



JURNAL RISET SISTEM INFORMASI

Halaman Jurnal: <https://journal.smartpublisher.id/index.php/jissi>

Halaman UTAMA Jurnal : <https://journal.smartpublisher.id>



DOI: <https://doi.org/10.69714/0xhvtr51>

ANALISIS PERKEMBANGAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM SISTEM KESELAMATAN AKTIF KENDARAAN OTOMOTIF DI ERA MODERN

Nicholas ^{a*}, Nico Saputra ^b, Dorie P. Kesuma ^c

^a Fakultas ilmu komputer dan rekayasa / Jurusan sistem informasi; nicholas_2327240044@mhs.mdp.ac.id, Universitas Multi Data Palembang, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan

^b Fakultas ilmu komputer dan rekayasa / Jurusan sistem informasi; nicosaputra_2327240039@mhs.mdp.ac.id, Universitas Multi Data Palembang, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan

^c Fakultas ilmu komputer dan rekayasa / Jurusan sistem informasi; dpkesuma@staff.mdp.ac.id, Universitas Multi Data Palembang, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan

* Penulis Korespondensi: Nicholas

ABSTRACT

The rapid development of Artificial Intelligence (AI) has significantly transformed the automotive industry, particularly in active vehicle safety systems. AI enables vehicles to perceive their environment, make decisions in real time, predict risks, and adapt safety features according to driver characteristics. This study aims to analyze the development of AI in active automotive safety systems, identify its primary roles, evaluate its impact on accident prevention, and examine the implementation challenges from technical, regulatory, and ethical perspectives. This research employs a qualitative descriptive approach using a literature review method. Data were collected from scientific journals, conference proceedings, international standards, dissertations, and preprint repositories related to AI-based automotive safety technologies. The findings indicate that AI has evolved from simple object detection systems into advanced technologies capable of driver cognitive state inference, predictive safety analysis, and autonomous decision-making. AI-based systems such as Automatic Emergency Braking (AEB), Adaptive Cruise Control (ACC), and Driver Monitoring Systems (DMS) have demonstrated significant contributions to reducing accident risks and injury severity. However, challenges remain regarding adverse weather conditions, mixed traffic environments, model uncertainty, certification frameworks, and ethical accountability. The study concludes that AI has substantial potential to improve road safety, but successful implementation requires robust technical development, adaptive regulations, and comprehensive safety assurance mechanisms.

Keywords: Artificial Intelligence; Active Safety System; Automotive Safety; Autonomous Vehicle; Driver Assistance System; Machine Learning.

Abstrak

Perkembangan Artificial Intelligence (AI) telah membawa perubahan signifikan dalam industri otomotif, khususnya pada sistem keselamatan aktif kendaraan. AI memungkinkan kendaraan untuk memahami lingkungan sekitar, mengambil keputusan secara real-time, memprediksi risiko, serta menyesuaikan fitur keselamatan berdasarkan karakteristik pengemudi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan AI dalam sistem keselamatan aktif kendaraan otomotif, mengidentifikasi peran utamanya, mengevaluasi dampaknya terhadap pencegahan kecelakaan, serta mengkaji tantangan implementasinya dari aspek teknis, regulasi, dan etika. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode studi literatur. Data diperoleh dari jurnal ilmiah, prosiding konferensi, standar internasional, disertasi, dan repository preprint yang membahas teknologi keselamatan kendaraan berbasis AI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AI telah berkembang dari sistem deteksi objek sederhana menjadi teknologi yang

mampu melakukan inferensi kondisi kognitif pengemudi, analisis keselamatan prediktif, serta pengambilan keputusan secara otonom. Sistem berbasis AI seperti Automatic Emergency Braking (AEB), Adaptive Cruise Control (ACC), dan Driver Monitoring System (DMS) terbukti berkontribusi dalam mengurangi risiko kecelakaan dan tingkat keparahan cedera. Meskipun demikian, implementasi AI masih menghadapi berbagai tantangan seperti kondisi cuaca buruk, lalu lintas campuran, ketidakpastian model, sertifikasi keselamatan, serta isu etika dan akuntabilitas. Penelitian ini menyimpulkan bahwa AI memiliki potensi besar untuk meningkatkan keselamatan berkendara, namun keberhasilannya memerlukan pengembangan teknologi yang lebih adaptif, regulasi yang dinamis, dan mekanisme jaminan keselamatan yang komprehensif.

Kata Kunci: Artificial Intelligence; Sistem Keselamatan Aktif; Keselamatan Otomotif; Kendaraan Otonom; Sistem Bantuan Pengemudi; Machine Learning.

1. PENDAHULUAN

Transformasi digital dalam dua dekade terakhir mendorong perkembangan teknologi Artificial Intelligence (AI) di berbagai sektor industri, termasuk otomotif [1]. AI tidak lagi hanya digunakan sebagai alat bantu komputasi dan analisis data, melainkan telah berevolusi menjadi komponen utama dalam sistem yang mampu melakukan persepsi lingkungan, pembelajaran, prediksi, serta pengambilan keputusan secara otomatis. Berdasarkan data *World Health Organization* (WHO), kecelakaan lalu lintas menyebabkan sekitar 1,19 juta kematian setiap tahunnya di seluruh dunia, dan sebagian besar insiden tersebut dipicu oleh kesalahan manusia (*human error*) [8]. Kondisi kritis ini mendorong urgensi pengembangan sistem keselamatan berbasis AI yang secara masif dirancang guna mengurangi ketergantungan pada faktor kelengahan manusia sekaligus meningkatkan keamanan pengguna jalan [1].

Sistem keselamatan aktif kendaraan merupakan teknologi yang bekerja secara preventif untuk mencegah terjadinya kecelakaan sebelum benturan terjadi. Berbeda dengan sistem keselamatan pasif seperti airbag dan sabuk pengaman yang berfungsi meminimalkan dampak setelah kecelakaan berlangsung, sistem keselamatan aktif bertugas mendeteksi potensi bahaya, memberikan peringatan dini, dan melakukan intervensi mekanis secara otomatis apabila diperlukan. Integrasi AI ke dalam ekosistem keselamatan aktif telah menghasilkan berbagai inovasi cerdas seperti *Automatic Emergency Braking* (AEB), *Lane Keeping Assist* (LKA), *Adaptive Cruise Control* (ACC), serta *Driver Monitoring System* (DMS) yang semakin cerdas dan responsif terhadap kondisi lalu lintas dinamis [3].

Perkembangan terbaru membuktikan bahwa aplikasi AI dalam keselamatan kendaraan tidak lagi terbatas pada kemampuan mendeteksi objek eksternal di sekitar kendaraan, tetapi mulai mengintegrasikan faktor manusia sebagai elemen internal yang krusial. Penelitian terdahulu oleh Sumner et al. menunjukkan bahwa arsitektur AI mampu mengidentifikasi kondisi kognitif pengemudi berdasarkan pola perilaku berkendara dan memanfaatkan informasi laten tersebut untuk mempersonalisasi antarmuka keselamatan secara real-time [1]. Pendekatan adaptif ini menandai pergeseran paradigma dari sistem keselamatan konvensional yang bersifat generik menuju sistem personal yang menyesuaikan karakteristik unik dari individu pengemudi [1].

Meskipun memberikan performa yang impresif, peningkatan kompleksitas sistem AI memicu tantangan baru pada aspek keselamatan fungsional dan validasi teknologi. Sifat algoritma *machine learning* dan *deep learning* yang cenderung *non-deterministic* membuat perilakunya sulit dievaluasi menggunakan metode rekayasa keselamatan konvensional [9]. Untuk menjembatani celah tersebut, berbagai standar internasional baru mulai dirumuskan, seperti ISO 21448:2022 (*Safety of the Intended Functionality* - SOTIF) dan ISO/PAS 8800:2024 guna menyediakan kerangka jaminan keselamatan yang terstandarisasi bagi sistem kendaraan berbasis AI [6]. Evaluasi mendalam oleh Ercan dan Dogan menunjukkan bahwa analisis risiko terhadap sistem AEB berbasis AI membutuhkan pendekatan integratif guna mendeteksi skenario kegagalan sistemik yang tidak teridentifikasi pada sistem mekanis tradisional [3].

Lebih jauh lagi, integrasi AI juga terbukti efektif dalam memprediksi risiko cedera fisik ketika kecelakaan benar-benar tidak dapat dihindari. Melalui pemanfaatan teknik *machine learning*, strategi keselamatan terintegrasi mampu menyelaraskan respons pengereman otomatis dengan kondisi biologis pengemudi, yang menghasilkan penurunan signifikan pada indikator cedera kepala (*Head Injury Criterion* - HIC) dan tingkat keparahan cedera tertimbang (*Weighted Injury Criterion* - WIC) [4].

Namun, ketika diimplementasikan pada kondisi riil, teknologi ini berbenturan dengan realitas operasional yang kompleks, terutama di negara berkembang seperti Indonesia. Karakteristik lalu lintas campuran (*mixed traffic*) yang melibatkan interaksi tak teratur antara mobil, sepeda motor, angkutan umum, hingga kendaraan tradisional, berpadu dengan gangguan cuaca tropis yang ekstrem. Penelitian Wibowo menegaskan bahwa sistem persepsi kendaraan otonom mengalami penurunan akurasi deteksi secara drastis saat dihadapkan pada gangguan *noise* visual akibat hujan lebat dan kabut di lingkungan lalu lintas campuran Indonesia [5].

Hingga saat ini, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus secara parsial pada aspek teknis tertentu, seperti pengujian algoritma keputusan di laboratorium [7]. Terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang nyata dalam hal kajian komprehensif yang mengintegrasikan tiga dimensi sekaligus—perkembangan teknologi AI, efektivitas keselamatan aktif, dan tantangan implementasi sosio-teknis. Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dengan mengintegrasikan ketiga aspek tersebut untuk mengisi keterbatasan literatur terdahulu [1, 3, 5]. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan AI dalam sistem keselamatan aktif, mengidentifikasi peran utamanya dalam persepsi lingkungan dan prediksi risiko, mengevaluasi dampak implementasinya, serta mengkaji tantangan multidimensional yang ada dari perspektif teknis, regulasi, dan etika.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) atau kecerdasan buatan merupakan cabang ilmu komputer yang berfokus pada pengembangan sistem yang mampu meniru kemampuan kognitif manusia, seperti belajar, memahami informasi, melakukan penalaran, serta mengambil keputusan secara otomatis [2]. AI bekerja dengan memanfaatkan algoritma komputasi, data dalam jumlah besar, dan kemampuan pemrosesan yang tinggi untuk menghasilkan keputusan yang mendekati pola berpikir manusia [2]. Dalam industri otomotif, AI berperan sebagai inti dari berbagai sistem cerdas yang memungkinkan kendaraan memahami lingkungan sekitar, memprediksi risiko, dan mengambil tindakan secara mandiri [1]. Berbeda dengan sistem konvensional yang bergantung pada aturan statis (*rule-based*), AI memiliki kemampuan untuk mempelajari pola baru dari data yang diperoleh secara berkelanjutan sehingga mampu beradaptasi terhadap situasi yang dinamis [1].

Dalam konteks keselamatan kendaraan bermotor, terdapat tiga paradigma utama kecerdasan buatan yang memegang peranan vital, yaitu *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *reinforcement learning* [9]. *Supervised learning* digunakan secara intensif untuk melatih model deteksi objek visual memanfaatkan dataset berlabel, seperti pengenalan pejalan kaki, marka jalan, dan kendaraan lain [9]. Sebaliknya, *unsupervised learning* dimanfaatkan untuk mendeteksi anomali pada sensor tanpa memerlukan pelabelan data sebelumnya. Sementara itu, *reinforcement learning* digunakan untuk proses pengambilan keputusan adaptif, di mana agen AI belajar melakukan manuver pengereman atau penghindaran yang optimal melalui interaksi di jalan raya [7]. Kombinasi ketiga pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem keselamatan kendaraan yang semakin cerdas dan responsif.

2.2 Sistem Keselamatan Aktif Kendaraan

Sistem keselamatan aktif kendaraan merupakan teknologi yang dirancang untuk mencegah terjadinya kecelakaan sebelum benturan terjadi. Sistem ini bekerja dengan memonitor kondisi kendaraan dan lingkungan sekitar secara terus-menerus, kemudian memberikan peringatan atau melakukan intervensi apabila terdeteksi potensi bahaya [3].

Sebagai contoh, pada komponen *Automatic Emergency Braking* (AEB), AI tidak hanya berfungsi mendeteksi jarak, melainkan secara aktif membedakan antara objek berbahaya dan objek non-bahaya. AI mengalkulasi waktu pengereman optimal (*Time-to-Collision*) dan menyesuaikan gaya tekanan rem secara presisi berdasarkan kecepatan kendaraan, koefisien gesek jalan, dan jarak aktual [3]. Kemampuan adaptif ini diperoleh melalui pelatihan model *deep learning* menggunakan jutaan data kecelakaan dan simulasi skenario lalu lintas ekstrem. Beberapa komponen utama sistem keselamatan aktif yang banyak digunakan pada kendaraan modern disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Utama Sistem Keselamatan Aktif Kendaraan

Komponen	Fungsi Utama
Automatic Emergency Braking (AEB)	Membedakan objek berbahaya, mengalkulasi <i>Time-to-Collision</i> , dan melakukan pengereman otomatis.
Lane Keeping Assist (LKA)	Mengidentifikasi marka jalan memudar dan melakukan koreksi kemudi otomatis
Adaptive Cruise Control (ACC)	Mengatur kecepatan dan menjaga jarak aman dengan kendaraan di depan
Driver Monitoring System (DMS)	Memantau kondisi pengemudi seperti kantuk, kelelahan, atau gangguan perhatian
Blind Spot Detection (BSD)	Mendeteksi objek pada area titik buta kendaraan
Collision Warning System	Memberikan sinyal audio-visual dini terhadap potensi tabrakan

Keberhasilan sistem-sistem tersebut sangat bergantung pada kemampuan AI dalam melakukan persepsi lingkungan dan pengambilan keputusan secara cepat dan akurat [3].

2.3 Peran AI dalam Sistem Keselamatan Aktif

AI memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan efektivitas sistem keselamatan aktif kendaraan. Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan, terdapat empat fungsi utama AI yang saling terintegrasi dalam sistem keselamatan aktif kendaraan:

2.3.1 Persepsi Lingkungan

Persepsi lingkungan merupakan kemampuan kendaraan untuk memahami kondisi sekitar melalui berbagai sensor seperti kamera, radar, ultrasonic sensor, dan LiDAR [5]. Data yang diperoleh dari berbagai sensor tersebut kemudian diolah menggunakan algoritma AI untuk mengidentifikasi objek, menentukan posisi objek, dan memprediksi pergerakannya [5]. Kemampuan persepsi lingkungan menjadi fondasi utama seluruh sistem keselamatan aktif karena kualitas pengambilan keputusan sangat dipengaruhi oleh akurasi informasi yang diterima sistem. Tantangan terbesar pada tahap ini adalah kondisi cuaca buruk, pencahayaan rendah, serta lingkungan lalu lintas campuran yang umum dijumpai di Indonesia [5].

2.3.2 Pengambilan Keputusan

Setelah memperoleh informasi mengenai kondisi lingkungan, AI bertugas menentukan tindakan yang paling aman dalam waktu yang sangat singkat [3]. Proses pengambilan keputusan melibatkan berbagai pertimbangan seperti jarak kendaraan, kecepatan, arah pergerakan objek, dan kemungkinan terjadinya tabrakan [3]. Sistem AEB berbasis AI harus mampu mengantisipasi berbagai skenario yang tidak terduga (*edge cases*) sehingga diperlukan pendekatan analisis keselamatan yang lebih komprehensif dibandingkan sistem konvensional [3].

2.3.3 Personalisasi Keselamatan

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa AI mampu menyesuaikan strategi keselamatan berdasarkan karakteristik pengemudi [1]. Sistem dapat mempelajari pola perilaku pengemudi, tingkat konsentrasi, kecenderungan impulsif, hingga kebiasaan berkendara tertentu [1]. Kemampuan personalisasi ini

memungkinkan sistem memberikan peringatan yang lebih sesuai dengan kondisi masing-masing pengemudi sehingga dapat meningkatkan efektivitas intervensi keselamatan dan mengurangi alarm palsu (*false alarm*) [1].

2.4 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi dasar penting dalam memahami arah perkembangan AI pada sistem keselamatan aktif kendaraan [1, 2, 3]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus secara terpisah pada satu domain teknis tertentu dan belum mengintegrasikan tiga dimensi utama dalam satu kerangka analisis yang komprehensif. Perbandingan mendalam beserta identifikasi keterbatasan dari masing-masing penelitian terdahulu ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Fokus Penelitian	Temuan Utama	Kelebihan	Keterbatasan
Sumner et al. [1]	Personalisasi keselamatan pengemudi	AI mampu menginferensi kondisi kognitif pengemudi secara laten.	Pendekatan adaptif terhadap karakteristik personal individu.	Belum diuji secara luas pada variasi budaya mengemudi regional.
Abbaspour et al. [2]	<i>Generative AI</i> untuk analisis keselamatan	Otomatisasi HARA meningkatkan efisiensi proses jaminan keselamatan.	Mendukung akselerasi identifikasi risiko berkendara secara cepat.	Validasi implementasi pada skala industri riil masih terbatas.
Ercan dan Dogan [3]	Keselamatan sistem AEB berbasis AI	Integrasi metode STPA dan CTA efektif mendeteksi skenario kegagalan.	Pendekatan evaluasi risiko sistemik dan deterministik.	Hanya terfokus pada satu jenis komponen keselamatan (AEB).
Li dan Du [4]	Prediksi risiko cedera real-time	Pengurangan indikator cedera HIC dan WIC melalui optimasi fuzzy.	Mengintegrasikan mekanisme keselamatan aktif dan pasif.	Membutuhkan arsitektur komputasi data kendaraan yang sangat kompleks.
Wibowo [5]	Sistem persepsi otonom lokal	Cuaca buruk dan lalu lintas campuran Indonesia adalah hambatan utama.	Sangat relevan dengan karakteristik fisik jalan raya domestik.	Belum menyentuh aspek kesiapan regulasi hukum nasional.
ISO Standard [6]	Standardisasi keamanan AI otomotif	Menyediakan pedoman baku penanganan model <i>uncertainty</i> pada AI.	Menjadi panduan global formal rekayasa keselamatan AI.	Implementasi industri belum merata di berbagai negara.
Raeesi et al. [7]	<i>Safe Reinforcement Learning</i>	Menjamin batas aman berkendara selama proses pembelajaran mandiri AI.	Ideal untuk arsitektur kendali otonom masa depan.	Beban dan kompleksitas komputasi algoritma sangat tinggi.

2.5 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir penelitian ini dibangun berdasarkan premis bahwa perkembangan kecerdasan buatan berpengaruh langsung terhadap efisiensi operasional sistem keselamatan aktif kendaraan [3]. Kerangka analisis ini memetakan alur penelitian secara terstruktur, mulai dari tahap input hingga evaluasi akhir, guna menyajikan penjelasan naratif bagi pembaca, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Tabel Kerangka Berpikir

Tahap	Aspek yang Dianalisis	Referensi Utama
Input	Perkembangan historis dan evolusi arsitektur AI dalam keselamatan aktif kendaraan.	[1], [3], [7], [9]
Proses	Pemetaan operasional empat peran utama AI (Persepsi, Keputusan, Personalisasi, Prediksi).	[1], [3], [5], [9]

Analisis Perkembangan Artificial Intelligence dalam Sistem Keselamatan Aktif Kendaraan Otomotif di Era Modern (Nicholas)

Output	Evaluasi dampak implementasi AI terhadap reduksi kecelakaan dan mitigasi cedera.	[4], [8]
Evaluasi	Identifikasi komprehensif hambatan dari dimensi teknis, regulasi, dan etika kemanusiaan.	[2], [5], [6]

Secara naratif, kerangka analisis penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi perkembangan teknologi AI dalam sistem keselamatan aktif kendaraan dari berbagai literatur global terkini. Selanjutnya, dilakukan analisis mendalam terhadap interaksi operasional empat peran utama AI: persepsi lingkungan, pengambilan keputusan, personalisasi keselamatan, dan prediksi risiko. Hasil dari analisis peran tersebut digunakan untuk mengevaluasi dampak nyata implementasi AI terhadap efektivitas pencegahan insiden kecelakaan di jalan raya serta pengurangan tingkat keparahan cedera korban. Pada tahap akhir, dilakukan identifikasi menyeluruh terhadap tantangan teknis, regulasi, dan etika yang masih dihadapi oleh industri otomotif modern untuk merumuskan solusi berkelanjutan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*library research*) dengan pendekatan deskriptif kualitatif [1]. Metode studi literatur dipilih karena penelitian berfokus pada analisis mendalam mengenai perkembangan *Artificial Intelligence* (AI) dalam sistem keselamatan aktif kendaraan otomotif berdasarkan data sekunder yang telah dipublikasikan sebelumnya [5]. Pendekatan deskriptif kualitatif digunakan untuk mengidentifikasi, menginterpretasikan, dan mensintesis berbagai temuan dari literatur ilmiah sehingga mampu menghasilkan gambaran teoretis yang sistematis, transparan, dan kredibel mengenai kondisi aktual teknologi tersebut [3].

3.2 Kriteria Pemilihan Literatur

Untuk menjamin transparansi metodologis, proses penyeleksian literatur didasarkan pada kriteria inklusi spesifik yang ketat: (1) Literatur merupakan publikasi ilmiah dalam rentang waktu 10 tahun terakhir (2015-2025) guna menjaga relevansi dengan perkembangan teknologi mutakhir, (2) Prioritas utama diberikan pada artikel jurnal internasional yang terindeks dalam database bereputasi tinggi seperti Scopus atau *Web of Science*, (3) Memasukkan prosiding konferensi internasional di bidang teknik otomotif, (4) Menggunakan dokumen standar keselamatan resmi dari organisasi internasional seperti ISO [6]. Literatur yang tidak memenuhi batas tahun publikasi atau diterbitkan oleh lembaga non-akademis dieksklusi dari analisis ini.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder dilakukan melalui penelusuran sistematis pada platform akademik digital seperti Google Scholar, Semantic Scholar, arXiv, dan ITB Digilib [5]. Proses pencarian digerakkan oleh kata kunci spesifik: "*Artificial Intelligence in Automotive Safety*", "*Active Safety Systems*", "*Automatic Emergency Braking AI*", "*Driver State Recognition*", "*ISO/PAS 8800*", dan "*Sistem persepsi kendaraan otonom Indonesia*" [5].

Guna menjamin validitas data, peneliti melakukan teknik triangulasi sumber data dengan cara membandingkan secara silang (*cross-examination*) informasi yang diperoleh dari berbagai jenis dokumen yang berbeda (jurnal, prosiding, dokumen standar, dan preprint teknis) [6]. Selain itu, peneliti juga menerapkan prosedur *member checking* teoretis, yaitu membandingkan hasil temuan interpretasi peneliti dengan kesimpulan dari beberapa pakar independen di literatur lain untuk memastikan konsistensi interpretasi ilmiah [1, 3].

3.4 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dijalankan melalui empat tahapan analisis deskriptif kualitatif yang diperluas secara rinci:

1. Reduksi Data: Memfilter, memilah, dan membuang informasi dari puluhan literatur yang tidak berkorelasi langsung dengan rumusan masalah penelitian.
2. Kategorisasi Data: Mengelompokkan data yang telah tereduksi ke dalam empat tema sentral: (1) perkembangan teknologi AI dalam sistem keselamatan, (2) operasionalisasi peran AI (persepsi, keputusan, personalisasi, dan prediksi), (3) evaluasi dampak positif dan negatif implementasi AI, serta (4) tantangan nyata dari aspek teknis, regulasi, dan etika [3].
3. Interpretasi Data: Menganalisis hubungan sebab-akibat dan keterkaitan teoretis antar-tema yang ditemukan di lapangan [1].

4. Sintesis Data: Mengintegrasikan seluruh hasil temuan menjadi kesimpulan naratif yang utuh dan komprehensif [4].

3.5 Keterbatasan Penelitian

Peneliti menyadari adanya keterbatasan metodologis dalam penelitian ini. Karena analisis sepenuhnya mengandalkan data sekunder dari literatur ilmiah yang telah dipublikasikan, penelitian ini tidak melakukan pengujian empiris atau eksperimen langsung di laboratorium terhadap perangkat keras sistem keselamatan aktif berbasis AI. Selain itu, fokus kajian ini dibatasi pada dimensi teknologi, regulasi, dan etika, sehingga tidak membahas aspek ekonomi seperti perhitungan biaya pengembangan industri otomotif maupun dampaknya terhadap harga jual kendaraan di pasar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perkembangan AI dalam Sistem Keselamatan Aktif Kendaraan

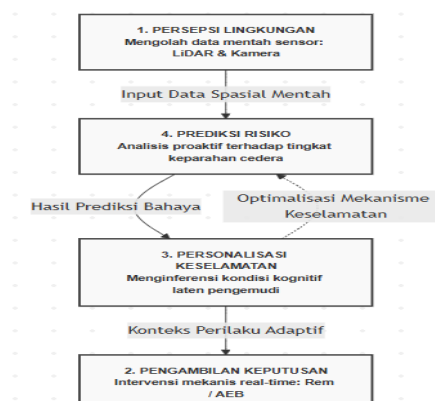
Perkembangan AI dalam sistem keselamatan aktif kendaraan menunjukkan transformasi arsitektural yang radikal selama dua dekade terakhir [5]. Pada fase awal (2000-2010), teknologi keselamatan kendaraan murni mengandalkan sensor radar deterministik sederhana yang hanya mampu mendeteksi jarak fisik objek statis di depan kendaraan [5]. Lompatan besar terjadi seiring dengan akselerasi kemampuan komputasi perangkat keras (*Hardware Acceleration*) dan matangnya arsitektur *deep learning* serta *computer vision* [9]. Kendaraan modern saat ini tidak hanya mampu mengenali kendaraan lain, tetapi juga dapat melakukan klasifikasi objek tingkat tinggi seperti mendeteksi pejalan kaki, pesepeda, marka jalan samar, hingga membaca rambu lalu lintas dinamis pada kondisi cuaca buruk [5].

Secara ilmiah, transisi dari sistem deteksi objek sederhana menuju kemampuan inferensi kondisi kognitif pengemudi tingkat lanjut dipicu oleh tiga faktor penggerak utama: (1) peningkatan eksponensial kemampuan komputasi prosesor kendaraan (*Edge Computing*) yang memungkinkan pemrosesan data sensor secara real-time dalam hitungan milidetik, (2) ketersediaan data perilaku berkendara berskala besar (*Big Data*) yang dikumpulkan melalui armada kendaraan terkoneksi (*connected vehicles*), dan (3) kemajuan pesat dalam arsitektur *deep learning*, seperti *Recurrent Neural Networks* (RNN) dan *Transformer*, yang memiliki kapasitas superior untuk menangkap pola temporal yang sangat kompleks dalam data perilaku manusia [9].

Penelitian Sumner et al. mengonfirmasi bahwa arah evolusi AI otomotif telah bergeser ke arah personalisasi adaptif yang berpusat pada manusia (*human-centric safety*), di mana AI secara aktif menginferensi tingkat impulsivitas pengemudi untuk menyesuaikan sensitivitas intervensi rem darurat [1]. Selain itu, inovasi *Safe Reinforcement Learning* dengan pendekatan *shielding-based reachable zonotopes* oleh Raeesi et al. berhasil memastikan sistem dapat terus melakukan pembelajaran mandiri secara otonom di jalan raya tanpa pernah melanggar batas-batas keselamatan kritis yang membahayakan nyawa [7].

4.2 Interaksi Antar-Peran AI dalam Siklus Keselamatan

Selama ini, literatur ilmiah sering kali membahas peran AI seperti persepsi lingkungan, pengambilan keputusan, personalisasi keselamatan, dan prediksi risiko secara terpisah. Padahal, hasil analisis sintesis dalam penelitian ini membuktikan bahwa keempat peran tersebut tidak berdiri sendiri, melainkan saling berinteraksi membentuk satu siklus keselamatan yang terintegrasi dan sirkular, seperti yang digambarkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Interaksi Antar-Peran AI

Siklus ini bekerja secara simultan: tahapan persepsi lingkungan bertindak sebagai penyedia data mentah spasial dari sensor eksternal. Data tersebut langsung dievaluasi oleh fungsi prediksi risiko untuk menganalisis potensi bahaya secara proaktif sebelum situasi darurat terjadi. Hasil analisis risiko tersebut kemudian dioptimalkan melalui peran personalisasi keselamatan yang menilai kondisi kognitif internal pengemudi saat itu (misalnya tingkat kelelahan atau impulsivitas). Akhirnya, kombinasi data eksternal dan internal yang telah terkontekstualisasi ini dikirim ke modul pengambilan keputusan untuk mengeksekusi tindakan mekanis (seperti pengereman otomatis AEB) secara tepat waktu dan akurat. Interaksi sirkular dari keempat peran ini menghasilkan sistem keselamatan yang jauh lebih efektif dan memberi tingkat akurasi yang lebih handal.

4.3 Dampak Sosio-Teknis Implementasi AI

Implementasi AI dalam ranah keselamatan aktif kendaraan memberikan dampak multidimensional yang signifikan bagi ekosistem transportasi modern.

4.3.1 Dampak Positif

Dampak positif paling signifikan adalah reduksi angka kecelakaan lalu lintas secara dramatis [3]. Berdasarkan uji keselamatan fungsional, penerapan sistem AEB berbasis AI terbukti mampu menurunkan risiko insiden tabrakan hingga 30-40% akibat keterlambatan waktu reaksi manusia [3]. Dari aspek mitigasi cedera biologis, Li dan Du membuktikan bahwa pemanfaatan algoritma prediksi risiko cedera mampu meminimalkan benturan fisik, sehingga menurunkan kriteria cedera kepala (HIC) korban hingga 30,60% [4]. Dampak positif ini secara langsung berkontribusi pada misi global WHO dalam menekan angka kematian akibat kecelakaan jalan raya [8].

4.3.2 Dampak Negatif dan Efek Kelengahan (Complacency Effect)

Di sisi lain, naskah ini menganalisis dampak negatif serius yang muncul, salah satunya adalah *complacency effect* atau efek kelengahan pengemudi akibat ketergantungan teknologi yang berlebihan [5]. Fenomena sosio-teknis ini menjadi semakin mengkhawatirkan seiring dengan meningkatnya level otonomi kendaraan [7]. Ketika pengemudi merasa bahwa sistem keselamatan berbasis AI selalu mampu menangani segala bentuk potensi bahaya di jalan raya, mereka cenderung menurunkan tingkat kewaspadaan atau mengalihkan perhatian dari tugas mengemudi (*distracted driving*) [1].

Akibatnya, ketika sistem AI mengalami kegagalan mendadak akibat situasi *edge case* atau malfungsi sensor, pengemudi manusia gagal mengambil alih kendali kendaraan (*take-over request*) dalam waktu yang ditentukan, yang justru memicu kecelakaan fatal baru [3]. Oleh karena itu, desain antarmuka pengemudi yang mampu menjaga interaksi dan kewaspadaan aktif manusia menjadi tantangan kritis yang wajib diselesaikan oleh industri otomotif [1].

Selain itu, masalah *distribution shift* akibat keterbatasan data pelatihan yang bias menyebabkan AI mengalami penurunan performa ekstrem ketika dipindahkan ke lingkungan geografi baru [3]. Dari aspek ekonomi, kompleksitas rekayasa perangkat lunak AI berimplikasi pada meroketnya biaya pengujian, sertifikasi keselamatan, dan pemeliharaan jangka panjang kendaraan [2].

4.4 Tantangan Implementasi pada Lingkungan Negara Berkembang

Tantangan implementasi AI pada sistem keselamatan aktif dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama:

4.4.1 Tantangan Teknis

Kondisi cuaca buruk (hujan tropis lebat dan kabut tebal) melemahkan daya tembus sensor visual, sementara karakteristik lalu lintas campuran di negara berkembang seperti Indonesia menyajikan tingkat ketidakaturan perilaku berkendara yang sangat tinggi, sehingga menyulitkan model AI dalam memprediksi pergerakan objek secara akurat [5]. Masalah ini diperparah oleh keberadaan *edge case* ekstrem di jalan raya yang belum pernah terekam dalam dataset pelatihan algoritma [3].

4.4.2 Tantangan Regulasi dan Sertifikasi

Standar keselamatan fungsional kendaraan tradisional seperti ISO 26262 dirancang untuk sistem mekanis yang bersifat deterministik [6]. Sebaliknya, AI merupakan sistem statistik non-deterministik yang perilakunya terus berubah seiring proses pembelajaran data baru [6]. Meskipun regulasi baru seperti ISO/PAS 8800:2024 telah dirilis untuk menangani ketidakpastian model AI, proses audit keselamatan dan sertifikasi hukum masih mengalami kesenjangan besar [6]. Abbaspour et al. menekankan bahwa metode

Hazard Analysis and Risk Assessment (HARA) konvensional tidak lagi mampu mengimpangi kompleksitas kode *deep learning*, sehingga memerlukan otomatisasi berbasis Generative AI untuk mempercepat audit jaminan keselamatan [2].

4.4.3 Tantangan Etika

Dilema moral muncul ketika kendaraan otonom dihadapkan pada situasi tabrakan tak terhindarkan, di mana algoritma AI dipaksa memilih antara mengorbankan keselamatan penumpang di dalam mobil atau pejalan kaki di luar [1]. Tantangan etika ini mencakup pula isu privasi data, mengingat fitur personalisasi keselamatan secara konstan merekam data biologis dan perilaku sensitif pengemudi, serta ketidakjelasan akuntabilitas hukum mengenai pihak yang wajib bertanggung jawab jika terjadi kegagalan fatal pada kecerdasan buatan tersebut [1].

4.5 Implikasi Temuan Terhadap Kebijakan dan Industri Otomotif

Temuan dalam penelitian ini memiliki implikasi kebijakan yang krusial bagi regulator pemerintah, khususnya di Indonesia. Diperlukan pengembangan kerangka regulasi nasional yang adaptif dan proaktif terhadap penetrasi teknologi kendaraan cerdas, mencakup perumusan standar keselamatan berkendara berbasis AI, hukum lalu lintas formal terkait kendaraan semi-otonom, serta kejelasan prosedur investigasi kecelakaan jika melibatkan kegagalan sistem otonom. Bagi sektor industri otomotif, temuan ini menegaskan pentingnya membangun dataset pelatihan lokal (*localized dataset*) yang merepresentasikan anomali lalu lintas mixed traffic Indonesia, agar teknologi keselamatan aktif yang dipasarkan benar-benar tangguh dan aman digunakan pada kondisi jalan raya domestik [5].

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil studi literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Artificial Intelligence (AI) memegang peran yang sangat penting dan transformatif dalam evolusi sistem keselamatan aktif kendaraan otomotif di era modern [1]. Penerapan AI berhasil mengubah paradigma keselamatan berkendara dari pendekatan tradisional yang bersifat reaktif menjadi kerangka keselamatan proaktif yang prediktif dan adaptif melalui implementasi arsitektur cerdas. Keberhasilan ini dicapai melalui integrasi sirkular empat peran utama AI, yaitu persepsi lingkungan, pengambilan keputusan real-time, personalisasi keselamatan pengemudi, dan prediksi risiko kecelakaan.

Meskipun secara empiris terbukti mampu menurunkan risiko kecelakaan sebesar 30-40% [3] dan meminimalkan tingkat keparahan cedera kepala korban hingga 30,60% [4], teknologi ini membawa dampak negatif yang signifikan, khususnya fenomena *complacency effect* atau penurunan kewaspadaan pengemudi akibat ketergantungan teknologi [1]. Implementasi massal AI otomotif masih terhambat oleh tantangan teknis berupa cuaca ekstrem dan lalu lintas campuran [5], tantangan regulasi akibat sifat non-deterministik AI yang belum sepenuhnya terakomodasi oleh standar sertifikasi keselamatan konvensional, serta dilema etika terkait keputusan moral dan akuntabilitas hukum.

SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian empiris terhadap kinerja model keselamatan berbasis AI menggunakan data dunia nyata (*real-world data*) di lingkungan lalu lintas negara berkembang seperti Indonesia guna memperoleh hasil evaluasi yang lebih representatif [5]. Selain itu, diperlukan kolaborasi lintas sektor antara akademisi dan industri untuk membangun dataset lokal yang mampu menggambarkan karakteristik lalu lintas campuran dan anomali cuaca tropis secara akurat [5]. Dari sisi regulasi, pembuat kebijakan disarankan untuk mempercepat penyusunan kerangka hukum nasional yang adaptif, mencakup standar sertifikasi jaminan keselamatan AI dan kejelasan regulasi akuntabilitas hukum, guna menyongsong era transportasi cerdas yang aman dan berkemajuan di masa depan [6].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. S. Sumner *et al.*, "Personalizing driver safety interfaces via driver cognitive factors inference," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, pp. 1-12, 2024. doi: 10.1038/s41598-024-74651-z.
- [2] A. Abbaspour, A. Arab, and Y. Mousavi, "Enhancing Autonomous Driving Safety Analysis with Generative AI: A Comparative Study on Automated Hazard and Risk Assessment," *arXiv preprint arXiv:2410.23207*, 2024. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.23207>.

- [3] T. E. Ercan and M. Dogan, "STPA Enhanced Safety Study for AI-Based Automatic Emergency Braking System: A Combined Approach with Cause Tree Analysis," in *2025 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, Istanbul, Turkey, 2025, pp. 1-6.
- [4] Y. Li and X. Du, "An Integrated Active-Passive Safety Strategy for Automobiles Based on Driver State Recognition and Injury Risk Prediction," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 208, Art. no. 108271, 2025. doi: 10.1016/j.aap.2024.108271.
- [5] A. Wibowo, "Sistem Persepsi Kendaraan Otonom untuk Lingkungan Lalu Lintas Campuran (Mixed Traffic) pada Kondisi Cuaca Buruk dan Pencahayaan Rendah," Disertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2024.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), *ISO/PAS 8800:2024 Road Vehicles - Safety and Artificial Intelligence*. Geneva, Switzerland: ISO, 2024.
- [7] H. Raeesi, A. Khosravi, and P. Sarhadi, "Safe Reinforcement Learning by Shielding Based Reachable Zonotopes for Autonomous Vehicles," *International Journal of Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 21-34, 2025.
- [8] World Health Organization (WHO), *Global Status Report on Road Safety 2023*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>.
- [9] J. Janai, F. Güney, A. Behl, and A. Geiger, "Computer Vision for Autonomous Vehicles: Problems, Datasets and State of the Art," *Foundations and Trends® in Computer Vision*, vol. 12, no. 1–3, pp. 1–308, 2020. doi: 10.1561/06000000079. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1704.05519>.