Success differs significantly between targets ($p = 0.008$), mainly because of target 35 (60%), but the cause of failures cannot be established because the final count was not recorded. One pulse corresponds to 7.25–8.28 cm, so the stopping distance can only be estimated within ±6.6%. The design can serve as a low-cost teaching aid for digital systems.
Keywords: logic gates, CD4026B counter, seven-segment display, automatic stopping, current-limiting resistor.

PENDAHULUAN

Purwarupa kendaraan dan robot beroda umumnya dikendalikan oleh mikrokontroler. Yunardi dkk. (2017), misalnya, membangun *mobile robot* dengan modul Arduino sebagai pengendali sensor, gerakan, dan komunikasi, membaca keluaran analog sensor inframerah melalui ADC 10 bit, serta memakai sensor *encoder* untuk data posisi. Tamamy dkk. (2023) memadukan *rotary encoder* dan giroskop pada robot beroda tiga roda yang dikendalikan prosesor, dan melaporkan galat odometri (RMSE) 13,40 cm pada sumbu x dan 10,63 cm pada sumbu y. Pendekatan ini fleksibel, tetapi logika kendali tersimpan di dalam program sehingga proses pencacahan, pembandingan, dan penyimpanan keadaan tidak dapat diamati pada tingkat gerbang. Bagi pembelajar sistem

digital, kondisi ini menyembunyikan konsep yang justru menjadi dasar pokok bahasan rangkaian logika.

Pembelajaran rangkaian logika di Indonesia banyak memakai papan latih (*trainer*) yang menyediakan gerbang dan penampil sebagai modul terpisah. Izza dan Al Azhar (2022), misalnya, membuat *trainer* dengan tiga rangkaian gerbang (OR, AND, NOT) dan satu rangkaian penampil tujuh segmen, sedangkan Sari dkk. (2020) merangkai gerbang AND dan OR serta komparator 4 bit, lalu memverifikasi bahwa hasil percobaan sesuai tabel kebenaran. Percobaan semacam itu penting, tetapi belum memperlihatkan bagaimana gerbang, pencacah, memori satu bit, dan aktuator bekerja bersama sebagai satu sistem kendali.

Fungsi "berhenti setelah menempuh jarak tertentu" pada hakikatnya tersusun dari tiga elemen: pencacah pulsa roda, pembanding angka target, dan memori satu bit yang menahan perintah berhenti. Pencacah desimal CD4026B menyatukan pencacah Johnson dan dekoder tujuh segmen dalam satu paket (Texas Instruments, 2003), sehingga keluaran segmennya dapat dipakai ganda, yaitu menggerakkan penampil dan menjadi masukan pembanding. Karena IC ini tidak menyediakan keluaran BCD, pembandingan dilakukan terhadap pola segmen a–g, bukan terhadap kode biner. Pembandingan pola memakai gerbang AND tiga masukan CD4073B dan pembalik 74LS04. Persoalannya, papan yang tersedia hanya memuat 9 gerbang AND dan 6 pembalik, sehingga diperlukan prosedur sintesis yang menjamin pola angka target apa pun dapat dipetakan tanpa melampaui sumber daya tersebut.

Dari uraian di atas terlihat celah penelitian berikut. Pertama, sistem pengukuran jarak pada robot beroda umumnya dibangun dengan mikrokontroler (Yunardi dkk., 2017; Tamamy dkk., 2023), sedangkan perangkat belajar logika diskret menyajikan gerbang dan penampil sebagai modul terpisah (Sari dkk., 2020; Izza dan Al Azhar, 2022), sehingga pada literatur yang dikaji penulis belum tampak contoh sistem kendali utuh yang menyatukan sensor, pencacah, pembanding, memori, dan aktuator tanpa program. Kedua, pembanding magnitudo seperti 7485 membutuhkan masukan biner, sedangkan CD4026B hanya menyediakan keluaran segmen a–g. Minimisasi fungsi Boolean sendiri telah mapan (Quine, 1952; McCluskey, 1956), tetapi pada literatur yang dikaji penulis belum ditemukan penerapannya untuk memetakan pola segmen angka target ke gerbang AND dan pembalik dalam sumber daya papan yang terbatas, beserta pembuktian bahwa seluruh angka target dapat direalisasikan. Ketiga, rancangan sistem semacam ini jarang disertai analisis kelayakan perangkat kerasnya, seperti arus penggerak LED terhadap kemampuan keluaran IC, kompatibilitas level TTL–CMOS, dan resolusi jarak.

Penelitian ini bertujuan: (1) merancang sistem pemberhenti otomatis berbasis pencacah, dekoder, gerbang logika, dan pengunci tanpa mikrokontroler; (2) menurunkan prosedur sintesis literal minimal dan membuktikan bahwa seluruh angka target 000–999 dapat direalisasikan pada papan dengan 9 gerbang AND dan 6 pembalik; (3) menganalisis kelayakan perangkat keras, termasuk resistor pembatas arus LED dengan memperhitungkan batas arus keluaran IC; serta (4) menguji keberhasilan prototipe berhenti pada angka target. Hasilnya diharapkan menjadi acuan perancangan pembanding angka yang hemat gerbang dan alat peraga sistem digital berbiaya rendah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada: (1) perumusan deteksi angka target sebagai pencarian himpunan literal minimal yang membedakan tiap digit pada keluaran segmen CD4026B, dengan penghitungan pembalik per saluran dan pohon gerbang tiga masukan, yang divalidasi dengan pencarian menyeluruh dan dibandingkan dengan perencana heuristik (metode minimisasinya sendiri bukan kebaruan); (2) pembuktian bahwa seluruh 1.000 angka target (000–999) dapat direalisasikan dengan paling banyak 6 gerbang AND dan 6 pembalik, diverifikasi pada 10^6 pasangan (target, hitungan), serta temuan bahwa dekode penuh tidak muat pada papan; dan (3) analisis kelayakan perangkat keras yang terpadu pada satu purwarupa, mencakup batas arus keluaran CD4026B, resistor pembatas arus, level logika, konversi jarak, dan transien pencacah *ripple*.

Kajian Teoretik

Rangkaian kombinasional dan sekuensial. Rangkaian kombinasional menghasilkan keluaran yang hanya bergantung pada masukan saat ini, sedangkan rangkaian sekuensial memiliki elemen memori sehingga keluarannya juga bergantung pada keadaan sebelumnya (Mano dan Ciletti, 2013; Floyd, 2015). Pembanding angka target adalah rangkaian kombinasional, sedangkan pencacah dan pengunci STOP adalah rangkaian sekuensial. Fungsi AND dengan n masukan dapat disusun sebagai pohon gerbang bermasukan k, dengan jumlah gerbang

$$G = \lceil (n - 1) / (k - 1) \rceil \quad (1)$$

sehingga untuk gerbang tiga masukan ($k = 3$) berlaku $G = \lceil (n - 1)/2 \rceil$.

Pencacah CD4026B. CD4026B terdiri atas pencacah Johnson dekade lima tingkat dan dekoder keluaran tujuh segmen. Masukan RESET tinggi mengosongkan hitungan ke nol, hitungan maju pada tepi naik *clock* bila CLOCK INHIBIT rendah, dan keluaran segmen aktif tinggi hanya ketika DISPLAY ENABLE IN tinggi (Texas Instruments, 2003). Keluaran CARRY OUT menggerakkan *clock* digit berikutnya sehingga tiga IC membentuk pencacah 000–999. Kemampuan arus keluaran maksimum pada parameter produk sekitar ±1,5 mA (Texas Instruments, 2003), yang menjadi batas penting bagi perancangan resistor segmen.

Pengunci berbasis flip-flop D. CD4013B memuat dua flip-flop D dengan masukan SET dan RESET asinkron yang aktif pada level tinggi dan bekerja tanpa bergantung pada *clock* (Texas Instruments, 2016). Dengan SET sebagai pemicu STOP dan RESET sebagai pembatal manual, satu flip-flop

berperilaku sebagai pengunci SR: keluaran Q tetap tinggi walaupun sinyal STOP kemudian hilang, dan keluaran terbalik QB dapat dipakai untuk menahan *clock* pencacah.

LED dan resistor pembatas arus. Arus LED naik secara eksponensial terhadap tegangan maju di atas tegangan ambang, sehingga perubahan kecil tegangan menimbulkan perubahan besar arus (Schubert, 2006; Boylestad dan Nashelsky, 2013). Pada sumber tegangan tetap, arus hanya dibatasi oleh resistansi dinamis LED sehingga dapat melonjak hingga ratusan mA. Koefisien suhu tegangan maju yang negatif, yaitu −2 mV/°C pada segmen merah seri HDSP-55xx (Avago Technologies, t.t.), membuat arus bertambah saat LED menghangat. Itulah mekanisme *thermal runaway*. Karena itu resistor seri ditentukan dari hukum Ohm dan Hukum Tegangan Kirchhoff (KVL) pada rangkaian sumber–resistor–LED (Boylestad dan Nashelsky, 2013).

Pembacaan putaran roda. Piringan berlubang yang dipindai sensor optik menghasilkan satu pulsa untuk setiap lubang, sehingga jarak tempuh s dapat dihitung dari jumlah pulsa N, jumlah lubang n, dan diameter roda D:

$$s = N \cdot \pi D / n \qquad (2)$$

Keakuratan pengukuran jarak lazim dinilai dengan membandingkan nilai ukur dan nilai sebenarnya pada beberapa titik uji. Yunardi dkk. (2017) melaporkan akurasi 96,88–98,16% untuk sensor jarak inframerah dan ultrasonik pada rentang 15–150 cm, sedangkan odometri berbasis *rotary encoder* dan giroskop pada Tamamy dkk. (2023) memberi galat 10–13 cm pada lintasan beberapa meter. Galat jarak tempuh dari pulsa roda karenanya perlu dinyatakan secara eksplisit, bukan dianggap nol.

METODE

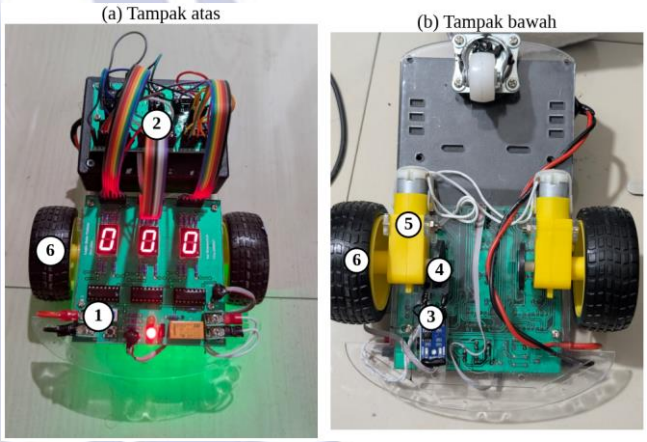
Penelitian ini berupa rancang bangun purwarupa dengan lima tahap: (1) penetapan spesifikasi; (2) perancangan arsitektur blok; (3) sintesis pembanding angka target; (4) perancangan penggerak LED dan relai; dan (5) verifikasi melalui simulasi model serta pengujian fungsional. Spesifikasi sistem ialah catu 5 V DC dari baterai, pencacah tiga digit, angka target tiga digit yang ditetapkan melalui pengabelan antara *header* segmen dan gerbang, serta motor yang berhenti dan tetap berhenti hingga tombol *reset* ditekan.

Alat dan Bahan

Komponen utama disajikan pada Tabel 1, dan prototipe mobil ditunjukkan pada Gambar 1. Rangkaian dirancang pada dua papan PCB (KiCad) yang tata letaknya ditunjukkan pada Gambar 4. Pada papan counter, setiap segmen dari 21 segmen penampil dihubungkan ke keluaran CD4026B melalui resistor 150 Ω. LED indikator STOP (merah) dan RUN (hijau) dihubungkan melalui resistor 1 kΩ. Basis BD139 memakai resistor 1 kΩ dengan *pull-down* 10 kΩ, sedangkan masukan RESET CD4013B dan jalur RST pencacah memakai *pull-down* 10 kΩ dengan tombol *reset* manual. Masukan gerbang yang tidak terpakai dihubungkan ke VCC agar tidak mengambang.

Tabel 1. Komponen utama sistem

Komponen	Jml	Peran
Sensor optik + piringan berlubang	1	Pulsa roda: LOW saat cahaya melewati lubang, HIGH saat terhalang
CD4026B	3	Pencacah dekade + dekoder tujuh segmen (satuan, puluhan, ratusan)
Tujuh segmen *common cathode*	3	Penampil hitungan (21 resistor segmen 150 Ω)
CD4073B	3	9 gerbang AND 3 masukan
74LS04	1	6 gerbang NOT (pembalik)
CD4013B	1	Dua flip-flop D; satu sebagai pengunci STOP
BD139 + relai DPDT G5V-2	1	Penggerak motor (kontak NC) dan jalur RST pencacah
Roda 65 mm + piringan sensor	1	Sumber pulsa jarak tempuh (7,25–8,28 cm per pulsa, hasil kalibrasi)
Baterai 5 V DC	1	Catu daya seluruh blok

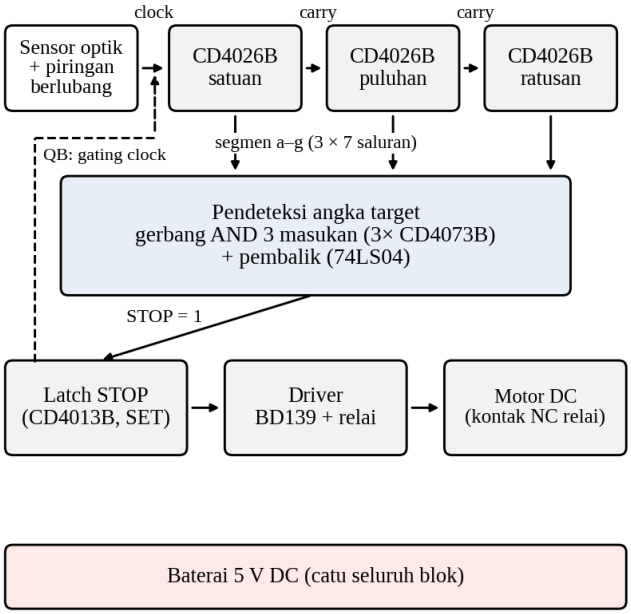


Gambar 1. Prototipe mobil logic gate: (a) tampak atas dan (b) tampak bawah. Keterangan: (1) board counter, (2) board logic gate, (3) sensor optik, (4) piringan berlubang, (5) motor DC dengan *gearbox*, (6) roda

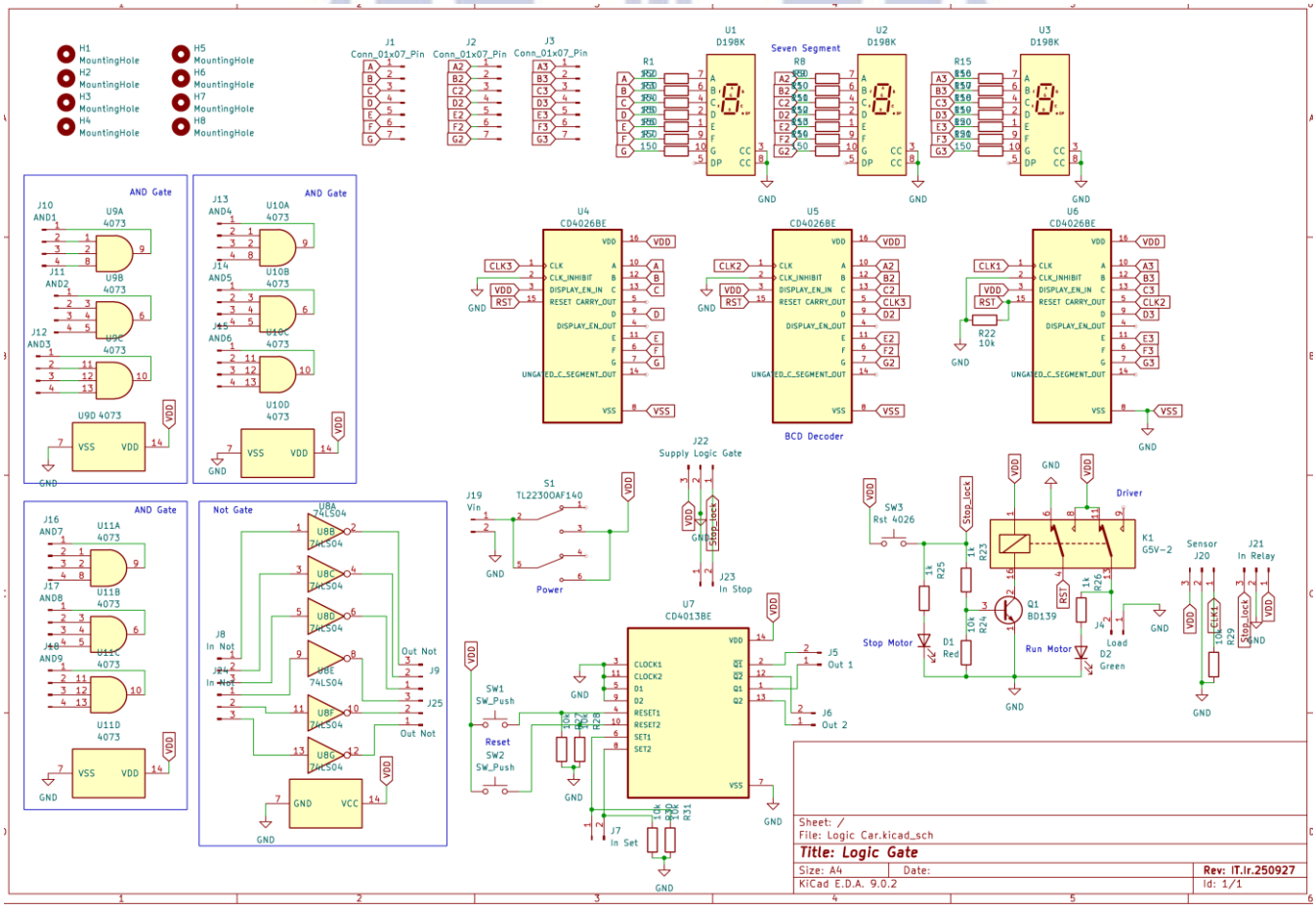
Arsitektur dan Prinsip Kerja

Sistem terdiri atas baterai sebagai catu daya, blok pencacah yang menghitung pulsa putaran roda, dan blok gerbang logika yang menggabungkan pola segmen menjadi sinyal pemicu relai (Gambar 2). Rangkaian lengkapnya ditunjukkan pada Gambar 3, dan alur sinyalnya adalah sebagai berikut. Pulsa dari sensor optik (konektor J20) menjadi *clock* CD4026B satuan (U6, CLK1). Setiap kali hitungan melintasi 9 menuju 0, CARRY OUT menggerakkan *clock* digit puluhan (U5, CLK2) dan selanjutnya digit ratusan (U4, CLK3). Keluaran segmen a–g setiap CD4026B menggerakkan penampil D198K melalui resistor 150 Ω sekaligus ditarik ke *header* J1–J3. Pada papan logic gate, saluran segmen yang diperlukan dihubungkan dengan kabel *jumper* ke masukan gerbang AND CD4073B (U9–U11) langsung atau melalui pembalik 74LS04 (U8). Bila pola ketiga digit sama dengan angka target, keluaran STOP bernilai HIGH dan masuk ke SET CD4013B (U7, J7), sementara RESET dihubungkan ke tombol reset dengan *pull-down* 10 kΩ. Keluaran Q (*Stop_lock*) menggerakkan BD139 (Q1) melalui resistor basis 1 kΩ,

sehingga relai K1 bekerja dan motor, yang dipasang pada kontak NC, berhenti. LED merah D1 menandakan motor berhenti dan LED hijau D2 menandakan motor berjalan. Kontak kedua K1 memindahkan jalur RST pencacah dari VSS ke VDD ketika relai bekerja, sehingga ketiga CD4026B di-reset ke 000 dan ditahan selama mobil berhenti; tombol *Rst 4026* (SW3) memakai jalur yang sama. Akibatnya tampilan kembali ke 000 saat mobil berhenti, dan hitungan akhir tidak tertinggal pada tampilan. Keluaran terbalik QB tersedia pada *header* bila penahanan *clock* diperlukan.



Gambar 2. Diagram blok sistem pemberhenti otomatis

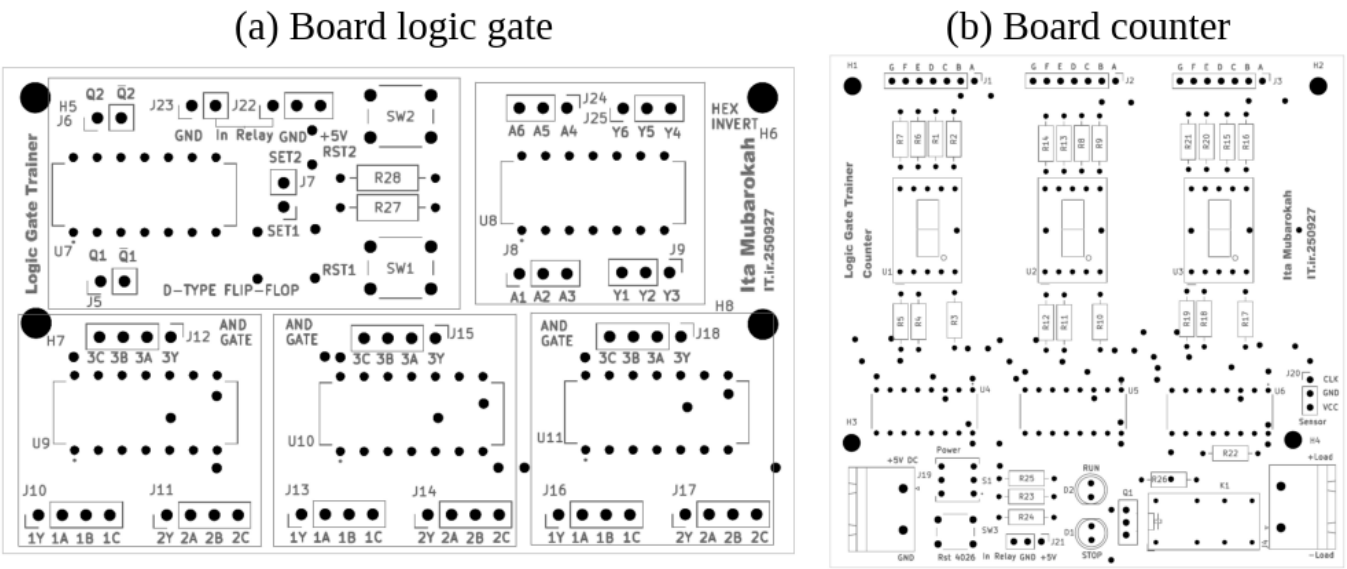


Gambar 3. Skematik rangkaian lengkap: pencacah U4–U6 (CD4026B) dengan penampil U1–U3, gerbang AND U9–U11 (CD4073B), pembalik U8 (74LS04), pengunci U7 (CD4013B), serta penggerak relai Q1 (BD139) dan K1

Parameter Mekanik dan Kalibrasi Jarak

Roda mobil berdiameter D = 65 mm sehingga kelilingnya πD = 204,2 mm. Piringan sensor pada poros roda menghasilkan pulsa yang dihitung oleh sistem. Bila piringan dianggap hanya memiliki satu celah per putaran (n = 1), satu pulsa setara 204,2 mm menurut Persamaan (2). Kalibrasi dilakukan dengan dua pengukuran meteran (240 cm untuk target 29 dan 145 cm untuk target 20), sehingga jarak per pulsa berada pada rentang k = 7,25–8,28 cm. Rentang ini setara 2,47–2,82 pulsa per putaran roda ($\pi D/k$). Karena bukan bilangan bulat, nilai

tersebut adalah nilai efektif dan tidak dapat langsung disamakan dengan jumlah celah piringan. Selisihnya dari jumlah celah mekanis dapat berasal dari pulsa yang hilang atau ganda, atau selip roda. Hubungan mekanis antara jumlah celah dan putaran roda perlu dipastikan dengan uji putar manual, yaitu roda diputar sejumlah putaran penuh sambil membaca hitungan pencacah. Karena jarak per pulsa tidak konstan, jarak untuk jumlah pulsa N dinyatakan sebagai rentang $k_{\text{min}} \cdot N$ sampai $k_{\text{maks}} \cdot N$, bukan sebagai satu nilai tunggal. Perhitungan ini dilakukan dengan lembar kerja yang memetakan jarak ke jumlah pulsa dan pola segmen tiap digit.



Gambar 4. Tata letak PCB: (a) board logic gate dan (b) board counter

Sintesis Pembanding Angka Target

Setiap digit $d \in \{0, \ldots, 9\}$ memiliki himpunan segmen menyala menurut tabel fungsi CD4026B (digit 6 menyertakan segmen a, digit 9 menyertakan segmen d, dan digit 7 hanya a, b, c). *Literal* adalah saluran segmen x (aktif bila x menyala) atau komplemennya $\neg x$ (aktif bila x padam). Himpunan literal pengenal L_d ialah himpunan literal yang hanya dipenuhi oleh digit d di antara sepuluh digit. Persoalan ini adalah kasus kecil dari minimisasi fungsi Boolean (Quine, 1952; McCluskey, 1956), yaitu mencari suku sederhana yang hanya benar untuk satu digit. Karena hanya ada 14 literal, seluruh kombinasinya dicari secara eksak: untuk tiap digit dipilih L_d dengan jumlah literal paling sedikit, dan bila terdapat beberapa pilihan dipilih yang memuat pembalik paling sedikit.

Keluaran STOP adalah AND dari seluruh literal ketiga digit. Bila jumlah literal total ialah L, jumlah gerbang AND dihitung dengan Persamaan (1) dengan $n = L$ dan $k = 3$, sedangkan jumlah pembalik sama dengan jumlah literal ternegasi. Sebagai pembanding digunakan dekode penuh, yaitu ketujuh saluran segmen tiap digit sebagai literal (segmen menyala sebagai literal langsung, segmen padam sebagai literal ternegasi) dengan $L = 21$. Batas papan adalah 9 gerbang AND dan 6 pembalik, dan satu gerbang AND dapat dicadangkan bila penahanan *clock* diperlukan.

Verifikasi dilakukan dengan model perangkat lunak yang mensimulasikan hitungan 000–999 dan jaringan AND hasil sintesis untuk setiap dari 1.000 target. Keluaran jaringan dibandingkan dengan kondisi kesamaan antara hitungan dan target pada 10^6 pasangan (target, hitungan).

Selain pencarian menyeluruh, penulis mengembangkan aplikasi perencana berbasis Python. Versi awal memilih literal tiap digit dengan heuristik *greedy* (literal yang menyingkirkan digit lawan terbanyak) dan menghitung pembalik berdasarkan nama literal unik. Versi kedua, yang dipakai pada hasil di bawah, memilih literal dengan pencarian eksak, menghitung pembalik per saluran (digit ratusan, puluhan, dan satuan masing-masing memiliki saluran segmen sendiri), dan menyusun jaringan AND sebagai pohon gerbang tiga masukan dengan jumlah gerbang menurut Persamaan (1). Kedua versi dijalankan untuk seluruh 1.000 target, dan netlist versi kedua diverifikasi dengan simulasi.

Penentuan Resistor Pembatas Arus

Pada rangkaian seri sumber V_S, resistor R, dan LED, KVL memberikan $V_S = I_F R + V_F$, sehingga

$$R = (V_S - V_F) / I_F \tag{3}$$

$$P_R = I_F^2 \cdot R \tag{4}$$

dengan V_F diambil dari lembar data pada arus kerja I_F. Untuk kasus tanpa resistor, kurva I–V LED putih (Nichia NSCW100, 25 °C) dilinearkan di sekitar dua titik data, $(I_1, V_1) = (20\ \text{mA}; 3{,}6\ \text{V})$ dan $(I_2, V_2) = (80\ \text{mA}; 4{,}6\ \text{V})$:

$$r_d = \Delta V / \Delta I\,; \quad V_0 = V_1 - r_d I_1 \tag{5}$$

$$I = (V_S - V_0) / r_d \tag{6}$$

Untuk kasus dengan resistor, digunakan data segmen merah HDSP-55xx pada $V_F = 2{,}1$ V dan $I_F = 20$ mA. Hasil hitungan

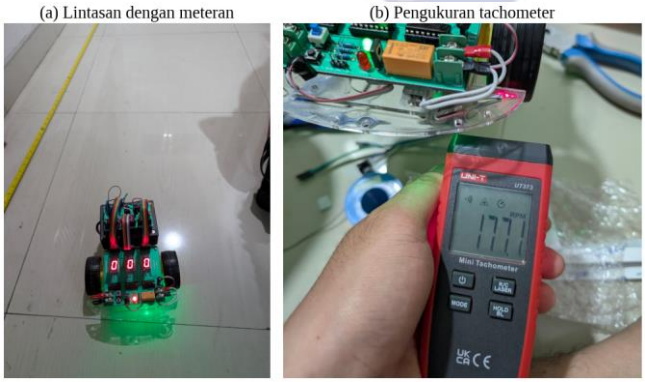
kemudian dibandingkan dengan resistor yang terpasang pada papan (150 Ω) dan dengan batas arus keluaran CD4026B, karena segmen digerakkan langsung dari IC tersebut.

Prosedur Pengujian

Pengujian fungsional dilakukan bertahap: (1) tiap gerbang diperiksa dengan LED yang dihubungkan melalui resistor 2,2 kΩ pada keluarannya; (2) blok per digit diuji terhadap pola segmen yang tampil; (3) pengunci diuji bersama tombol *reset*; dan (4) uji berhenti pada angka target. Pada tahap terakhir, hitungan di-*reset* ke 000 dan mobil dijalankan pada lintasan datar dengan meteran sebagai acuan jarak (Gambar 5a). Dua kriteria keberhasilan dibedakan. Kriteria logika (K1) terpenuhi bila mobil berhenti ketika hitungan pencacah sama dengan angka target. Kriteria posisi (K2) terpenuhi bila jarak berhenti berada dalam rentang jarak target menurut kalibrasi. Pada pengujian yang dilaporkan di sini, hasil dicatat sebagai berhasil atau gagal menurut K1, tanpa merekam hitungan akhir maupun posisi berhenti pada percobaan yang gagal, sehingga K2 belum dievaluasi. Hitungan akhir juga tidak tertinggal pada tampilan karena relai K1 mereset pencacah saat mobil berhenti (bagian Arsitektur dan Prinsip Kerja). Pengujian mencakup 10 angka target (5, 7, 10, 20, 29, 35, 93, 98, 200, dan 209) dengan 15 percobaan tiap target. Kecepatan putaran roda diukur dengan tachometer optik UNI-T UT373 (Gambar 5b). Keberhasilan dihitung dengan

$$K = ((m - g) / m) \times 100\% \quad (7)$$

dengan m jumlah percobaan dan g jumlah percobaan yang gagal. Selang kepercayaan 95% dihitung dengan metode Wilson, yang dianjurkan untuk jumlah percobaan kecil (Brown dkk., 2001). Kesamaan tingkat keberhasilan antar target diuji dengan uji khi-kuadrat dan uji permutasi, uji eksak Fisher untuk perbandingan dua kelompok, serta koreksi Holm untuk perbandingan berganda (Holm, 1979).



Gambar 5. Pengaturan pengujian: (a) mobil pada posisi awal (000) di lintasan dengan meteran dan (b) pengukuran kecepatan putaran roda dengan tachometer UNI-T UT373

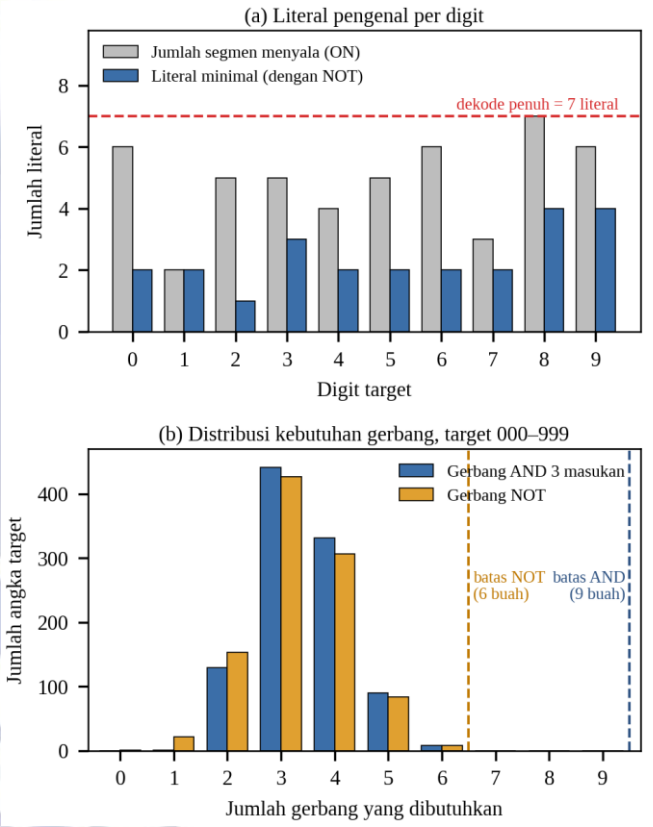
HASIL DAN PEMBAHASAN

Himpunan Literal Pengenal Digit

Hasil pencarian menyeluruh disajikan pada Tabel 2. Hanya digit 8 yang dapat dikenali dengan literal segmen menyala saja, karena himpunan segmen menyala setiap digit lain merupakan himpunan bagian dari digit 8. Akibatnya pembalik 74LS04 mutlak diperlukan untuk sembilan dari sepuluh digit. Jumlah literal per digit turun dari 7 pada dekode penuh menjadi 1–4, dengan rata-rata 2,4 atau berkurang sekitar 66% (Gambar 6a).

Tabel 2. Himpunan literal pengenal tiap digit (¬ = segmen padam)

Digit	Segmen menyala	Literal minimal	Jml	NOT
0	a,b,c,d,e,f	d, ¬g	2	1
1	b,c	¬a, ¬f	2	2
2	a,b,d,e,g	¬c	1	1
3	a,b,c,d,g	c, d, ¬f	3	1
4	b,c,f,g	f, ¬a	2	1
5	a,c,d,f,g	¬b, ¬e	2	2
6	a,c,d,e,f,g	e, ¬b	2	1
7	a,b,c	a, ¬d	2	1
8	a,b,c,d,e,f,g	b, c, e, g	4	0
9	a,b,c,d,f,g	a, b, f, ¬e	4	1



Gambar 6. (a) Jumlah literal pengenal per digit dan (b) distribusi kebutuhan gerbang untuk target 000–999

Kebutuhan Gerbang untuk Seluruh Angka Target

Dari 1.000 angka target, kebutuhan gerbang AND berkisar 1–6 dengan rata-rata 3,4 dan modus 3 gerbang (441 target), sedangkan kebutuhan pembalik berkisar 0–6 dengan rata-rata 3,3 (Gambar 6b). Kebutuhan maksimum 6 gerbang AND dan 6 pembalik hanya terjadi pada 8 target. Bila satu gerbang AND dicadangkan untuk penahanan *clock*, anggaran 8 gerbang AND tetap mencukupi. Seluruh angka target dengan demikian dapat dipetakan pada papan tanpa tambahan IC.

Tabel 3 membandingkan beberapa target dengan dekode penuh. Dekode penuh membutuhkan 21 literal atau 10 gerbang AND untuk setiap target, melebihi 9 gerbang yang tersedia. Dalam rancangan ini, sintesis literal minimal bukan sekadar optimasi, melainkan syarat agar pembanding dapat dibangun pada papan. Target 098, misalnya, membutuhkan 10

literal (H_d, $\neg H_g$; T_a, T_b, T_f, $\neg T_e$; U_b, U_c, U_e, U_g) yang disusun menjadi 5 gerbang AND dan 2 pembalik:

$$\text{STOP} = H_d \cdot \neg H_g \cdot T_a \cdot T_b \cdot T_f \cdot \neg T_e \cdot U_b \cdot U_c \cdot U_e \cdot U_g \quad (8)$$

Tabel 3. Kebutuhan literal / gerbang AND / pembalik

Target	Literal minimal	Dekode penuh
098	10 / 5 / 2	21 / 10 / 2
679	8 / 4 / 3	21 / 10 / 6
888	12 / 6 / 0	21 / 10 / 0
999	12 / 6 / 3	21 / 10 / 3

Perbandingan dan Perbaikan Perencana

Perencana versi awal menghasilkan rancangan yang benar secara fungsional dan muat pada papan untuk seluruh 1.000 target, tetapi memiliki tiga kekurangan. Literal yang dipilih tidak selalu minimal (rata-rata 7,5 literal per target dibanding 7,2 pada pencarian menyeluruh; 271 target atau 27,1% memperoleh himpunan lebih besar dari minimum). Pembalik dihitung berdasarkan nama literal unik, padahal tiap digit memiliki saluran segmen sendiri dan membutuhkan pembalik sendiri, sehingga kebutuhan pembalik pada 546 target terlalu rendah. Jumlah gerbang AND yang dilaporkan berbeda dari hitungan pohon gerbang tiga masukan pada 474 target. Ketiganya diperbaiki pada versi kedua (pencarian literal eksak, pembalik per saluran, jaringan AND berbentuk pohon), yang menghasilkan rancangan identik dengan pencarian menyeluruh pada 1.000 target: rata-rata 7,2 literal, 3,4 gerbang AND, dan 3,3 pembalik per target, maksimum 6 gerbang AND dan 6 pembalik, serta lolos simulasi atas 10^6 pasangan tanpa ketidaksesuaian. Untuk target 098 dihasilkan 10 literal, 5 gerbang AND, dan 2 pembalik.

Verifikasi Model dan Transien Pencacah

Simulasi terhadap 10^6 pasangan (target, hitungan) tidak menemukan satu pun ketidaksesuaian antara keluaran jaringan AND hasil sintesis dan kondisi kesamaan, sehingga pembanding hasil sintesis terbukti benar secara fungsional pada model. Pencacah CD4026B yang dikaskade bersifat *ripple*, sehingga saat hitungan berpindah, digit rendah berubah lebih dahulu daripada digit tinggi. Keadaan antara yang muncul selalu berupa angka dengan digit rendah dinolkan dan digit tinggi belum berubah, sehingga nilainya tidak melebihi hitungan sebelumnya. Pada pencacah naik yang di-*reset* ke 000, nilai tersebut sudah pernah dilewati secara sah, dan bila nilai itu adalah target mobil sudah berhenti. Pengecekan seluruh peralihan 0→999 mengonfirmasi bahwa tidak ada keadaan antara yang melampaui hitungan sebelumnya. Transien *ripple* ini karenanya tidak dapat memicu STOP lebih awal.

Simulasi ini bersifat logis dan tidak memodelkan waktu tunda propagasi, perubahan sinyal sensor, maupun gangguan sesaat. Waktu tunda gerbang CMOS dan TTL pada catu 5 V diperkirakan berada pada orde puluhan hingga ratusan nanodetik per tingkat, sehingga jaringan tiga tingkat mencapai keadaan tunak dalam orde mikrodetik, kira-kira lima orde lebih cepat daripada periode pulsa roda sekitar 120–137 ms (bagian Kecepatan Roda dan Periode Pulsa). Model statis karenanya sah untuk keadaan tunak. Namun model ini tidak dapat menjelaskan kegagalan akibat pulsa derau, pantulan kontak sensor, atau gangguan dari motor dan relai, yang hanya dapat dinilai dengan pengukuran pada papan. Gangguan sesaat akibat selisih waktu perambatan antarsegmen di dalam satu digit diredam dengan RC kecil pada jalur STOP (τ = 10 kΩ × 100 nF = 1 ms), dengan syarat periode pulsa roda jauh lebih besar daripada τ. Rangkaian RC ini belum terpasang pada papan (bagian Proteksi dan Keandalan Papan).

Kalibrasi Jarak dan Resolusi

Dua pengukuran dengan meteran memberi jarak per pulsa 240/29 = 8,28 cm dan 145/20 = 7,25 cm (Tabel 4). Kedua titik terpaut 13% dari rata-ratanya (±6,6% terhadap titik tengah 7,77 cm), sehingga jarak per pulsa tidak dapat dianggap konstan. Memakai satu nilai 8 cm untuk seluruh target menyimpang −3,3% pada target 29 dan +10,3% pada target 20, sehingga nilai tunggal itu tidak dipakai. Jarak berhenti dinyatakan sebagai rentang 7,25N sampai 8,28N (Tabel 5). Galat odometri roda lazim dibedakan menjadi galat sistematik (misalnya diameter roda efektif) dan non-sistematik (misalnya selip) (Borenstein dan Feng, 1996). Selisih kedua titik dapat mencerminkan komponen non-sistematik yang tidak dapat dihapus dengan satu faktor kalibrasi, di samping pengaruh kecepatan saat berhenti dan jarak pengereman setelah relai bekerja. Rentang itu hanya dibatasi oleh dua titik kalibrasi; penyempitannya memerlukan sekurang-kurangnya lima target dengan tiga ulangan dan pengukuran jarak berhenti yang sebenarnya.

Tabel 4. Kalibrasi jarak per pulsa dari dua pengukuran dengan meteran

Target	Jarak ukur (cm)	Jarak/pulsa (cm)	Prediksi 8 cm/pulsa (cm)	Selisih (%)
29	240	8,28	232	−3,3
20	145	7,25	160	+10,3
Rentang	—	7,25–8,28	—	—

Kecepatan Roda dan Periode Pulsa

Satu kali pengukuran dengan tachometer menunjukkan putaran roda 177,1 RPM (Gambar 5b). Dengan diameter roda 65 mm, kecepatan linear mobil adalah $\pi \times 0{,}065 \times (177{,}1/60) \approx 0{,}60$ m/s. Dengan jarak per pulsa 7,25–8,28 cm, laju pulsa sensor adalah 7,3–8,3 pulsa/s atau periode pulsa 120–137 ms. Syarat RC (periode paling sedikit 10 τ = 10 ms) terpenuhi dengan margin sekitar 12 kali pada kecepatan ini, dan tetap terpenuhi hingga kecepatan sekitar 7 m/s, jauh di atas kecepatan mobil, sehingga variasi tegangan baterai yang wajar tidak mengubah kesimpulan tersebut. Variasi kecepatan tetap memengaruhi jarak pengereman setelah relai bekerja, yang kira-kira sebanding dengan kuadrat kecepatan. Pengukuran pada satu kondisi ini belum cukup untuk menilai ketelitian posisi berhenti. Pengukuran pada beberapa tegangan baterai (penuh, menengah, dan hampir habis) dan kondisi beban dimasukkan sebagai pengujian lanjutan.

Pengujian Fungsional Prototipe

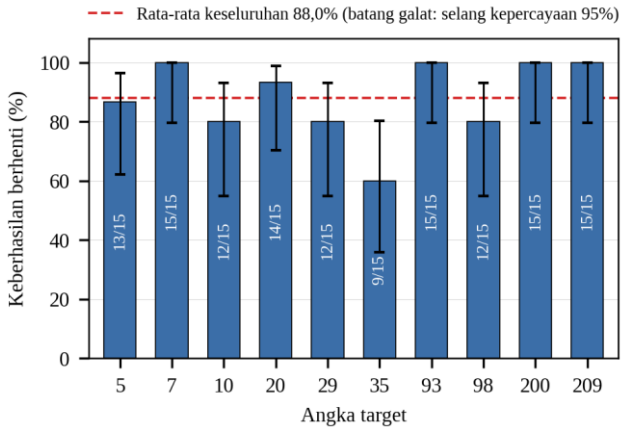
Hasil uji berhenti pada angka target disajikan pada Tabel 5. Pengujian mencakup 10 angka target dengan 15 percobaan tiap target, atau 150 percobaan seluruhnya, dan keberhasilan menurut kriteria logika (K1) dihitung dengan Persamaan (7).

Tabel 5. Hasil uji berhenti pada angka target (15 percobaan per target)

Target	Jarak (cm)	Percobaan	Gagal	Berhasil (%)	Selang 95% (%)
5	36–41	15	2	86,7	62–96
7	51–58	15	0	100	80–100
10	72–83	15	3	80,0	55–93
20	145[a]	15	1	93,3	70–99
29	240[a]	15	3	80,0	55–93
35	254–290	15	6	60,0	36–80
93	674–770	15	0	100	80–100
98	710–811	15	3	80,0	55–93
200	1.450–1.655	15	0	100	80–100
209	1.515–1.730	15	0	100	80–100
Total	—	**150**	**18**	**88,0**	**81,8–92,3**

[a] Jarak diukur dengan meteran; jarak lain berupa rentang berdasarkan 7,25–8,28 cm per pulsa (kalibrasi dua titik).

Secara keseluruhan mobil berhenti pada angka target (K1) dalam 132 dari 150 percobaan, atau 88,0% (selang kepercayaan 95% 81,8–92,3%). Keberhasilan per target berkisar 60–100% (Gambar 7). Target 7, 93, 200, dan 209 berhasil pada seluruh 15 percobaan, sedangkan target 35 paling sering gagal (6 dari 15), diikuti target 10, 29, dan 98 dengan 3 kegagalan masing-masing. Posisi berhenti tidak diukur, sehingga belum diketahui apakah mobil yang berhenti pada angka target juga berhenti pada jarak yang diharapkan (K2), padahal mobil masih dapat bergerak sesaat setelah motor dimatikan. Hasil ini karenanya hanya menunjukkan bahwa logika berhenti bekerja, bukan seberapa tepat posisi berhenti.



Gambar 7. Keberhasilan mobil berhenti pada angka target (15 percobaan per target); batang galat menunjukkan selang kepercayaan Wilson 95%

Uji homogenitas khi-kuadrat atas 10 target memberi $\chi^2(9) = 22{,}5$ dengan $p = 0{,}0075$ (uji permutasi $p = 0{,}008$), sehingga tingkat keberhasilan berbeda nyata antar target. Perbedaan itu terutama berasal dari target 35: dibandingkan dengan seluruh target lain, uji eksak Fisher memberi $p = 0{,}003$ (0,033 setelah koreksi Bonferroni untuk 10 perbandingan). Perbandingan berpasangan target 35 dengan tiap target lain tidak lagi signifikan setelah koreksi Holm (p terkecil 0,10), karena 15 percobaan per target memberi daya statistik yang kecil. Korelasi peringkat Spearman antara tingkat kegagalan dan besarnya angka target ($\rho = -0{,}23$), jumlah literal ($\rho = 0{,}27$), serta jumlah pembalik ($\rho = 0{,}36$) tidak bermakna ($p > 0{,}3$; $n = 10$). Jadi perbedaan antar target nyata, tetapi tidak dijelaskan oleh besar target maupun kompleksitas logika pembanding.

Penyebab kegagalan belum dapat dipastikan karena hitungan akhir dan posisi berhenti pada percobaan gagal tidak direkam. Dugaan penyebab, yaitu derau dari motor dan relai pada papan yang belum memiliki komponen proteksi, jarak per pulsa yang tidak konstan, dan margin level logika yang kecil, belum diuji. Hasil yang dicatat pada percobaan gagal menentukan penyebab yang paling mungkin menurut Tabel 6. Hitungan akhir yang lebih kecil daripada target berarti mobil berhenti terlalu awal; karena transien *ripple* terbukti tidak dapat memicu STOP lebih awal, penyebabnya mengarah ke pulsa tambahan atau derau pada jalur *clock* atau STOP. Hitungan akhir yang lebih besar berarti STOP terlewat atau pengunci terlambat bekerja. Bila hitungan akhir sama dengan target tetapi posisi menyimpang, penyebabnya adalah jarak pengereman dan jarak per pulsa yang tidak konstan. Karena relai K1 mereset pencacah saat berhenti, hitungan akhir baru dapat dicatat bila tampilan direkam dengan video atau jalur RST relai ditahan selama uji diagnostik.

Tabel 6. Diagnosis kegagalan berdasarkan hasil yang dicatat

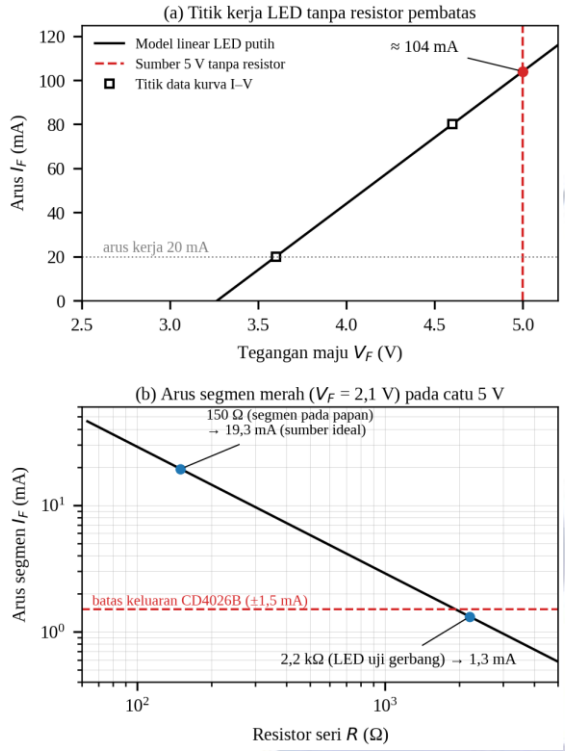
Hasil yang dicatat	Penyebab yang paling mungkin	Pengujian pembeda
Hitungan akhir < target	Pulsa tambahan atau derau pada jalur *clock*/STOP	Ukur jalur STOP dan *clock* dengan osiloskop; uji dengan RC dan dekopling
Hitungan akhir > target	STOP terlewat, pengunci terlambat, atau pulsa hilang	Uji *gating clock* dengan QB; ukur waktu kerja relai
Hitungan akhir = target, posisi menyimpang	Jarak pengereman dan jarak per pulsa tidak konstan	Tambah titik kalibrasi; ukur jarak berhenti
Hitungan akhir = target, posisi sesuai	Percobaan berhasil menurut K1 dan K2	—

Analisis Arus LED dan Penampil

Dari dua titik data diperoleh $r_d = 16{,}7\ \Omega$ dan $V_0 = 3{,}27$ V (Persamaan 5). Pada catu 5 V tanpa resistor, Persamaan (6) memberi arus ≈104 mA, yaitu 5,2 kali arus kerja 20 mA, dengan daya LED ≈0,52 W dibanding 0,072 W pada titik kerja (Gambar 8a). Nilai ini merupakan perkiraan orde besar karena 5 V berada di luar rentang kurva datasheet. Dengan data HDSP-55xx, Persamaan (3) memberi $R = (5 - 2{,}1)/0{,}02 = 145\ \Omega$ dan Persamaan (4) memberi $P_R = 0{,}058$ W, sehingga resistor ⅛ W memadai. Nilai 145 Ω tidak tersedia pada deret E24, dan 150 Ω menghasilkan 19,3 mA dengan $P_R = 0{,}056$ W (Tabel 7).

Tabel 7. Perbandingan kondisi penggerak LED pada catu 5 V

Kondisi	R (Ω)	I_F (mA)	P_R (mW)
Tanpa resistor, LED putih (model linear)	0	≈104	—
Resistor hitung, segmen merah	145	20	58
Resistor papan (E24), sumber ideal	150	19,3	56
Batas 1,5 mA (LED uji gerbang)	2.200	1,3	3,8



Gambar 8. (a) Titik kerja LED putih tanpa resistor dan (b) arus segmen terhadap resistor seri pada catu 5 V

Resistor segmen yang terpasang pada papan counter adalah 150 Ω (21 buah), sesuai hasil hitungan setelah dibulatkan ke deret E24. Angka 19,3 mA dari rumus hanya berlaku bila keluaran IC berperilaku sebagai sumber tegangan ideal, sehingga ia adalah batas atas arus segmen dan bukan perkiraan arus kerja. Keluaran CD4026B memiliki resistansi keluaran yang tidak dapat diabaikan dan kemampuan arus sekitar 1,5 mA (Texas Instruments, 2003), sehingga arus nyata ditentukan oleh resistansi keluaran IC bersama resistor 150 Ω. Arus itu diperkirakan berada di bawah 19,3 mA dan dapat melebihi kemampuan nominal 1,5 mA (Gambar 8b). Kedua angka ini tidak saling bertentangan. Resistor 150 Ω menjamin LED tidak menerima lebih dari 19,3 mA, sedangkan beban pada keluaran IC dapat melebihi kemampuan nominalnya sehingga tegangan keluaran HIGH turun dan kecerahan segmen berkurang. Arus total yang terukur pada catu papan adalah 90,99 mA, yaitu arus gabungan seluruh beban pada papan dan bukan arus satu segmen. Arus per segmen belum diukur, sehingga kondisi kerja LED dan kesesuaiannya dengan kemampuan IC belum dapat dinilai secara pasti. Pengukurannya memerlukan tegangan jatuh pada tiap resistor 150 Ω (arus = tegangan/150 Ω) pada 21 segmen dengan jumlah segmen menyala yang berbeda. Bila arus melebihi kemampuan IC, penyangga atau resistor sekitar 1,93 kΩ (batas 1,5 mA, seperti 2,2 kΩ pada LED uji gerbang) dapat dipakai.

Kompatibilitas Level Logika

Keluaran HIGH 74LS04 pada 5 V umumnya hanya terjamin sekitar 2,7 V (tipikal sekitar 3,4 V), sedangkan masukan CMOS seri B pada 5 V memerlukan sekitar 3,5 V dan margin derau terjamin hanya 1 V (Floyd, 2015; Texas Instruments, 2016; Texas Instruments, 2017). Selisihnya −0,8 V pada nilai terjamin dan −0,1 V pada nilai tipikal, sehingga keluaran 74LS04 ke masukan CD4073B berisiko tidak terbaca HIGH dengan andal. Tegangan keluaran HIGH 74LS04 pada papan belum diukur, sehingga margin pada prototipe belum diketahui. Pembanding tetap bekerja pada pengujian, tetapi hal itu tidak menjamin ketahanan terhadap derau, sehingga antarmuka ini dapat menjadi salah satu penyebab kegagalan sesekali. Perbaikan yang lazim ialah resistor *pull-up* pada keluaran 74LS04 atau penggantian dengan 74HC04, disertai pengukuran tegangan keluaran tiap pembalik pada kondisi HIGH.

Proteksi dan Keandalan Papan

Berdasarkan skematik (Gambar 3), papan belum memuat kapasitor dekopling pada IC, dioda *flyback* pada koil relai, kapasitor peredam derau pada terminal motor DC, maupun RC untuk meredam pantulan kontak sensor dan gangguan pada jalur STOP. Padahal sistem memuat dua sumber derau yang lazim, yaitu koil relai (beban induktif) dan motor DC bersikat, yang dapat menimbulkan lonjakan tegangan dan pulsa palsu pada jalur *clock* pencacah; peredaman pada sumber dan dekopling catu merupakan praktik baku (Ott, 1988). Pengaruh ketiadaan komponen ini terhadap keandalan belum dapat dipastikan karena belum ada pengujian pembanding antara papan tanpa dan dengan proteksi. Pengujian A/B pada jumlah percobaan yang sama dimasukkan sebagai pengujian lanjutan.

Perbandingan dengan Pendekatan Lain

Dibandingkan dengan sistem berbasis Arduino, ADC, dan komunikasi serial seperti pada Yunardi dkk. (2017), rancangan ini tidak memerlukan pemrograman dan setiap sinyal dapat diukur langsung pada keluaran gerbang, sehingga cocok sebagai media pembelajaran. Berbeda dari *trainer* yang menyajikan gerbang dan penampil sebagai modul terpisah (Izza dan Al Azhar, 2022), sistem ini memperlihatkan rantai lengkap dari sensor ke aktuator pada satu purwarupa. Dari sisi ketelitian jarak, ketidakpastian ±6,6% (sekitar ±50 cm pada 98 pulsa) sepadan dalam orde dengan galat odometri 10–13 cm pada lintasan beberapa meter yang dilaporkan Tamamy dkk. (2023) dengan *rotary encoder* dan giroskop, walaupun metrik dan lintasannya berbeda, sehingga perbandingan ini hanya indikatif. Keterbatasannya ialah angka target ditetapkan melalui pengabelan *jumper* antara *header* segmen

dan gerbang. Satu target membutuhkan 7–21 kabel *jumper* (rata-rata 13,9; 17 kabel untuk target 098), yaitu *L* kabel literal, satu kabel tambahan per pembalik, serta sambungan antar gerbang dan ke SET pengunci. Perubahan target karenanya memakan waktu dan rawan salah. Penentuan target secara dinamis dengan membandingkan setiap segmen terhadap saklar (21 gerbang XNOR) memerlukan sekitar enam IC XNOR empat gerbang dan sepuluh gerbang AND tambahan, atau empat IC CD4073B, yang melampaui kapasitas papan sekarang. Alternatif yang tidak memerlukan pengabelan ulang ialah pencacah berkeluaran BCD dengan komparator magnitudo, tetapi alternatif ini menggantikan CD4026B dan memerlukan dekoder tujuh segmen terpisah. Sistem juga tidak dapat mengkompensasi selip roda atau mengubah kecepatan. Rancangan ini lebih tepat diposisikan sebagai alat peraga dan solusi kendali sederhana untuk target tetap, bukan pengganti sistem mikrokontroler pada aplikasi yang menuntut fleksibilitas tinggi.

Tabel 8 menempatkan rancangan ini terhadap pendekatan lain: pembandingan angka target dilakukan sepenuhnya dengan gerbang, langsung pada pola segmen CD4026B, dengan kebutuhan gerbang yang cukup kecil untuk muat pada papan.

Tabel 8. Posisi rancangan dibanding pendekatan lain

Pendekatan	Program	Pembanding angka target	Muat pada papan
Mikrokontroler dan sensor (Yunardi dkk., 2017)	Ya	Perangkat lunak	—
Gerbang dan komparator 7485 (Sari dkk., 2020)	Tidak	Masukan biner, tidak tersedia dari CD4026B	—
Dekode penuh segmen a–g	Tidak	21 literal, 10 AND	Tidak
Literal minimal (usulan)	Tidak	3–12 literal, ≤6 AND, ≤6 NOT	Ya

PENUTUP

Simpulan

Simpulan disusun menurut tujuan penelitian. (1) Sistem pemberhenti otomatis tanpa mikrokontroler dapat dibangun dari pencacah CD4026B, pembanding gerbang AND CD4073B dan pembalik 74LS04, serta pengunci CD4013B, dengan keluaran relai yang menghentikan motor; skematik lengkapnya ditunjukkan pada Gambar 3. (2) Sintesis literal minimal dari pola segmen CD4026B mengurangi kebutuhan literal dari 21 menjadi 3–12 per target, sehingga seluruh 1.000 angka target dapat direalisasikan dengan paling banyak 6 gerbang AND dan 6 pembalik, sedangkan dekode penuh membutuhkan 10 gerbang AND dan tidak muat pada papan. Perencana versi kedua menghasilkan rancangan identik dengan pencarian menyeluruh dan lolos verifikasi simulasi atas 10^6 pasangan. Kebaruan penelitian terbatas pada penerapan minimisasi ini pada keluaran segmen CD4026B dan bukti kecukupan papan untuk seluruh angka target, bukan pada metode minimisasinya. (3) Resistor segmen 150 Ω pada papan sesuai hitungan (145 Ω, deret E24), tetapi arus nyata dibatasi keluaran CD4026B yang hanya sekitar 1,5 mA, dan arus tiap segmen belum diukur. Tanpa resistor, arus LED diperkirakan ≈104 mA atau 5,2 kali arus kerjanya. Satu pulsa setara 7,25–8,28 cm sehingga jarak berhenti hanya dapat diperkirakan dalam ±6,6%. (4) Pada uji prototipe, mobil berhenti pada angka target dalam 132 dari 150 percobaan (88,0%; selang kepercayaan 95% 81,8–92,3%), dengan keberhasilan yang berbeda nyata antar target (p = 0,008) terutama karena target 35 (60%). Penyebab kegagalan belum dapat ditentukan.

Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. (1) Hitungan akhir dan posisi berhenti pada percobaan gagal tidak direkam. Hitungan akhir juga tidak tertinggal pada tampilan karena relai K1 mereset pencacah saat mobil berhenti, sehingga penilaian K1 pada Tabel 5 tidak dapat diverifikasi ulang dari tampilan, serta penyebab kegagalan dan kriteria posisi (K2) belum dapat dievaluasi. (2) Kalibrasi jarak hanya memakai dua titik, dan jumlah celah efektif piringan belum diverifikasi dengan uji putar manual. (3) Setiap target diuji 15 kali sehingga selang kepercayaan per target lebar; ketelitian ±5% pada keberhasilan 88% memerlukan sekitar 163 percobaan per target, dan membedakan 60% dari 90% dengan daya 80% sekitar 32 percobaan per target. (4) Kecepatan hanya diukur pada satu kondisi, tanpa variasi tegangan baterai atau beban. (5) Tegangan keluaran 74LS04 dan arus tiap segmen belum diukur pada papan. (6) Papan belum memiliki komponen proteksi, dan pengaruhnya belum diuji. (7) Penentuan target memerlukan penyambungan ulang *jumper*. Butir-butir ini menjadi dasar pengujian lanjutan.

Saran

Penelitian lanjutan disarankan: (1) menambah dioda *flyback*, kapasitor dekopling, dan RC pada jalur STOP, mengganti 74LS04 dengan 74HC04 atau menambah *pull-up*, lalu mengulang uji untuk membandingkan keberhasilan sebelum dan sesudah perbaikan; (2) merekam hitungan akhir dan jarak berhenti pada setiap percobaan, misalnya dengan merekam video tampilan atau menahan jalur RST relai selama uji diagnostik, serta memperbanyak percobaan per target dan menambah titik kalibrasi jarak per pulsa pada berbagai kecepatan, tegangan baterai, dan kondisi permukaan; (3) mengukur arus tiap segmen dan menambah penyangga bila kecerahan kurang; dan (4) menyediakan penentuan target tanpa penyambungan ulang, misalnya dengan saklar DIP dan komparator.

DAFTAR PUSTAKA

Avago Technologies. t.t. *HDSP-55xx Series Seven Segment Displays (High Efficiency Red), Data Sheet*.

Borenstein, Johann dan Feng, Liqiang. 1996. Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(6): 869–880. https://doi.org/10.1109/70.544770

Boylestad, Robert L. dan Nashelsky, Louis. 2013. *Electronic Devices and Circuit Theory*. Edisi ke-11. Boston: Pearson Education.

Brown, Lawrence D., Cai, T. Tony, dan DasGupta, Anirban. 2001. Interval Estimation for a Binomial Proportion. *Statistical Science*, 16(2): 101–133. https://doi.org/10.1214/ss/1009213286

Floyd, Thomas L. 2015. *Digital Fundamentals*. Edisi ke-11. Boston: Pearson Education.

Holm, Sture. 1979. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2): 65–70.

Izza, Syarifatul dan Al Azhar, Gillang. 2022. Pengembangan Trainer Elektronika Digital Sebagai Media Pembelajaran Teknik Listrik Politeknik Unisma. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 8(1): 30–36. https://doi.org/10.24036/jtev.v8i1.114103

Mano, M. Morris dan Ciletti, Michael D. 2013. *Digital Design: With an Introduction to the Verilog HDL*. Edisi ke-5. Upper Saddle River: Pearson Education.

McCluskey, Edward J. 1956. Minimization of Boolean Functions. *Bell System Technical Journal*, 35(6): 1417–1444. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb03835.x

Nichia Corporation. t.t. *Specifications for White LED NSCW100*.

Ott, Henry W. 1988. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. Edisi ke-2. New York: John Wiley & Sons.

Quine, Willard V. O. 1952. The Problem of Simplifying Truth Functions. *The American Mathematical Monthly*, 59(8): 521–531.

Sari, Indah Fatika dkk. 2020. Gerbang Logika Kombinasional dan Komparator. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Fisika (SENDIKFI)*, 3(1): 425–432. Serang: Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Schubert, E. Fred. 2006. *Light-Emitting Diodes*. Edisi ke-2. Cambridge: Cambridge University Press.

Tamamy, Aries Jehan, Arifin, Zaenal, Zulfika, Bramandika Kunni, Alfani, Wahyu, dan Gunawan, Wahyu Sahrul. 2023. Pemetaan Ruangan pada Robot Beroda Menggunakan Sensor LiDAR. *Applied Industrial Engineering Journal*, 7(1): 9–16.

Texas Instruments. 2003. *CD4026B, CD4033B Types: CMOS Decade Counter/Divider with Decoded 7-Segment Display Outputs and Display Enable* (Rev. B). Dallas: Texas Instruments.

Texas Instruments. 2003. *CD4073B, CD4081B, CD4082B Types* (Rev. C). Dallas: Texas Instruments.

Texas Instruments. 2016. *CD4013B CMOS Dual D-Type Flip-Flop* (Rev. E). Dallas: Texas Instruments.

Texas Instruments. 2017. *Logic Guide 2017* (SDYU001). Dallas: Texas Instruments.

Yunardi, Riky Tri, Winarno, dan Pujiyanto. 2017. Analisa Kinerja Sensor Inframerah dan Ultrasonik untuk Sistem Pengukuran Jarak pada Mobile Robot Inspection. *SETRUM: Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 6(1): 33–41.

UNESA Universitas Negeri Surabaya