SISTEM KELISTRIKAN PADA KENDARAAN OTONOM: SUATU STUDI KOMPREHENSIF

Rachmat Iskandar[1], Agus Saleh[2], Reni Listiana[3]

[1] *Program Teknik Komputer-Politeknik TEDC Bandung*
[2]*Program Studi Teknik Mesin- Politeknik TEDC Bandung*
[3] *Program Studi Teknik Elektronika&Otomasi – Politeknik TEDC Bandung*
Jl. Politeknik-Pesantren KM2 Cibabat Cimahi Utara – Cimahi Jawa Barat - Indonesia
rachmat@poltektedc.ac.id, agussaleh@poltektedc.ac.id , renilistiana@poltektedc.ac.id
Corespondent Email: rachmat@poltektedc.ac.id

Abstrak — Kemajuan teknologi serta adopsi gagasan-gagasan inovatif telah mempermudah kehidupan manusia. Perkembangan ini telah kita saksikan di berbagai sektor, termasuk transportasi, manufaktur, dan teknologi. Seluruh jaringan transportasi kini berkembang menuju integrasi kecerdasan buatan.

Salah satu komponen paling penting dalam konsep kota cerdas di masa depan adalah mobilitas cerdas berbasis kendaraan otonom. Topik yang sedang berkembang ini telah menarik perhatian yang signifikan, namun masih berada pada tahap awal dan memerlukan penelitian yang cermat serta solusi terhadap berbagai permasalahan dan peluang yang mungkin muncul.

Makalah ini membahas kondisi terkini dari dua komponen utama dalam sistem kendaraan otonom, yaitu:
(1) sistem kelistrikan dan elektromekanis, serta
(2) sensor kendaraan pintar.

Sistem-sistem tersebut mencakup spektrum teknologi yang luas, termasuk sensor beresolusi tinggi (seperti LiDAR, radar, dan kamera), platform komputasi berperforma tinggi untuk pengambilan keputusan secara real-time, serta aktuator elektromekanis presisi untuk fungsi kemudi, pengereman, dan propulsi.

Selain itu, elektrifikasi kendaraan tanpa pengemudi juga menghadirkan tantangan baru dalam hal manajemen daya, efisiensi energi, serta pengendalian termal, terutama seiring dengan meningkatnya kebutuhan komputasi.

Sistem kelistrikan merupakan area yang sangat krusial dalam penelitian dan pengembangan, karena interaksi yang terkoordinasi dengan baik antara proses penginderaan (sensing), komputasi, dan aktuasi sangat penting untuk mewujudkan otonomi yang andal.

Makalah ini menyajikan tinjauan sistematis terhadap sistem kelistrikan pada kendaraan otonom saat ini, membahas bagaimana sistem tersebut diintegrasikan ke dalam arsitektur kendaraan secara keseluruhan, serta mengidentifikasi beberapa tren yang sedang berkembang yang akan membentuk masa depan mobilitas otonom.

.

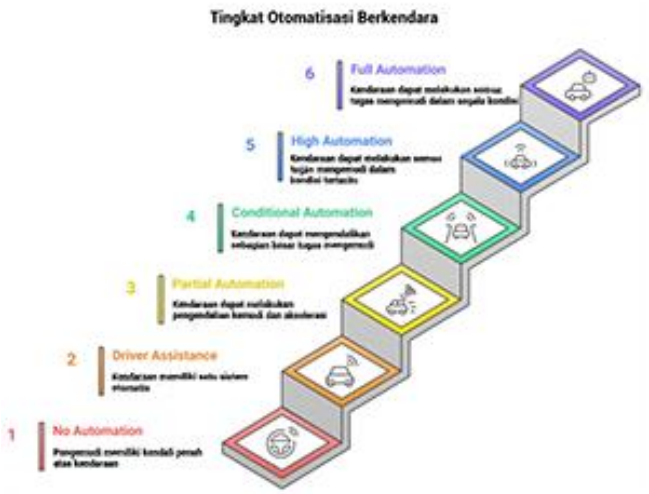
Kata kunci: *Kendaraan otonom; Sensor; Sistem kelistrikan; LiDAR; Vehicle-to-Everything (V2X)*

I. PENDAHULUAN

Masa depan transportasi dan mobilitas telah mengalami transformasi melalui kehadiran kendaraan otonom (Autonomous Vehicles/AVs), yang dengan cepat beralih dari ranah fiksi ilmiah menjadi prototipe nyata. Perkembangannya secara umum dapat dibagi ke dalam enam tingkat otomatisasi berkendara (level 0–5), sebagaimana ditetapkan oleh Society of Automotive Engineers (SAE) [1], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Sistem bantuan pengemudi paling sederhana meliputi adaptive cruise control, bantuan menjaga lajur (lane-keeping assistance), serta sistem parkir otomatis, yang telah diterapkan pada kendaraan tahap awal. Seiring waktu, sistem yang lebih canggih dikembangkan, yang mampu melakukan otomatisasi bersyarat dalam lingkungan tertentu, hingga akhirnya mengarah pada pengembangan kendaraan sepenuhnya otonom yang tidak memerlukan kendali manusia.

Transformasi ini didorong oleh kemajuan teknologi sensor, peningkatan daya komputasi, serta kecerdasan buatan. Namun secara fundamental, otonomi dimungkinkan oleh integrasi yang mulus dari sistem elektro (electro-systems), yaitu sistem kompleks yang terdiri atas komponen elektronik, kelistrikan, dan elektromekanis yang berfungsi untuk memproses persepsi, pengambilan keputusan, dan aktuasi [2]. Tabel 1 menjelaskan secara rinci tingkat-tingkat otomatisasi berkendaraan.



Gambar 1. Level Otomasi Berkenderaan

Kendaraan otonom mengandalkan sistem elektro sebagai fondasi utama untuk mewujudkan otonomi melalui integrasi antara dunia fisik dan digital kendaraan. Pada lapisan persepsi (awareness layer), berbagai sensor seperti LiDAR, radar, dan kamera beresolusi tinggi mengumpulkan data lingkungan secara real-time dalam jumlah besar [3,4]. Hal ini memungkinkan kendaraan untuk:

- mengenali objek,
- memahami dinamika lalu lintas,
- serta memprediksi perilaku pengguna jalan lainnya.

Sensor-sensor tersebut harus bekerja secara sinergis melalui metode **sensor fusion** untuk menghasilkan data yang andal dan redundan guna mendukung fungsi-fungsi kritis terkait keselamatan.

Setelah data dikumpulkan, informasi tersebut diproses menggunakan unit kendali elektronik (Electronic Control Units/ECUs) berdaya tinggi serta platform komputasi performa tinggi, dengan memanfaatkan algoritma canggih seperti **deep neural networks** untuk pengenalan objek dan perencanaan lintasan [5].

Hasil pengambilan keputusan kemudian diterjemahkan menjadi perintah aktuasi yang presisi melalui sistem:

- kemudi elektrik (electric steering),
- pengereman (braking),
- serta sistem propulsi.

Fungsi-fungsi dasar ini didukung oleh modul manajemen energi yang menyediakan daya yang cukup bagi prosesor komputasi tinggi maupun aktuator elektromekanis, dengan tetap menjaga efisiensi dan stabilitas termal [6].

Sistem elektromekanis tidak hanya penting dalam fungsi dasar operasional, tetapi juga berperan dalam meningkatkan keandalan, keselamatan, dan skalabilitas. Salah satu contohnya adalah sistem **drive-by-wire**, di mana koneksi mekanis digantikan oleh sinyal elektronik hibrida yang lebih cepat dan memungkinkan desain kendaraan yang lebih fleksibel [7].

Selain itu, jaringan kelistrikan terdistribusi dapat dirancang untuk mendukung redundansi dan toleransi kesalahan (fault tolerance), sehingga fungsi otonom tetap dapat berjalan meskipun terjadi kegagalan perangkat keras. Industri saat ini bergerak menuju kendaraan yang sepenuhnya elektrik dan otonom, yang meningkatkan tuntutan terhadap sistem elektro, termasuk:

- kebutuhan bandwidth komunikasi yang lebih tinggi,
- densitas komputasi yang lebih besar,
- serta distribusi daya yang lebih efisien.

Teknologi masa depan seperti:

- domain controller,
- LiDAR solid-state,
- komputer neuromorfik,
- serta komunikasi vehicle-to-everything (V2X),

sedang mengubah cara sistem elektromekanis dirancang dan diintegrasikan [8].

Tujuan dari makalah tinjauan ini adalah untuk memberikan analisis mendalam mengenai sistem kelistrikan pada kendaraan otonom, termasuk kondisi terkini, permasalahan integrasi, serta perkembangan terbaru. Kajian ini dimulai dengan analisis arsitektur sistem, dengan menyoroti teknologi yang mendukung proses persepsi, komputasi, dan aktuasi.

Selanjutnya, dibahas pula sistem manajemen daya dan komunikasi yang memungkinkan operasi otonom yang andal. Selain itu, makalah ini mengulas perkembangan terbaru serta bidang penelitian yang akan membentuk generasi berikutnya dari sistem kelistrikan kendaraan otonom.

Fokus utama kajian ini adalah untuk mendukung pengembangan transportasi otonom yang:

- lebih aman,
- lebih efisien,
- serta lebih berkelanjutan.

Tinjauan ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti, insinyur, dan pembuat kebijakan dalam mewujudkan sistem transportasi otonom yang cerdas dan aman melalui integrasi berbagai perkembangan teknologi di bidang ini

Tabel 1: Menunjukkan tingkat-tingkat otomatisasi berkendara secara rinci

Level	Name	Controls	Automation Scope	Driver Role
0	No Automation	Human driver only	No automation	Full control of steering, braking, etc.
1	Driver Assistance	Human driver + single assist	Assists with either steering or acceleration/braking	Must monitor and stay engaged
2	Partial Automation	Human + vehicle combined	Controls steering and speed simultaneously	Must keep hands on wheel & monitor road
3	Conditional Automation	Vehicle in limited conditions	Handles driving in specific scenarios (e.g. highway)	Must be ready to take over if needed
4	High Automation	Vehicle mostly	Fully drives itself in geo-fenced or controlled areas	No driver needed in these areas
5	Full Automation	Vehicle always	Drives everywhere under all conditions	No driver required at all

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem kelistrikan pada kendaraan tanpa pengemudi telah menjadi subjek berbagai laporan penelitian dalam beberapa tahun terakhir, seiring dengan kemajuan teknologi dan munculnya gagasan-gagasan baru yang menjadikan sistem tersebut semakin cerdas dan efisien. Penulis dalam [9]

mengkaji keterkaitan antara Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI) dan keselamatan kendaraan otonom (AV), serta melakukan tinjauan literatur sistematis yang mensintesis hasil dari 59 penelitian. Pembahasan mendalam ini menunjukkan bahwa AI memiliki peran sentral dalam meningkatkan keselamatan kendaraan otonom melalui pengambilan keputusan yang lebih baik serta kemampuan dalam menginterpretasikan lingkungan.

Namun demikian, penelitian tersebut juga menyoroti risiko yang melekat akibat potensi kegagalan sistem, sehingga diperlukan penelitian berkelanjutan untuk meminimalkan risiko tersebut. Topik peningkatan pemahaman ilmiah terhadap teknologi mengemudi otonom dibahas dalam [10]. Dengan menggunakan pendekatan multidisipliner untuk mengungkap dan mensintesis informasi laten dari berbagai domain penelitian yang luas, permasalahan ini dapat diatasi. Pendekatan yang diusulkan memberikan ringkasan yang ringkas namun komprehensif mengenai struktur konseptual bidang penelitian kendaraan otonom dengan menggabungkan teknik pemodelan topik (subject modeling) dan metode identifikasi komunitas berbasis sitasi.

Penulis dalam [11] juga memberikan kontribusi terhadap literatur dengan membahas aspek verifikasi dan validasi (Verification and Validation/V&V) pada kendaraan otonom tanpa pengemudi (Self-driving Autonomous Vehicles/SAVs). Tinjauan sistematis terhadap pendekatan pengujian berbasis cakupan (coverage-based testing) menunjukkan bahwa industri semakin memberikan perhatian terhadap jaminan keselamatan serta peningkatan kepercayaan pengguna terhadap teknologi SAV.

Karya-karya yang telah dipublikasikan tersebut memberikan perspektif yang luas dan beragam mengenai sistem kendaraan listrik otonom, yang mencakup inovasi dalam desain, algoritma canggih, serta komitmen terhadap keberlanjutan. Artikel-artikel ini berkontribusi dalam meningkatkan pemahaman kita terhadap berbagai tantangan dan peluang di bidang ini, yang pada akhirnya akan mendorong penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam sistem transportasi otonom.

Literatur tambahan terkait kendaraan otonom disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Literatur tambahan terkait kendaraan otonom

Tahun	Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
2020	Menganalisis laporan kecelakaan dan pelepasan kendali (disengagement) pada kendaraan otonom (AV); mengklasifikasikan penyebab keselamatan serta meninjau strategi mitigasi	Sebagian besar kecelakaan masih terjadi dalam mode otonom; kemampuan respons terhadap perilaku tak terduga dari pengemudi manusia masih terbatas
2021	Meninjau teknologi komunikasi pendukung kendaraan otonom (Bluetooth, DSRC, 5G, dan lain-lain) berdasarkan latensi, jangkauan, dan ruang lingkup aplikasinya	Tantangan integrasi akibat variasi latensi dan cakupan; belum adanya standar komunikasi yang terpadu; serta adanya kerentanan keamanan
2021	Mengkuantifikasi pengaruh kondisi cuaca terhadap sensor utama kendaraan otonom (LiDAR, radar, kamera, GNSS); serta mengusulkan model simulasi untuk pengujian persepsi yang lebih realisti	Tingkat kesalahan yang tinggi pada kondisi kabut tebal, salju, dan hujan; serta belum tersedianya model universal untuk degradasi sensor pada berbagai kondisi lingkungan
2023	Melakukan tinjauan komprehensif terhadap peningkatan persepsi, fusi sensor, dan klasifikasi kondisi cuaca pada situasi cuaca buruk untuk kendaraan otonom	Penurunan kinerja sensor pada kondisi hujan dan kabut; keterbatasan dataset pelatihan yang beragam; serta rendahnya ketahanan (robustness) LiDAR 1550 nm
2024	Mengkaji tantangan yang muncul terkait SOTIF (Safety of the Intended Functionality) pada kendaraan otonom, dengan penekanan pada strategi validasi, standar ISO 21448, serta keterbatasan fungsional	Ketidakpastian dalam pengambilan keputusan AI, rendahnya interpretabilitas, serta kurangnya alat verifikasi untuk kondisi tidak aman yang belum diketahui
2025	Mengusulkan sistem deteksi intrusi (Intrusion Detection/ID) berbasis federated learning yang ditingkatkan dengan transformer, menggunakan fusi fitur dinamis dan pembobotan model	Heterogenitas distribusi data pada node; kebutuhan implementasi pada sistem dengan sumber daya terbatas; serta tantangan dalam adaptasi model secara real-time

	adaptif untuk keamanan CAN bus	
2025	Melakukan tinjauan sistematis terhadap deteksi dan diagnosis kesalahan (Fault Detection and Diagnosis/FDD), penilaian risiko, serta kerangka ketahanan sistem; serta mengusulkan solusi masa depan seperti machine learning yang dapat diverifikasi dan digital twin	eterbatasan model kegagalan lintas lapisan (cross-layer fault modeling) dan dataset berbasis skenario; serta kurangnya metode formal untuk verifikasi machine learning.
2025	Mengembangkan antarmuka multimodal berbasis realitas virtual (VR) untuk teleoperasi kendaraan otonom dengan umpan balik haptik guna meningkatkan keselamatan dan kepercayaan pengguna	Masalah latensi, beban kognitif operator, serta skalabilitas sistem pada berbagai platform kendaraan yang heterogen
2025	Mengembangkan sistem mengemudi otonom berbasis ROS (Autonomous Driving System/ADS) dengan pengendali PID adaptif dan perencanaan lintasan berbasis metaheuristik yang divalidasi pada skenario chicane	Kendala integrasi real-time pada algoritma optimasi; serta ketergantungan pada kalibrasi sensor yang sangat presisi.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan **systematic literature review (SLR)** yang dikombinasikan dengan analisis konseptual dan komparatif untuk mengkaji secara mendalam perkembangan sistem kelistrikan pada kendaraan otonom (Autonomous Vehicles/AVs). Pendekatan ini dipilih karena karakteristik penelitian yang berfokus pada sintesis pengetahuan dari berbagai sumber ilmiah terkini, serta bertujuan untuk mengidentifikasi tren, tantangan, dan peluang pengembangan teknologi di masa depan.

A. Definisi Masalah dan Ruang Lingkup

Tahap awal penelitian adalah mendefinisikan permasalahan secara jelas, yaitu:

- bagaimana arsitektur sistem kelistrikan pada kendaraan otonom saat ini,
- bagaimana integrasi antara sistem listrik, elektromekanis, sensor, dan komputasi,
- serta apa saja tantangan teknis dan arah perkembangan teknologi ke depan.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa domain utama, yaitu:

1. Sistem kelistrikan kendaraan otonom (electrical systems)
2. Sistem elektromekanis (actuation systems)
3. Teknologi sensor (LiDAR, radar, kamera, ultrasonik)
4. Sistem komputasi dan AI (ECU, edge computing, deep learning)
5. Manajemen energi (battery management, thermal management, V2X)

Pembatasan ini dilakukan agar analisis tetap fokus dan mendalam pada aspek inti yang mendukung otonomi kendaraan.

B. Strategi Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur sistematis dengan sumber utama berupa:

- jurnal internasional bereputasi (Scopus, IEEE, ScienceDirect, MDPI),
- prosiding konferensi,
- standar industri (SAE, ISO 26262, ISO 21448),
- serta laporan teknis terkait kendaraan otonom.

Kriteria inklusi literatur meliputi:

- publikasi dalam rentang waktu 5–10 tahun terakhir,
- relevansi dengan sistem kelistrikan atau arsitektur AV,
- memiliki kontribusi signifikan terhadap teknologi sensor, AI, atau sistem energi.

Kriteria eksklusi:

- artikel non-peer-reviewed,
- penelitian yang tidak relevan langsung dengan sistem kendaraan otonom,
- publikasi dengan metodologi yang tidak jelas.

Proses pencarian dilakukan menggunakan kata kunci:

- “autonomous vehicle electrical system”
- “sensor fusion AV”
- “drive-by-wire system”
- “EV power management”
- “AI in autonomous driving”

Seluruh literatur yang diperoleh kemudian diseleksi melalui tahapan:

1. Screening judul dan abstrak
2. Evaluasi isi penuh (full-text review)
3. Ekstraksi data penting

C. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan tiga pendekatan utama:

1 Analisis Deskriptif

Digunakan untuk menggambarkan:

- struktur sistem kendaraan otonom,
- fungsi masing-masing komponen (sensor, ECU, aktuator),
- serta hubungan antar subsistem.

2 Analisis Komparatif

Digunakan untuk membandingkan:

- jenis sensor (LiDAR vs radar vs kamera),
- sistem aktuasi (steer-by-wire vs brake-by-wire),
- serta metode manajemen energi.

Pendekatan ini memungkinkan identifikasi kelebihan, kekurangan, dan trade-off dari masing-masing teknologi.

3 Analisis Sistem (System Engineering Approach)

Penelitian ini juga menggunakan pendekatan rekayasa sistem (system engineering) dengan memodelkan kendaraan otonom sebagai **Cyber-Physical System (CPS)**, yang terdiri dari:

- input (sensor),
- processing (AI dan komputasi),
- output (aktuator).

Model ini digunakan untuk memahami aliran data dan energi dalam sistem secara holistik

D. Kerangka Arsitektur Sistem

Untuk memperjelas analisis, penelitian ini mengembangkan kerangka arsitektur sistem kendaraan otonom yang terdiri dari beberapa layer:

1. **Perception Layer**
   Mengolah data dari sensor lingkungan
2. **Decision Layer**
   Melakukan perencanaan dan pengambilan keputusan berbasis AI
3. **Control Layer**
4. Menghasilkan sinyal kontrol untuk aktuator
5. **Actuation Layer**
   Mengeksekusi perintah dalam bentuk gerakan fisik
6. **Energy & Communication Layer**
   Menyediakan daya dan komunikasi antar subsistem

Kerangka ini digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi integrasi sistem kelistrikan dalam kendaraan otonom

E. Validasi dan Evaluasi

Validasi penelitian dilakukan melalui:

- triangulasi sumber (menggunakan berbagai referensi ilmiah),
- konsistensi hasil antar studi,
- serta kesesuaian dengan standar industri.

Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap:

- keandalan sistem (reliability),
- keselamatan (safety),
- efisiensi energi,
- serta skalabilitas teknologi.

Analisis juga mempertimbangkan aspek:

- fault tolerance,
- redundancy,
- serta real-time performance

F. Identifikasi Tantangan dan Gap Penelitian

Berdasarkan hasil analisis, penelitian ini mengidentifikasi beberapa gap utama:

- keterbatasan integrasi sensor dalam kondisi ekstrem,
- tingginya kebutuhan daya komputasi,
- belum adanya standar universal sistem AV,
- serta kompleksitas verifikasi sistem berbasis AI.

Identifikasi gap ini dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian terdahulu dan kebutuhan industri saat ini.

G. Perumusan Rekomendasi dan Arah Penelitian

Tahap akhir metodologi adalah merumuskan:

- rekomendasi pengembangan teknologi,
- serta arah penelitian masa depan.

Beberapa pendekatan yang diusulkan:

- integrasi AI berbasis edge computing,
- penggunaan solid-state sensor,
- pengembangan sistem energi cerdas,
- serta penerapan digital twin untuk validasi sistem

H. Evaluasi Metodologi

Pendekatan SLR memberikan keunggulan dalam:

- cakupan analisis yang luas,
- validitas berbasis literatur,
- serta kemampuan mengidentifikasi tren global.

Namun, keterbatasannya meliputi:

- ketergantungan pada kualitas sumber literatur,
- tidak adanya eksperimen langsung,

- serta potensi bias seleksi.

Untuk mengurangi keterbatasan tersebut, penelitian ini menggunakan:

- sumber multi-domain,
- pendekatan komparatif,
- serta validasi berbasis standar industri.

IV. HASIL PENELITIAN

Berdasarkan hasil kajian terhadap artikel yang dianalisis, diperoleh pemahaman bahwa kendaraan otonom merupakan suatu sistem kompleks yang dibangun di atas integrasi berbagai subsistem berbasis kelistrikan, elektronik, dan elektromekanis. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat transportasi, tetapi telah berevolusi menjadi suatu *cyber-physical system* yang mampu menghubungkan dunia fisik dengan dunia digital melalui pemrosesan data secara real-time. Dalam konteks ini, sistem kelistrikan memiliki peran sentral sebagai tulang punggung yang menghubungkan seluruh komponen, mulai dari sensor, unit komputasi, hingga aktuator.



Gambar2. Sensor utama yang digunakan dalam kendaraan otonom

Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur dasar kendaraan otonom terdiri dari beberapa lapisan sistem yang saling terintegrasi, yaitu lapisan persepsi, lapisan pemrosesan, lapisan pengambilan keputusan, serta lapisan aktuasi. Pada lapisan persepsi, kendaraan memanfaatkan berbagai jenis sensor seperti LiDAR, radar, kamera, dan sensor ultrasonik untuk memperoleh informasi lingkungan secara real-time. Setiap jenis sensor memiliki karakteristik dan keterbatasan masing-masing. LiDAR, misalnya, memiliki kemampuan pemetaan tiga dimensi dengan akurasi tinggi, namun kinerjanya menurun pada kondisi cuaca buruk seperti hujan atau kabut. Radar memiliki keunggulan dalam mendeteksi objek pada berbagai kondisi cuaca dan mampu mengukur kecepatan objek, namun resolusi spasialnya lebih rendah dibandingkan LiDAR. Kamera memberikan informasi visual yang kaya dan sangat berguna dalam klasifikasi objek, tetapi sangat bergantung pada kondisi pencahayaan. Sementara itu, sensor ultrasonik efektif digunakan untuk deteksi jarak dekat, namun memiliki jangkauan terbatas.

Temuan penting dari penelitian ini adalah bahwa tidak ada satu jenis sensor pun yang mampu memberikan informasi lingkungan secara lengkap dan andal secara mandiri. Oleh karena itu, pendekatan *sensor fusion* menjadi suatu kebutuhan mutlak dalam sistem kendaraan otonom. Dengan menggabungkan data dari berbagai sensor, sistem dapat meningkatkan akurasi persepsi, mengurangi ketidakpastian, serta meningkatkan keandalan dalam kondisi lingkungan yang kompleks dan dinamis.

Setelah data lingkungan diperoleh, informasi tersebut diproses oleh sistem komputasi berperforma tinggi yang terdiri dari Electronic Control Units (ECU) dan unit pemrosesan berbasis kecerdasan buatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan algoritma berbasis *deep learning*, khususnya *deep neural networks*, memungkinkan sistem untuk melakukan pengenalan objek, klasifikasi, serta perencanaan lintasan secara lebih akurat. Namun demikian, peningkatan kemampuan komputasi ini juga berdampak pada meningkatnya kebutuhan energi serta kompleksitas sistem manajemen termal.

Pada tahap berikutnya, hasil pengambilan keputusan diterjemahkan menjadi perintah aktuasi melalui sistem elektromekanis. Sistem aktuasi yang digunakan dalam kendaraan otonom umumnya berbasis teknologi *drive-by-wire*, di mana koneksi mekanis konvensional digantikan oleh sinyal elektronik. Teknologi ini mencakup *steer-by-wire*, *brake-by-wire*, dan sistem propulsi elektrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini memberikan keunggulan dalam hal presisi kontrol, fleksibilitas desain, serta integrasi dengan algoritma berbasis kecerdasan buatan. Selain itu, sistem ini juga memungkinkan implementasi kontrol adaptif yang dapat menyesuaikan respons kendaraan terhadap kondisi jalan dan lingkungan secara real-time.

Dari sisi sistem kelistrikan, penelitian ini menunjukkan bahwa kendaraan otonom memerlukan arsitektur distribusi daya yang lebih kompleks dibandingkan kendaraan konvensional. Sistem ini umumnya terdiri dari dua level tegangan, yaitu tegangan tinggi untuk sistem propulsi dan tegangan rendah untuk sistem kontrol dan sensor. Selain itu, sistem kelistrikan juga dirancang dengan konsep redundansi untuk memastikan keandalan dan keselamatan. Dalam kondisi kegagalan sistem utama, sistem cadangan dapat mengambil alih fungsi kritis seperti pengereman dan kemudi.

Aspek manajemen energi juga menjadi salah satu temuan penting dalam penelitian ini. Kendaraan otonom memiliki kebutuhan energi yang jauh lebih besar karena harus mendukung operasi sensor, komputasi, dan aktuasi secara simultan. Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen energi yang cerdas, seperti Battery Management System (BMS), yang mampu mengoptimalkan penggunaan energi, memonitor kondisi baterai, serta memperpanjang umur pakai baterai. Selain itu, teknologi *regenerative braking* memungkinkan kendaraan untuk memanfaatkan kembali

energi kinetik menjadi energi listrik, sehingga meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan.

Penelitian ini juga mengidentifikasi bahwa integrasi antara sistem kelistrikan, sistem komputasi, dan sistem elektromekanis merupakan tantangan utama dalam pengembangan kendaraan otonom. Kompleksitas integrasi ini meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah sensor, kebutuhan komputasi yang tinggi, serta tuntutan terhadap keselamatan dan keandalan sistem. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengatasi permasalahan ini adalah pengembangan arsitektur berbasis *domain controller*, di mana beberapa fungsi sistem dikonsolidasikan ke dalam unit kontrol terpusat untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi kompleksitas jaringan.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat berbagai tantangan teknis yang masih harus diatasi, antara lain terkait dengan keandalan sensor dalam kondisi lingkungan ekstrem, ketidakpastian dalam pengambilan keputusan berbasis kecerdasan buatan, serta kebutuhan akan sistem verifikasi dan validasi yang lebih robust. Tantangan lainnya adalah terkait dengan manajemen panas akibat tingginya beban komputasi, serta kebutuhan akan standar industri yang seragam untuk memastikan interoperabilitas antar sistem.

Dalam konteks perkembangan teknologi, penelitian ini menunjukkan adanya tren menuju penggunaan teknologi yang lebih canggih, seperti LiDAR berbasis solid-state, komputasi neuromorfik, serta integrasi sistem kendaraan dengan infrastruktur melalui teknologi vehicle-to-everything (V2X). Teknologi-teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, keselamatan, serta kemampuan adaptasi kendaraan otonom dalam berbagai kondisi lingkungan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kendaraan otonom merupakan sistem multidisiplin yang memerlukan integrasi erat antara teknologi elektronika, sistem tenaga, kecerdasan buatan, dan sistem kontrol. Sistem kelistrikan berperan sebagai elemen kunci yang memastikan seluruh subsistem dapat bekerja secara terkoordinasi. Keberhasilan pengembangan kendaraan otonom di masa depan sangat bergantung pada kemampuan untuk mengintegrasikan berbagai teknologi tersebut secara efisien, andal, dan aman.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian dan analisis terhadap sistem kelistrikan pada kendaraan otonom, dapat disimpulkan bahwa kendaraan otonom merupakan suatu sistem multidisiplin yang sangat kompleks, yang dibangun melalui integrasi erat antara teknologi elektronika, kelistrikan, elektromekanis, komputasi, serta kecerdasan buatan. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat transportasi konvensional, tetapi telah berevolusi menjadi sebuah *cyber-physical system* yang mampu menghubungkan dunia fisik dengan sistem digital secara real-time melalui proses sensing, computing, dan actuation.

Sistem kelistrikan terbukti memegang peranan yang sangat krusial sebagai tulang punggung utama dalam keseluruhan arsitektur kendaraan otonom. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai penyedia dan pengelola energi, tetapi juga sebagai media komunikasi dan koordinasi antar subsistem, sehingga memastikan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara sinkron dan efisien. Tanpa sistem kelistrikan yang andal dan terintegrasi dengan baik, fungsi otonomi kendaraan tidak akan dapat tercapai secara optimal.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa keberhasilan sistem kendaraan otonom sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengintegrasikan berbagai jenis sensor melalui pendekatan *sensor fusion*. Setiap sensor memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing, sehingga kombinasi berbagai sensor menjadi suatu kebutuhan mutlak untuk meningkatkan akurasi persepsi lingkungan, mengurangi ketidakpastian, serta meningkatkan keandalan sistem dalam berbagai kondisi operasional. Dengan demikian, pendekatan multi-sensor menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem persepsi kendaraan otonom.

Selain itu, sistem komputasi berbasis kecerdasan buatan memainkan peran sentral dalam proses pengambilan keputusan. Penggunaan algoritma *deep learning* memungkinkan kendaraan untuk mengenali objek, memahami lingkungan, serta merencanakan tindakan secara adaptif dan real-time. Namun demikian, peningkatan kompleksitas komputasi ini juga menimbulkan tantangan baru, khususnya dalam hal kebutuhan energi yang tinggi, manajemen panas, serta kebutuhan akan sistem verifikasi dan validasi yang lebih ketat untuk menjamin keselamatan.

Dari sisi aktuasi, penerapan teknologi *drive-by-wire* seperti *steer-by-wire* dan *brake-by-wire* memberikan peningkatan signifikan dalam hal presisi kontrol dan fleksibilitas desain kendaraan. Sistem ini memungkinkan implementasi kontrol berbasis perangkat lunak yang lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi lingkungan. Namun, penerapan sistem ini juga menuntut adanya mekanisme redundansi dan *fail-safe* yang kuat untuk menjamin keselamatan operasional kendaraan.

Aspek manajemen energi menjadi faktor kritis lainnya dalam pengembangan kendaraan otonom. Tingginya kebutuhan energi untuk mendukung operasi sensor, komputasi, dan aktuasi menuntut adanya sistem manajemen energi yang cerdas dan efisien. Teknologi seperti Battery Management System (BMS), regenerative braking, serta integrasi dengan sistem energi eksternal seperti Vehicle-to-Grid (V2G) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi serta mendukung keberlanjutan sistem transportasi di masa depan.

Meskipun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi sejumlah tantangan utama yang masih harus diatasi, antara

lain terkait dengan keandalan sensor dalam kondisi lingkungan ekstrem, ketidakpastian dalam pengambilan keputusan berbasis kecerdasan buatan, kompleksitas integrasi sistem, serta belum adanya standar global yang seragam. Selain itu, isu keselamatan, keamanan siber, serta aspek regulasi dan etika juga menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan dan implementasi kendaraan otonom.

Seiring dengan perkembangan teknologi, kendaraan otonom diproyeksikan akan terus mengalami evolusi menuju sistem yang lebih cerdas, terhubung, dan efisien. Teknologi seperti solid-state LiDAR, arsitektur domain controller, komputasi neuromorfik, serta komunikasi vehicle-to-everything (V2X) akan memainkan peran penting dalam membentuk generasi berikutnya dari sistem kendaraan otonom. Integrasi kendaraan otonom dengan infrastruktur kota cerdas juga akan membuka peluang baru dalam meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kemacetan, serta meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

Secara keseluruhan, keberhasilan pengembangan kendaraan otonom di masa depan sangat bergantung pada kemampuan untuk mengintegrasikan berbagai teknologi secara holistik, dengan mempertimbangkan aspek efisiensi, keandalan, keselamatan, dan keberlanjutan. Oleh karena itu, diperlukan kolaborasi yang erat antara peneliti, insinyur, industri, dan pembuat kebijakan untuk memastikan bahwa teknologi ini dapat diimplementasikan secara optimal dan memberikan manfaat yang signifikan bagi masyarakat.

.

PENUTUP

Sebagai penutup, dapat ditegaskan bahwa sistem kelistrikan merupakan fondasi utama dalam mewujudkan kendaraan otonom yang andal, aman, dan efisien. Integrasi antara sensor, komputasi berbasis kecerdasan buatan, serta sistem aktuasi menjadi kunci keberhasilan dalam mencapai otonomi penuh. Meskipun masih terdapat berbagai tantangan teknis dan non-teknis, perkembangan teknologi yang pesat menunjukkan bahwa kendaraan otonom memiliki potensi besar untuk merevolusi sistem transportasi di masa depan menuju mobilitas yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ahmed, H. U., Huang, Y., Lu, P., & Bridgelall, R. (2022). *Technology developments and impacts of connected and autonomous vehicles: An overview*. Smart Cities, 5(1), 382–404. https://doi.org/10.3390/smartcities5010022.

[2] Nascimento, A. M., et al. (2020). *A systematic literature review about the impact of artificial intelligence on autonomous vehicle safety*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21(12), 4928–4946.

[3] Chen, L., et al. (2021). *Deep neural network based vehicle and pedestrian detection for autonomous driving: A survey*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(6), 3234–3246.

[4] Ahangar, M. N., Ahmed, Q. Z., Khan, F. A., & Hafeez, M. (2021). *A survey of autonomous vehicles: Enabling communication technologies and challenges*. Sensors, 21(3), 706

[5] Vargas, J., Alsweiss, S., Toker, O., Razdan, R., & Santos, J. (2021). *An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions*. Sensors, 21(16), 539.

[6] HZhang, Y., Carballo, A., Yang, H., & Takeda, K. (2023). *Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 196, 146–177.

[7] Wang, H., Shao, W., Sun, C., Yang, K., Cao, D., & Li, J. (2024). *Safety of the intended functionality in autonomous vehicles: A survey*. Engineering, 33, 17–34.

[8] Fan, L., Wang, J., Chang, Y., Li, Y., Wang, Y., & Cao, D. (2024). *4D mmWave radar for autonomous driving perception: A comprehensive survey*. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 9(4), 4606–4620.

[9] Leong, P. Y., & Ahmad, N. S. (2024). *LiDAR-based obstacle avoidance with autonomous vehicles: A comprehensive review*. IEEE Access, 12, 164248–164261.

[10] Abdulmaksoud, A., & Ahmed, R. (2025). *Transformer-based sensor fusion for autonomous vehicles: A comprehensive review*. IEEE Access, 13, 41822–41838.

[11] Mahmood, A., & Szabolcsi, R. (2025). *A systematic review on risk management and enhancing reliability in autonomous vehicles*. Machines, 13(8), 646