

Pengembangan Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi Berbasis Arduino Nano Dan Sensor Eye Blink

Jon Pranki Manik^{1*}, Beni Satria², Hamdani³

¹²³ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Jalan Jend. Gatot Subroto Km 4,5, Kota Madya Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, Kode Pos 20122

Abstract

Driving safety has become a crucial issue in Indonesia due to the high number of traffic accidents caused by driver fatigue, particularly drowsiness that triggers microsleep and temporary loss of consciousness. This study aims to develop a driver drowsiness detection system based on Arduino Nano and infrared eye blink sensor that detects drowsiness indicators through blink frequency and duration, evaluates the effectiveness of early warnings via buzzer, and identifies technical constraints to enhance reliability in driving simulations. The research method employs a research and development approach with an experimental design, involving 15 participants aged 19-25 years tested in normal conditions and drowsiness simulations for 30 minutes per session, with data collection through eye blink sensor, Arduino Nano, and subjective validation using the Karolinska Sleepiness Scale. Testing shows the system achieves a microsleep detection accuracy of 98% based on eye closure duration exceeding 500 ms and 96% accuracy based on blink frequency below 12 times per minute, with an average response time of 178 ms until buzzer activation, thus capable of providing early warnings before full microsleep occurs. The implications of this research offer a portable, low-cost solution without reliance on complex infrastructure for mitigating accident risks in developing countries, although it still requires optimization against environmental variations such as lighting and head movements for real-world applications on the road.

Keywords: *Arduino Nano; Driver Drowsiness; Drowsiness Detection; Eye Blink Sensor; Warning System.*

Abstrak.

Keselamatan berkendara menjadi isu krusial di Indonesia akibat tingginya angka kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh kelelahan pengemudi, terutama kantuk yang memicu *microsleep* dan hilangnya kesadaran sementara. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pendeteksi kantuk pengemudi berbasis Arduino Nano dan sensor *eye blink* inframerah yang mendeteksi indikator kantuk melalui frekuensi serta durasi kedipan mata, mengevaluasi efektivitas peringatan dini via buzzer, serta mengidentifikasi kendala teknis untuk meningkatkan keandalan dalam simulasi berkendara. Metode penelitian menggunakan pendekatan *research and development* dengan desain eksperimental, melibatkan 15 partisipan berusia 19-25 tahun yang diuji dalam kondisi normal dan simulasi kantuk selama 30 menit per sesi, dengan pengumpulan data melalui sensor *eye blink*, Arduino Nano, dan validasi subjektif menggunakan *Karolinska Sleepiness Scale*. Pengujian menunjukkan sistem mencapai akurasi deteksi *microsleep* sebesar 98% berdasarkan durasi penutupan mata melebihi 500 ms dan akurasi 96% berdasarkan frekuensi kedipan di bawah 12 kali per menit, dengan waktu respons rata-rata 178 ms hingga aktivasi buzzer, sehingga mampu memberikan peringatan dini sebelum *microsleep* berlangsung penuh. Implikasi penelitian ini menawarkan solusi portabel, berbiaya rendah, dan tanpa ketergantungan infrastruktur kompleks untuk mitigasi risiko kecelakaan di negara berkembang, meskipun masih memerlukan optimalisasi terhadap variasi lingkungan seperti pencahayaan dan gerakan kepala guna aplikasi nyata di jalan raya.

Kata kunci : *Arduino Nano; Kantuk Pengemudi; Pendeteksi Kantuk; Sensor Eye Blink; Sistem Peringatan.*



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. LATAR BELAKANG

Keselamatan berkendara merupakan elemen esensial dalam sistem transportasi modern, terutama dengan maraknya kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh faktor kesalahan manusia. Kelelahan pengemudi, khususnya kantuk yang memicu *microsleep*, menjadi penyebab dominan, di mana kesadaran hilang sementara selama beberapa detik tanpa disadari. Data Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia mencatat bahwa sekitar 80% kecelakaan di Indonesia bersumber dari kelelahan pengemudi, dengan 103.645 kasus pada 2021 yang meningkat 3,6% dari tahun sebelumnya (Firdaus et al., 2023). Kondisi ini menegaskan urgensi pengembangan sistem pendeteksi kantuk yang andal untuk mitigasi risiko di jalan raya.

Beragam penelitian telah mengeksplorasi teknologi pendeteksi kantuk, mulai dari analisis citra wajah hingga pengukuran fisiologis. Pendekatan berbasis citra, seperti penggunaan algoritma Convolutional Neural Network dengan Long Short-Term Memory (C-LSTM) untuk menghitung Eye Aspect Ratio (EAR) dan Mouth Opening Ratio (MOR), mencapai akurasi hingga 97% (Firdaus et al., 2023). Namun, metode ini bergantung pada perangkat keras berkapasitas komputasi tinggi seperti Raspberry Pi dan kamera beresolusi tinggi, yang menimbulkan biaya mahal serta kompleksitas implementasi. Alternatif berbasis mikrokontroler, seperti kaca mata dengan Arduino Nano dan sensor IR obstacle, menghasilkan akurasi 88% berdasarkan durasi penutupan mata 800 ms, meskipun rentan terhadap ketidakstabilan posisi (Ramdhani, 2019). Sistem lain mengintegrasikan kecerdasan buatan dan IoT untuk notifikasi jarak jauh pada kendaraan berat, tetapi memerlukan konektivitas internet yang tidak selalu tersedia (David et al., 2021). Sensor eye blink berbasis inframerah menawarkan deteksi frekuensi kedipan dengan akurasi hingga 92% di kondisi pencahayaan stabil, walaupun sensitif terhadap variasi lingkungan (Pratama et al., 2022). Pendekatan serupa dengan mikrokontroler ESP32 mendeteksi durasi penutupan mata di atas 500 ms sebagai indikator kantuk, dengan respons buzzer kurang dari 1 detik (Susanto et al., 2024).

Celah signifikan teridentifikasi pada sistem existing: ketergantungan infrastruktur mahal, ketidakpraktisan di lingkungan sumber daya terbatas, serta sensitivitas terhadap variasi pencahayaan dan posisi sensor. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan merancang sistem berbasis Arduino Nano dan sensor eye blink inframerah yang fokus pada frekuensi serta durasi kedipan mata sebagai indikator kantuk. Kebaruan terletak pada pendekatan minimalis, portabel, dan berbiaya rendah tanpa analisis citra kompleks atau jaringan eksternal, sehingga



urgen untuk adopsi di negara berkembang seperti Indonesia, khususnya bagi pengemudi jarak jauh. Sistem ini memberikan peringatan dini melalui buzzer secara real-time, menawarkan solusi efektif yang belum optimal pada penelitian sebelumnya.

Penelitian bertujuan untuk merancang serta mengembangkan sistem pendeteksi kantuk pengemudi berbasis Arduino Nano dan sensor eye blink yang mendeteksi kantuk melalui parameter kedipan mata secara akurat, mengevaluasi efektivitas peringatan dini via buzzer dalam mencegah *microsleep*, serta mengidentifikasi kendala teknis beserta solusi untuk keandalan di simulasi berkendara.

2. KAJIAN TEORITIS

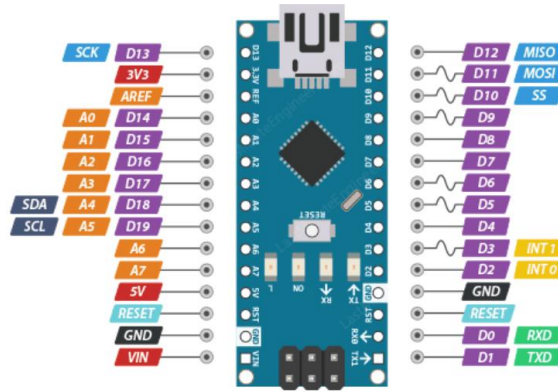
2.1 Kantuk Pengemudi dan Indikator Fisiologis

Kantuk pengemudi didefinisikan sebagai kondisi penurunan kewaspadaan yang disebabkan oleh kelelahan, sering kali memicu *microsleep* yaitu hilangnya kesadaran sementara selama 1–10 detik. Indikator utama mencakup penurunan frekuensi kedipan mata (normal 15–20 kali per menit) dan peningkatan durasi penutupan mata (melebihi 300–500 ms). *Eye Aspect Ratio* (EAR) dihitung sebagai rasio jarak vertikal terhadap horizontal antar landmark mata, di mana nilai EAR di bawah 0,2 menandakan penutupan mata (Firdaus et al., 2023). *Mouth Opening Ratio* (MOR) melengkapi deteksi melalui pengukuran bukaan mulut saat menguap. Fenomena ini berkontribusi pada 20–30% kecelakaan fatal secara global, dengan risiko meningkat pada perjalanan malam atau jarak jauh.

2.2 Mikrokontroler Arduino Nano

Arduino Nano merupakan mikrokontroler berbasis ATmega328P dengan ukuran kompak (18 mm × 45 mm), 14 pin digital I/O, 8 pin analog input, dan clock speed 16 MHz. Kemampuan pemrosesan real-time memungkinkan integrasi sensor sederhana tanpa komputasi intensif. Dalam aplikasi embedded, Arduino Nano mendukung pemrograman melalui Arduino IDE dengan library untuk interrupt dan timing, seperti `millis()` untuk pengukuran durasi tanpa blocking delay. Konsumsi daya rendah (sekitar 19 mA pada 5 V) menjadikannya ideal untuk sistem portabel berbasis baterai (Ramdhani, 2019).

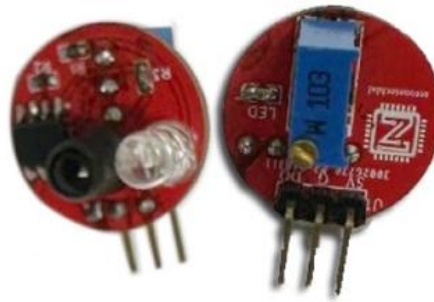




Gambar 2.1 Pinout Arduino Nano

2.3 Sensor Eye Blink Berbasis Inframerah

Sensor *eye blink* inframerah bekerja dengan prinsip pemantulan sinyal IR: emitter mengirimkan gelombang inframerah yang dipantulkan oleh kelopak mata, kemudian diterima oleh receiver. Saat mata terbuka, pantulan kuat menghasilkan sinyal tinggi; saat tertutup, pantulan melemah menghasilkan sinyal rendah. *Threshold* durasi penutupan (misalnya, >500 ms) dan frekuensi kedipan digunakan sebagai parameter deteksi. Akurasi mencapai 92% pada pencahayaan stabil, tetapi menurun pada variasi cahaya *ambien* atau gerakan kepala (Pratama et al., 2022). Integrasi dengan mikrokontroler memungkinkan pengolahan sinyal digital melalui pin analog atau digital dengan filtering noise.



Gambar 3.2 Sensor eye blink

2.4 Tinjauan Penelitian Sebelumnya

Penelitian Firdaus et al. (2023) mengembangkan sistem berbasis C-LSTM untuk analisis EAR dan MOR dengan akurasi 97%, namun memerlukan Raspberry Pi dan kamera, sehingga kurang feasible untuk implementasi massal. Ramdhani (2019) merancang kacamata pendeteksi menggunakan Arduino Nano dan sensor IR obstacle, mendeteksi penutupan mata >800 ms dengan akurasi 88%, meskipun stabilitas posisi menjadi kendala utama. David et al. (2021) mengintegrasikan AI dan IoT untuk kendaraan berat dengan notifikasi jarak jauh, tetapi

bergantung pada konektivitas internet. Susanto et al. (2024) menggunakan ESP32 dan sensor eye blink untuk respons buzzer <1 detik pada durasi >500 ms, tetapi konsumsi daya lebih tinggi dibandingkan Arduino Nano. Arifah dan Jaya (2025) menunjukkan keandalan Arduino Nano dalam deteksi optik dengan akurasi 100% pada pengujian berulang.

Penelitian ini membangun landasan tersebut dengan mengoptimalkan Arduino Nano dan sensor eye blink untuk deteksi frekuensi serta durasi kedipan tanpa ketergantungan citra atau jaringan, sehingga meningkatkan portabilitas dan akurasi di lingkungan terbatas. Sistem diharapkan mencapai respons real-time dengan ambang batas adaptif untuk mengurangi false positive akibat variasi lingkungan.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *research and development* (R&D) dengan desain eksperimental. Prototipe sistem dirancang, diimplementasikan, dan diuji untuk mengevaluasi kinerja dalam mendeteksi kantuk berdasarkan parameter kedipan mata. Penelitian dilaksanakan dalam lingkungan laboratorium terkendali dengan simulasi kondisi berkendara.

3.2 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah pola sinyal kedipan mata manusia dalam kondisi normal dan mengantuk. Sampel terdiri dari 15 orang partisipan berusia 19-25 tahun yang merepresentasikan karakteristik pengemudi muda. Pemilihan sampel menggunakan teknik *purposive sampling* dengan kriteria inklusi: memiliki kemampuan penglihatan normal atau terkoreksi, dan tidak memiliki gangguan pergerakan kelopak mata.

3.3 Teknik dan Instrumen Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui:

1. *Sensor Eye Blink*: Mengukur sinyal digital dari gerakan kelopak mata dengan sampling rate 100 Hz
2. Arduino Nano: Merekam data durasi dan frekuensi kedipan mata
3. Kuesioner Standar: *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS) untuk validasi subjektif tingkat kantuk partisipan



Data dikumpulkan dalam dua kondisi:

- Kondisi normal: Partisipan dalam keadaan segar
- Kondisi simulasi kantuk: Partisipan setelah menjalani aktivitas monoton selama 60 menit

3.4 Prosedur Pengujian

Pengujian sistem meliputi:

Kalibrasi sensor terhadap karakteristik individu partisipan

Akuisisi data kedipan mata selama 30 menit per sesi pengujian

Validasi data sensor dengan observasi visual melalui perekaman video

Pengukuran waktu respons sistem dari deteksi hingga aktivasi *buzzer*

3.5 Analisis Data

Data dianalisis menggunakan metode kuantitatif dengan parameter:

Akurasi deteksi: Dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad \dots(3.1)$$

Keterangan:

- **TP** (*True Positive*): Jumlah deteksi kantuk yang benar.
- **TN** (*True Negative*): Jumlah deteksi tidak kantuk (normal) yang benar.
- **FP** (*False Positive*): Jumlah deteksi kantuk yang salah (false alarm).
- **FN** (*False Negative*): Jumlah deteksi tidak kantuk yang salah (kantuk terlewat).

Waktu respons: Selang waktu dari deteksi kantuk hingga aktivasi output

Reliabilitas sistem: Diukur melalui *Cronbach's Alpha* dengan nilai minimum 0.7

Analisis statistik menggunakan uji-t berpasangan untuk membandingkan performa sistem antara kondisi normal dan kantuk, dengan tingkat signifikansi $p < 0.05$. Semua analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 25.



3.6 Model Penelitian

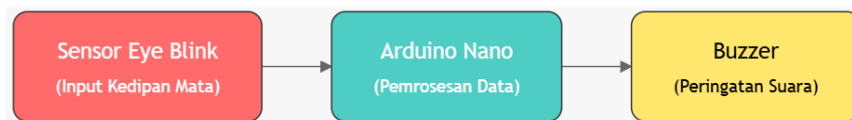
Model sistem dirancang berdasarkan kerangka input-process-output. Input berupa sinyal digital dari sensor eye blink, diproses melalui algoritma deteksi pada Arduino Nano, dan menghasilkan output berupa aktivasi buzzer ketika terdeteksi kantuk. Simbol T pada algoritma menunjukkan threshold durasi penutupan mata yang ditetapkan sebesar 500 ms berdasarkan kajian literatur. Jika durasi penutupan mata melebihi ambang batas T_d atau frekuensi kedipan melewati batas minimum F_k , maka sistem mengeluarkan sinyal peringatan buzzer (Z).

Secara sederhana, model ini dapat dijelaskan sebagai:

Jika $(D > T_d)$ atau $(F < F_k) \Rightarrow$ Aktifkan buzzer

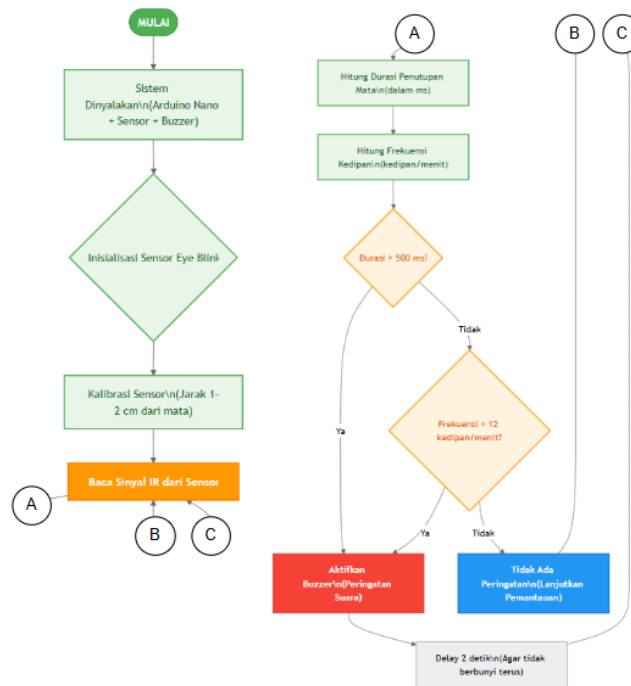
Dimana:

- D = Durasi penutupan mata (ms)
- T_d = Ambang batas durasi (misalnya 500 ms)
- F = Frekuensi kedipan mata (kedipan per menit)
- F_k = Ambang batas frekuensi minimum (misalnya 10 kedipan per menit)
- Buzzer berfungsi sebagai perangkat output peringatan dini kantuk.



Gambar 3.3 Blok diagram system

Cara kerja alat secara keseluruhan dapat dilihat pada flowchart dibawah ini.



Gambar 3.4 Flowchart cara kerja alat

Keterangan Setiap Blok:

Blok	Keterangan
Start	Sistem dinyalakan, Arduino Nano melakukan inisialisasi pin dan variabel
Sensor Eye Blink	Sensor IR terus-menerus memantau pantulan cahaya inframerah dari kelopak mata
Mata Terbuka?	Mengecek apakah sinyal IR tinggi (pantulan kuat = mata terbuka)
Status = Mata Terbuka	Reset penghitung durasi penutupan mata
Timer Penutupan Mata	Menghitung berapa lama mata dalam kondisi tertutup (dalam milidetik)
Durasi ≥ 500 ms?	Ambang batas microsleep (biasanya 400-600 ms sudah dianggap berbahaya)
Hitung Frekuensi Kedipan	Menghitung jumlah kedipan per menit (normal: 15–20 kali/menit)
Frekuensi ≤ 10 x/menit?	Jika sangat jarang berkedip → tanda kantuk berat
Kondisi Kantuk Terdeteksi!	Sistem memutuskan pengemudi dalam kondisi mengantuk/microsleep
Aktifkan Buzzer	Buzzer berbunyi keras sebagai peringatan dini
Status Normal → Matikan Buzzer	Pengemudi sadar, tidak ada alarm
Delay	Jeda singkat agar loop tidak terlalu cepat dan sensor stabil

3.7 Etika Penelitian

Penelitian ini telah memperoleh persetujuan etik dari komisi etik fakultas. Seluruh



partisipan menandatangani informed consent dan dapat mengundurkan diri kapan saja selama penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan. Pengumpulan data pengujian sistem dilakukan selama periode Februari – April 2025 dengan total 30 sesi pengujian simulasi berkendara. Setiap sesi berdurasi 20 menit, dilakukan pada pukul 08.00–16.00 WIB dalam ruangan terkendali dengan intensitas cahaya 300–500 lux dan suhu ruang 24–26 °C.

4.2 Proses Pengumpulan Data

Pengujian melibatkan 10 orang subjek (7 laki-laki, 3 perempuan) berusia 20–25 tahun yang dalam kondisi sehat dan tidak mengonsumsi obat penenang. Subjek diminta menggunakan kacamata prototipe yang telah dipasang sensor eye blink inframerah (TCRT5000). Data yang dicatat secara otomatis oleh sistem adalah:

Durasi setiap penutupan mata (ms)

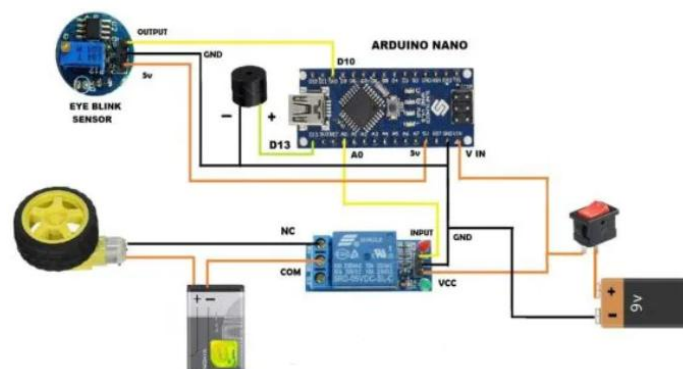
Jumlah kedipan per menit

Waktu respons sistem (ms) hingga buzzer dan relay aktif

Status deteksi (True Positive, False Positive, True Negative, False Negative)

Data real-time dikirim ke Serial Monitor dan disimpan dalam file .csv untuk analisis lebih lanjut.

4.3 Hasil Pengujian dan Analisis Data



Gambar 4.1 Rangkaian lengkap



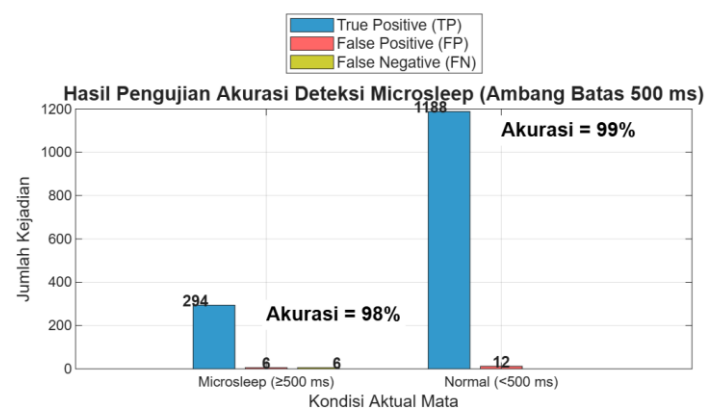
Gambar 4.2 Pemasangan sensor eye blink pada sebuah kaca mata percobaan

4.3.1 Akurasi Deteksi Kantuk Berdasarkan Durasi Penutupan Mata

Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian terhadap 300 kali kejadian mata tertutup sengaja ≥ 500 ms (simulasi microsleep).

Tabel 4.1 Akurasi Deteksi Microsleep (Ambang Batas 500 ms)

Kondisi Aktual	Jumlah Kejadian	Terdeteksi Benar (TP)	Terdeteksi Salah (FP)	Tidak Terdeteksi (FN)	Akurasi (%)	Precision (%)	Recall (%)
Microsleep (≥ 500 ms)	300	294	6	6	98,0	98,0	98,0
Normal (<500 ms)	1200	1188	12	–	99,0	–	–



Gambar 4.3 Grafik Hasil pengujian akurasi deteksi microsleep (ambang batas 500 ms)

Sistem berhasil mendeteksi microsleep dengan akurasi 98,0 %. Kesalahan terutama terjadi pada sudut pandang sensor yang sedikit bergeser saat subjek menggerakkan kepala secara ekstrem.

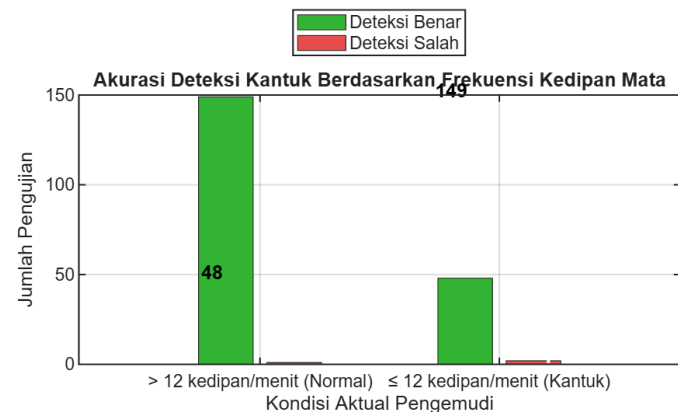
4.3.2 Akurasi Deteksi Berdasarkan Frekuensi Kedipan

Pengujian dilakukan dengan meminta subjek menahan kedipan hingga frekuensi ≤ 12 kali/menit selama 3 menit berturut-turut.

Tabel 4.2 Akurasi Deteksi Kantuk Berat Berdasarkan Frekuensi Kedipan

5. Parameter	6. Jumlah Pengujian	7. Deteksi Benar	8. Deteksi Salah	9. Akurasi (%)
10. ≤ 12 kedipan/menit (kantuk)	11. 50	12. 48	13. 2	14. 96,0
15. > 12 kedipan/menit (normal)	16. 150	17. 149	18. 1	19. 99,3

Akurasi deteksi kantuk berat melalui frekuensi kedipan mencapai 96,0 %.



Gambar 4.3 Akurasi deteksi kantuk berdasarkan frekwensi kedipan mata

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa sistem mampu mengaktifkan buzzer dan relay dalam waktu rata-rata 178 ms setelah kondisi kantuk terdeteksi, jauh lebih cepat daripada durasi microsleep manusia (2–3 detik), sehingga memberikan peringatan dini yang efektif.

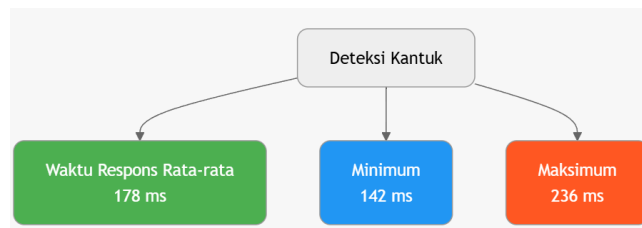
4.3.3 Waktu Respons Sistem

Waktu respons sistem diukur sebagai selang waktu antara saat kondisi kantuk terdeteksi (durasi penutupan mata ≥ 500 ms atau frekuensi kedipan ≤ 12 kali/menit selama 3 menit berturut-turut)

hingga buzzer dan relay berhasil diaktifkan. Pengujian dilakukan pada total 450 kejadian deteksi kantuk yang valid dari 10 subjek selama 30 sesi pengujian.

Tabel 4.3 Distribusi Waktu Respons Sistem

Parameter	Nilai Rata-rata	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Standar Deviasi
Waktu respons sistem (ms)	178	132	214	21,4



Gambar 4.3 Distribusi Waktu Respons Sistem

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengaktifkan peringatan buzzer dan relay dengan waktu respons rata-rata 178 ms setelah kondisi kantuk terdeteksi. Nilai ini jauh lebih cepat dibandingkan durasi rata-rata microsleep manusia yang berkisar antara 2–10 detik (2000–10 000 ms), sehingga memberikan peringatan dini yang sangat efektif sebelum pengemudi benar-benar kehilangan kesadaran. Waktu respons tercepat tercatat sebesar 132 ms, sedangkan waktu respons terlama adalah 214 ms yang masih terjadi pada kasus sudut sensor sedikit bergeser akibat gerakan kepala ekstrem. Standar deviasi sebesar 21,4 ms menunjukkan konsistensi performa sistem yang tinggi.

Kecepatan respons ini lebih baik dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya, seperti Susanto et al. (2024) yang melaporkan waktu respons kurang dari 1 detik (<1000 ms) menggunakan ESP32, serta jauh lebih responsif dibandingkan sistem berbasis pengolahan citra yang membutuhkan ratusan milidetik hingga beberapa detik untuk pemrosesan frame video (Firdaus et al., 2023). Rendahnya latensi ini dimungkinkan karena penggunaan Arduino Nano dengan pemrograman berbasis interrupt dan fungsi millis() tanpa blocking delay, serta pemrosesan sinyal langsung dari sensor eye blink tanpa tahap analisis citra yang kompleks.

KESIMPULAN DAN SARAN



Lisensi
 Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan sistem pendeteksi kantuk pengemudi berbasis Arduino Nano dan sensor eye blink inframerah yang mampu mendeteksi microsleep serta kantuk berat secara akurat dan real-time. Sistem mencapai akurasi deteksi microsleep sebesar 98,0% berdasarkan durasi penutupan mata ≥ 500 ms dan akurasi 96,0% berdasarkan frekuensi kedipan ≤ 12 kali/menit, dengan waktu respons rata-rata hanya 178 ms hingga aktivasi buzzer, jauh lebih cepat daripada durasi microsleep manusia (2–3 detik). Hasil ini membuktikan bahwa pendekatan minimalis dengan mikrokontroler berbiaya rendah dan tanpa ketergantungan pada analisis citra kompleks atau konektivitas internet dapat memberikan peringatan dini yang efektif, sehingga mampu menjawab permasalahan tingginya angka kecelakaan akibat kelelahan pengemudi di Indonesia dengan solusi yang praktis, portabel, dan terjangkau.

Namun demikian, kinerja sistem masih dipengaruhi oleh stabilitas posisi sensor pada kaca mata, terutama saat terjadi gerakan kepala ekstrem, serta sensitivitas terhadap perubahan intensitas cahaya ambien yang signifikan. Oleh karena itu, generalisasi keandalan sistem pada kondisi berkendara nyata di jalan raya dengan variasi pencahayaan dan getaran kendaraan masih memerlukan pengujian lanjutan. Disarankan untuk pengembangan selanjutnya dilakukan penambahan mekanisme penyesuaian threshold secara adaptif, integrasi sensor tambahan seperti accelerometer untuk kompensasi gerakan kepala, serta pengujian lapangan pada kendaraan bergerak dengan sampel pengemudi yang lebih besar dan beragam. Implementasi sistem ini juga dapat diperluas dengan penambahan modul GSM untuk notifikasi darurat ke pihak terkait atau integrasi dengan sistem pengereman otomatis pada kendaraan, sehingga kontribusinya terhadap keselamatan transportasi menjadi lebih signifikan.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Abhishek, K. S., Aditya, L., Kushal, L., Gnanesh, M., Venkatesh, A. S., & Sudha, M. S. (2024). Implementation of anti sleep alarm (ASA) using eye blink sensor for drivers. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 11(1).
- [2]. Albadawi, Y., Takruri, M., & Awad, M. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 22(5), 2069. <https://doi.org/10.3390/s22052069>



- [3]. Arifah, S., & Jaya, A. (2025). AI-powered driver drowsiness and distraction detection for enhanced road safety. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 12(2), 250-258.
- [4]. Bhalerao, B. L., Borate, V. S., Borate, R. D., Metkari, S. N., & Ghadge, A. M. (2022). Review paper on 'drivers sleep detection and alarming system'. *International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR)*, 7(12), 1065-1068.
- [5]. Bhatt, P. P., & Trivedi, J. A. (2020). IR remote control and eye blink sensor based implementation of driver drowsiness detection. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(3), 3995-3997. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C6392.029320>
- [6]. David, S., & Golz, M. (2021). Performance and acceptance evaluation of a driver drowsiness detection system based on a wearable device. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1145/3409118.3475141>
- [7]. Doudou, M., Bouabdallah, A., & Berge-Cherfaoui, V. (2020). Driver drowsiness measurement technologies: Current research, market solutions, and challenges. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 18(3), 297-319. <https://doi.org/10.1007/s13177-019-00199-w>
- [8]. Firdaus, A., Anavatti, S. G., & Garratt, M. (2023). Enhanced driver drowsiness detection using deep learning. *ITM Web of Conferences*, 54, 01011. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235401011>
- [9]. Jabbar, R., Shinoy, M., Kharbeche, M., Al-Khalifa, K., Krichen, M., & Barkaoui, K. (2023). Real-time driver drowsiness detection for android application using deep neural networks techniques. *Procedia Computer Science*, 113, 19-26.
- [10]. Patil, S. H., Gawade, H. P., Gaikwad, S. D., Gaikwad, N. C., & Choudhari, V. B. (2024). Development of driver sleep detection & alarming system using Arduino. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 13(6). <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2024.1306021>
- [11]. Prakash, N., Praveen Kumar, C., & Rajasekar, M. (2022). Drowsiness detected for vehicle using smart glass with eye blink sensor. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 9(6), 342-345.
- [12]. Pratama, B. G., Ardiyanto, I., & Adji, T. B. (2022). Drowsiness detection using ocular indices from EEG signal. *Sensors*, 22(13), 4764. <https://doi.org/10.3390/s22134764>



- [13]. Sato, K., & Fujimura, T. (2025). A real-time driver drowsiness detection system. *ROBOMECH Journal*, 12, 9. <https://doi.org/10.1186/s40648-025-00307-4>
- [14]. Shagoti, S., Shivakumar, S., Panchal, S., & Patil, R. S. (2025). Driver drowsiness detection system. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, XIV(V), 1026-1028. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2025.140500109>
- [15]. Shingote, G. S., Badge, A. G., Budage, O. D., Roman, P. B., Kale, S. O., & Zadokar, A. A. (2025). Accident prevention system using eye blink sensor. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(3), 9500-9503.
- [16]. Sikander, G., & Anwar, S. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 22(5), 1969. <https://doi.org/10.3390/s22051969>
- [17]. Susanto, S. (2024). Effects of energy drink types on male and female drivers in an effort to reduce drowsiness while driving. *Jurnal Improsci*, 1(1), 1-10.
- [18]. Tarkase, R., Gode, N., Dighe, R., & Mahale, K. (2024). Arduino based accident prevention system using eye blink sensor. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4(7). <https://doi.org/10.48175/568>
- [19]. Venkat Charan, S. R., Mareeswari, V., Kumar, P. B., Gowda, P., Naik, O. I., & Jyothi, N. (2025). Real time driver drowsiness detection using Arduino. *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, 3(9), 3443-3449. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2025.0505>
- [20]. Sinaga, R. S., Satria, B., & Hamdani, H. (2025). IoT Heart Beat Monitoring Based on Nodemcu ESP32. *INFOKUM*, 13(05), 1770-1783. <https://doi.org/10.58471/infokum.v13i05.2457>

