

Perancangan Simulator ECU Sebagai Alat Diagnosis Kerusakan ECU Kendaraan

Ivan Christian Hernando^{1*}, Teng Sutrisno¹, Aurelio Alver Wijaya¹,
Yutaka Matthew Tandiono²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

² King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand

*Penulis korespondensi; E-mail: ivan.hernando@petra.ac.id

ABSTRAK

Ketergantungan sistem manajemen mesin pada *electronic control unit* (ECU) memicu kebutuhan akan alat diagnosis *off-board* yang aman dan efisien. Penelitian ini mengembangkan simulator ECU berbasis Arduino Uno dengan pendekatan *hardware-in-the-loop* (HIL) untuk mensimulasikan sinyal sensor CKP, CMP, dan analog. Pengujian dilakukan secara komparatif pada tiga unit: ECU Toyota Avanza K3-VE, Daihatsu Ayla 1KR-DE (normal), dan Daihatsu Ayla (*fault*). Hasil menunjukkan akurasi status output aktuator sebesar 100% dibandingkan kondisi nyata. Simulator berhasil mengidentifikasi kegagalan aktivasi koil silinder 3 pada unit *fault*, menampilkan kode DTC yang relevan melalui OBD-II *scanner*, serta menunjukkan karakteristik *hysteresis fan relay* sebesar 5 °C yang stabil. Alat ini terbukti efektif sebagai media pembelajaran logika kerja sistem mesin dan instrumen pra-diagnosis kerusakan ECU yang terkontrol dan ekonomis.

Kata Kunci: simulator ECU, diagnosis kerusakan ECU, Hardware-in-the-Loop, sinyal CKP–CMP, OBD-II.

ABSTRACT

The heavy reliance of modern engine management systems on the electronic control unit (ECU) has increased the demand for safe and efficient off-board diagnostic tools. This study developed an Arduino Uno-based ECU simulator using the hardware-in-the-loop (HIL) approach to replicate CKP, CMP, and analog sensor signals. Comparative testing was conducted on three units: Toyota Avanza K3-VE ECU, Daihatsu Ayla 1KR-DE ECU (normal), and a faulty Daihatsu Ayla ECU. Results showed a 100% accuracy in actuator output status compared to real-world conditions. The simulator successfully identified a cylinder 3 ignition coil failure on the faulty unit, displayed relevant DTCs via an OBD-II scanner, and demonstrated a consistent 5 °C fan relay hysteresis. This device proves effective as a pedagogical tool for ECU logic and a cost-effective instrument for controlled off-board ECU pre-diagnosis.

Keywords: ECU simulator, ECU fault diagnosis, Hardware-in-the-Loop, CKP–CMP signals, OBD-II.

PENDAHULUAN

Perkembangan sistem kendali otomotif modern menuntut pengujian perangkat lunak dan perangkat keras *electronic control unit* (ECU) secara sistematis menggunakan pendekatan *hardware-in-the-loop* (HIL) untuk menganalisis perilaku dinamis dan keandalannya sebelum diterapkan pada kendaraan nyata [1]. Jaringan komunikasi kendaraan berbasis CAN-Bus membuka peluang integrasi fungsi yang luas sekaligus menimbulkan tantangan keamanan dan kerentanan ECU terhadap serangan siber, sehingga isu keamanan komunikasi menjadi bagian penting dalam perancangan dan pengujian sistem [2]. Implementasi ECU berbasis mikrokontroler pada mesin pembakaran skala kecil menunjukkan bahwa fungsi pengendalian dasar dapat direalisasikan dengan arsitektur sederhana dan berbiaya rendah, sehingga sesuai untuk riset terapan dan pendidikan vokasi [3].

Berbagai media pembelajaran dan alat uji dikembangkan untuk menjembatani teori dan praktik, mulai dari training kit *engine management system* (EMS) pada kendaraan seperti Toyota Avanza yang meningkatkan pemahaman peserta didik terhadap sensor, ECU, dan aktuator [4], serta simulator EMS yang terbukti meningkatkan minat dan kompetensi dalam perbaikan sistem injeksi elektronik [5]. Kompleksitas sistem diagnostik semakin meningkat pada kendaraan listrik dan hibrida, di mana OBD-II tetap menjadi sarana utama pemantauan kondisi komponen [6], sementara keandalan pembacaan sinyal sensor CKP dengan pola gigi hilang (*missing tooth*) sangat menentukan akurasi penentuan sudut dan putaran mesin [7]. Untuk mendukung pengujian tanpa melibatkan mesin sungguhan, dikembangkan sistem HIL berbiaya rendah sebagai sarana edukasi dan validasi fungsi ECU [8], *ECU bench simulation tool* yang memungkinkan pengujian ECU di luar kendaraan dengan skenario terkontrol dan mudah diulang [9], serta penerapan HIL pada sistem kontrol motor listrik sebagai media instruksional untuk pembelajaran perancangan dan pengujian sistem kontrol [10]. Simulator ECU untuk mesin kendaraan modern juga dimanfaatkan untuk menjembatani pemahaman mahasiswa terhadap integrasi sensor, ECU, dan aktuator dalam sistem otomotif [11].

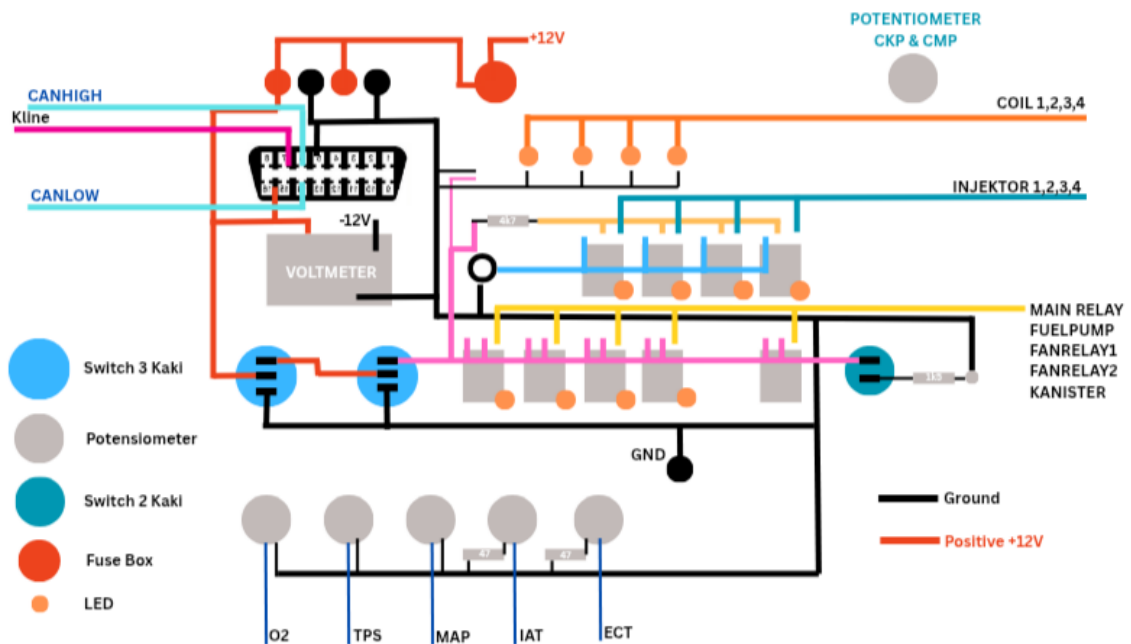
Aspek keamanan dan arsitektur sistem turut menjadi fokus penting dalam pengembangan teknologi ini. Pengujian keamanan siber otomotif dilakukan secara sistematis untuk mengidentifikasi kelemahan ECU dan infrastrukturnya [12], sementara validator ECU berbasis antarmuka CAN digunakan untuk menguji komunikasi dan respons ECU terhadap berbagai kondisi tanpa bergantung pada kendaraan [13]. Konsep virtual ECU dieksplorasi sebagai sarana pengembangan dan pengujian perangkat lunak otomotif sebelum implementasi pada perangkat keras [14], dan simulator jaringan komunikasi otomotif dikembangkan untuk meniru lalu lintas data antar ECU tanpa risiko terhadap kendaraan sebenarnya [15]. Penggunaan multicore ECU dengan pengaturan *runnable* dan penjadwalan tugas yang tepat menjadi kunci untuk mengelola kompleksitas fungsi kendaraan modern [16], sejalan dengan evolusi *embedded systems* otomotif yang bergeser menuju sistem terintegrasi dengan otomasi dan konektivitas lebih tinggi [17]. Klasifikasi ECU berdasarkan karakteristik keselamatan dan keamanan memberikan dasar untuk menentukan prioritas perlindungan dan strategi pengujian [18], sedangkan kerangka kerja inspeksi ECU berbasis simulasi pada tahap produksi memastikan unit memenuhi spesifikasi fungsional dan kualitas [19]. Pendekatan berbasis pembelajaran mesin dikembangkan untuk mendeteksi anomali dan mengidentifikasi ECU pada jaringan kendaraan kompleks [20], dan skema enkripsi ulang bertingkat pada ECU untuk kendaraan otonom dirancang untuk meningkatkan perlindungan terhadap manipulasi data serta akses tidak sah pada sistem kendali [21]. Berdasarkan perkembangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pembuatan simulator ECU berbasis mikrokontroler sebagai media pembelajaran dan pra-diagnosis yang selaras dengan kebutuhan pendidikan vokasi dan tuntutan teknologi otomotif modern [3].

METODE

Metode penelitian ini disusun dengan pendekatan eksperimental berbasis HIL untuk merancang dan mengevaluasi simulator ECU berbasis Arduino Uno sebagai media pra-diagnosis dan pembelajaran kerja ECU Toyota Avanza K3-VE dan Daihatsu Ayla 1KR-DE. Tahapan utama meliputi studi literatur, perancangan sistem simulator, pemilihan dan perakitan komponen, pemrograman mikrokontroler, serta pengujian fungsional dan komparatif terhadap ECU kendaraan nyata.

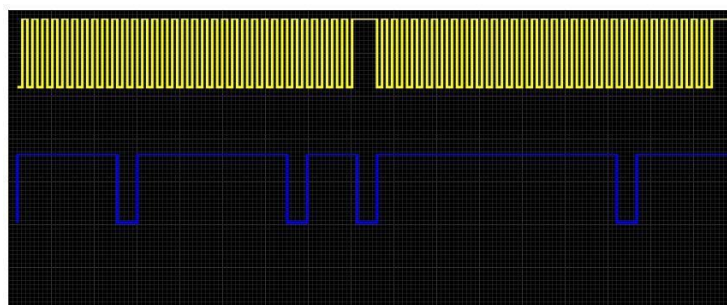
Tahap awal adalah studi literatur yang mencakup karakteristik sinyal sensor CKP dan CMP, arsitektur sistem manajemen mesin pada kedua kendaraan referensi, prinsip kerja OBD-II, dan penerapan HIL pada sistem otomotif. Berdasarkan kajian ini disusun diagram blok instalasi simulator ECU yang ditampilkan pada Gambar 1. Diagram tersebut menggambarkan hubungan antara sumber catu daya 12 V dan 5 V, papan Arduino Uno sebagai generator sinyal, jaringan potensiometer yang merepresentasikan sensor analog (TPS, MAP, ECT, IAT, dan sensor oksigen), ECU yang diuji, rangkaian LED dan relay sebagai indikator aktuator (injektor, koil, *main relay*, *fuel pump relay*, dan *fan relay*), serta koneksi ke scanner OBD-II. Gambar 1 menegaskan alur utama sistem, yaitu: potensiometer dan Arduino membangkitkan sinyal sensor lalu ECU

memproses dan mengeluarkan perintah actuator lalu status aktuator divisualisasikan dan sekaligus dipantau melalui OBD-II.



Gambar 1. Diagram perancangan sistem simulator ecu

Tahap berikutnya adalah perancangan dan perakitan perangkat keras simulator sesuai blok diagram tersebut. Arduino Uno diposisikan sebagai pusat pembangkitan sinyal digital CKP dan CMP sekaligus pembaca masukan analog dari potensiometer sensor. Rangkaian disusun sedemikian rupa sehingga pin-pin kritis ECU Avanza dan Ayla (CKP, CMP, sensor analog, serta output aktuator) terhubung ke terminal simulator tanpa melibatkan mesin dan sistem kelistrikan kendaraan. Setelah pemasangan, dilakukan verifikasi tegangan suplai, kontinuitas kabel, dan linearitas respon potensiometer menggunakan multimeter untuk memastikan instalasi simulator sesuai rancangan pada Gambar 1 dan siap diprogram serta diuji.



Gambar 2. Pulsa CKP dan CMP Ayla

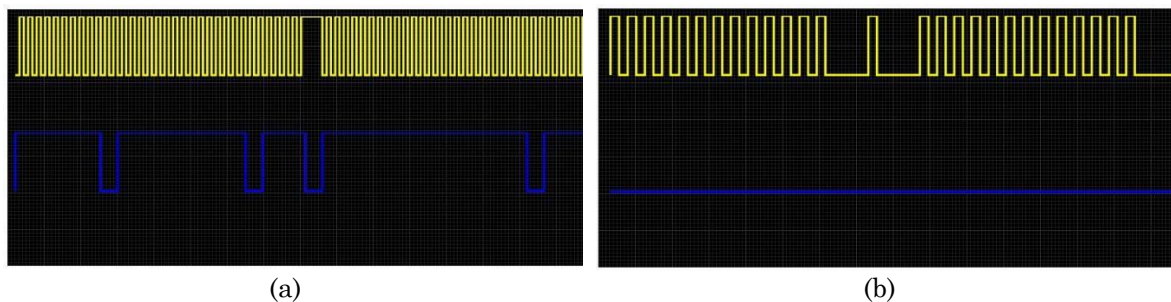
Pemrograman mikrokontroler dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++ untuk membangkitkan sinyal CKP dan CMP dalam bentuk pulsa digital yang frekuensinya bergantung pada posisi potensiometer RPM. Pola pulsa disusun berdasarkan skema sinyal CKP–CMP yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut ditampilkan bentuk gelombang CKP dengan pola gigi hilang (*missing tooth*) sesuai konfigurasi roda gigi mesin, serta hubungan fasa dengan sinyal CMP yang menandai posisi siklus kerja silinder. Skema ini memastikan ECU tetap dapat mendeteksi *missing tooth* dan menentukan TDC sehingga algoritma pengapian dan injeksi berjalan normal meskipun mesin fisik tidak digunakan. Program Arduino membaca nilai potensiometer RPM, memetakannya ke periode pulsa CKP–CMP sesuai skema pada Gambar 2, sekaligus mengatur keluaran analog sensor via potensiometer untuk divalidasi melalui *live data* OBD-II.

Tahap pengujian dimulai dengan uji fungsional simulator. Pengujian perangkat keras mencakup pemeriksaan kestabilan catu 5 V dan 12 V, pengecekan jalur sinyal terhadap *short* atau putus, serta pengamatan bentuk dan frekuensi gelombang CKP–CMP (kesesuaian dengan skema pada Gambar 2). Pengujian perangkat lunak dilakukan menggunakan *serial monitor* untuk memastikan perubahan RPM simulasi berbanding lurus dengan putaran potensiometer dan bahwa pembacaan sensor analog berada dalam rentang yang diharapkan. Integrasi awal dengan ECU dilakukan dengan menghubungkan simulator ke ECU yang terisolasi, kemudian diperiksa apakah ECU dapat diakses oleh scanner OBD-II, merespons sinyal simulasi, dan menghasilkan *diagnostic trouble codes* (DTC) ketika sinyal tertentu dihentikan atau dimanipulasi.

Pengujian utama dilakukan secara komparatif pada tiga ECU, yaitu ECU Ayla 1KR-DE 1 (normal), ECU Ayla 1KR-DE 2 (fault pada rangkaian pengapian silinder 3), dan ECU Avanza K3-VE (normal). Untuk setiap ECU dilakukan beberapa skenario variasi RPM dan beban sensor dengan memutar potensiometer simulator, sembari mengamati pola *ON/OFF* injektor, koil, *main relay*, *fuel pump relay*, dan *fan relay* melalui LED indikator. Secara paralel, scanner OBD-II digunakan untuk merekam *live data* dan DTC pada setiap skenario. Seluruh hasil dicatat dalam tabel perbandingan antara respon ECU pada simulator dan pada kendaraan nyata, lalu dianalisis untuk memperoleh tingkat kesesuaian status aktuator, konsistensi *hysteresis fan relay* terhadap variasi temperatur ECT, serta kemampuan simulator sebagai media pembelajaran logika ECU dan alat pra-diagnosis kerusakan ECU secara *off-board* yang aman dan terkontrol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah simulator ECU berbasis Arduino Uno yang mampu membangkitkan sinyal sinkronisasi CKP–CMP serta mensimulasikan input sensor analog sehingga ECU dapat dioperasikan secara *off-board* dalam kondisi terkontrol [3]. Validasi dilakukan dengan membandingkan bentuk sinyal simulator terhadap karakteristik sinyal asli, kemudian mengamati respon aktuator dan data diagnosis yang terbaca melalui scanner OBD-II pada beberapa unit ECU Toyota Avanza K3-VE dan Daihatsu Ayla 1KR-DE [6]. Fokus pembahasan diawali dari keberhasilan pembangkitan sinyal CKP–CMP sebagai syarat utama ECU mengaktifkan sistem pengapian dan injeksi, dilanjutkan dengan evaluasi perilaku aktuator dan fungsi diagnosis pada berbagai skenario pengujian.

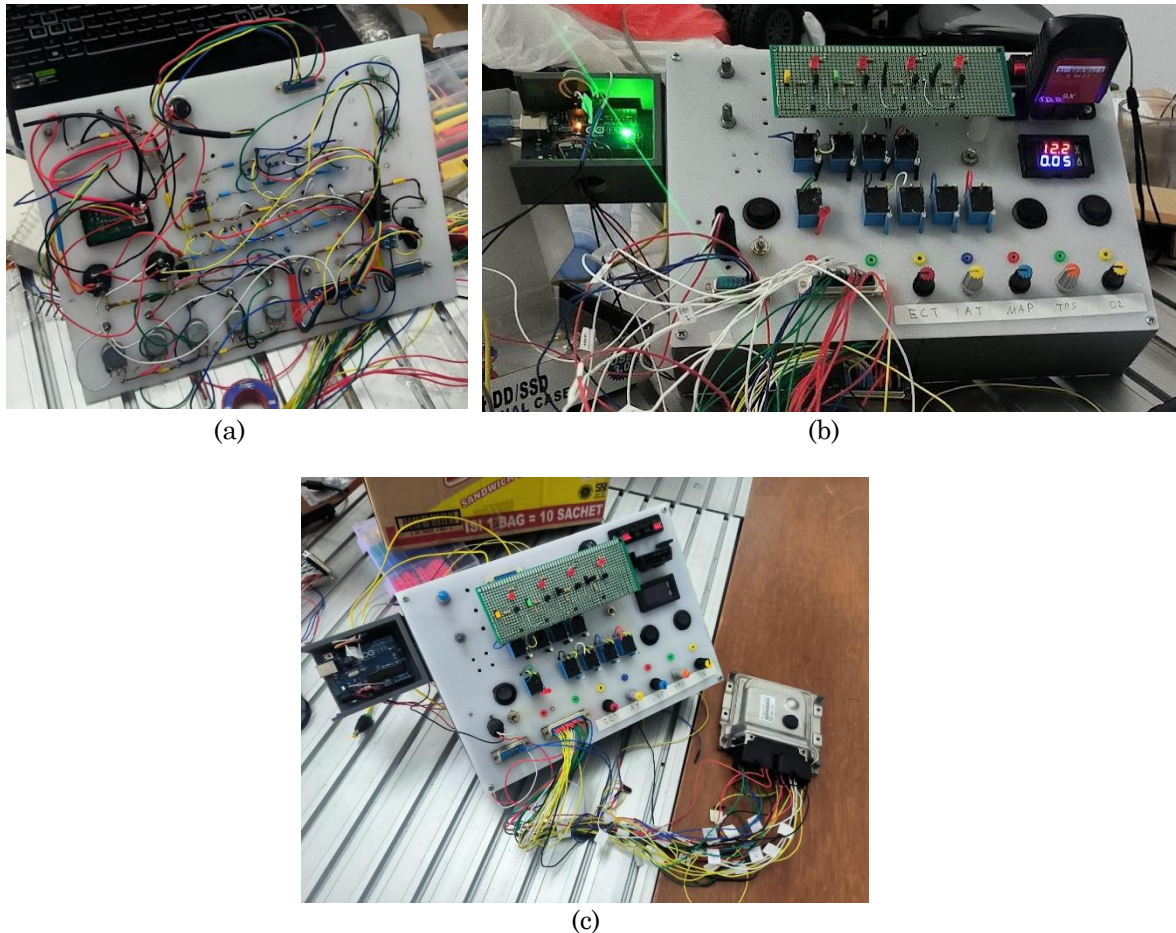


Gambar 3. Skema sinyal CKP–CMP simulator untuk Ayla (a) dan Avanza (b)

Gambar 3a menunjukkan skema sinyal CKP–CMP yang dibangkitkan simulator untuk ECU Daihatsu Ayla 1KR-DE dan gambar 3b untuk Toyota Avanza K3-VE, beserta ilustrasi pola roda gigi pemicu yang menjadi dasar perancangan sinyal tersebut [8]. Pada Ayla, sinyal CKP direalisasikan sebagai pola 36-2 berbasis sensor Hall, sedangkan pada Avanza digunakan pola 36-2-2-2 berbasis sensor reluktor. Bentuk gelombang hasil pemrograman Arduino memperlihatkan posisi *missing tooth* dan pergeseran fasa sinyal CMP yang selaras dengan referensi mekanis, sehingga ECU mampu mengenali posisi TDC dan segera mengaktifkan pengapian dan injeksi meskipun tidak terhubung ke mesin nyata. Hal ini menunjukkan bahwa rancangan *lookup table* dan algoritma pembangkitan pulsa telah berhasil menirukan fungsi sinkronisasi dasar sistem manajemen mesin.

Selain sinyal posisi, simulator juga memvalidasi masukan sensor analog utama seperti TPS, MAP, ECT, IAT, dan sensor oksigen menggunakan jaringan potensiometer yang terhubung ke input

analog ECU [4]. Perubahan posisi potensiometer menghasilkan perubahan tegangan yang terbaca pada *live data* OBD-II secara linier dan konsisten untuk ECU Ayla maupun Avanza, sebagaimana ditunjukkan oleh data pengukuran. Perbedaan kecil di wilayah tengah rentang kerja masih berada dalam batas toleransi dan tidak memicu munculnya *diagnostic trouble code* (DTC), sehingga tidak mengganggu logika kendali aktuator. Dengan demikian, pendekatan sederhana menggunakan potensiometer dinilai cukup representatif untuk tujuan simulasi edukatif dan pra-diagnosis sekaligus menjaga kompleksitas dan biaya rangkaian tetap rendah.



Gambar 4. Rangkaian simulator ECU tampak depan (a), belakang (b) dan Ketika terhubung dengan ECU (c)

Implementasi fisik rangkaian simulator ditampilkan pada Gambar 4a yang menunjukkan tampak depan dan pada Gambar 4b menunjukkan tampak belakang papan simulator serta gambar 4c menunjukkan penempatan ECU, Arduino Uno, potensiometer sensor, LED, dan *relay actuator* [9]. Rangkaian ini mengintegrasikan jalur *input* CKP–CMP, tegangan sensor analog, serta keluaran aktuator injektor, koil pengapian, *main relay*, *fuel pump relay*, dan *fan relay* ke dalam satu *bench* yang dapat dioperasikan sepenuhnya di luar kendaraan. Setelah verifikasi tegangan suplai dan kontinuitas jalur, simulator dihubungkan ke tiga ECU uji, yaitu Ayla 1 (normal), Ayla 2 (*fault* pada sirkuit pengapian silinder 3), dan Avanza K3-VE (normal). Pada masing-masing ECU dilakukan serangkaian variasi rpm dan beban sensor dengan memutar potensiometer, sementara pola ON/OFF aktuator diamati melalui LED indikator dan dibandingkan dengan perilaku ECU pada kendaraan nyata.

Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 menunjukkan bahwa pada ECU Ayla 1 dan Avanza K3-VE, seluruh LED aktuator menyala dan padam dengan pola yang identik terhadap kondisi kendaraan, sehingga diperoleh tingkat kesesuaian status ON/OFF aktuator sebesar 100% untuk skenario pengujian yang dilakukan. Pengujian komparatif dilakukan dengan memberikan variasi input RPM (melalui sinyal CKP/CMP) dan beban sensor. Hasil observasi terhadap respons aktuator utama—seperti injektor, koil pengapian, *main relay*, dan *fuel pump relay* ditampilkan

pada Tabel 1. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi kesesuaian status ON/OFF dan ritme aktuator antara simulator dan ECU nyata.

Tabel 1. Hasil pengujian respons aktuator terhadap variasi rpm dan beban

Komponen yang Diuji	ECU Ayla #1 (Normal)	ECU Ayla #2 (Fault)	ECU Avanza (Normal)	Status Kesesuaian
Injektor	Berkedip seiring RPM	Berkedip seiring RPM	Berkedip seiring RPM	Sesuai (100%)
Koil Pengapian (1, 2, 3, 4)	Berkedip seiring RPM	Koil 3 Tidak Aktif (Mati)	Berkedip seiring RPM	Sesuai (Fault Terdeteksi)
Main Relay	ON (Aktif) stabil	ON (Aktif) stabil	ON (Aktif) stabil	Sesuai (100%)
Fuel Pump Relay	ON saat ada sinyal RPM	ON saat ada sinyal RPM	ON saat ada sinyal RPM	Sesuai (100%)

Pada ECU Ayla 2, LED koil pengapian silinder 3 tampak tidak aktif ketika silinder lain masih menerima trigger normal, yang konsisten dengan gejala *misfire* spesifik pada kanal tersebut di kendaraan. Kondisi ini diperkuat oleh pembacaan scanner OBD-II yang menampilkan kode kerusakan pengapian pada silinder 3 ketika simulator membangkitkan sinyal CKP–CMP yang valid. Temuan ini menunjukkan bahwa simulator tidak hanya mampu menggerakkan ECU normal, tetapi juga menonjolkan perbedaan perilaku antara ECU normal dan ECU dengan kerusakan lokal secara jelas dan terukur, sehingga relevan sebagai media latihan diagnosis [11].

Pengujian khusus dilakukan pada *fan relay* untuk mengamati karakteristik *hysteresis* terhadap variasi sinyal ECT yang disimulasikan, dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 2 hubungan antara temperatur ECT simulasi dan status *fan relay* untuk ketiga ECU. Dengan menaikkan nilai potensiometer ECT dari kondisi “dingin” ke “panas”, *fan relay* pada semua ECU mulai aktif pada kisaran temperatur ekuivalen 85–95 °C dan kembali nonaktif setelah temperatur turun sekitar 5 °C [9]. Karakteristik *hysteresis* yang hampir sama pada seluruh unit ini penting untuk mencegah fan hidup-mati terlalu sering di sekitar titik setel dan mengindikasikan bahwa modul logika pengendalian suhu bekerja normal meskipun terdapat *fault* pada kanal pengapian tertentu. Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa simulator yang dikembangkan efektif untuk mereplikasi logika dasar ECU, memvisualisasikan respon aktuator, dan memfasilitasi pembacaan DTC dalam lingkungan *off-board* yang aman dan terkontrol.

Tabel 2. Respons fan relay terhadap variasi temperatur ECT pada tiga ECU yang diuji

ECU	Threshold Fan ON	Threshold Fan OFF	Hysteresis
Ayla 1KR-DE 1	~100°C	~95°C	~5°C
Ayla 1KR-DE 2	~100°C	~95°C	~5°C
Avanza K3-VE	~100°C	~95°C	~5°C

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sebuah simulator ECU berbasis mikrokontroler Arduino Uno yang mampu mensimulasikan sinyal CKP–CMP dan input sensor analog utama sehingga ECU Toyota Avanza K3-VE dan Daihatsu Ayla 1KR-DE dapat dioperasikan secara *off-board* dalam lingkungan yang aman dan terkontrol. Simulator yang dikembangkan mampu menghasilkan pola sinyal CKP–CMP yang sesuai dengan konfigurasi roda gigi asli (36-2 Hall untuk Ayla dan 36-2-2-2 reluktorko untuk Avanza) sehingga ECU tetap dapat mengenali posisi TDC dan mengaktifkan sistem pengapian serta injeksi tanpa keterlibatan mesin nyata.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa masukan sensor analog yang dibangkitkan melalui potensiometer terbaca secara linier pada live data OBD-II dan berada dalam rentang kerja normal ECU, sehingga dapat mewakili kondisi operasi mesin untuk tujuan pembelajaran dan pra-diagnosis. Pengujian terhadap tiga ECU (Ayla 1 normal, Ayla 2 *fault* pengapian silinder 3, dan

Avanza K3-VE normal) menghasilkan tingkat kesesuaian status *ON/OFF* aktuator sebesar 100% antara simulator dan kendaraan nyata pada skenario yang diuji, serta mampu menonjolkan perbedaan perilaku antara ECU normal dan ECU yang mengalami kerusakan spesifik. Karakteristik *hysteresis fan relay* sekitar 5 °C yang konsisten pada seluruh ECU juga menunjukkan bahwa logika pengendalian suhu termanajemen dengan baik oleh simulator. Dengan demikian, simulator ini terbukti efektif sebagai media pembelajaran logika ECU dan sebagai alat pra-diagnosis kerusakan ECU di luar kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Abboush, D. Bamal, C. Knieke, and A. Rausch, "Hardware-in-the-loop-based real-time fault injection framework for dynamic behavior analysis of automotive software systems," *Sensors*, vol. 22, no. 4, p. 1360, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22041360>.
- [2] O. Avatefipour and H. Malik, "State-of-the-art survey on in-vehicle network communication (CAN-Bus) security and vulnerabilities," *arXiv preprint arXiv:1802.01725*, 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.01725>.
- [3] F. F. Dalimarta, M. Mahdi, J. Jaelani, and R.D. Wibisono, "Rancang bangun electronic control unit berbasis Arduino pada mesin motor dua langkah," *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, 2022, doi: <https://doi.org/10.21831/dinamika.v7i2>.
- [4] N.A. Handoyono and R. Rabiman, "Pengembangan training kit engine management system Toyota Avanza K3-VE untuk praktikum otomotif," *Jurnal Pendidikan Vokasi Otomotif*, vol. 6, no. 1, pp. 37–48, 2023, doi: <https://doi.org/10.21831/jpvo.v6i1.65886>.
- [5] N. Nurdiyanto, "Pemanfaatan simulator EMS untuk meningkatkan minat dan kompetensi memperbaiki sistem injeksi elektronik," *Paedagogie*, vol. 13, no. 1, pp. 1–6, 2018, doi: <https://doi.org/10.31603/paedagogie.v13i1.2029>.
- [6] A. Hnatov, S. Arhun, O. Ulianets, and D. Ivanov, "Diagnostics of electric vehicles using OBD-II: Principles, capabilities, and prospects," *Automobile Transport*, pp. 5–12, 2025, doi: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.56.0.01>.
- [7] A. Kamsani, "Random missing tooth error detection in crankshaft function of an engine control unit," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 6895–6905, 2024, doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.28.0540>.
- [8] S. Karaman and L. Guvenc, "Low cost, educational internal combustion engine electronic control unit hardware-in-the-loop test systems," *arXiv preprint arXiv:2012.00928*, 2020, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.00928>.
- [9] M.B. Nandakumar, B. Magesh, S.J. Muthiya, K.P. Prashanth, B.R. Mahesh, B.E. Naveena, S. Raja, and J.J. Godwin, "Design and development of engine control unit bench simulation tool using hardware in loop," *SAE Technical Paper* 01-5182, 2023, doi: <https://doi.org/10.4271/2023-01-5182>.
- [10] M.Z. Romdlony and F. Irsyadi, "Hardware-in-the-loop simulation of DC motor as an instructional media for control system design and testing," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 81–86, 2021, doi: <https://doi.org/10.14203/j.mev.2021.v12.81-86>.
- [11] A. Supranartha, I.W.D. Pancane, I.N. Sunaya, I.M.A. Yasa, and I.M.A. Wiryawans, "Implementation of electronic control unit (ECU) simulator engine for improving vehicle system performance modern," in Proceedings of ICoSTAS-EAS 2024, Advances in Engineering Research, vol. 249, 2024, doi: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-587-4_6.
- [12] F. Luo, X. Zhang, Z. Yang, Y. Jiang, J. Wang, M. Wu, and W. Feng, "Cybersecurity testing for automotive domain: A survey," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9211, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22239211>.
- [13] A.D. Sutar and S.B. Shinde, "ECU diagnostics validator using CANUSB," in Proceedings of the International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI), 2017, pp. 856–

860, doi: <https://doi.org/10.1109/ICICI.2017.8365257>.

- [14] M. Schulze, S. Peldszus, and C. Berger, "Exploring virtual ECUs for automotive software: A systematic mapping study," *Journal of Systems and Software*, vol. 218, p. 112716, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112716>.
- [15] S. Park, S. Kim, and S. Lee, "Automotive communication bus simulator for ECU networks," in 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520267>.
- [16] K. Suganyadevi, V. Nandhalal, N. Thiagarajan, and S. Dhanasekaran, "A multicore ECU-based automotive software domain combining runnable sequencing and task scheduling," in 2022 International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS), 2022, pp. 34–38, doi: <https://doi.org/10.1109/ICACRS55517.2022.10029084>.
- [17] S. Sonko, C.D. Daudu, F. Osasona, A.M. Monebi, E.A. Etukudoh, and A. Atadoga, "The evolution of embedded systems in automotive industry: A global review," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 2, pp. 96–104, 2024, doi: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.2.0420>.
- [18] D.K. Nilsson, P.H. Phung, and U.E. Larson, "Vehicle ECU classification based on safety-security characteristics," in IET Road Transport Information and Control – RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members' Conference, 2008, pp. 1–7, doi: <https://doi.org/10.1049/ic.2008.0810>.
- [19] W.K. Ham, M. Ko, and S.C. Park, "A framework for simulation-based engine-control unit inspection in manufacturing phase," *Control Engineering Practice*, vol. 59, pp. 137–148, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.12.001>.
- [20] A. Hafeez, J. Mohan, M. Girdhar, and S.S. Awad, "Machine learning based ECU detection for automotive security," in 2021 17th International Computer Engineering Conference (ICENCO), 2021, pp. 73–81, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3249240>.
- [21] J. Cui, Y. Shen, H. Zhong, J. Zhang, and L. Liu, "A multilevel electronic control unit re-encryption scheme for autonomous vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 104–119, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3309817>.