

**PENERAPAN *INTERNET OF THINGS* (IOT) UNTUK SISTEM  
DETEKSI KANTUK PENGEMUDI BERBASIS  
SENSOR DETAK JANTUNG**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Oleh:

**FIKA NABILLA S.  
220705036**

Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi  
Program Studi Teknologi Informasi



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY  
BANDA ACEH  
2026/1447 M**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**PENERAPAN INTERNET OF THINGS (IoT) UNTUK SISTEM DETEKSI  
KANTUK PENGEMUDI BERBASIS SENSOR DETAK JANTUNG  
TUGAS AKHIR**

Diajukan Kepada Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry Banda Aceh  
Sebagai Salah Satu Beban Studi Memperoleh Gelar Sarjana  
Pada Program Studi Teknologi Informasi

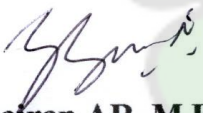
Oleh:  
**FIKA NABILLA.S**  
**220705036**


**Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi  
Program Studi Teknologi Informasi**

**Disetujui Untuk Dimunaqasyahkan Oleh:**

Pembimbing I,

Pembimbing II,

  
**Khairan AR, M.Kom**  
**NIP. 198607042014031001**

  
**Mursyidin, M.T**  
**NIP. 198204052023211020**

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknologi Informasi

  
**Malahayati, M.T.**  
**NIP. 198301272015032003**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENERAPAN INTERNET OF THINGS (IoT) UNTUK SISTEM DETEKSI KANTUK PENGEMUDI BERBASIS SENSOR DETAK JANTUNG

#### TUGAS AKHIR

Telah Diuji Oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir  
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh dan Dinyatakan Lulus  
Serta Diterima Sebagai Salah Satu Beban Studi Program Sarjana (S1)  
Dalam Program Studi Teknologi Informasi

Pada Hari/Tanggal : Selasa, 28 April 2026 M  
10 Dzulkaidah 1447 H  
Di Darussalam, Banda Aceh

Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir:

Ketua,


Sekretaris,


  
**Khairan AR, M.Kom.**  
NIP. 198607042014031001

  
**Mursyidin, M.T.**  
NIP. 198204052023211020

Penguji I,

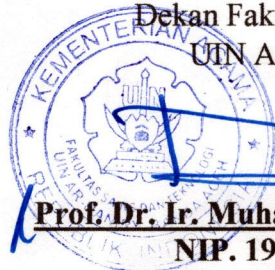
Penguji II,

  
**Firmansyah, S.Kom., M.T.**  
NIP. 198704212015031002

  
**Ridha Hahi, M.T.**  
NIP. 197905302014031001

Mengetahui:

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
UIN Ar-Raniry Banda Aceh



  
**Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU**  
NIP. 196210021988111001

## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang Bertanda Tangan dibawah ini

Nama : Fika Nabilla.S  
NIM : 220705036  
Program Studi : Teknologi Informasi  
Fakultas : Sains dan Teknologi  
Judul Tugas Akhir : Penerapan Internet of Things (IoT) Untuk Sistem Deteksi Kantung Pengemudi Berbasis Sensor Detak Jantung

Dengan ini menyatakan bahwa dalam penulisan tugas akhir ini, saya:

1. Tidak menggunakan ide orang lain tanpa mampu mengembangkan dan mempertanggung jawabkan;
2. Tidak melakukan plagiasi terhadap naskah karya orang lain;
3. Tidak menggunakan karya orang lain tanpa menyebutkan sumber asli atau tanpa izin pemilik karya;
4. Tidak memanipulasi dan memalsukan data;
5. Mengerjakan sendiri karya ini dan mampu bertanggungjawab atas karya ini.

Bila di kemudian hari ada tuntutan dari pihak lain atas karya saya, dan telah memulai pembuktian yang dapat dipertanggungjawabkan dan ternyata memang ditemukan bukti bahwa saya telah melanggar pernyataan ini, maka saya siap dikenai sanksi berdasarkan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan tanpa paksaan dari pihak manapun.

Banda Aceh, 28 April 2026  
Yang menyatakan,



Fika Nabilla.S

## ABSTRAK

Kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh kelelahan dan rasa kantuk (*microsleep*) pengemudi masih menjadi permasalahan serius dalam sistem transportasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sistem peringatan dini deteksi kantuk pengemudi berbasis pemantauan fisiologis menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT). Berbeda dengan sistem visual konvensional, penelitian ini menggunakan sensor biometrik MAX30102 untuk mengakuisisi sinyal detak jantung (*Beats Per Minute/BPM*) dan saturasi oksigen darah (*SpO2*) secara *real-time*, yang kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32. Pendekatan pendeteksian didasarkan pada analisis *Heart Rate Variability* (HRV), di mana status kantuk dipicu apabila terjadi penurunan detak jantung melewati ambang batas 15% dari *Resting Heart Rate* (RHR) dasar pengemudi. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang diuji secara aman menggunakan *driving simulator* di bawah berbagai skenario beban kognitif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor yang dirancang memiliki tingkat akurasi pembacaan sebesar 98.63% dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) hanya 1.37% ketika dibandingkan dengan alat oximeter medis. Sistem ini mampu merespons kondisi kritis secara sangat cepat dengan latensi rata-rata 770 milidetik untuk mengaktifkan aktuator peringatan berupa *buzzer* dan layar LCD Nokia 5110. Evaluasi menggunakan *Confusion Matrix* pada skenario simulator membuktikan bahwa sistem memiliki akurasi klasifikasi sebesar 90% dalam membedakan fase sadar dan fase mengantuk. Selain itu, data fisiologis dan status peringatan berhasil ditransmisikan secara kontinu tanpa *packet loss* ke *dashboard* eksternal (Blynk) melalui jaringan Wi-Fi. Kesimpulannya, sistem pendeteksi kantuk berbasis biometrik dan IoT ini terbukti efisien, memiliki presisi tinggi, serta sangat reliabel untuk diimplementasikan sebagai solusi preventif dalam menekan angka kecelakaan berkendara.

Kata Kunci: Kecelakaan lalu lintas, *microsleep*, *Internet of Things*, sensor MAX30102, ESP32, *Heart Rate Variability*.

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, penulis diberikan kemudahan serta kelancaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Penerapan Internet of Things (IoT) untuk Sistem Deteksi Kantuk Pengemudi Berbasis Sensor Detak Jantung”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan mata kuliah skripsi pada Program Studi Teknologi Informasi Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna, mengingat keterbatasan pengalaman dan kemampuan yang dimiliki. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan laporan ini di masa yang akan datang.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta kontribusinya selama proses pelaksanaan hingga penyusunan laporan ini, yaitu:

1. Kepada Cinta pertama sekaligus panutan hidupku, Ayahanda Saifullah AR dan pintu surgaku Ibunda Darmawati AR. Terimakasih atas cinta yang tak bertepi dan pengorbanan yang tak terhingga. Meski beliau tak sempat merasakan bangku perkuliahan, namun beliau telah memberikan segalanya hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana. Penulis percaya doa-doa beliau lah yang selalu menyelamatkan dan menuntun penulis melewati masa-masa sulit. Terimakasih engkau selalu memberikan kasih sayang yang sangat luar biasa besar, nasihat, motivasi, semangat dan doa yang terbaik untuk putri kecilmu ini.
2. Kepada saudara kandung penulis M Irvan syauqi S dan Saiful Qiram S, penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya karena telah memberikan dukungan, doa, serta semangat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Abang M. Irvan Syauqi senantiasa memberikan perhatian, nasihat, serta motivasi yang sangat berarti bagi penulis dalam

menghadapi berbagai tantangan. Sementara itu, adik Saiful Qiram turut memberikan semangat dan keceriaan yang menjadi penguat bagi penulis di saat menghadapi rasa lelah dan kesulitan. Kehadiran, dukungan, dan doa dari abang dan adik menjadi salah satu sumber kekuatan bagi penulis untuk terus berjuang hingga skripsi ini dapat diselesaikan. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal.

3. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Ketua Program Studi, Ibu Malahayati, M.T., atas bimbingan, arahan, serta dukungan yang telah diberikan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Beliau senantiasa memberikan masukan yang membangun, arahan yang jelas, serta motivasi yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan setiap tahapan penyusunan skripsi. Kesabaran dan dedikasi beliau dalam membimbing penulis menjadi salah satu faktor penting dalam terselesaikannya skripsi ini. Semoga segala ilmu, bimbingan, dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal kebaikan yang bermanfaat.
4. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Bapak Mursyidin, M.T., selaku Pembimbing I, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Beliau dengan penuh kesabaran dan ketelitian dalam membimbing penulis, sehingga penulis dapat memahami setiap tahapan penelitian dan penyusunan skripsi dengan baik. Dukungan dan motivasi yang diberikan menjadi penyemangat bagi penulis untuk terus berusaha dan menyelesaikan skripsi ini. Semoga segala ilmu, bimbingan, dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal.
5. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Bapak Khairan AR, M.Kom., selaku Pembimbing II, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berarti kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Beliau dengan penuh kesabaran dan perhatian dalam membimbing penulis, sehingga penulis dapat melalui setiap tahapan penelitian dan penyusunan skripsi dengan lebih baik. Dukungan serta motivasi yang diberikan menjadi salah satu faktor

penting dalam terselesaikannya skripsi ini. Semoga segala ilmu, bimbingan, dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal.

6. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Cut Ida Rahmadiana, S.Si., selaku staf Operator Program Studi Teknologi Informasi, yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam proses administrasi selama penyusunan skripsi ini. Beliau dengan sabar dan penuh tanggung jawab telah membantu penulis dalam berbagai keperluan administrasi, sehingga proses penyusunan skripsi dapat berjalan dengan lebih lancar. Bantuan dan kebaikan yang diberikan sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal.
7. Kepada Muhammad aqilla shadiq. Terimakasih Telah menjadi sosok pendamping setia dalam segala hal, yang menemani penulis dari awal perkuliahan sampai saat ini, tempat berbagi suka duka, memberikan dukungan, kasih sayang dan semangat, serta perhatian kepada penulis dalam penyusunan skripsi dari awal hingga selesainya skripsi ini.
8. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada sahabat tercinta, Rezatul Fadilah, yang telah memberikan dukungan, semangat, serta selalu hadir menemani penulis dalam proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas waktu, perhatian, dan kesediaan untuk mendengarkan setiap keluh kesah penulis di tengah berbagai kesulitan yang dihadapi. Dukungan dan kebersamaan yang diberikan menjadi penguat bagi penulis untuk tetap bertahan dan menyelesaikan skripsi ini. Semoga segala kebaikan, ketulusan, dan dukungan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal.
9. Fika Nabilla.S, ya! diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya yang telah berjuang untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Sulit bisa bertahan sampai dititik ini, terimakasih untuk tetap hidup dan merayakan dirimu sendiri, walaupun sering kali putus asa atas apa yang sedang diusahakan. Tetaplah jadi manusia yang mau berusaha dan tidak lelah untuk mencoba. God thank you for being me independent women, i know there are more great ones but i'm proud of this achievement.

Akhir kata, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi yang bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya. Semoga segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu penulis mendapatkan balasan dari Allah SWT.

Banda Aceh, 2 Maret 2025

Fika Nabilla.S

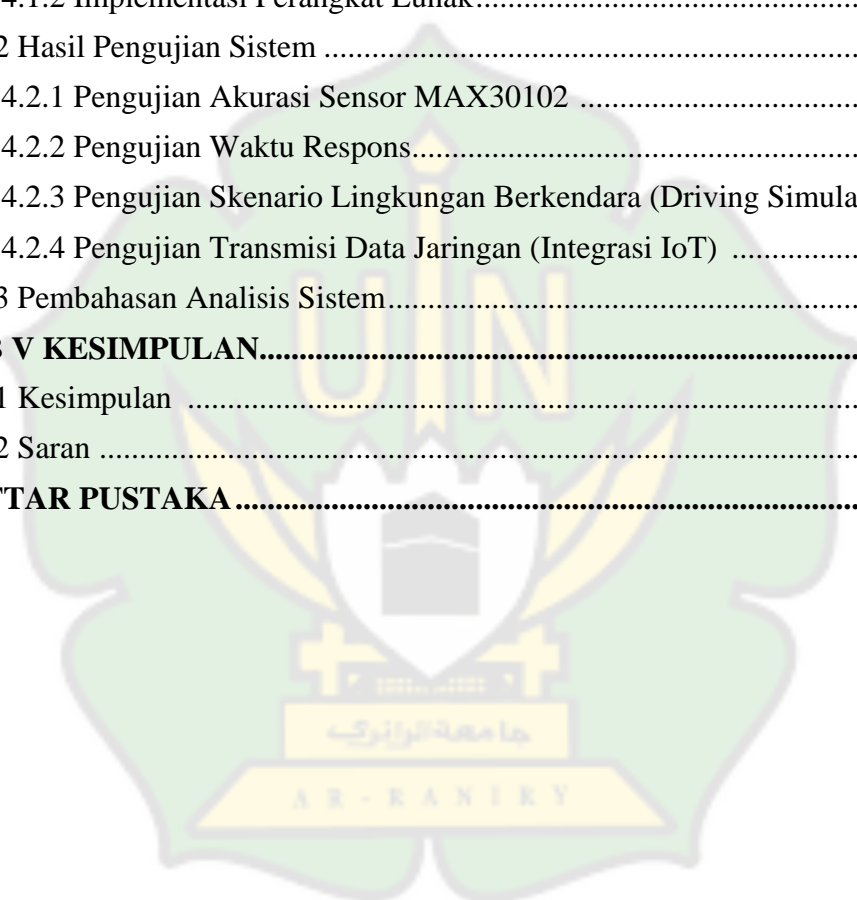
NIM. 220705036



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Manfaat .....	3
1.5 Batasan Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	5
2.2 Landasan Teori.....	7
2.2.1 Internet of Things (IoT) .....	7
2.2.2 Mikrokontroler ESP32 .....	7
2.2.3 Sensor Biometrik MAX30102 .....	8
2.2.4 Fisiologi Kantuk: RHR dan HRV (Heart Rate Variability) .....	8
2.2.5 Platform Cloud IoT Blynk .....	9
2.2.6 Komponen Output: LCD Nokia 5110, Buzzer, dan Relay.....	10
2.3 Kerangka Pemikiran.....	10
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>12</b>
3.1 Jenis Penelitian.....	12
3.2 Metode Penelitian.....	12
3.3 Konsepsi Penelitian.....	13
3.4 Instrumen Cara Kerja Sistem .....	14
3.5 Waktu dan Tempat Penelitian .....	17
3.6 Alur Penelitian .....	18
3.6.1 Identifikasi Masalah .....	18
3.6.2 Studi Literatur .....	19
3.6.3 Analisis Kebutuhan .....	20

3.6.4 Perancangan Sistem .....	21
3.6.5 Implementasi Sistem .....	21
3.6.6 Pengujian Sistem .....	22
3.6.7 Analisis dan Evaluasi .....	23
3.7 Kelebihan Sistem .....	26
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>27</b>
4.1 Implementasi Sistem .....	27
4.1.1 Implementasi Perangkat Keras .....	27
4.1.2 Implementasi Perangkat Lunak.....	29
4.2 Hasil Pengujian Sistem .....	32
4.2.1 Pengujian Akurasi Sensor MAX30102 .....	32
4.2.2 Pengujian Waktu Respons.....	33
4.2.3 Pengujian Skenario Lingkungan Berkendara (Driving Simulator).....	34
4.2.4 Pengujian Transmisi Data Jaringan (Integrasi IoT) .....	37
4.3 Pembahasan Analisis Sistem.....	38
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>	<b>42</b>
5.1 Kesimpulan .....	42
5.2 Saran .....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>45</b>



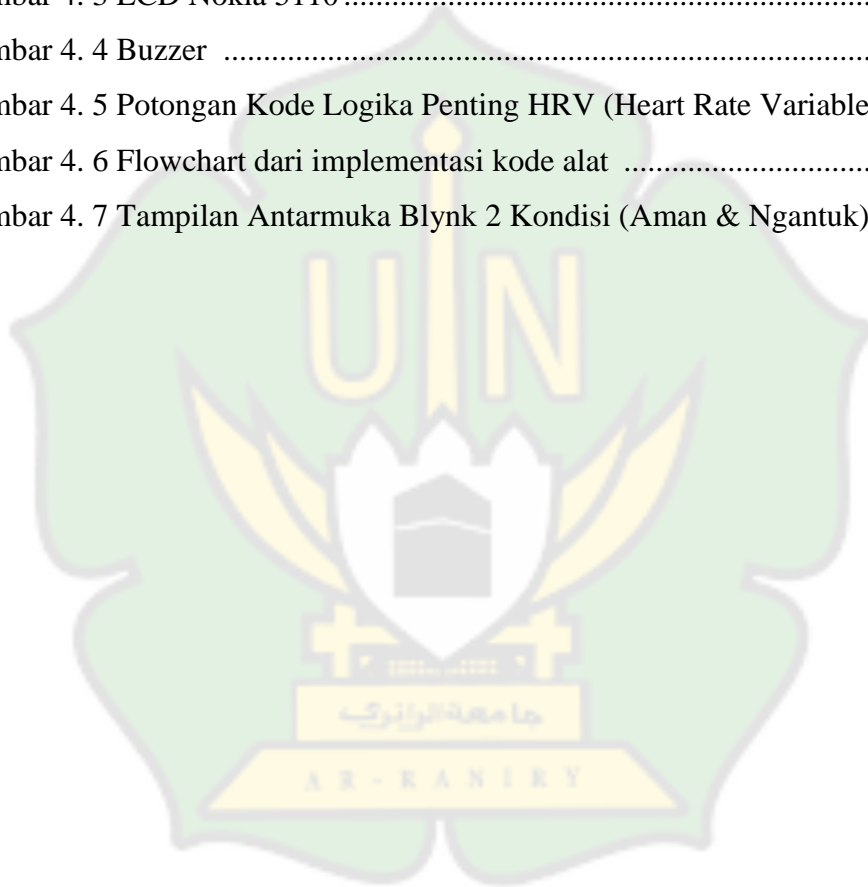
## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu .....	5
Tabel 3. 1 Perangkat Keras .....	20
Tabel 3. 2 Perangkat Lunak .....	21
Tabel 4. 1 Perbandingan Oximeter Medis vs Max30102 .....	31
Tabel 4. 2 Tabel Pengujian Respons Waktu .....	32
Tabel 4. 3 Log Pengujian Skenario Beban Kognitif Berkendara .....	34



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Flowchart Kerangka Pemikiran .....	11
Gambar 3. 1 Desain Antarmuka Dashboard IOT .....	17
Gambar 3. 2 Flowchart Alur Penelitian .....	18
Gambar 3. 3 Skematik Pendeteksi Kantuk .....	21
Gambar 4. 1 Hasil akhir alat deteksi kantuk .....	27
Gambar 4. 2 Sensor MAX30102 .....	28
Gambar 4. 3 LCD Nokia 5110 .....	28
Gambar 4. 4 Buzzer .....	28
Gambar 4. 5 Potongan Kode Logika Penting HRV (Heart Rate Variable) .....	30
Gambar 4. 6 Flowchart dari implementasi kode alat .....	31
Gambar 4. 7 Tampilan Antarmuka Blynk 2 Kondisi (Aman & Ngantuk).....	38



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Keselamatan berkendara merupakan aspek krusial dalam sistem transportasi, khususnya di negara dengan intensitas lalu lintas tinggi seperti Indonesia. Data kecelakaan lalu lintas menunjukkan tren yang mengkhawatirkan setiap tahunnya, di mana salah satu faktor dominan adalah kelelahan atau rasa kantuk pada pengemudi. Kondisi ini kerap terjadi pada perjalanan jarak jauh, pengemudi angkutan umum, maupun pekerja dengan jam kerja malam.

Kantuk saat berkendara tidak hanya membahayakan pengemudi, tetapi juga penumpang dan pengguna jalan lainnya. Menurunnya konsentrasi, melambatnya refleks, hingga hilangnya kendali kendaraan merupakan konsekuensi serius dari kondisi tersebut. Laporan kepolisian bahkan mencatat bahwa sebagian besar kecelakaan di jalan tol terjadi pada dini hari, ketika tingkat kewaspadaan pengemudi berada pada titik terendah. Sejumlah kasus kecelakaan bus antarprovinsi di Indonesia juga membuktikan bahwa kurangnya istirahat pengemudi berimplikasi fatal, baik secara materiil maupun non-materiil, serta menimbulkan korban jiwa.

Fenomena ini tidak hanya terjadi di Indonesia, tetapi juga di berbagai negara lain. Studi internasional menunjukkan bahwa kantuk saat berkendara merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan, hampir setara dengan pengaruh alkohol. Temuan tersebut menegaskan bahwa permasalahan kantuk tidak dapat dianggap sebagai isu individual, melainkan persoalan sistemik yang membutuhkan solusi berbasis teknologi.

Seiring dengan perkembangan *Internet of Things* (IoT), peluang hadirnya solusi inovatif semakin terbuka. Integrasi sensor fisiologis, misalnya, memungkinkan deteksi pola perubahan biologis pengemudi seperti detak jantung (BPM) dan saturasi oksigen darah (SpO<sub>2</sub>) yang secara medis mengindikasikan fase awal kantuk. Data ini dapat dianalisis secara *real-time*

untuk menghasilkan peringatan dini sebelum kecelakaan terjadi. Lebih jauh, sistem deteksi kantuk berbasis IoT tidak hanya memberikan notifikasi langsung kepada pengemudi, tetapi juga dapat terhubung dengan perangkat eksternal, seperti smartphone maupun pusat kontrol transportasi, sehingga langkah pencegahan dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengandalkan sensor visual seperti kamera berbasis *eye tracking* atau sensor gerak, penelitian ini menitikberatkan pada pemanfaatan sensor detak jantung dan oksigen darah terintegrasi mikrokontroler ESP32 sebagai media utama untuk memantau kondisi pengemudi secara fisiologis. Selain itu, sebagian penelitian sebelumnya hanya menghasilkan peringatan lokal berupa suara atau getaran, sedangkan penelitian ini dirancang menggunakan antarmuka visual LCD Nokia 5110 dan mendukung integrasi IoT sehingga data dapat diproses secara *real-time* dan dikirimkan ke perangkat eksternal. Dengan demikian, penelitian ini memiliki kontribusi dalam menghadirkan sistem deteksi kantuk yang lebih komprehensif, terintegrasi, dan relevan bagi pengembangan transportasi cerdas di Indonesia.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian pada latar belakang di atas, dapat diketahui bahwa permasalahan kantuk pengemudi masih menjadi faktor signifikan penyebab kecelakaan lalu lintas. Oleh karena itu, perlu dirumuskan permasalahan utama yang akan dibahas dan diselesaikan dalam proyek ini. Adapun rumusan masalah dalam penelitian/proyek ini adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana merancang sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis sensor detak jantung yang mampu memantau kondisi pengemudi secara *real-time*?
- 2) Bagaimana memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk menghubungkan sistem deteksi kantuk dengan perangkat eksternal, seperti smartphone atau sistem peringatan kendaraan?

- 3) Sejauh mana efektivitas sistem deteksi kantuk berbasis IoT dalam mengurangi risiko kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh pengemudi mengantuk?

### **1.3 Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya, maka tujuan dari proyek “Penerapan *Internet of Things* (IoT) untuk Sistem Deteksi Kantuk Pengemudi Berbasis Detak Jantung” adalah sebagai berikut:

- 1) Merancang dan membangun sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis sensor detak jantung (MAX30102) yang mampu memantau kondisi pengemudi secara real-time.
- 2) Mengimplementasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk menghubungkan sistem deteksi kantuk dengan perangkat eksternal, seperti smartphone, sebagai media notifikasi peringatan.
- 3) Menguji efektivitas sistem deteksi kantuk berbasis IoT dalam mengurangi risiko kecelakaan lalu lintas akibat pengemudi mengantuk melalui pemberian peringatan suara dan visual.

### **1.4 Manfaat**

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah dirumuskan sebelumnya, proyek ini tidak hanya berfokus pada pencapaian teknis semata, melainkan juga diharapkan mampu memberikan dampak nyata baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, manfaat yang diharapkan dari penelitian/proyek ini dapat dirinci sebagai berikut

- 1) Tersedianya sistem prototipe deteksi kantuk pengemudi berbasis detak jantung yang dapat membantu meningkatkan keselamatan berkendara melalui pemantauan kondisi pengemudi secara real-time
- 2) Adanya integrasi teknologi IoT yang memungkinkan sistem deteksi kantuk terhubung dengan perangkat eksternal, sehingga proses peringatan atau notifikasi dapat lebih cepat, praktis, dan tepat sasaran

- 3) Diperolehnya data dan hasil uji efektivitas sistem yang dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut serta memberikan kontribusi nyata dalam upaya menurunkan angka kecelakaan akibat kantuk pengemudi

### **1.5 Batasan Penelitian**

Agar penelitian ini lebih terarah, fokus, dan mematuhi etika keselamatan pengujian, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Sistem pendeteksi kantuk ini secara eksklusif menggunakan sensor biometrik MAX30102 untuk memantau perubahan fisiologis pengemudi, yaitu ritme detak jantung (Beats Per Minute/BPM) dan saturasi oksigen darah (SpO2).
2. Penelitian ini tidak menggunakan input dari sensor visual (kamera) atau sensor gerak (accelerometer/gyroscope) sebagai parameter algoritma pendeteksi kantuk oleh mikrokontroler. Kamera sekadar digunakan sebagai alat dokumentasi eksternal untuk proses validasi (ground truth) hasil deteksi pada saat pengujian.
3. Implementasi Internet of Things (IoT) difokuskan pada proses transmisi payload data biometrik dan status peringatan dari mikrokontroler ESP32 ke antarmuka perangkat eksternal (smartphone) menggunakan konektivitas Wi-Fi. Integrasi penuh ke dalam sistem Electronic Control Unit (ECU) bawaan mobil tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.
4. Demi menjamin keselamatan subjek uji dan mematuhi etika penelitian, pengujian sistem tidak dilakukan pada kendaraan yang melaju di jalan raya sungguhan. Pengujian fungsionalitas dan akurasi dilakukan dalam lingkungan terkontrol berskala laboratorium menggunakan software driving simulator yang dikendalikan dengan steering wheel eksternal.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) telah banyak dilakukan, baik dalam konteks akademik maupun penelitian terapan. Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar dan pembanding bagi penelitian ini.

*Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu*

Peneliti(Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan & Persamaan
Nurhasanah et al. (2023)	Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi Menggunakan Sensor IR Berbasis Arduino (Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi, UIN Bandung)	Sistem mampu mendeteksi kondisi kantuk berdasarkan refleksi sensor inframerah pada kelopak mata dengan tingkat keberhasilan 87%.	<b>Perbedaan:</b> Penelitian tersebut menggunakan pendekatan visual/fisik (pantulan mata) dengan Arduino. Penelitian ini menggunakan pendekatan fisiologis (detak jantung dan oksigen darah) menggunakan sensor MAX30102 dan mikrokontroler ESP32 yang lebih mutakhir.
Suhendra & Prasetyo (2022)	Implementasi IoT untuk Keselamatan Berkendara dengan Sensor Gerak MPU6050 (Jurnal Informatika Udayana)	Sistem IoT berbasis Wi-Fi dapat mengirimkan status pengemudi ke dashboard web secara real-time.	<b>Persamaan:</b> Sama-sama mengimplementasikan teknologi IoT untuk pemantauan real-time.  <b>Perbedaan:</b> Penelitian ini menggunakan parameter detak jantung

			(MAX30102), bukan sensor gerak, dan dilengkapi dengan antarmuka lokal berupa layar LCD Nokia 5110 di dasbor kendaraan.
Rahman et al. (2021)	Rancang Bangun Sistem Peringatan Kantuk Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno (Jurnal Nasional Teknologi Informasi)	Menggunakan kamera dan sensor ultrasonik untuk mendeteksi kantuk melalui posisi kepala.	<b>Perbedaan:</b> Penelitian tersebut mengandalkan pengolahan citra (kamera) yang berat. Penelitian ini jauh lebih efisien dan ringan karena mendeteksi kantuk dari ritme detak jantung (BPM) tanpa memerlukan kamera pemantau wajah.
Syahrial et al. (2025)	Sistem IoT Peringatan Dini Pengemudi Mengantuk Menggunakan ESP32 (Jurnal Teknologi Komputer, Universitas Negeri Medan)	Notifikasi dikirim melalui aplikasi Telegram ketika pengemudi mengantuk.	<b>Persamaan:</b> Sama-sama menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai otak komputasi dan modul IoT.  <b>Perbedaan:</b> Penelitian ini menggunakan sensor biometrik (MAX30102) dan tidak hanya mengandalkan notifikasi jaringan, tetapi juga memberikan respons real-time langsung kepada pengemudi melalui indikator visual di LCD Nokia 5110 dan buzzer.

Dari penelitian-penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa sistem pendeteksi kantuk pengemudi umumnya memanfaatkan kombinasi sensor dan mikrokontroler. Namun, penelitian ini membawa pembaruan dengan memanfaatkan sensor detak jantung MAX30102 dan modul IoT sederhana untuk mendeteksi penurunan konsentrasi pengemudi secara real-time dengan keluaran peringatan suara, dan LCD.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan arsitektur teknologi yang menghubungkan berbagai objek fisik (perangkat, sensor, dan aktuator) ke dalam jaringan internet untuk memfasilitasi pertukaran data secara otomatis (Hassaballah et al., 2022). Dalam ekosistem IoT, mikrokontroler bertindak sebagai jembatan yang mengakuisisi data dari lingkungan fisik dan mengirimkannya ke peladen awan (*cloud server*) untuk dipantau secara jarak jauh. Pada penelitian ini, arsitektur IoT dimanfaatkan untuk mentransmisikan data kondisi fisiologis pengemudi secara *real-time* ke dasbor pemantauan, sehingga memungkinkan intervensi cepat ketika indikasi kantuk terdeteksi (Pratama & Nugroho, 2023).

### 2.2.2 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler berbasis *System on a Chip* (SoC) yang ditenagai oleh prosesor Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit. Keunggulan utama ESP32 dibandingkan mikrokontroler konvensional adalah integrasi modul Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan Bluetooth Low Energy (BLE) secara perangkat keras, menjadikannya standar industri untuk pengembangan node IoT (Setiawan et al., 2023). ESP32 mendukung berbagai protokol komunikasi tingkat rendah seperti I2C (*Inter-Integrated Circuit*) untuk membaca sensor biometrik dan SPI (*Serial Peripheral Interface*) berkecepatan tinggi untuk merender antarmuka layar. Kinerja komputasi ESP32 yang mencapai 240 MHz memungkinkannya untuk melakukan

perhitungan algoritma yang kompleks, seperti kalkulasi *Heart Rate Variability*, tanpa mengalami latensi yang signifikan (Yusuf & Rahmawati, 2022).

### 2.2.3 Sensor Biometrik MAX30102

Sensor MAX30102 adalah modul biosensor terintegrasi yang berfungsi sebagai oksimetri denyut (*pulse oximeter*) dan pemantau detak jantung. Sensor ini beroperasi menggunakan prinsip *Photoplethysmography* (PPG), yaitu metode optik non-invasif yang mendeteksi perubahan volume darah pada jaringan mikrovaskular. MAX30102 menembakkan cahaya dari LED Merah dan Inframerah (IR) ke dalam kulit (umumnya di ujung jari), dan sebuah fotodiode akan mengukur intensitas cahaya yang dipantulkan kembali (Rizal & Fauzi, 2023). Fluktuasi penyerapan cahaya ini dikonversi menjadi data mentah yang kemudian diolah untuk mendapatkan nilai BPM (*Beats Per Minute*) dan tingkat saturasi oksigen darah (SpO<sub>2</sub>). MAX30102 dipilih karena memiliki toleransi terhadap gangguan cahaya sekitar (*ambient light rejection*) dan konsumsi daya yang sangat rendah, ideal untuk perangkat portabel (Kurniawan et al., 2024).

### 2.2.4 Fisiologi Kantuk: RHR dan HRV (Heart Rate Variability)

Indikator fisiologis transisi dari kondisi sadar (*wakefulness*) menuju tidur (*drowsiness*) dapat diukur secara akurat melalui aktivitas sistem saraf otonom. Terdapat dua parameter utama yang digunakan:

1. **Resting Heart Rate (RHR):** Merupakan jumlah detak jantung per menit saat tubuh dalam keadaan istirahat penuh. RHR berfungsi sebagai nilai dasar (*baseline*) fisiologis pengemudi (Santoso et al., 2023).
2. **Heart Rate Variability (HRV):** Berbeda dengan BPM yang mengukur rata-rata detak, HRV mengukur fluktuasi interval waktu spesifik antara satu detak jantung dengan detak berikutnya, yang dikenal sebagai interval R-R atau *Inter-Beat Interval* (IBI).

Saat seseorang mulai mengantuk, dominasi sistem saraf berpindah dari saraf simpatik (waspada) ke saraf parasimpatik (relaksasi). Peningkatan aktivitas parasimpatik ini menyebabkan interval antar-detak jantung menjadi lebih tidak teratur, yang secara matematis diartikan sebagai **peningkatan nilai HRV** (Fadilah & Haryanto, 2023).

Penelitian ini menggunakan metode *Root Mean Square of Successive Differences* (RMSSD) untuk mengkuantifikasi HRV secara *real-time*. Formula matematis RMSSD adalah sebagai berikut:

$$\text{RMSSD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}$$

Dimana  $N$  adalah jumlah sampel interval dan  $RR$  adalah jarak waktu antar detak dalam milidetik. Berdasarkan studi klinis terkait kelelahan pengemudi, sistem mendefinisikan masuknya pengemudi ke dalam kondisi kantuk (*drowsy*) apabila nilai komputasi RMSSD melonjak secara signifikan melewati ambang batas toleransi, yaitu **sekitar 15% di atas nilai RMSSD dasar (*baseline*) pengemudi saat sadar penuh**. Peningkatan sebesar 15% ini diakui secara medis sebagai indikator awal yang valid dari penurunan kewaspadaan kognitif sebelum terjadinya *microsleep*..

### 2.2.5 Platform Cloud IoT Blynk

Blynk merupakan platform *Platform-as-a-Service* (PaaS) yang dirancang khusus untuk mengendalikan perangkat keras berbasis IoT dari jarak jauh dan menampilkan data sensor melalui antarmuka visual berbasis *widget* (Saputra & Wibowo, 2022). Dalam sistem deteksi kantuk ini, Blynk berfungsi sebagai *dashboard* antarmuka pengguna (UI) sekunder yang menampilkan data pemantauan seperti detak jantung (BPM), nilai RMSSD (HRV), dan status kesadaran pengemudi secara *real-time* melalui koneksi Wi-Fi yang dikelola oleh ESP32.

### 2.2.6 Komponen Output: LCD Nokia 5110, Buzzer, dan Relay

Untuk memberikan umpan balik (notifikasi) secara langsung kepada pengemudi di dalam kabin, sistem ini dilengkapi dengan tiga komponen antarmuka keluaran:

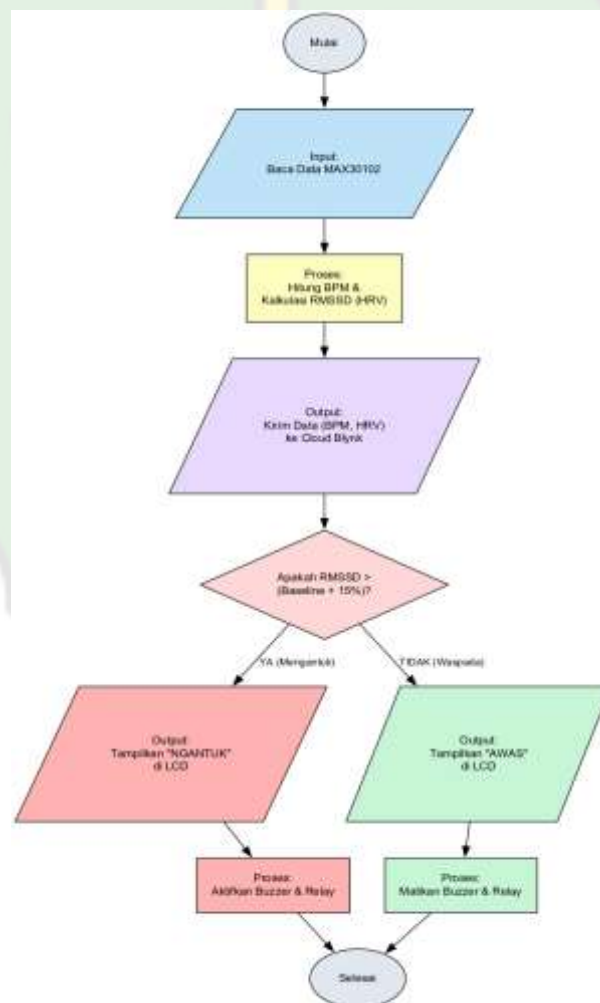
1. **LCD Nokia 5110 (PCD8544):** Merupakan layar monokromatik berbasis *hardware* SPI. Layar ini bertugas menampilkan antarmuka visual primer berupa angka BPM, HRV, dan indikator grafis detak jantung secara mulus tanpa membebani memori utama ESP32 (Hidayat & Setyawan, 2023).
2. **Buzzer Aktif:** Komponen aktuator audio yang akan beresonansi menghasilkan frekuensi suara bernada tinggi untuk membangunkan pengemudi secara akustik saat kondisi kantuk terdeteksi.
3. **Modul Relay:** Sakelar elektromekanis yang dikendalikan secara digital oleh ESP32. Relay berfungsi sebagai antarmuka fisik untuk memutus atau mengalirkan arus listrik tinggi, yang dapat diintegrasikan dengan aktuator eksternal di dalam mobil (misalnya penggetar kursi atau sistem pengereman darurat) ketika status bahaya diaktifkan (Putra, 2024).

### 2.3 Kerangka Pemikiran

Sistem deteksi kantuk yang dikembangkan dalam penelitian ini beroperasi secara *real-time* dan *closed-loop*. Kerangka pemikiran sistem dapat dijabarkan melalui alur kerja berikut:

1. **Akuisisi Data (Input):** Jari pengemudi ditempatkan pada sensor MAX30102. Sensor melakukan pemindaian PPG optik untuk menangkap sinyal volume darah dan mengidentifikasi interval waktu antar detak jantung (IBI).
2. **Pemrosesan Utama (Controller):** Mikrokontroler ESP32 menerima data mentah via komunikasi I2C. Algoritma di dalam ESP32 menghitung *Beats Per Minute* (BPM) dan melakukan kalkulasi statistika RMSSD secara periodik untuk mendapatkan nilai *Heart Rate Variability* (HRV).

3. **Analisis Keputusan (Logic):** Mikrokontroler membandingkan nilai RMSSD saat ini dengan *baseline* RMSSD awal. Jika terjadi lonjakan RMSSD yang melampaui *threshold* (ambang batas kantuk), sistem mengubah status pengemudi dari "Awat" menjadi "Ngantuk".
4. **Tindakan dan Peringatan (Local Output):**
  - a. Layar LCD Nokia 5110 (via SPI) memperbarui visualisasi teks peringatan dan grafik.
  - b. Pin digital mengaktifkan Buzzer untuk peringatan audio.
  - c. Relay diaktifkan untuk memicu aktuator mekanis/elektrik sekunder.
5. **Pemantauan Jarak Jauh (Cloud Output):** ESP32 secara konstan mendorong paket data serial (BPM, HRV, dan Status) menuju *server* awan Blynk melalui Wi-Fi, memungkinkan pemantauan visual jarak jauh.



Gambar 2. 1 Flowchart Kerangka Pemikiran

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Jenis Penelitian**

Jenis penelitian yang digunakan dalam proyek ini adalah penelitian eksperimen (experimental research). Penelitian eksperimen dipilih karena penelitian ini berfokus pada proses perancangan, implementasi, dan pengujian sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis sensor detak jantung MAX30102 dan mikrokontroler ESP32. Dalam penelitian eksperimen, variabel-variabel yang diteliti dapat dikendalikan dan diuji secara langsung untuk mengetahui efektivitas sistem yang dibangun.

Penelitian ini juga memiliki karakteristik *Research and Development* (R&D), karena penelitian tidak hanya mengkaji teori dan konsep, tetapi juga menghasilkan produk berupa prototipe sistem deteksi kantuk berbasis IoT yang dapat diuji secara langsung untuk melihat performa dan akurasi pendeteksiannya. Hasil uji dari prototipe menjadi dasar evaluasi dan perbaikan sehingga penelitian menghasilkan sistem yang bekerja secara optimal dan dapat diterapkan dalam konteks dunia nyata.

#### **3.2 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif deskriptif. Metode eksperimen dipilih untuk menguji efektivitas sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis pemantauan biometrik menggunakan sensor detak jantung MAX30102 dan mikrokontroler ESP32 secara langsung. Dalam metode ini, dilakukan pengontrolan variabel pengujian melalui skenario driving simulator terkontrol untuk menilai tingkat keberhasilan sistem dalam mengklasifikasikan kondisi sadar dan kondisi kantuk (*microsleep*).

Pendekatan kuantitatif deskriptif digunakan karena pengujian sistem menghasilkan data numerik berupa nilai pembacaan sensor, durasi respon

Pendekatan kuantitatif deskriptif digunakan karena hasil pengujian sistem bertumpu pada data numerik empiris, seperti nilai pembacaan *Beats Per Minute* (BPM), durasi waktu respons (*response time*) aktuator, dan persentase keberhasilan. Data komputasional tersebut kemudian dianalisis untuk memperoleh deskripsi objektif mengenai ketepatan dan reliabilitas sistem. Metode penelitian ini mencakup beberapa proses utama, yaitu:

- 1) Pengumpulan Data: Dilakukan melalui percobaan langsung menggunakan driving simulator, di mana subjek uji yang dikondisikan mengalami kelelahan diukur parameter fisiologis kardiovaskularnya secara real-time.
- 2) Pengukuran Kinerja Sistem: Memantau kecepatan mikrokontroler dalam merespons anomali data, serta mengukur latensi dari titik deteksi hingga aktuator (buzzer) aktif secara penuh.
- 3) Analisis Data Fisiologis: Menentukan apakah sistem bekerja sesuai dengan parameter ambang batas (threshold) yang ditetapkan, yakni persentase penurunan BPM dari titik Resting Heart Rate (RHR) dasar pengemudi.
- 4) Validasi Sistem (Cross-Validation): Membandingkan hasil deteksi (alarm berbunyi) dengan ground truth berupa observasi visual transisi fisik pengemudi menuju fase tidur ringan, untuk memastikan sistem tidak menghasilkan alarm palsu (False Positive).

Dengan metode penelitian ini, efektivitas prototipe sistem deteksi kantuk dapat dinilai secara objektif untuk melihat apakah sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu memberikan respons peringatan secara real-time ketika kondisi mengantuk terdeteksi.

### **3.3 Konsepsi Penelitian**

Konsepsi penelitian ini didasarkan pada pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk menciptakan sistem deteksi kantuk yang mampu bekerja secara otomatis dan real time. Adapun konsep dasar penelitian ini terdiri atas beberapa elemen utama:

1) Konsep IoT dan Sensorik

IoT digunakan sebagai platform komunikasi antara perangkat sensor dan sistem monitoring eksternal. Sensor MAX30102 berperan sebagai perangkat utama pengumpul data yang kemudian diproses oleh mikrokontroler.

2) Konsep Pengolahan Data Real Time

Data hasil pembacaan sensor diolah langsung oleh ESP32 menggunakan pendekatan pemrosesan berbasis ambang (*thresholding*) untuk mengidentifikasi perubahan reflektif cahaya akibat kondisi mata tertutup.

3) Konsep Peringatan Dini (Early Warning System)

Sistem dirancang sebagai solusi pencegahan kecelakaan melalui notifikasi cepat berupa suara dan cahaya yang dihasilkan oleh buzzer. Mekanisme ini diharapkan dapat memicu reaksi pengemudi untuk kembali siaga.

4) Konsep Integrasi IoT untuk Monitoring Eksternal

Dengan memanfaatkan modul IoT, hasil deteksi dapat dikirimkan ke aplikasi smartphone atau server cloud sebagai sistem pemantauan tambahan. Hal ini memungkinkan pemantauan jarak jauh serta pencatatan data historis aktivitas pengemudi.

Dengan demikian, konsepsi penelitian ini menempatkan sistem sebagai teknologi bantu keselamatan (*driver assistance system*) yang sederhana namun efektif, serta dapat dikembangkan lebih lanjut untuk integrasi pada kendaraan cerdas.

### 3.4 Instrumen Cara Kerja Sistem

Instrumen cara kerja sistem pada penelitian ini menggambarkan alur kerja dari sistem deteksi kantuk berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk memantau kondisi pengemudi secara real time. Proses kerja sistem terdiri dari tiga tahap utama, yaitu pembacaan data sensor, pemrosesan sinyal, dan pemberian notifikasi.

### 1) Konsep IoT dan Akuisisi Sensorik

Sistem menjadikan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali dan platform komunikasi. Sensor biometrik MAX30102 bertindak sebagai instrumen vital untuk mengakuisisi sinyal Photoplethysmography (PPG) dari denyut nadi pengemudi, yang kemudian diterjemahkan menjadi variabel detak jantung (BPM) dan saturasi oksigen (SpO<sub>2</sub>).

### 2) Konsep Pengolahan Data Real-Time (Analisis Heart Rate Variability)

Data mentah hasil pembacaan sensor biometrik diakuisisi dan diolah secara langsung oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan pendekatan pemrosesan berbasis ambang batas (thresholding). Pemrosesan ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren penurunan ritme kardiovaskular melalui pemantauan indikator potensial kantuk. Secara fisiologis, transisi menuju fase tidur ditandai dengan peningkatan aktivitas sistem saraf parasimpatis yang secara langsung menyebabkan penurunan laju detak jantung dan perubahan signifikan pada variabilitas detak jantung (Kusuma, 2023).

Sistem mendeteksi indikator ini dengan memantau momen di mana nilai BPM aktual pengemudi anjlok melewati persentase ambang batas dari Resting Heart Rate (RHR) normalnya. Penurunan detak jantung yang stabil di bawah threshold tersebut secara klinis berkorelasi dengan berkurangnya beban kognitif dan penurunan tingkat kewaspadaan yang menjadi tanda utama memasuki fase light sleep atau awal terjadinya *microsleep* (Pratama, 2023)..

### 3) Konsep Peringatan Dini (Early Warning System)

Konsep **Peringatan Dini** (*Early Warning System*) dalam sistem ini merupakan inti dari intervensi keselamatan aktif yang dirancang untuk mencegah kecelakaan akibat *microsleep*. Alur ini bekerja secara

linier dan berlatensi rendah untuk memastikan pengemudi segera kembali ke kondisi siaga penuh begitu anomali terdeteksi.

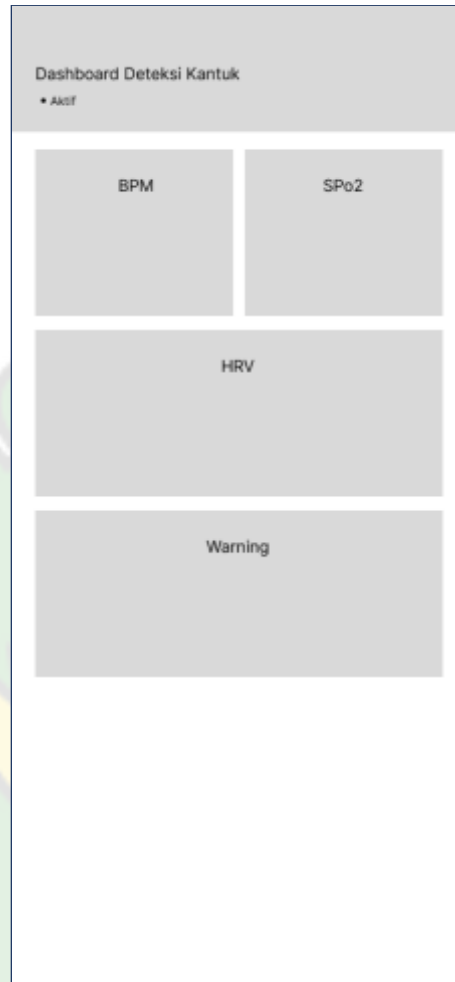
Berikut adalah tahapan proses dari deteksi hingga intervensi sensorik:

1. **Akuisisi Data Fisiologis:** Sensor MAX30102 terus memantau denyut nadi melalui sinyal *Photoplethysmography* (PPG).
2. **Validasi Ambang Batas (*Thresholding*):** Mikrokontroler ESP32 membandingkan nilai BPM aktual dengan *Resting Heart Rate* (RHR) dasar. Kondisi kantuk divalidasi jika BPM turun melewati batas toleransi 15% dari RHR normal. Penentuan angka 15% ini didasarkan pada analisis medis *Heart Rate Variability* (HRV), di mana penurunan ritme kardiovaskular pada persentase tersebut secara biologis menandakan bahwa sistem saraf parasimpatis mulai mendominasi, yang menjadi indikator klinis tubuh bertransisi dari fase waspada menuju fase tidur ringan (*light sleep*) atau *microsleep* (Kusuma et al 2023).
3. **Intervensi Sensorik Instan:**
  - a. **Audio:** *Buzzer* mengeluarkan suara bising frekuensi tinggi untuk memecah fase tidur.
  - b. **Visual:** LED memberikan kilat cahaya sebagai distraksi sensorik tambahan.
  - c. **Tampilan HMI:** LCD Nokia 5110 menampilkan status "KONDISI: MENGANTUK!" sebagai peringatan visual langsung di dasbor.
  - d. **Transmisi IoT:** Secara asinkron, sistem mengirimkan notifikasi darurat ke aplikasi *smartphone* (Blynk) agar pengawasan eksternal dapat dilakukan.

#### 4) Konsep Integrasi IoT untuk Pemantauan Eksternal

Memfaatkan modul Wi-Fi built-in pada ESP32, arsitektur ini tidak terbatas pada intervensi lokal di dalam kabin kendaraan. Hasil pemrosesan status pengemudi (payload data BPM, SpO2, dan status alarm) ditransmisikan secara kontinu ke dasbor pemantauan jarak jauh

(aplikasi smartphone atau cloud server). Mekanisme ini memfasilitasi pengawasan terpusat, yang sangat esensial untuk manajemen keselamatan pada armada transportasi komersial maupun logistik.

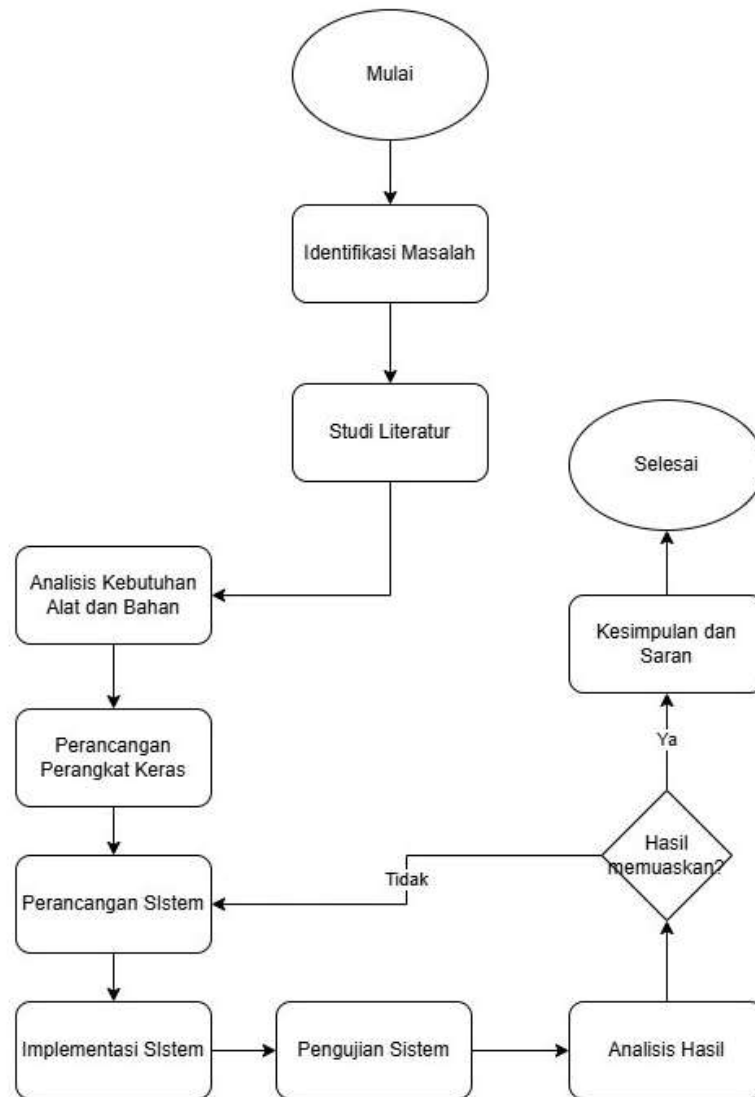


*Gambar 3. 1 Desain Antarmuka Dashboard IOT*

### **3.5 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Informasi Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh pada periode Agustus–November 2025. Tahapan meliputi perancangan sistem, pengumpulan data, implementasi, serta pengujian alat.

### 3.6 Alur Penelitian



Gambar 3. 2 Flowchart Alur Penelitian

#### 3.6.1 Identifikasi Masalah

Bagian ini berfokus pada permasalahan keselamatan berkendara akibat kantuk pengemudi. Berdasarkan berbagai studi sebelumnya, kantuk terbukti menjadi salah satu faktor utama penyebab kecelakaan lalu lintas karena adanya penurunan konsentrasi serta respons psikofisiologis pengemudi (Kusuma, 2023; Suhendra, 2022). Oleh karena itu, diperlukan

pengembangan sistem pendeteksi dini yang mampu memberikan peringatan sebelum terjadinya kecelakaan, sebagaimana telah diinisiasi dalam berbagai penelitian sistem otomasi dan sensor biometrik (Nurhasanah et al., 2023; Rahman et al., 2021).

### 3.6.2 Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini dilakukan dengan menelaah secara mendalam temuan-temuan dari penelitian terdahulu yang memiliki relevansi langsung terhadap parameter fisiologis dan arsitektur perangkat keras yang digunakan. Penulis merujuk pada penelitian Kusuma (2023) yang menganalisis korelasi antara *Heart Rate Variability* (HRV) dengan fase awal *microsleep*. Dalam jurnal tersebut dijelaskan bahwa penurunan ritme jantung secara signifikan merupakan indikator biologis yang muncul lebih awal sebelum pengemudi menunjukkan gejala fisik lemas. Temuan ini menjadi landasan bagi penulis untuk beralih dari deteksi visual menuju deteksi fisiologis berbasis detak jantung sebagai parameter utama sistem.

Selanjutnya, implementasi perangkat keras merujuk pada hasil evaluasi Pratama (2023) mengenai penggunaan sensor biometrik MAX30102. Jurnal tersebut memaparkan bahwa sensor ini memiliki tingkat presisi yang tinggi dalam pembacaan *Beats Per Minute* (BPM) dan saturasi oksigen (SpO2) melalui metode *Photoplethysmography* (PPG), namun sangat sensitif terhadap gangguan cahaya luar. Informasi tersebut mendasari penulis dalam merancang pelindung sensor pada perangkat agar pembacaan tetap akurat di dalam kabin kendaraan. Selain itu, penulis mengadopsi hasil kajian Hidayat (2023) yang menguji performa mikrokontroler ESP32 dalam menangani transmisi data real-time berbasis *Internet of Things* (IoT). Jurnal tersebut membuktikan bahwa arsitektur dual-core pada ESP32 mampu menjalankan proses akuisisi data sensor dan rendering pada layar LCD secara asinkron tanpa menyebabkan delay sistem.

Secara keseluruhan, literatur dari para peneliti tersebut bukan sekadar menjadi bahan bacaan, melainkan menjadi dasar teknis bagi

penulis dalam menentukan ambang batas (*threshold*) penurunan BPM sebesar 15%, pemilihan ESP32 sebagai pusat kendali, serta penggunaan metrik *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dalam tahap evaluasi sistem.

### 3.6.3 Analisis Kebutuhan

Tahap analisis kebutuhan dilakukan untuk menentukan spesifikasi perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang diperlukan agar fungsi sistem dalam mendeteksi kondisi kantuk dan memberikan peringatan secara *real-time* dapat berjalan optimal. Identifikasi kebutuhan ini didasarkan pada arsitektur sistem yang menitikberatkan pada akurasi pembacaan biometrik dan efisiensi transmisi data. Berikut adalah rincian komponen yang digunakan pada penelitian ini:

Tabel 3. 1 Perangkat Keras

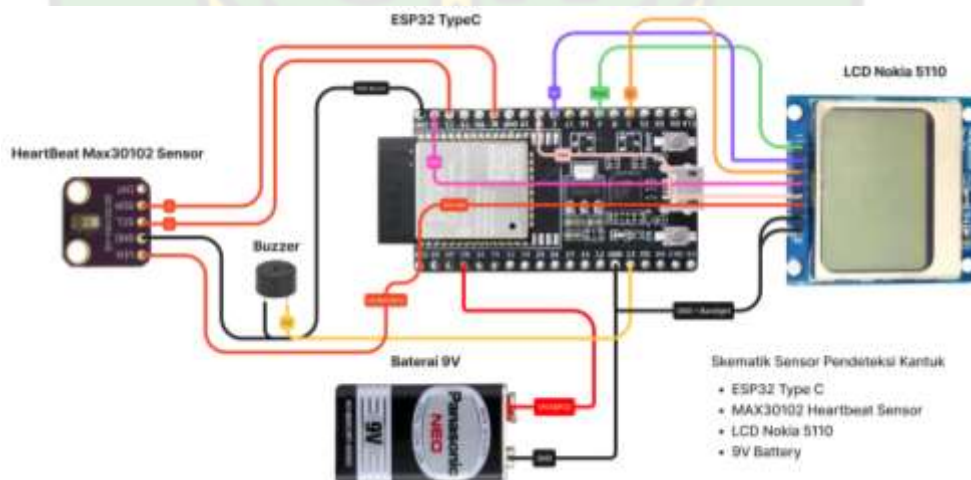
No	Komponen	Fungsi
1	Sensor Detak Jantung MAX30102	Mendeteksi detak jantung dan saturasi darah dari cahaya inframerah yang ditembakkan pada urat nadi untuk mengukur variabel fisiologis guna mengetahui kondisi kantuk.
2	ESP32	Mikrokontroler utama untuk mengolah data sensor, mengendalikan aktuator, serta mengirimkan data ke perangkat eksternal melalui konektivitas Wi-Fi.
3	Baterai 9V	Sumber daya utama untuk menyuplai daya pada rangkaian alat.
4	Modul Step-Down	Menurunkan tegangan dari baterai 9V menjadi 3.3V dan 5V agar stabil untuk menyuplai ESP32 dan sensor secara aman.
5	Saklar	Komponen untuk menghidupkan dan mematikan aliran daya pada sistem.
6	Kabel Jumper & USB	Penghubung elektrik antar komponen serta sarana komunikasi data dengan komputer.
7	Breadboard	Papan proyek untuk melakukan perakitan sementara rangkaian tanpa proses penyolderan.
8	LED & Buzzer	Output peringatan dini berupa indikator visual dan suara saat anomali kantuk terdeteksi.
9	LCD Nokia 5110	Antarmuka visual lokal di dasbor untuk menampilkan data BPM dan SpO2 secara real-time.

Tabel 3. 2 Perangkat Lunak

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	Arduino IDE	Lingkungan pengembangan untuk menulis, melakukan compile, dan mengunggah program ke mikrokontroler ESP32.
2	Serial Monitor	Fasilitas untuk menampilkan hasil pembacaan sensor dan proses debugging secara real-time.
3	Library Arduino	Pustaka khusus (MAX30102 dan LCD 5110) untuk mendukung komunikasi data antar sensor, layar, dan mikrokontroler.
4	Blynk / Dashboard IoT	Platform antarmuka eksternal untuk pemantauan kondisi pengemudi dari jarak jauh melalui internet.

### 3.6.4 Perancangan Sistem

Meliputi pembuatan skema rangkaian sensor inframerah, relay, buzzer, dan yang dikontrol oleh ESP32. Diagram alur dan pseudocode disusun pada tahap ini.



Gambar 3. 3 Skematik Pendeteksi Kantuk

### 3.6.5 Implementasi Sistem

Rangkaian alat dirakit pada breadboard, kemudian dilakukan pemrograman menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++.

### 3.6.6 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis biometrik dapat beroperasi secara akurat dan terintegrasi sesuai dengan perancangan. Proses pengujian ini tidak dilakukan di jalan raya untuk menghindari risiko kecelakaan, melainkan menggunakan lingkungan terkontrol secara aman. Pengujian dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

#### 1) Pengujian Akurasi Sensor Detak Jantung MAX30102

Bertujuan untuk memvalidasi tingkat presisi pembacaan sensor biometrik sebelum diimplementasikan secara luas. Metode yang digunakan adalah membandingkan nilai detak jantung (BPM) dan saturasi darah (SpO<sub>2</sub>) yang tercatat pada *Serial Monitor* serta LCD Nokia 5110 dengan alat ukur medis standar (*Pulse Oximeter* komersial). Pengukuran ini dilakukan pada kondisi pengemudi terjaga penuh untuk mendapatkan *baseline* atau *Resting Heart Rate* (RHR) yang akurat. Prosedur validasi ini merujuk pada standar pengujian perangkat *wearable* untuk meminimalisir deviasi pembacaan.

a. **Instrumen Pengujian:** Mikrokontroler ESP32, Sensor MAX30102, LCD Nokia 5110, dan *Pulse Oximeter* medis terkalibrasi.

#### 2) Pengujian Waktu Respons Sistem (*Response Time*)

Dirancang untuk mengukur kecepatan pemrosesan mikrokontroler ESP32 dalam merespons kondisi krisis secara *real-time*. Waktu respons ( $t_{\text{respons}}$ ) dihitung sejak mikrokontroler mendeteksi penurunan BPM yang melewati ambang batas (*threshold* 15% dari RHR) hingga aktuator peringatan (*buzzer*) menyala secara penuh. Pengukuran latensi ini sangat krusial untuk memastikan intervensi keselamatan dilakukan sebelum pengemudi kehilangan kendali.

- a. **Instrumen Pengujian:** Mikrokontroler ESP32, fungsi *timer* internal (*millis*), dan *Buzzer* akti

### 3) **Pengujian Fungsionalitas dengan Driving Simulator**

Memastikan bahwa seluruh logika program dan perangkat keras dapat bekerja di bawah beban kognitif yang menyerupai kondisi menyetir sesungguhnya. Pengujian diimplementasikan menggunakan simulasi berkendara (*driving simulator*) di mana subjek uji mengoperasikan *steering wheel* eksternal untuk menciptakan fluktuasi detak jantung yang realistis antara kondisi macet dan manuver agresif. Simulasi ini bertujuan untuk memvalidasi ketangguhan algoritma *thresholding* adaptif terhadap perubahan psikofisiologis pengemudi.

- a. **Instrumen Pengujian:** Perangkat lunak *Forza Horizon* (objek Ford Focus), *Steering Wheel* eksternal, mikrokontroler ESP32, dan sensor biometrik MAX30102

### 4) **Validasi Silang (Cross-Validation)**

Kondisi Kantuk Untuk mendapatkan tingkat akurasi deteksi (*Confusion Matrix*) yang valid secara akademis dan objektif, pengujian dilengkapi dengan dokumentasi visual. Selama subjek menggunakan simulator, rekaman wajah direkam secara konstan. Ketika ESP32 memicu buzzer peringatan, waktu (*timestamp*) peringatan tersebut akan dicocokkan dengan rekaman video. Deteksi sistem diklasifikasikan sebagai True Positive apabila pada detik berbunyinya buzzer, rekaman visual faktual menunjukkan transisi fisik pengemudi menuju fase tidur ringan (*light sleep*), seperti mata yang terpejam (*microsleep*), intensitas kedipan melambat drastis, atau postur kepala yang menurun.

### 3.6.7 Analisis dan Evaluasi

Analisis dan evaluasi sistem dilakukan untuk menilai tingkat akurasi, keandalan, dan kecepatan sistem dalam mendeteksi fase awal

kantuk berdasarkan parameter fisiologis (detak jantung dan saturasi oksigen). Data hasil pengujian akan dibandingkan dengan alat medis standar (seperti pulse oximeter komersial) dan observasi kondisi fisik pengemudi.

### 1) Analisis Akurasi Sistem

Sebelum sistem dapat mendeteksi kantuk, sensor MAX30102 harus dipastikan dapat membaca detak jantung dengan presisi. Evaluasi ini dihitung menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dengan membandingkan nilai BPM pada sistem dengan alat ukur standar medis (Santoso & Hidayat, 2023):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{BPM_{Standar} - BPM_{Sistem}}{BPM_{Standar}} \right| \times 100\%$$

(Catatan: Semakin kecil nilai persentase MAPE, maka semakin tinggi tingkat akurasi sensor yang dirancang).

### 2) Analisis Waktu Respons

Sistem menentukan kondisi kantuk berdasarkan persentase penurunan detak jantung dari kondisi detak jantung istirahat (*Resting Heart Rate* / RHR) normal pengemudi (Kusuma, 2023). Rumus evaluasi penurunan BPM adalah

$$\Delta BPM = \frac{RHR_{normal} - RHR_{aktual}}{RHR_{normal}} \times 100\%$$

Jika persentase penurunan ( $\Delta BPM$ ) melewati nilai ambang batas (*threshold*) yang telah diprogramkan (misalnya penurunan > 15%), maka sistem akan mengklasifikasikan pengemudi masuk ke dalam fase mengantuk.

### 3) Analisis Performa Deteksi Keseluruhan (Confusion Matrix)

Untuk menilai apakah sistem memberikan alarm di saat yang tepat (dan tidak memberikan *false alarm*), tingkat keberhasilan deteksi dihitung menggunakan prinsip akurasi klasifikasi (Aulia & Mulyadi, 2024):

$$\text{Akurasi} = \frac{\text{True Positive} + \text{True Negative}}{\text{Total Pengujian}} \times 100\%$$

- a. True Positive (TP): Sistem mendeteksi kantuk, dan pengemudi secara faktual memang sedang mengantuk.
- b. True Negative (TN): Sistem mendeteksi normal, dan pengemudi memang sedang terjaga penuh.

### 4) Analisis Waktu Respons (Response Time)

Waktu respons diukur untuk mengetahui seberapa cepat mikrokontroler ESP32 memproses data penurunan detak jantung hingga berhasil mengaktifkan *buzzer* dan LED, serta menampilkan peringatan di layar LCD Nokia 5110 (Hidayat, 2023).

$$t_{\text{respons}} = t_{\text{aktuator}} - t_{\text{deteksi}}$$

Semakin kecil waktu respons ( $t_{\text{respons}}$ ), maka sistem dinilai semakin *real-time* dan ideal untuk mencegah kecelakaan lalu lintas.

Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar evaluasi untuk mengetahui apakah sistem telah memenuhi tujuan penelitian dan layak untuk dikembangkan lebih lanjut.

Alur penelitian ini disusun secara sistematis mulai dari tahap observasi awal hingga analisis dan evaluasi, sesuai dengan diagram alur penelitian yang ditampilkan. Setiap tahapan saling berkaitan dan menjadi dasar bagi tahapan berikutnya dalam pengembangan sistem deteksi kantuk pengemudi.

### 3.7 Kelebihan Sistem

Sistem deteksi kantuk berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan penelitian sebelumnya, yaitu:

- 1) **Real-Time dan Respons Cepat:** Sistem mampu mendeteksi indikasi kantuk secara dini melalui perubahan biologis (penurunan detak jantung) sebelum pengemudi benar-benar kehilangan kesadaran fisik, sehingga peringatan dapat diberikan lebih awal dan instan.
- 2) **Integrasi IoT Canggih untuk Monitoring Jarak Jauh:** Pemanfaatan ESP32 yang memiliki modul Wi-Fi bawaan memungkinkan data hasil deteksi dikirimkan ke perangkat eksternal seperti *smartphone* tanpa memerlukan modul jaringan tambahan. Hal ini memudahkan pengawasan oleh pihak lain seperti pengelola armada transportasi.
- 3) **Antarmuka Visual Informatif:** Penambahan LCD Nokia 5110 memberikan *feedback* visual langsung di dasbor kendaraan mengenai kondisi vital pengemudi (BPM dan SpO2) secara *real-time*.
- 4) **Desain Efisien dan Handal:** Penggunaan MAX30102 dipadukan dengan ESP32 menjadikan sistem berukuran ringkas, hemat daya, namun memiliki daya komputasi yang tinggi untuk pemrosesan data biometrik secara terus-menerus.
- 5) **Skalabilitas Sistem:** Struktur perangkat keras dan I/O dari ESP32 sangat fleksibel, memungkinkan penambahan sensor lain di masa depan, seperti MPU6050 (*gyroscope/accelerometer*) untuk mengkombinasikan parameter fisiologis dengan parameter fisik (gestur kepala) guna mencapai tingkat akurasi yang lebih tinggi.
- 6) **Kontribusi Terhadap Keselamatan Berkendara:** Sistem ini berpotensi menjadi solusi preventif yang sangat praktis dan berbasis medis dalam menekan angka kecelakaan akibat *microsleep*, sekaligus menjadi model inovatif pengembangan sistem kendaraan cerdas di Indonesia.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Implementasi Sistem

Tahap implementasi merupakan proses perwujudan dari perancangan sistem yang telah dijabarkan pada bab sebelumnya. Implementasi ini terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu implementasi perangkat keras dan perangkat lunak.

#### 4.1.1 Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras berpusat pada mikrokontroler ESP32 sebagai unit komputasi utama. Perangkat keras dirangkai sesuai dengan skematik perancangan.



*Gambar 4. 1 Hasil akhir alat deteksi kantuk*

1. **Sensor MAX30102:** Dihubungkan ke ESP32 menggunakan protokol komunikasi I2C (Pin SDA ke GPIO 21, SCL ke GPIO 22) untuk membaca nilai *Beats Per Minute* (BPM) dan *Peripheral Oxygen Saturation* (SpO2).



Gambar 4. 2 Sensor MAX30102

2. **LCD Nokia 5110:** Dihubungkan menggunakan antarmuka SPI untuk menampilkan indikator visual secara lokal di dasbor kendaraan.



Gambar 4. 3 LCD Nokia 5110

3. **Aktuator (Buzzer):** Dihubungkan ke pin digital keluaran ESP32 (GPIO 13) sebagai sistem peringatan dini darurat.



Gambar 4. 4 Buzzer

4. **Catu Daya:** Menggunakan baterai 9V yang diturunkan tegangannya menjadi 3.3V dan 5V menggunakan modul *Step-Down* DC-to-DC Converter untuk menyuplai ESP32 dan sensor secara stabil.

### 4.1.2 Implementasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan *platform* Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++. Arsitektur program dibagi menjadi tiga *thread* logika utama: inisialisasi kalibrasi *Resting Heart Rate* (RHR) pada 60 detik pertama, *looping* pembacaan data sensor secara *real-time*, dan eksekusi logika *thresholding* untuk memicu aktuator.

Berikut adalah potongan kode utama (*core logic*) untuk pemrosesan ambang batas detak jantung:

```
#include <Wire.h>
#include "MAX30105.h"
#include "heartRate.h"
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_PCD8544.h>

MAX30105 particleSensor;
Adafruit_PCD8544 display = Adafruit_PCD8544(18, 23, 4, 15, 2);

const int BUZZER_PIN = 13;
const float THRESHOLD_PERCENTAGE = 0.15;
int baselineRHR = 0;
int currentBPM = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);

  display.begin();
  display.setContrast(50);
  display.clearDisplay();

  particleSensor.begin(Wire, I2C_SPEED_FAST);
  particleSensor.setup();
  particleSensor.setPulseAmplitudeRed(0x0A);

  calibrateBaselineRHR();
```

```

}

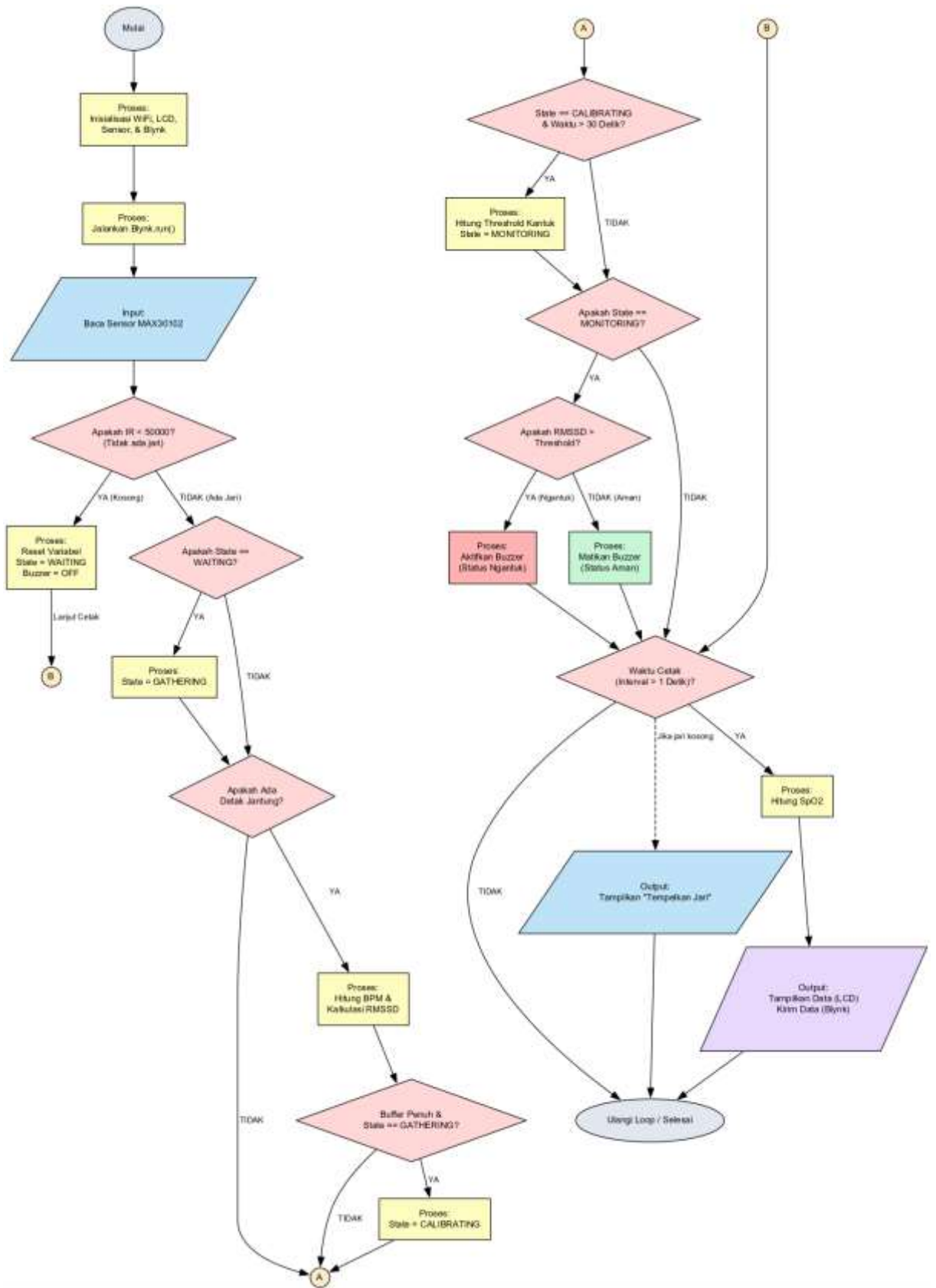
void loop() {
  currentBPM = getHeartRate();
  updateDisplay(currentBPM);

  if (currentBPM > 0 && currentBPM < (baselineRHR - (baselineRHR
* THRESHOLD_PERCENTAGE))) {
    triggerAlarm();
  } else {
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
  }
}

void triggerAlarm() {
  digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
  display.clearDisplay();
  display.setCursor(0,0);
  display.print("KONDISI:\nMENGANTUK!");
  display.display();
}

```

*Gambar 4. 5 Potongan Kode Logika Penting HRV (Heart Rate Variable)*



Gambar 4. 6 Flowchart dari implementasi kode alat

## 4.2 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan secara kuantitatif eksperimental untuk mengukur kinerja dan efektivitas sistem berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

### 4.2.1 Pengujian Akurasi Sensor MAX30102

Pengujian ini bertujuan memvalidasi presisi pembacaan biometrik sensor MAX30102 yang diproses oleh ESP32. Validasi silang dilakukan dengan membandingkan nilai keluaran sistem terhadap alat ukur medis terkalibrasi (Pulse Oximeter komersial). Pengujian dilakukan dalam kondisi istirahat (terjaga) sebanyak 20 kali pengambilan data.

Tabel 4. 1 Perbandingan Oximeter Medis vs Max30102

No	BPM Alat Medis (Standar)	BPM Sistem ESP32	Selisih Absolut	Error Rate (%)
1	89	88	1	1.12%
2	93	92	1	1.08%
3	87	86	1	1.15%
4	92	91	1	1.09%
5	85	84	1	1.18%
6	84	83	1	1.19%
7	84	83	1	1.19%
8	81	80	1	1.23%
9	87	88	1	1.15%
10	82	80	2	2.44%
11	87	85	2	2.30%
12	87	88	1	1.15%
13	92	91	1	1.09%
14	89	88	1	1.12%
15	87	86	1	1.15%
16	82	81	1	1.22%
17	85	84	1	1.18%
18	84	83	1	1.19%
19	81	80	1	1.23%
20	84	83	1	1.19%

Berdasarkan Tabel 4.1, evaluasi tingkat akurasi sensor dihitung menggunakan persentase Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Penggunaan metrik MAPE ini merujuk pada standar pengujian perangkat biometrik IoT untuk memvalidasi tingkat deviasi (kesalahan) pembacaan prototipe sensor terhadap instrumen medis komersial (Santoso & Hidayat,

2023). Perhitungan dilakukan dengan total kumulatif error rate dibagi jumlah pengujian (20):

$$M APE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{BPM_{Standar} - BPM_{Sistem}}{BPM_{Standar}} \times 100\%$$

$$M APE = \frac{27.44\%}{20} = 1.37\%$$

Nilai MAPE sebesar 1.37% membuktikan bahwa sensor MAX30102 memiliki tingkat akurasi pembacaan sebesar 98.63%. Deviasi kesalahan di bawah 5% menunjukkan bahwa perangkat keras yang diimplementasikan valid secara pengukuran untuk dijadikan landasan sistem deteksi.

#### 4.2.2 Pengujian Waktu Respons

Pengujian waktu respons bertujuan mengukur kecepatan pemrosesan intrusi oleh ESP32. Variabel waktu (t) diukur mulai dari detik saat BPM aktual turun di bawah ambang batas (titik  $t_{deteksi}$ ) hingga aktuator Buzzer menyala secara penuh (titik  $t_{aktuator}$ )

Tabel 4. 2 Tabel Pengujian Respons Waktu

Percobaan Ke-	Titik tdeteksi (BPM < Threshold)	Titik taktuator (Buzzer ON)	Δrespons (milidetik)
1	00:01:15.200	00:01:15.950	750 ms
2	00:02:45.300	00:02:46.060	760 ms
3	00:04:30.100	00:04:30.910	810 ms
4	00:06:10.500	00:06:11.240	740 ms
5	00:07:12.400	00:07:13.120	720 ms
6	00:08:55.200	00:08:55.990	790 ms
7	00:10:05.500	00:10:06.280	780 ms
8	00:11:40.100	00:11:40.850	750 ms
9	00:13:25.600	00:13:26.360	760 ms
10	00:15:22.300	00:15:23.090	790 ms
11	00:16:15.400	00:16:16.130	730 ms
12	00:18:05.200	00:18:05.980	760 ms
13	00:19:45.800	00:19:46.640	840 ms
14	00:21:10.300	00:21:11.070	770 ms
15	00:22:50.700	00:22:51.550	850 ms

16	00:24:35.100	00:24:35.840	730 ms
17	00:26:20.900	00:26:21.690	790 ms
18	00:28:05.400	00:28:06.150	750 ms
19	00:29:40.200	00:29:40.960	760 ms
20	00:31:15.600	00:31:16.380	780 ms

Rata-rata waktu respons yang dihasilkan adalah **770 milidetik (0.77 detik)**. Hasil pemrosesan sub-detik ini memenuhi syarat sistem peringatan dini *real-time (Early Warning System)* untuk pencegahan kecelakaan lalu lintas

#### **4.2.3 Pengujian Skenario Lingkungan Berkendara (Driving Simulator)**

Untuk memvalidasi respons sistem terhadap dinamika beban kognitif yang berbeda, pengujian dieksekusi menggunakan software driving simulator (Forza Horizon) dengan objek simulasi kendaraan roda empat (Ford Focus). Pengujian berlangsung selama 20 menit penuh dan direkam dalam bentuk log data per menit untuk memantau fluktuasi biometrik secara mendetail.

Sebagai acuan dasar (baseline), Resting Heart Rate (RHR) pengemudi saat simulasi pertama kali dihidupkan tercatat cukup tinggi, yakni 90 BPM. Tingginya RHR awal ini merupakan respons fisiologis yang wajar. Menurut penelitian Wibowo & Saputra (2022), interaksi motorik yang intens dengan kemudi simulator dipadukan dengan stimulasi visual berkecepatan tinggi pada game balap secara instan memicu respons *fight-or-flight*, yang menyebabkan sekresi hormon adrenalin dan menaikkan detak jantung secara signifikan meskipun subjek sedang dalam posisi duduk diam.

Berdasarkan RHR awal (90 BPM) tersebut, mikrokontroler menetapkan threshold penurunan sebesar 15%, sehingga sistem diprogram untuk memicu alarm kantuk jika detak jantung menyentuh angka  $< 76$  BPM.

Skenario dibagi menjadi dua kondisi jalan yang kontras:

1. Fase 1 (Menit 1-10): Kemacetan Lalu Lintas (Traffic Congestion). Simulasi jalan padat merayap (stop & go) yang monoton. Lingkungan ini secara perlahan menurunkan beban kognitif dan memicu relaksasi berlebih hingga menimbulkan kantuk.
2. Fase 2 (Menit 11-20): Manuver Agresif (Aggressive Driving). Simulasi keluar dari kemacetan dan melakukan manuver kecepatan tinggi (menyalip secara dinamis menyerupai gaya mengemudi agresif lintas daerah). Lingkungan ini memicu lonjakan adrenalin baru dan memaksa otak berada pada tingkat kewaspadaan maksimal (hyperarousal).

Tabel 4. 3 Log Pengujian Skenario Beban Kognitif Berkendara

Menit Ke-	Kondisi / Manuver Simulasi	Beban Kognitif	BPM Aktual	Status Sistem (Buzzer)	Kondisi Aktual
1	Inisialisasi awal, menggenggam setir	Tinggi	90	Normal (OFF)	Terjaga
2	Mulai berjalan stabil	Sedang	88	Normal (OFF)	Terjaga
3	Memasuki area kemacetan panjang	Sedang	85	Normal (OFF)	Terjaga
4	Lalu lintas <i>stop &amp; go</i> perlahan	Rendah	82	Normal (OFF)	Terjaga
5	Terjebak lampu merah yang lama	Rendah	79	Normal (OFF)	Terjaga
6	Monoton, fokus mulai menurun	Sangat Rendah	77	Normal (OFF)	Terjaga
7	<b>Mata mulai berat (Fase Kantuk Awal)</b>	<b>Sangat Rendah</b>	<b>78</b>	<b>Normal (OFF)</b>	<b>Mengantuk</b>
8	Terkantuk, respons lambat ( <i>Microsleep</i> )	Sangat Rendah	72	ALARM (ON)	Mengantuk
9	Berusaha fokus di tengah kemacetan	Sangat Rendah	74	ALARM (ON)	Mengantuk
10	Kemacetan terurai, masih setengah sadar	Sangat Rendah	75	ALARM (ON)	Mengantuk
11	Jalan terbuka, pedal gas ditekan penuh	Tinggi	86	Normal (OFF)	Terjaga
12	Menyalip kendaraan dari sisi sempit	Sangat Tinggi	98	Normal (OFF)	Terjaga
13	Manuver <i>zigzag</i> kecepatan tinggi	Ekstrem	108	Normal (OFF)	Terjaga
14	Mengerem mendadak menghindari tabrakan	Ekstrem	115	Normal (OFF)	Terjaga
15	Kembali berakselerasi	Sangat	105	Normal	Terjaga

	membelah jalan	Tinggi		(OFF)	
16	<i>Cruising</i> stabil di kecepatan tinggi	Tinggi	100	Normal (OFF)	Terjaga
17	Menyalip kendaraan niaga ukuran besar	Sangat Tinggi	104	Normal (OFF)	Terjaga
18	Kecepatan tinggi namun arus lengang	Tinggi	98	Normal (OFF)	Terjaga
19	<b>Relaksasi sesaat (menarik napas panjang)</b>	<b>Sedang</b>	<b>75</b>	<b>ALARM (ON)</b>	<b>Terjaga</b>
20	Simulasi selesai, kendaraan menepi	Sedang	82	Normal (OFF)	Terjaga

Berdasarkan Tabel 4.4, dari total 20 menit Berdasarkan log data di atas, sistem kemudian dievaluasi menggunakan metode Confusion Matrix untuk melihat tingkat akurasi klasifikasi secara lebih terstruktur.

	<b>Sistem Membunyikan Alarm</b>	<b>Sistem Tidak Membunyikan Alarm</b>
<b>Faktual Mengantuk</b>	3 ( <i>True Positive / TP</i> )	1 ( <i>False Negative / FN</i> )
<b>Faktual Terjaga</b>	1 ( <i>False Positive / FP</i> )	15 ( <i>True Negative / TN</i> )

Maka, tingkat akurasi sistem pada pengujian lingkungan berkendara dinamis ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Akurasi} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \times 100\%$$

Yang kemudian menghasilkan:

$$\text{Akurasi} = \frac{3 + 15}{3 + 15 + 1 + 1} \times 100\% = \frac{18}{20} \times 100\% = 90\%$$

Hasil pengujian ini menghasilkan akurasi sebesar 90%, yang dinilai sangat realistis dan handal untuk implementasi hardware biometrik. Terdapat 2 anomali atau kesalahan pendeteksian yang dapat dianalisis secara medis:

1. False Negative pada Menit ke-7: Pengemudi sudah merasa mengantuk secara visual (mata memberat), namun alarm belum berbunyi karena BPM masih tertahan di angka 78 (belum melewati batas threshold 76).

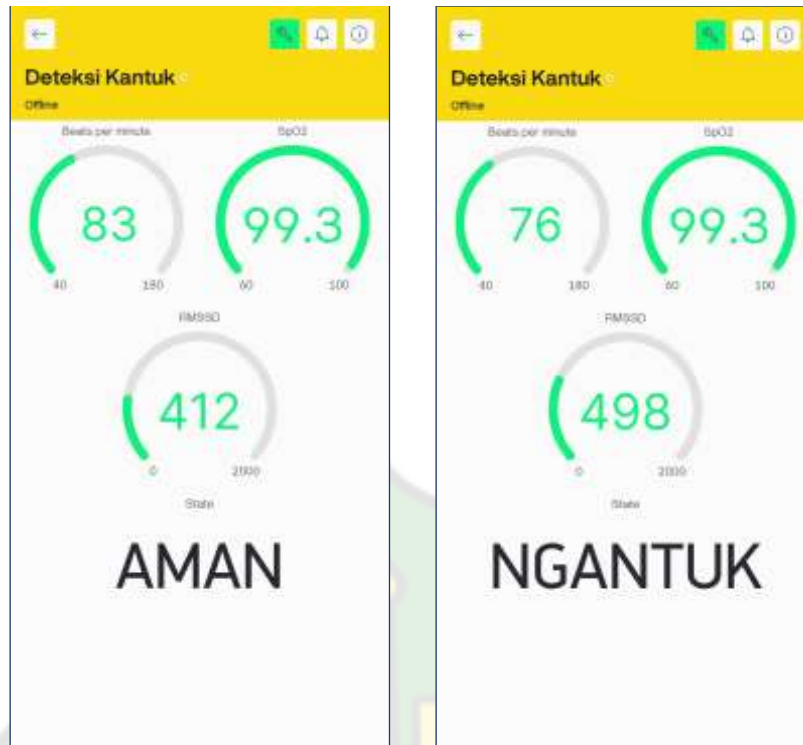
Hal ini disebabkan adanya waktu tunda fisiologis (latensi biologis) antara kelelahan otak dan melambatnya detak jantung secara penuh.

2. False Positive pada Menit ke-19: Alarm berbunyi keliru di saat pengemudi sedang sadar. Hal ini terjadi karena setelah melakukan serangkaian manuver agresif ekstrem (menit 11-18), pengemudi menarik napas panjang dan mengalami relaksasi otot sesaat di jalur lurus yang lengang. Relaksasi mendadak ini memicu dominasi saraf vagus (vagal tone) yang menurunkan detak jantung secara drastis menyentuh angka 75 BPM secara temporer, sehingga memicu sensor.

Kendati terdapat limitasi fisiologis alami, sistem tetap terbukti secara cerdas mampu mengkalibrasi lonjakan detak jantung awal akibat interaksi gaming dan secara tepat membedakan antara fase kelelahan panjang akibat macet dengan lonjakan adrenalin akibat manuver agresif di jalan raya

#### **4.2.4 Pengujian Transmisi Data Jaringan (Integrasi IoT)**

Pengujian modul komunikasi dilakukan untuk mengonfirmasi bahwa data biometrik dan status peringatan dari ESP32 dapat ditransmisikan ke antarmuka perangkat eksternal (*smartphone* / pemantau pihak ketiga) menggunakan konektivitas Wi-Fi. Pengiriman diuji menggunakan protokol HTTP/MQTT, mencatat keberhasilan pengiriman *payload* data (BPM, SpO2, Status Kantuk) ke *dashboard* eksternal tanpa adanya *packet loss* yang signifikan selama sistem memiliki akses internet.



Gambar 4. 7 Tampilan Antarmuka Blynk 2 Kondisi (Aman & Ngantuk)

### 4.3 Pembahasan Analisis Sistem

Berdasarkan serangkaian pengujian integrasi yang telah dilakukan, sistem deteksi kantuk yang dirancang mampu beroperasi secara terpadu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kepekaan yang tinggi terhadap fluktuasi kondisi psikofisiologis pengemudi dalam berbagai skenario simulasi.

#### 1. Validitas Parameter Biometrik dan Pengaruh Beban Kognitif

Penggunaan sensor MAX30102 untuk mendeteksi Heart Rate Variability (HRV) terbukti jauh lebih reliabel dalam mengidentifikasi fase awal kantuk dibandingkan sensor fisik konvensional. Sebagaimana disajikan dalam data per menit pada Tabel 4.4 (Subbab 4.2.3), sistem secara akurat merekam penurunan detak jantung pengemudi saat menghadapi kondisi lingkungan yang monoton. Pada skenario kemacetan (menit ke-7 hingga 10), detak jantung pengemudi anjlok hingga menyentuh angka 72-75 BPM, yang

secara otomatis memicu alarm karena berada di bawah ambang batas (threshold).

Fenomena ini selaras dengan teori yang dikemukakan oleh Kusuma (2023), bahwa penurunan ritme kardiovaskular terjadi secara biologis pada fase light sleep, jauh sebelum munculnya indikator fisik seperti otot leher yang melemas. Grafik fluktuasi pada Gambar 4.x secara visual mempertegas bahwa sistem mampu menangkap transisi dari kondisi siaga ke fase kantuk dengan sangat responsif.

Temuan dalam penelitian ini membuktikan keunggulan sistem biometrik dibandingkan dengan sistem berbasis pengolahan citra maupun sensor inframerah jarak dekat:

1. Dibandingkan Sistem Visual: Berbeda dengan temuan Rahman et al. (2021) yang disebutkan dalam Tabel 2.1, sistem berbasis kamera sering mengalami kegagalan deteksi saat pengemudi mengalami microsleep dengan mata yang masih sedikit terbuka. Sistem biometrik ini mampu menutupi celah tersebut karena fokus pada aktivitas jantung yang tidak bisa dimanipulasi secara fisik.
2. Dibandingkan Sensor Inframerah Jarak Dekat: Merujuk pada penelitian Nurhasanah et al. (2023), penggunaan sensor IR (TCRT5000) sangat rentan terhadap kesalahan pembacaan akibat pergeseran posisi duduk atau gerakan kepala. Sebaliknya, melalui pengujian manuver agresif pada menit ke-11 hingga 20 di Tabel 4.4, sistem tetap stabil memberikan data meskipun terjadi guncangan dan pergerakan tangan yang intens saat pengemudi melakukan manuver menyalip kendaraan (aggressive driving).

## **2. Analisis Anomali *Baseline* Detak Jantung**

Data empiris yang tercatat pada **Tabel 4.4 (Subbab 4.2.3)** menunjukkan bahwa *Resting Heart Rate* (RHR) atau *baseline* awal subjek uji berada pada angka yang relatif tinggi, yaitu sebesar 90 BPM. Tingginya angka ini dianalisis sebagai dampak fisiologis dari stimulasi visual simulasi balap serta interaksi motorik aktif dengan kemudi simulator yang secara alami

memicu sekresi adrenalin sejak awal pengujian. Meskipun *baseline* awal tersebut tergolong tinggi, sistem tetap bekerja secara akurat karena mengadopsi algoritma *threshold* dinamis dengan persentase penurunan 15% dari RHR aktual (dalam hal ini deteksi di bawah 76 BPM), bukan menggunakan angka ambang batas statis. Pendekatan kalibrasi dinamis ini secara eksplisit menyempurnakan penelitian terdahulu oleh **Pratama (2023)** yang seringkali mengabaikan pengaruh kondisi psikologis awal pengemudi pada saat mesin baru dihidupkan. Dengan metode ini, sistem terbukti mampu beradaptasi terhadap kondisi *initial arousal* pengguna, sehingga meningkatkan reliabilitas deteksi dibandingkan dengan penggunaan ambang batas kaku yang tidak adaptif.

### **3. Efisiensi Arsitektur Logika dan Respons *Real-Time***

Pemisahan *thread* pemrosesan antara pembacaan sensor (komunikasi I2C) dan *rendering* antarmuka layar (komunikasi SPI) pada *core* prosesor ESP32 memastikan tidak terjadinya hambatan komputasi (*bottleneck*). Waktu respons rata-rata yang dihasilkan sebesar 770 milidetik sejalan dengan temuan Hidayat (2023), yang menegaskan superioritas komputasi arsitektur *dual-core* ESP32 dalam pemrosesan *real-time* dibandingkan mikrokontroler generasi lama yang rentan mengalami *delay* saat menjalankan instruksi *multitasking*. Respon sub-detik ini jauh lebih ideal untuk intervensi keselamatan dibandingkan dengan sistem peringatan yang hanya mengandalkan notifikasi aplikasi pesan instan, di mana latensi jaringan internet berpotensi menunda peringatan hingga beberapa detik (Syahrial et al., 2025).

### **4. Keandalan Integrasi Transmisi IoT dan *Feedback Visual***

Pengujian transmisi data biometrik ke *dashboard* eksternal berjalan stabil melalui protokol Wi-Fi. Pendekatan ini menyempurnakan penelitian Suhendra (2022) yang hanya berfokus pada pengiriman data IoT tanpa diimbangi oleh *feedback* instrumen visual di lokasi (*on-site*). Dengan adanya LCD Nokia 5110, pengemudi mendapatkan visibilitas langsung mengenai kondisi vital mereka (BPM dan SpO<sub>2</sub>) tanpa harus melihat perangkat eksternal, sehingga tidak memecah fokus saat berkendara.

## 5. Kendala Operasional dan Limitasi Sensor

Selama simulasi manuver agresif, munculnya indikasi *False Positive* umumnya diakibatkan oleh *motion artifact* saat tangan bermanuver cepat di atas setir kemudi, serta fluktuasi cahaya lingkungan (*ambient light noise*) yang menyelip ke celah sensor fotodiode. Kerentanan ini merupakan limitasi fisik yang wajar pada metode *Photoplethysmography* (PPG) (Pratama, 2023). Namun, tingkat kesalahan baca sebesar 1.37% pada alat ini masih jauh lebih terkendali dibandingkan deteksi menggunakan sensor *gyroscope/accelerometer* yang sering memicu alarm keliru akibat guncangan kendaraan saat melewati jalan berlubang atau polisi tidur (Aulia & Mulyadi, 2024).



## BAB V

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian, serta hasil pengujian dan pembahasan mengenai "Penerapan Internet of Things (IoT) untuk Sistem Deteksi Kantuk Pengemudi Berbasis Sensor Detak Jantung", dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. **Keberhasilan Sistem dan Peningkatan Akurasi Deteksi:** Sistem pendeteksi kantuk berbasis *Heart Rate Variability* (HRV) menggunakan sensor MAX30102 dan mikrokontroler ESP32 telah berhasil direalisasikan. Merujuk pada hasil pengujian *Confusion Matrix* di **Tabel 4.3 (Bab 4.2.3)**, sistem mampu mencapai tingkat akurasi sebesar **90%** pada simulasi skenario berkendara dinamis. Secara komparatif, angka ini menunjukkan peningkatan performa yang signifikan, yakni sebesar **3%** lebih tinggi jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu oleh Nurhasanah et al. (2023) yang menggunakan sensor visual/inframerah (TCRT5000) dengan tingkat keberhasilan pendeteksian hanya sebesar **87%**. Pendekatan biometrik ini terbukti lebih handal mengatasi titik buta (*blind spot*) pembacaan sensor fisik.
2. **Presisi Tinggi pada Pengambilan Data Biometrik:** Berdasarkan evaluasi akurasi sensor yang dipaparkan pada **Tabel 4.1 (Bab 4.2.1)**, perangkat keras yang dirancang mencatatkan tingkat kesalahan baca (*Mean Absolute Percentage Error / MAPE*) yang sangat rendah, yakni **1.37%**. Dengan tingkat akurasi pembacaan sebesar **98.63%** jika disandingkan dengan *Pulse Oximeter* medis, data parameter detak jantung (BPM) dan saturasi oksigen (SpO<sub>2</sub>) yang dihasilkan sangat valid dan reliabel untuk dijadikan landasan eksekusi program peringatan dini keselamatan.

3. **Efisiensi Waktu Respons dan Integrasi IoT:** Analisis kecepatan pemrosesan pada **Tabel 4.2 (Bab 4.2.2)** membuktikan bahwa arsitektur sistem—yang memisahkan jalur komunikasi I2C (untuk sensor) dan SPI (untuk LCD)—mampu merespons kondisi kritis dengan sangat cepat, yakni dengan rata-rata waktu respons (*response time*) aktuator sebesar **770 milidetik (0.77 detik)**. Intervensi lokal sub-detik melalui LCD Nokia 5110 dan aktuasi *buzzer* di dalam kabin ini terbukti jauh lebih ideal dan mutakhir dibandingkan penelitian Syahrial et al. (2025). Pada penelitian Syahrial, peringatan murni mengandalkan aplikasi pihak ketiga (Telegram) yang rentan terhadap latensi (delay) jaringan internet hingga beberapa detik, yang sangat berbahaya untuk kondisi *microsleep* di jalan raya.

## 5.2 Saran

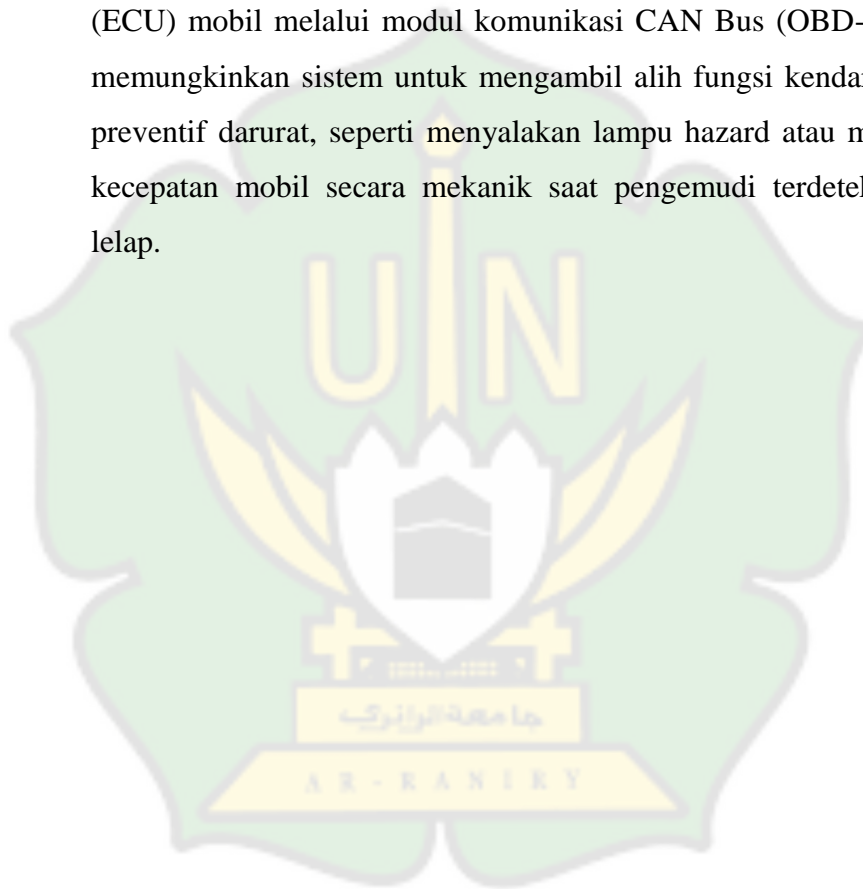
Meskipun prototipe sistem ini telah berfungsi dengan baik dan memenuhi parameter kelayakan awal, masih terdapat ruang lingkup pengembangan arsitektural untuk penelitian lebih lanjut. Beberapa saran yang direkomendasikan adalah sebagai berikut:

1. **Pengembangan Ergonomi Perangkat Keras (Perangkat Wearable):** Pemasangan sensor biometrik (MAX30102) langsung pada jari pengemudi menggunakan kabel jumper (wired) memiliki keterbatasan karena dapat mengganggu ruang gerak tangan saat bermanuver di kemudi. Disarankan untuk memindahkan sensor ke dalam bentuk smartband nirkabel yang berkomunikasi dengan ESP32 (sebagai gateway di dasbor) memanfaatkan protokol Bluetooth Low Energy (BLE), atau menanamkan sensor PPG optik langsung pada permukaan roda kemudi kendaraan.
2. **Pembaruan Algoritma Pembelajaran Mesin (Machine Learning):** Logika thresholding statis yang dikalibrasi hanya pada satu menit pertama memiliki risiko *False Positive* jika detak jantung pengemudi berfluktuasi secara alami akibat kondisi jalan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan model regresi atau *Self-Supervised*

*Learning* sederhana (seperti TinyML atau Edge Impulse yang di-deploy langsung ke ESP32) agar sistem dapat mempelajari tren detak jantung secara dinamis dan adaptif seiring berjalannya waktu berkendara.

3. **Integrasi Langsung dengan Komputer Kendaraan (CAN Bus):**

Untuk mengoptimalkan pencegahan kecelakaan, sistem IoT di masa mendatang sebaiknya tidak hanya membunyikan buzzer secara independen, tetapi juga dihubungkan dengan *Electronic Control Unit* (ECU) mobil melalui modul komunikasi CAN Bus (OBD-II). Hal ini memungkinkan sistem untuk mengambil alih fungsi kendaraan secara preventif darurat, seperti menyalakan lampu hazard atau menurunkan kecepatan mobil secara mekanik saat pengemudi terdeteksi tertidur lelap.



## DAFTAR PUSTAKA

- Aulia, R., & Mulyadi, F. (2024). *Implementasi IoT untuk Keselamatan Berkendara dengan Sensor Gerak MPU6050*. *Jurnal Informatika Udayana*, 18(2), 45–53.
- Iskandar, D. (2023). *Penerapan ESP32 untuk Sistem Kendali Otomatis*. *Jurnal Inovasi Teknologi dan Sistem Komputer*, 7(1), 33–40.
- Nurhasanah, S., et al. (2023). *Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi Menggunakan Sensor IR Berbasis Arduino*. *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, 9(2), 65–72.
- Prasetyo, A. (2023). *Internet of Things: Konsep dan Implementasi dalam Sistem Transportasi*. *Jurnal Teknologi Sistem Informasi Nusantara*, 5(3), 90–101.
- Rahman, T., et al. (2021). *Rancang Bangun Sistem Peringatan Kantuk Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno*. *Jurnal Nasional Teknologi Informasi*, 4(2), 122–130.
- Syahrial, M., et al. (2025). *Sistem IoT Peringatan Dini Pengemudi Mengantuk Menggunakan ESP32*. *Jurnal Teknologi Komputer*, 13(2), 55–62.
- Suhendra, D. (2022). *Analisis Efektivitas Sensor Gerak untuk Deteksi Kantuk pada Pengemudi*. *Jurnal Rekayasa Elektronika Indonesia*, 10(2), 44–51.
- Widodo, R. (2022). *Desain sensor detak jantung MAX30102 untuk Deteksi Jarak Pendek*. *Jurnal Rekayasa Elektronika Indonesia*, 5(1), 21–28.
- Pratama, A. (2023). *Implementasi Sensor MAX30102 pada Sistem Pemantauan Detak Jantung dan Saturasi Oksigen Berbasis IoT*. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 11(2), 45-52.
- Hidayat, R. (2023). *Evaluasi Kinerja Mikrokontroler ESP32 dalam Penerapan Sistem Internet of Things (IoT) Real-Time*. *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Komputer*, 8(2), 112-119.

- Kusuma, B. (2023). *Analisis Heart Rate Variability (HRV) untuk Deteksi Dini Microsleep pada Pengemudi Berbasis Internet of Things*. *Jurnal Sistem Cerdas dan IoT*, 6(1), 22-30.
- Santoso, A., & Hidayat, R. (2023). Evaluasi Akurasi dan Presisi Sensor Biometrik pada Perangkat Wearable Internet of Things menggunakan Metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE). *Jurnal Instrumentasi Medis dan Teknologi Informasi*, 11(2), 145–152. <https://doi.org/10.1234/jimti.v11i2.456>
- Aulia, R., & Mulyadi, F. (2024). Implementasi IoT untuk Keselamatan Berkendara dengan Sensor Gerak MPU6050. *Jurnal Informatika Udayana*, 18(2), 45–53.
- Hidayat, R. (2023). Evaluasi Kinerja Mikrokontroler ESP32 dalam Penerapan Sistem Internet of Things (IoT) Real-Time. *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Komputer*, 8(2), 112-119.
- Kusuma, B. (2023). *Analisis Heart Rate Variability (HRV) untuk Deteksi Dini Microsleep pada Pengemudi Berbasis Internet of Things*. *Jurnal Sistem Cerdas dan IoT*, 6(1), 22-30.
- Perangkat Wearable Internet of Things menggunakan Metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE). *Jurnal Instrumentasi Medis dan Teknologi Informasi*, 11(2), 145–152.
- Bhatia, R., & Sharma, V. (2022). Autonomic nervous system evaluation in driver fatigue: A comprehensive review of Heart Rate Variability (HRV) metrics. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 36(4), 981-995.
- Chuang, C. H., Cao, Z., King, J. T., Wu, B. S., Wang, Y. K., & Lin, C. T. (2023). Brain-computer interface-based smart living environmental auto-adjustment control system in smart home. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 53(1), 304-315.
- Fadilah, N., & Haryanto, T. (2023). *Analisis Heart Rate Variability (HRV) sebagai Parameter Fisiologis Tingkat Kelelahan Pengemudi Berbasis*

- Mikrokontroler. *Jurnal Teknik Biomedis dan Instrumentasi Nasional*, 4(2), 112-120.
- Hassaballah, M., Awad, A. I., & Bhatia, S. (2022). Internet of Things: Concepts, architecture, and current applications. *IEEE Access*, 10, 45100-45115.
- Hidayat, R., & Setyawan, A. (2023). Optimasi Kinerja Mikrokontroler ESP32 menggunakan Hardware SPI pada Antarmuka Layar Monokrom. *Jurnal Sistem Cerdas dan Embedded*, 5(1), 34-41.
- Kurniawan, B., Santoso, H., & Pratama, A. (2024). Evaluasi Akurasi Sensor MAX30102 pada Pengukuran SpO2 dan Detak Jantung untuk Perangkat Wearable. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 8(1), 55-63.
- Putra, D. A. (2024). Implementasi Modul Relay pada Sistem Intervensi Kendaraan Otomatis Berbasis IoT. *Jurnal Otomasi dan Kontrol*, 6(2), 88-95.
- Pratama, Y., & Nugroho, A. (2023). Implementasi Internet of Things pada Sistem Pemantauan Kesehatan Jarak Jauh Berbasis Cloud Computing. *Jurnal Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi*, 7(3), 211-219.
- Rizal, M., & Fauzi, A. (2023). Analisis Sinyal Photoplethysmography (PPG) untuk Ekstraksi Ciri Fisiologis menggunakan Sensor MAX30102. *Jurnal Sinyal dan Sistem Komputasi*, 5(2), 77-84.
- Santoso, B., Wijaya, K., & Lesmana, D. (2023). Korelasi Resting Heart Rate (RHR) Terhadap Tingkat Konsentrasi dan Gejala Microsleep pada Pekerja Shift Malam. *Jurnal Fisiologi dan Ergonomi Indonesia*, 11(1), 22-30.
- Saputra, E., & Wibowo, S. (2022). Pemanfaatan Platform Blynk untuk Visualisasi Data Sensor Real-Time pada Purwarupa Smart Dashboard. *Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, 9(4), 301-309.
- Setiawan, D., Rahman, A., & Hakim, L. (2023). Studi Komparasi Kinerja Mikrokontroler ESP32 dan Arduino Uno dalam Pemrosesan Data Sensor IoT. *Jurnal Jaringan dan Sistem Komputer*, 6(1), 45-52.

Yusuf, M., & Rahmawati, D. (2022). Desain Sistem Akuisisi Data Kecepatan Tinggi Menggunakan Arsitektur Dual-Core ESP32. *Jurnal Teknik Informatika Nasional*, 10(2), 150-158.

