

RANCANG BANGUN SISTEM IDENTIFIKASI KELELAHAN BERDASARKAN *DRIVING BEHAVIOUR*

1,2) Program Studi Teknologi
Otomotif, Jurusan
Rekayasa Industri,
Politeknik Negeri Tanah
Laut, Jl. A Yani km 6 Ds
Panggun 70815.

Corresponding email ^{1*)} :
sukma@politala.ac.id

Received: 29.12.2021
Accepted: 30.12.2024
Published: 28.12.2025

©2025 Politala Press.
All Rights Reserved.

Sukma Firdaus^{1*)}, Kurnia Dwi Artika²⁾

Abstrak. Kelelahan pengemudi meningkatkan risiko kecelakaan, sementara kamera dan sensor fisiologis sering terkendala biaya, privasi, dan kalibrasi. Studi ini melaporkan riset original rancang bangun sistem identifikasi kelelahan berbasis empat PID OBD-II: speed (0x0D), RPM (0x0C), throttle (0x11), dan engine load (0x04). Data diakuisisi real-time melalui ELM327 pada Jetson Orin, dengan pencatatan ganda nilai engineering (Phys_*) dan raw payload ECU (RAW_*) untuk audit DoCAN/ISO-TP. Dataset mencakup 51,80 jam (5 pengemudi, 10 sesi, 2 konteks) pada 2 Hz, berlabel KSS yang dipetakan menjadi Label Fatigue kontinu. Validasi decoding menunjukkan $r \geq 0,9996$ dan MAE $< 0,25$ unit. Fitur ketidakstabilan (STD dan bandpower 0,05–0,3 Hz) diekstrak per window 60 s/step 10 s. Uji Wilcoxon exact menemukan pergeseran signifikan pada fatigue tinggi ($p \leq 0,001953$). Regresi cluster-robust meningkatkan R^2 0,266 \rightarrow 0,716; LODO menurunkan RMSE 0,198 \rightarrow 0,122 dan menaikkan korelasi 0,525 \rightarrow 0,823. Hasil mendukung penurunan vigilance dan stabilitas kontrol sensorimotor saat lelah, sehingga 4 PID layak untuk peringatan kelelahan edge.
Kata Kunci: OBDII; PID; kelelahan; driving behaviour.

Abstract. Driver fatigue is a major crash factor, yet camera/physiology methods face cost, privacy, and calibration barriers. This paper presents an embedded, noninvasive system using four OBD-II PIDs—speed (0x0D), RPM (0x0C), throttle (0x11), and engine load (0x04)—polled in real time via ELM327 on Jetson Orin. Engineering values (Phys_) and raw ECU payloads (RAW_) are logged for DoCAN/ISO-TP auditing. The real-world dataset contains 51.80 h (5 drivers, 10 sessions, 2 contexts) at 2 Hz, labeled by KSS and mapped to a continuous fatigue score. Decoding fidelity is high ($r \geq 0.9996$, $MAE < 0.25$). From 60 s/10 s windows we extract instability features (SD, 0.05–0.3 Hz corrective-oscillation bandpower). Wilcoxon exact tests show significant shifts at high fatigue ($p \leq 0.001953$). Cluster-robust regression improves R^2 0.266 \rightarrow 0.716; LODO reduces RMSE 0.198 \rightarrow 0.122 and raises prediction correlation 0.525 \rightarrow 0.823. Findings match reduced vigilance and sensorimotor control stability under fatigue. This supports 4-PID OBD-II as a low-cost edge fatigue-warning modality.
Keywords: OBDII; PID; fatigue; driving behaviour.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v12i2.184>

1. Pendahuluan

Kecelakaan lalu lintas tetap menjadi isu keselamatan yang penting di berbagai negara, dengan beban kematian dan cedera yang tinggi. Di antara faktor risiko yang sulit dikendalikan, kelelahan dan kantuk (*driver fatigue/drowsiness*) berkontribusi pada kegagalan deteksi bahaya, penurunan kewaspadaan berkelanjutan, serta keterlambatan respon terhadap kejadian tak terduga. Laporan keselamatan jalan global menekankan bahwa risiko kecelakaan tidak hanya ditentukan oleh kondisi kendaraan dan infrastruktur, tetapi juga oleh kondisi manusia (*human factors*) selama berkendara [1]. Ringkasan statistik kecelakaan lalu lintas di beberapa yurisdiksi menunjukkan bahwa insiden yang terkait kantuk masih muncul secara konsisten, namun sering kali *under-reported*

karena keterbatasan pembuktian di lapangan [2], [3]. Dengan demikian, sistem identifikasi kelelahan yang non-invasif dan dapat diintegrasikan pada kendaraan menjadi kebutuhan nyata untuk pencegahan kecelakaan.

Berbagai pendekatan deteksi kelelahan telah dikembangkan, mulai dari kamera (perilaku okular/pose) hingga sensor fisiologis (EEG/ECG). Namun pada implementasi praktis, kamera sensitif terhadap pencahayaan, sedangkan fisiologis menuntut *wearable* serta memiliki hambatan kenyamanan dan biaya yang tinggi [14]. Artikel ini mengusung dalam memanfaatkan kanal diagnostik standar OBD-II sebagai sumber sinyal perilaku berkendara berbasis *vehicle measures*. Akuisisi data dimulai dari DLC OBD-II (SAE J1962) yang menghubungkan ECU melalui jaringan *Diagnostic communication over Controller Area Network* (Do-CAN)/ISO-TP (ISO 15765-4), sementara ELM327 berperan sebagai *gateway* yang menerjemahkan frame CAN/ISO-TP menjadi *stream* serial (UART/USB) untuk diproses pada platform *embedded system* [8]–[12]. Konfigurasi *AT command* meliputi pemilihan protokol, echo/linefeed, dan pengaturan *timeout* diterapkan untuk menekan *jitter* dan memastikan determinisme polling empat PID Mode 01 sesuai praktik OBD-II dan ketentuan layanan diagnostik [7], [11]. Selain nilai engineering (Phys_*), payload mentah ECU (RAW_*) dicatat untuk auditabilitas sehingga artefak komunikasi akibat transien suplai 12 V, *Electromagnetic Interference* (EMI), atau *noise* dapat dipisahkan dari perubahan perilaku pengemudi.

Pada jalur akuisisi data tersebut, dataset dibangun sebagai rekaman *time-series* 2 Hz dari empat sinyal longitudinal yang paling universal pada OBD-II, yaitu *speed* (0x0D), *engine speed/RPM* (0x0C), *throttle position* (0x11), dan *calculated engine load* (0x04). Untuk mengendalikan faktor pengganggu, metadata konteks (*traffic*, *curvature*, *roughness*, *grade*, serta status istirahat) disertakan sebagai kovariat. *Ground truth* kelelahan diukur menggunakan *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS) yang tervalidasi terhadap performa dan indikator *neurofisiologis*, lalu dipetakan ke *Label Fatigue* dan diinterpolasi sepanjang sesi [5]. Sinyal kemudian dipartisi pada *window* 60 detik (step 10 detik) untuk mengekstrak fitur ketidakstabilan kontrol longitudinal, menggunakan standar deviasi (*variabilitas*), *bandpower* 0,05–0,3 Hz (osilasi korektif), serta jerk RMS dari akselerasi IMU. Bukti empiris diuji melalui uji *repeated-measures* berbasis sesi (*Wilcoxon exact*), regresi linear dengan *cluster-robust standard errors*, dan evaluasi generalisasi *leave-one-driver-out* (LODO), sehingga temuan tidak semata dari auto-korelasi *window* atau spesifik pengemudi.

Pemilihan empat PID tersebut memiliki dasar neurofisiologis dan teori kontrol yang kuat. Mengemudi merupakan *loop kontrol* sensorimotor kontinu, dimana pengemudi mengestimasi keadaan kendaraan/jalan, membandingkannya dengan target, mengeksekusi aksi (*throttle/brake*), lalu mengevaluasi umpan balik. Kelelahan dan kurang tidur menurunkan *vigilance* dan memperlambat pemrosesan umpan balik neurobehavioral, sehingga kontrol menjadi kurang stabil dan memunculkan koreksi mikro yang lebih sering dan lebih variatif [4], [6]. Pada domain longitudinal, instabilitas tersebut paling langsung tercermin pada *throttle* (aksi kontrol), RPM dan load (respon mesin/permintaan torsi), serta *speed* (keluaran regulasi). Dengan kerangka ini, kontribusi original riset dirangkum sebagai berikut, pertama pada rancang bangun sistem akuisisi empat PID OBD-II berbasis *embedded system* dengan *logging raw payload* ECU untuk auditabilitas, kedua pada penyusunan dataset kondisi nyata beranotasi KSS dengan kovariat konteks untuk mengendalikan confounding, ketiga pada pembuktian empiris melalui uji statistik dan evaluasi LODO bahwa fitur ketidakstabilan empat PID memenuhi syarat sebagai indikator kelelahan yang dapat digeneralisasi antar pengemudi.

2. Metodologi

Penelitian ini dimulai dengan merancang sistem akuisisi data, skema komunikasi OBD-II, pembentukan dataset dan label kelelahan, ekstraksi fitur, serta prosedur analisis statistik. Dua varian berkendara digunakan pada jalan luar kota pada siang hari dengan anotasi data LuarKota_Siang () dan jalan dalam kota pada malam hari dengan anotasi data DalamKota_Malam ().

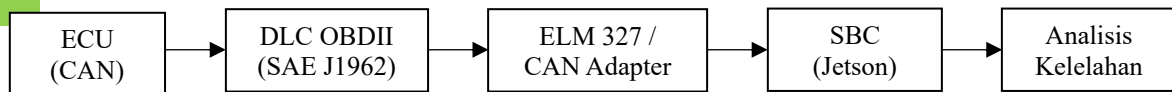
Arsitektur Sistem Akuisisi Embedded dan Antarmuka OBD-II

Pada Gambar 1(a) menunjukkan blok diagram sistem. ECU kendaraan diakses melalui *port* OBD-II (DLC) yang berada biasanya dibawah *dashboard* pengemudi. Antarmuka ELM327 mengonversi protokol kendaraan (ISO 15765-4 CAN) menjadi *stream* serial (USB/UART) yang dibaca oleh SBC. SBC menjalankan modul akuisisi (polling empat PID), *time-stamping*, penyimpanan (CSV dan *raw payload*), *windowing*, serta modul analitik untuk estimasi kelelahan dan pemicu peringatan. Gambar 1(b) memperlihatkan skema konektivitas fisik dan jalur daya yang relevan untuk replikasi sistem di kendaraan nyata.

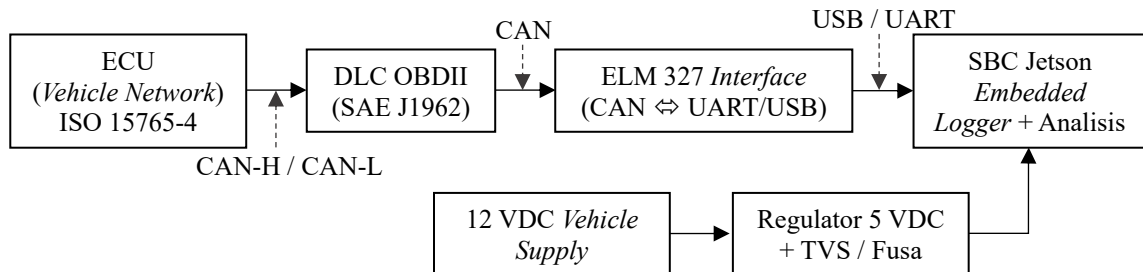
Antarmuka fisik menggunakan konektor DLC OBD-II (SAE J1962 [10]) dengan akses ke jalur CAN-H/CAN-L pada kendaraan berprotokol ISO 15765-4 (Do-CAN) [12]. Modul ELM327 berperan sebagai *gateway* yang mengimplementasikan transport ISO-TP dan menerjemahkan *frame* CAN (8 byte) menjadi *stream* ASCII *hexadesimal* melalui UART/USB, sehingga *Single board computer* (SBC) dapat berfungsi sebagai unit akuisisi dan komputasi *edge* tanpa perlu mengintegrasikan *transceiver* CAN secara langsung.

Implementasi perangkat keras mempertimbangkan karakteristik kelistrikan kendaraan sebesar 12 V. Pada prototipe, suplai ke antarmuka dan sistem *embedded* diturunkan melalui regulator 5 V dengan proteksi dasar (sekering/fuse dan TVS) untuk meredam lonjakan tegangan, serta tata letak kabel yang meminimalkan interferensi

elektromagnetik (EMI). Aspek ini penting agar *noise* tidak memicu kesalahan framing serial, retransmisi ISO-TP, maupun *timeout* respons ECU.



Gambar 1.a. Blok diagram sistem akuisisi empat PID OBD-II pada *platform embedded system*



Gambar 1.b. Skema antarmuka fisik OBD-II, jalur komunikasi CAN menuju ELM327 dan SBC

Protokol OBD-II dan *Decoding* PID

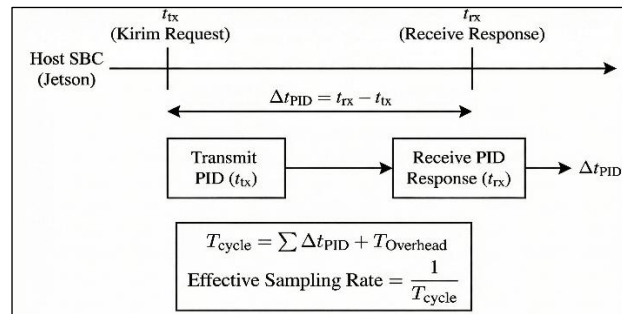
Akuisisi menggunakan *service Mode 01 (current data)*. Setiap permintaan PID dikirim dalam bentuk string ASCII melalui serial (seperti “010C” untuk RPM). ECU merespon *payload* heksadesimal (41 0C A B ...). Tabel 1 merangkum PID yang digunakan dan rumus *decoding* standar [7]. Pada kendaraan CAN, permintaan Mode 01 pada umumnya dipancarkan sebagai *functional request* ke ID 0x7DF dan ECU membalas melalui ID respons (seperti 0x7E8) sesuai Do-CAN [12]. Pada PID yang digunakan pada studi ini, respons muat dalam *single-frame*, namun jalurnya tetap menyiapkan penanganan *multi-frame* (ISO-TP) melalui konfigurasi ELM327 [13]. Pada level antarmuka serial, parameter deterministik diatur melalui AT command seperti ATZ, ATE0, ATL0, ATS0, ATH1, ATSP6/ATSP0, *adaptive timing* untuk mengurangi jitter sampling dan menjaga konsistensi urutan polling [8], [11].

Tabel 1. Daftar PID, rumus *decoding*, dan hipotesis keterkaitannya dengan kelelahan.

PID (Mode 01)	Parameter	Satuan	Rumus <i>decoding</i> (byte A,B)	Alasan terkait kelelahan
0x0D	Vehicle Speed	km/h	$v = A$	Variasi longitudinal: fluktuasi target/ <i>overshoot</i>
0x0C	Engine RPM	rpm	$\text{rpm} = (256 \cdot A + B)/4$	Refleksi koreksi kontrol dan <i>load</i> mesin
0x11	Throttle Position	%	$\text{TPS} = (A \cdot 100)/255$	Motor control tremor/ <i>over-correction</i>
0x04	Calculated Engine Load	%	$\text{Load} = (A \cdot 100)/255$	Beban/permintaan torsi & kompensasi

Validasi Akuisisi Data, AT Command, dan Latensi Polling

Untuk memastikan kualitas data, sistem mencatat *raw payload* ECU per PID (RAW_Speed, RAW_RPM, RAW_Throttle, RAW_Load) sehingga nilai engineering unit (Phys_*) dapat diverifikasi silang. Pada Gambar 2 memperlihatkan skema pengukuran latensi polling empat PID, sedangkan pada Gambar 3 menampilkan contoh *log serial (AT command)* dan contoh *raw payload* beserta hasil *decoding*. Karena sistem ini ditujukan sebagai instrumentasi *embedded system automotive*, proses akuisisi menerapkan penjadwalan berbasis *clock monotonik* dan *buffer* antrian (*ring-buffer*) agar operasi tulis/baca serial tidak menggeser *timestamp*. Setiap siklus *polling* mencatat waktu pengiriman *query PID* (t_{tx}), kemudian waktu respons lengkap diterima (t_{rx}), dan mencatat waktu komit penyimpanan (t_{log}). Latensi per PID didefinisikan sebagai ($t_{rx} - t_{tx}$), sedangkan *jitter* diukur dari simpangan baku latensi antar siklus. Praktik instrumentasi ini lazim pada sistem akuisisi jaringan kendaraan untuk memastikan perubahan sinyal merefleksikan dinamika kendaraan atau pengemudi, bukan artefak komunikasi [15]. Selain validasi visual, kami melakukan verifikasi numerik pada 5,000 sampel dengan mendekode ulang *raw payload* dan membandingkannya terhadap Phys_*. Hasilnya dirangkum pada Tabel 2: korelasi sangat tinggi ($r \geq 0,9996$) dengan MAE kecil (speed 0.214 km/h, RPM 0.245 rpm, throttle 0.076%, load 0.144%).



Gambar 2. Skema instrumentasi pengukuran latensi polling empat PID dan sinkronisasi *timestamp*.

```
Contoh raw payload (hex) mode 01 (ISO-TP):
Speed PID 0x0D : 04 41 0D 0B 00 00 00 00
RPM   PID 0x0C : 04 41 0C 16 6F 00 00 00
Throttle PID 0x11: 04 41 11 AC 00 00 00 00
Load  PID 0x04 : 04 41 04 A3 00 00 00 00
```

Gambar 3.a. Tampilan *serial monitor* respon raw payload ECU (Mode 01) yang direkam untuk audit dan verifikasi silang.

```
Contoh frame respons Mode 01 (ECU → tester) via ISO 15765-4 (CAN):
PID 0x0D (Vehicle Speed): 41 0D 3C → A=0x3C=60 km/h
PID 0x0C (Engine RPM): 41 0C 1A F8 → (256*A+B)/4 = (0x1AF8)/4 = 1726 rpm
PID 0x11 (Throttle Pos): 41 11 40 → (A/255)*100 = 25.1 %
PID 0x04 (Engine Load): 41 04 80 → (A/255)*100 = 50.2 %
```

Gambar 3.b. Tampilan *serial monitor* untuk decoding raw payload menjadi engineering units.

Tabel 2. Validasi dekoding raw payload ECU terhadap nilai engineering unit (Phys *).

Parameter	MAE	Korelasi (r)
Speed (PID 0x0D)	0.214 km/h	0.999936
RPM (PID 0x0C)	0.245 rpm	1.000000
Throttle (PID 0x11)	0.076 %	0.999889
Load (PID 0x04)	0.144 %	0.999603

Pengambilan Dataset dan Protokol Pelabelan KSS

Dataset terdiri dari lima pengemudi yang berkendara sejauh ± 150 km dari kota pelaihari menuju kota banjarmasin di kalimantan selatan, setiap pengemudi mempunyai dua sesi, sehingga penelitian ini menghasilkan 10 sesi pengambilan data, dengan total durasi 51.80 jam pada laju sampling 2 Hz ($\Delta t = 0.5$ s dan jitter std = 0.0). Total sampel terakuisisi 373,000. Setiap sesi mencakup segmen mengemudi dan segmen istirahat (rata-rata proporsi istirahat 0.143). Subjek pengemudi adalah orang dewasa dengan rata-rata usia 32 tahun dengan standar deviasi 4 tahun. Seluruh subjek memiliki pengalaman mengemudi lebih dari 5 tahun yang memiliki surat jin mengemudi. Tabel 3 merangkum durasi dan jumlah titik anotasi per sesi. *Ground truth* kelelahan menggunakan *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS), skala 1–9 yang tervalidasi terhadap performa dan indikator fisiologis [5]. Pada dataset ini, tersedia 166 titik KSS dengan interval median 18.0 menit (rentang 11.7–25.0 menit). Nilai KSS dipetakan ke *Label Fatigue* kontinu (0–1) menggunakan fungsi monotonik yang mempertahankan urutan tingkat kantuk, lalu diinterpolasi sepanjang *timeline* sesi.

Tabel 3. Ringkasan durasi, proporsi istirahat, dan jumlah anotasi KSS per sesi.

Driver	Kondisi	Durasi (jam)	Proporsi istirahat	Jumlah titik KSS
DRV 01	DalamKota Malam	4.47	0.204	15
DRV 01	LuarKota Siang	5.79	0.055	18
DRV 02	DalamKota Malam	5.09	0.130	16
DRV 02	LuarKota Siang	4.52	0.143	15
DRV 03	DalamKota Malam	5.58	0.187	19
DRV 03	LuarKota Siang	5.57	0.084	18
DRV 04	DalamKota Malam	5.61	0.236	17
DRV 04	LuarKota Siang	4.55	0.131	15
DRV 05	DalamKota Malam	5.44	0.170	17
DRV 05	LuarKota Siang	5.18	0.096	16

Ekstraksi Fitur, Analisis Statistik dan Evaluasi Generalisasi

Sinyal empat PID diproses dalam *window* 60 detik dengan step 10 detik untuk menangkap dinamika kontrol longitudinal. *Window* yang didominasi segmen istirahat (>10%) atau kecepatan rata-rata ≤ 10 km/h dieliminasi agar fitur merefleksikan perilaku mengemudi aktif. Dari tiap *window*, diekstrak fitur variasi (STD) serta *bandpower low-frequency* (0.05–0.3 Hz) yang merepresentasikan osilasi koreksi kontrol. Selain itu, *jerk* RMS dihitung dari turunan akselerasi IMU untuk menangkap ketidakhalusan (*jerkiness*). Total *window valid* yang dianalisis adalah 15,867. Pembuktian empiris dilakukan pada dua tingkatan. Pertama, pengujian *repeated-measures* berbasis sesi, dimana untuk setiap sesi, median fitur pada kondisi kelelahan rendah (*Label Fatigue* $\leq 0,40$) dibandingkan dengan kondisi tinggi (*Label Fatigue* $\geq 0,75$), lalu perbedaan antar sesi diuji menggunakan *Wilcoxon signed-rank exact* (satu sisi; hipotesis fitur meningkat pada kelelahan tinggi). Kedua, model regresi linear dengan standar *error cluster-robust* (*cluster* = sesi) digunakan untuk mengestimasi kontribusi fitur keempat PID dengan mengendalikan kovariat kondisi (*traffic*, *curvature*, *roughness*, *grade*) dan *time-on-task*. Untuk menguji generalisasi antar pengemudi, dilakukan *leave-one-driver-out* (LODO) dengan metrik RMSE dan korelasi, serta AUC untuk klasifikasi kelelahan berat (*Label_Fatigue* $\geq 0,90$).

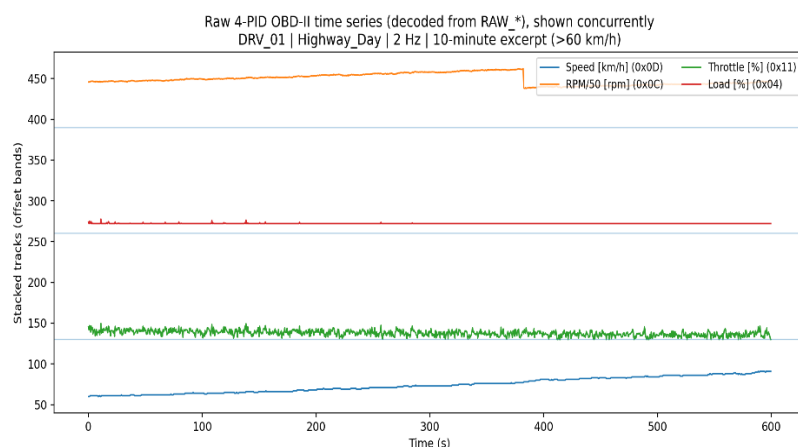
3. Hasil dan Pembahasan

Karakterisasi Data dan Distribusi Kelelahan

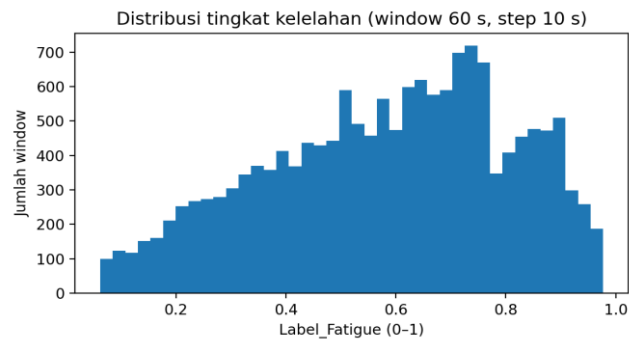
Hasil akuisisi data empat PID seperti pada gambar 4 yang memperlihatkan data *polling* secara sinkron pada laju **2 Hz** (*speed*, *RPM*, *throttle*, dan *calculated engine load*) dan divisualisasikan sebagai *stacked time-series tracks* untuk memperlihatkan koherensi antar-sinyal pada satu sumbu waktu. Nilai pada kurva di *decoding* langsung dari *payload* mentah ECU (RAW_*), sehingga grafik ini berfungsi sebagai bukti bahwa sinyal yang dianalisis memang berasal dari respons bus Do-CAN/ISO-TP dan bukan hasil rekonstruksi pasca-proses. Praktik pencatatan ganda (RAW_* dan Phys_*) memperkuat auditabilitas karena hubungan “*payload* menjadi nilai *engineering unit*” dapat diverifikasi kapan pun untuk menghindari bias akibat artefak komunikasi.

Pada gambar 5 memperlihatkan distribusi *Label_Fatigue* pada *window* analisis. Nilai median berada di sekitar 0.609, menunjukkan cakupan rentang rendah hingga tinggi tanpa dominasi ekstrem. Pada kondisi DalamKota_Malam, proporsi istirahat cenderung lebih tinggi dibanding LuarKota_Siang (Tabel 3), selaras dengan kenaikan dorongan tidur pada periode malam. Validitas akuisisi menjadi prasyarat dalam artikel ini karena seluruh analisis diturunkan dari keempat PID. Hasil pada Tabel 2 menunjukkan kesesuaian hampir sempurna antara dekoding *raw payload* dan nilai *engineering unit*. Dengan *r* mendekati 1 dan MAE < 0,25 unit, dataset memenuhi syarat auditabilitas, sehingga argumen empiris tidak bergantung pada asumsi “*black-box*” akuisisi data.

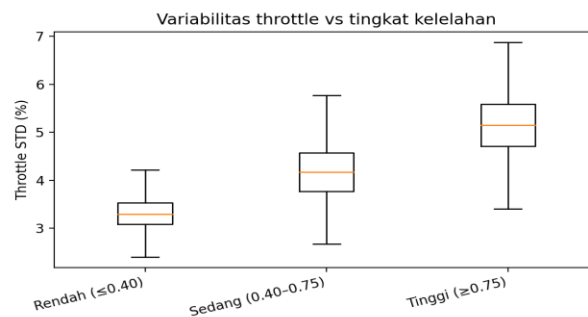
Pada gambar 6 memperlihatkan peningkatan *variabilitas throttle* (STD) seiring kenaikan *Label_Fatigue*. Secara fisiologis, *kelelahan* memicu penurunan kontrol motorik halus dan peningkatan *variabilitas timing respon*, yang dapat bermanifestasi sebagai koreksi *throttle* yang lebih fluktuatif (*over/under-correction*). Pada domain frekuensi, Gambar 7 menunjukkan *bandpower* throttle pada 0,05–0,3 Hz meningkat pada kelelahan tinggi, mengindikasikan osilasi korektif berulang pada kontrol longitudinal.



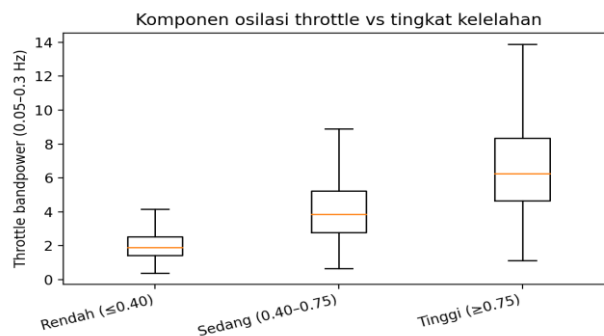
Gambar 4. Data keempat PID selama 10 menit dari DRV_01



Gambar 5. Distribusi *Label_Fatigue* pada *window* 60 s (step 10 s) untuk segmen mengemudi aktif.



Gambar 6. Boxplot *STD throttle* (%) pada tiga rentang *Label_Fatigue*.



Gambar 7. Boxplot *bandpower throttle* (0,05–0,3 Hz) pada tiga rentang *Label_Fatigue*.

Uji *Repeated-Measures* Berbasis Sesi (*Wilcoxon Exact*)

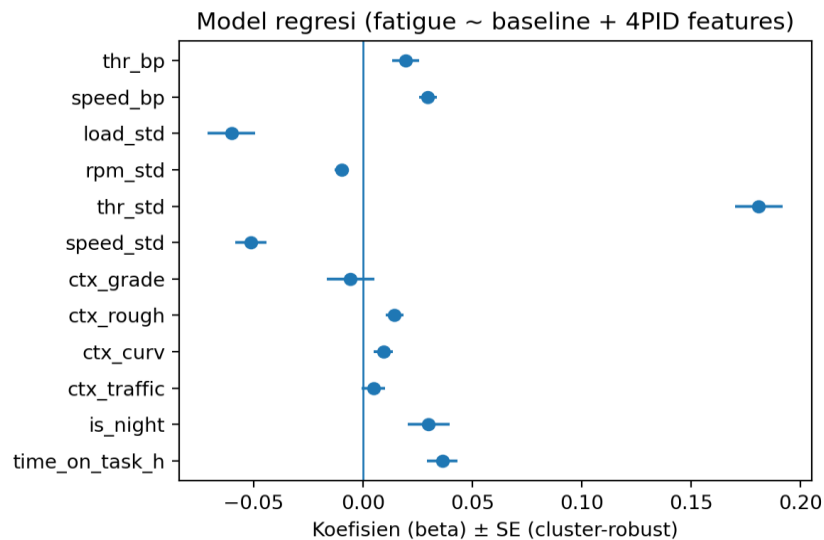
Untuk menghindari bias akibat *auto* korelasi *window*, kami merangkum fitur per sesi (median pada kondisi rendah dan tinggi) lalu menguji perbedaan antar sesi. Tabel 4 menunjukkan bahwa *STD throttle*, *STD RPM*, serta *bandpower speed/throttle* meningkat secara konsisten pada kelelahan tinggi ($p \leq 0,001953$; $r \approx 1,00$ pada beberapa fitur), sedangkan *jerk* RMS tidak selalu meningkat secara konsisten. Temuan ini konsisten dengan teori bahwa kelelahan lebih dahulu memengaruhi kontrol korektif dan stabilitas (*throttle/RPM*) dibanding menghasilkan *jerk* besar yang lebih dipengaruhi kondisi jalan.

Tabel 4. Uji *Wilcoxon signed-rank exact* (satu sisi) pada perbandingan fitur kelelahan tinggi dan rendah.

Fitur (<i>window</i> 60 s)	n sesi	Median Δ (Tinggi–Rendah)	p (<i>exact</i> , satu sisi)	r (<i>rank-biserial</i>)
<i>STD Speed</i> (km/h)	9	0.465	0.001953	1.000
<i>STD Throttle</i> (%)	9	1.814	0.001953	1.000
<i>STD RPM</i> (rpm)	9	14.581	0.001953	1.000
<i>STD Load</i> (%)	9	0.464	0.027344	0.733
<i>Bandpower Speed</i> (0.05–0.3 Hz)	9	0.144	0.001953	1.000
<i>Bandpower Throttle</i> (0.05–0.3 Hz)	9	4.372	0.001953	1.000
<i>Jerk</i> RMS (m/s ³)	9	0.096	0.212891	0.333

Model Regresi *Cluster-Robust* dan Peran Kovariat Kondisi

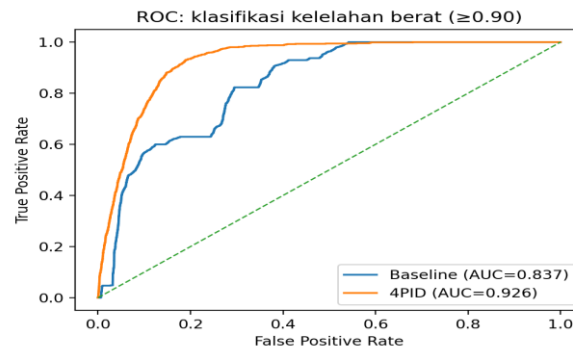
Model *baseline* (kondisi + *time-on-task*) menghasilkan $R^2 = 0.266$. Setelah menambahkan fitur 4 PID, R^2 meningkat menjadi 0.716, menunjukkan bahwa sinyal longitudinal dari keempat PID membawa informasi kelelahan yang substansial di luar variabel kondisi. Gambar 8 menyajikan koefisien regresi (fitur distandarkan). Koefisien positif pada STD *throttle* dan *bandpower speed/throttle* mengindikasikan peningkatan osilasi/koreksi kontrol seiring meningkatnya kelelahan, selaras dengan penurunan kemampuan motorik dan perhatian berkelanjutan pada kelelahan[6]. Sebaliknya, STD *speed* dapat berkoefisien negatif setelah kontrol kovariat, yang dapat ditafsirkan sebagai kecenderungan pengemudi menurunkan/menstabilkan kecepatan makro ketika lelah, sementara ketidakstabilan muncul pada komponen osilasi *low-frequency (bandpower)* dan pada *throttle/RPM*.



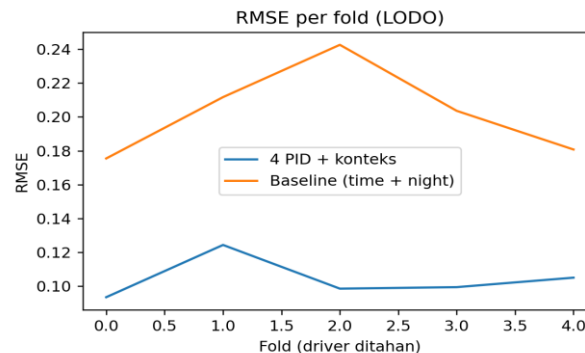
Gambar 8. Koefisien regresi (β) ± SE *cluster-robust* untuk model fatigue berbasis *baseline* dan fitur keempat PID.

Generalisasi Antar Pengemudi dengan Evaluasi LODO

Pada evaluasi LODO, model *baseline* menghasilkan RMSE rata-rata 0.198 dan korelasi 0.525, sedangkan model empat PID menghasilkan RMSE 0.122 dan korelasi 0.823. Artinya, peningkatan performa tetap bertahan ketika pengemudi uji tidak pernah muncul pada data latih. Untuk klasifikasi kelelahan berat (*Label_Fatigue* ≥ 0,90), AUC rata-rata meningkat dari 0.806 menjadi 0.905 (rentang AUC 4 PID: 0.849–0.959). Gambar 9 menampilkan kurva ROC pada seluruh window, sedangkan Tabel 5 merinci metrik per pengemudi. Untuk menilai kemampuan generalisasi antar-pengemudi (bukan sekadar fit pada sesi yang sama), evaluasi dilakukan menggunakan skema LODO. Gambar 10 yang memvisualisasikan RMSE per fold ketika satu pengemudi ditahan sebagai data uji, sehingga stabilitas performa antar individu dapat diamati secara langsung. Dimana setiap *fold* menahan satu pengemudi sebagai data uji, dan memperlihatkan bahwa penambahan fitur berbasis empat PID secara konsisten menurunkan error prediksi *Label_Fatigue* pada seluruh *fold* dibanding *baseline* (kondisi + *time-on-task*). Secara kuantitatif, RMSE *baseline* berada pada rentang 0,173–0,237, sedangkan RMSE model empat PID turun ke rentang 0,101–0,136 (Tabel 5); rata-rata RMSE menurun dari 0,1982 menjadi 0,1216 (reduksi relatif ≈ 38,4%), sekaligus menunjukkan penyempitan sebaran antar *fold* (rentang RMSE turun dari 0,064 menjadi 0,035, penurunan ≈ 45,3%), yang mengindikasikan performa yang lebih stabil lintas pengemudi. Perbaikan paling menonjol tampak pada *fold* dengan pengemudi paling menantang (mis. DRV_03): RMSE turun dari 0,237 menjadi 0,133, dan korelasi prediksi meningkat dari 0,342 menjadi 0,748. Dari perspektif inferensi ini, pola pada Gambar 10 menegaskan bahwa *baseline* berbasis waktu dan kondisi saja belum cukup menangkap variasi gaya mengemudi antar individu sehingga rentan terhadap error saat dihadapkan pada pengemudi yang tidak pernah terlihat pada fase pelatihan; sebaliknya, fitur ketidakstabilan yang dibentuk dari aksi kontrol longitudinal (*throttle*) dan respons *powertrain* (RPM dan *load*, serta *speed*) menyediakan sinyal yang lebih “*driver-invariant*” dan lebih dekat dengan mekanisme fisiologis kelelahan. Secara neurofisiologis, penurunan *vigilance* dan degradasi stabilitas *loop* kontrol sensorimotor pada kondisi kelelahan akan memunculkan koreksi *throttle* yang lebih variatif dan lebih berosilasi, yang kemudian tercermin pada fitur STD/*bandpower*; konsistensi penurunan RMSE dan peningkatan korelasi pada semua *fold* (r rata-rata 0,525 → 0,822) memperkuat bahwa peningkatan performa bukan artefak satu sesi tertentu, melainkan bukti generalisasi yang selaras dengan hipotesis penurunan kontrol-motorik akibat kelelahan.



Gambar 9. Kurva ROC klasifikasi kelelahan berat ($\geq 0,90$) pada baseline dan PID



Gambar 10. Perbandingan RMSE prediksi Label_Fatigue pada skema LODO

Tabel 5. Hasil LODO per pengemudi (RMSE, korelasi, dan AUC)

Driver left-out	RMSE baseline	RMSE 4PID	r baseline	r 4PID	AUC baseline	AUC 4PID
DRV_01	0.173	0.101	0.513	0.874	0.618	0.959
DRV_02	0.210	0.136	0.553	0.788	0.811	0.849
DRV_03	0.237	0.133	0.342	0.748		
DRV_04	0.196	0.122	0.563	0.847	0.866	0.880
DRV_05	0.175	0.116	0.652	0.855	0.931	0.933

Keterkaitan Teknologi Akuisisi, Kualitas Data dan Bukti Empiris Kelelahan

Kualitas inferensi pada studi berbasis *vehicle measures* ditentukan sejak tahap paling hulu, yaitu bagaimana sinyal diperoleh pada tingkat bus data dan bagaimana integritasnya dijaga. Pada sistem ini, langkah akuisisi dimulai dari DLC OBD-II (SAE J1962) yang menghubungkan ECU melalui jaringan CAN dengan *transport ISO-TP* (ISO 15765-4). ELM327 berfungsi sebagai *gateway* yang menerjemahkan *frame* CAN/ISO-TP menjadi *stream serial* (UART/USB) untuk diproses di platform embedded system atau SBC. Agar polling empat PID lebih deterministik, konfigurasi AT command (pemilihan protokol, *echo/linefeed*, dan *timeout*) disetel untuk menekan *jitter* dan mengurangi variasi latensi yang bersifat artifisial. Yang paling krusial, sistem tidak hanya menyimpan nilai *engineering unit* (Phys_*), tetapi juga *payload* mentah per PID (RAW_*). Dalam lingkungan kendaraan yang lazim mengalami transien suplai 12 V, EMI, dan potensi *noise* komunikasi mengharuskan strategi *dual logging*, ini memberi audit *trail* untuk verifikasi *post-hoc*, yaitu ketika muncul *delay/timeout* atau *anomaly framing*, kami dapat membedakan apakah anomali berasal dari artefak akuisisi atau benar-benar merupakan perubahan perilaku pengemudi. Dengan demikian, argumen empiris pada bagian hasil tidak bertumpu pada asumsi *black-box* akuisisi, melainkan pada data yang dapat diaudit.

Dari mekanisme akuisisi tersebut, dataset dibentuk sebagai rekaman *time-series* 2 Hz dari empat sinyal longitudinal yang relatif universal pada OBD-II: *speed* (0x0D), *RPM* (0x0C), *throttle position* (0x11), dan *calculated engine load* (0x04). Keempatnya dipilih bukan karena mudah diproses, tetapi karena secara fungsional merepresentasikan *loop kontrol longitudinal*, yaitu state kendaraan (*speed*), keluaran/keadaan mesin (RPM), input kontrol pengemudi (*throttle*), dan permintaan torsi/beban operasi (*load*). Untuk menjaga keterlacakan kondisi operasi dan mencegah *spurious association*, metadata kondisi (*traffic*, *curvature*, *roughness*, *grade*, serta status istirahat) diposisikan sebagai kovariat pengendali; ini penting karena ketidakstabilan *speed/throttle* dapat meningkat akibat jalan rusak atau kemacetan tanpa adanya kelelahan. *Ground truth* kelelahan diukur menggunakan KSS, dipetakan ke *Label_Fatigue* kontinu dan diinterpolasi sepanjang *timeline*, lalu sinyal dipartisi dalam *window* 60 detik (step 10 detik). Dari setiap *window* diekstrak fitur yang secara teoritis terkait penurunan performa kontrol;

yaitu standar deviasi sebagai ukuran variabilitas, bandpower 0,05–0,3 Hz sebagai indikator osilasi korektif berulang, dan *jerk* RMS dari akselerasi IMU untuk menangkap ketidakhalusan dinamika. Prosedur seleksi *window* (menyingkirkan segmen istirahat dan kecepatan rendah) memastikan fitur merepresentasikan dinamika kontrol pengemudi, bukan kondisi berhenti, idle, atau transisi non-mengemudi yang dapat mengaburkan interpretasi.

Rantai bukti empiris pada penelitian ini konsisten dari level sinyal hingga level inferensi dan tetap koheren ketika dikaitkan dengan teori kontrol sensorimotor. Pertama, validasi dekoding menunjukkan kesesuaian hampir sempurna antara RAW_* dan Phys_* ($r \sim 1$; MAE kecil), sehingga perubahan fitur yang diamati tidak dapat dijelaskan sebagai artefak *decoding*. Kedua, pada uji *repeated-measures* berbasis sesi (*Wilcoxon exact*), fitur variabilitas dan metrik osilasi, terutama yang diturunkan dari *throttle*/RPM serta *bandpower speed/throttle* yang meningkat pada kelelahan tinggi, yang secara fisiologis selaras dengan penurunan kontrol motorik halus, melemahnya *sustained attention*, dan keterlambatan pemrosesan umpan balik saat kelelahan. Ketiga, ketika kovariat konteks dikendalikan melalui regresi *cluster-robust*, penambahan fitur empat PID tetap meningkatkan daya dalam menjelaskan model secara substansial; dan evaluasi LODO memperlihatkan generalisasi antar pengemudi tetap kuat, sehingga sinyal yang ditangkap bukan semata pola spesifik individu atau rute. Secara konseptual, mengemudi adalah *loop* kontrol kontinu, dimana pengemudi mengamati state kendaraan/jalan, membandingkan dengan target, mengeksekusi aksi (*throttle/brake*), lalu memonitor respon. Kelelahan menurunkan stabilitas *loop* ini dan memunculkan koreksi yang lebih sering/kurang stabil tepatnya yang tercermin sebagai peningkatan osilasi dan variabilitas pada sinyal keempat PID. Temuan kontribusi *roughness/curvature* juga menegaskan pentingnya kontrol *confounding* sebagaimana dibahas pada literatur [4]. Dari perspektif implementasi, pendekatan empat PID unggul karena *non-invasif* dan berbiaya rendah, namun dibatasi pada kontrol longitudinal; integrasi sinyal lateral (*steering/lane/yaw rate*) atau sensor kondisi tambahan merupakan arah lanjutan untuk menurunkan *false alarm* dan memperluas cakupan fenomena kelelahan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini merancang dan memvalidasi sistem identifikasi kelelahan pengemudi berbasis data *driving behaviour* dari empat PID OBD-II (*speed* 0x0D, *RPM* 0x0C, *throttle* 0x11, dan *calculated engine load* 0x04) dengan *platform embedded system* yang menekankan pada integritas akuisisi data. Jalur akuisisi dimulai dari DLC OBD-II (SAE J1962) pada jaringan Do-CAN/ISO-TP (ISO 15765-4), ELM327 digunakan sebagai *gateway* CAN/ISO-TP ke serial (UART/USB), dan konfigurasi *AT command* diterapkan untuk menekan *jitter* serta menjaga determinisme polling empat PID. Validasi *decoding* menunjukkan kesesuaian hampir sempurna antara RAW_* dan Phys_* (korelasi mendekati 1 dan galat absolut rata-rata kecil), sehingga seluruh analisis berdiri pada fondasi data yang terverifikasi dan dapat diaudit. Dengan data akuisisi tersebut, proses analitik dibangun secara runut, dimulai dari sinyal *time-series* 2 Hz dilengkapi kovariat kondisi (*traffic, curvature, roughness, grade, serta status istirahat*) untuk mengendalikan *confounding*; *ground truth* KSS dipetakan ke *Label Fatigue* secara kontinu dan diinterpolasi sepanjang sesi, kemudian dilakukan *windowing* 60 detik (step 10 detik) pada segmen mengemudi aktif untuk mengekstrak fitur ketidakstabilan kontrol longitudinal (variabilitas/STD, *bandpower* 0,05–0,3 Hz sebagai osilasi korektif, dan *jerk* RMS). Nilai-nilai fitur ini diuji secara inferensial melalui *repeated-measures* berbasis sesi (*Wilcoxon exact*), regresi linear dengan *cluster-robust standard errors*, serta evaluasi generalisasi *leave-one-driver-out* (LODO), yang bersama-sama menunjukkan bahwa indikator berbasis empat PID menangkap sinyal kelelahan yang konsisten dan dapat digeneralisasi antar pengemudi. Secara neurofisiologis, peningkatan variabilitas dan osilasi pada *throttle*/RPM/load sejalan dengan penurunan *vigilance* dan stabilitas *loop* kontrol sensorimotor pada kondisi kelelahan, yang memunculkan koreksi *throttle* lebih sering dan kurang stabil. Dengan kombinasi auditabilitas akuisisi, pembuktian statistik, dan generalisasi, hasil penelitian kami pada artikel ini memberikan bukti empiris yang kuat atas kontribusinya sebagai solusi *non-invasif*, berbiaya rendah, dan kompatibel dengan kendaraan produksi untuk identifikasi kelelahan pada kondisi nyata. Penelitian lanjutan dapat memperluas cakupan dengan integrasi sinyal lateral dan sensor konteks untuk menekan *false alarm*.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kemenristek-BRIN yang telah memberikan bantuan pendanaan di tahun 2021 sehingga dapat menghasilkan data penelitian pada publikasi ini. Penelitian tersebut dibiayai melalui skema INSINAS tahun 2021 dengan no kontrak 20/INS/PPK/E4/2021.

Daftar Pustaka

- [1] WHO, "Global status report on road safety 2023, World Health Org. (WHO), Geneva, Switzerland," vol. 1, 2023, Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>.
- [2] N. Highway Traffic Safety Administration and U. Department of Transportation, "Summary of Motor Vehicle Traffic Crashes: 2023 Data 1 Summary of Motor Vehicle Traffic Crashes Key Findings."

- [3] B. C. Tefft, "Drowsy Driving in Fatal Crashes, United States, 2017–2021," AAA Foundation for Traffic Safety., Mar. 2024, Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://aaaafoundation.org/drowsy-driving-in-fatal-crashes-united-states-2017-2021>.
- [4] C. C. Liu, S. G. Hosking, and M. G. Lenné, "Predicting driver drowsiness using vehicle measures: Recent insights and future challenges," *J. Safety Res.*, vol. 40, no. 4, pp. 239–245, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.JSR.2009.04.005.
- [5] K. Kaida et al., "Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables," *Clinical Neurophysiology*, vol. 117, no. 7, pp. 1574–1581, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.CLINPH.2006.03.011.
- [6] H. P. A. Van Dongen, G. Maislin, J. M. Mullington, and D. F. Dinges, "The cumulative cost of additional wakefulness: dose-response effects on neurobehavioral functions and sleep physiology from chronic sleep restriction and total sleep deprivation," *Sleep*, vol. 26, no. 2, pp. 117–126, Mar. 2003, doi: 10.1093/SLEEP/26.2.117.
- [7] "ISO 15031-5:2015 - Road vehicles — Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics — Part 5: Emissions-related diagnostic services." Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/66368.html>
- [8] "Elm Electronics-Circuits for the Hobbyist OBD to RS232 Interpreter", Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: www.elmelectronics.com.
- [9] "Jetson Xavier NX Developer Kit," 2020.
- [10] "J1962_201509: Diagnostic Connector - Technical Standard." Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: https://saemobilus.sae.org/standards/j1962_201509-diagnostic-connector.
- [11] "J1979_201702: E/E Diagnostic Test Modes - Technical Standard." Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: https://saemobilus.sae.org/standards/j1979_201702-e-e-diagnostic-test-modes.
- [12] "ISO 15765-4:2021 - Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN) — Part 4: Requirements for emissions-related systems." Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/78384.html>.
- [13] S. Firdaus, "Rancang Bangun Interpreter On Board Diagnosis II(OBDII)," *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, vol. 14, no. 1, pp. 40–45, Jul. 2017, doi: 10.20527/flux.v14i1.3779
- [14] S. Firdaus and K. D. Artika, "DETEKSI KELELAHAN PENGEMUDI MOBIL MENGGUNAKAN CITRA WAJAH," *ELEMEN: JURNAL TEKNIK MESIN*, vol. 8, no. 1, pp. 16–21, Jun. 2021, doi: 10.34128/JE.V8I1.154.
- [15] "IEEE Standard for Motor Vehicle Event Data Recorder (MVEDR)," Art. no. 1616–2004, Sep. 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9654153.