

Studi Literatur Sistematis Potensi Kendaraan Otonom dalam Transformasi Transportasi oleh Pemerintah Daerah di Indonesia

Author:

Muhammad Aria Rajasa Pohan*

Affiliation:

Universitas Komputer Indonesia, Jl. Dipati Ukur No. 112-116, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

e-Mail: muhammad.aria@email.unikom.ac.id

*Correspondence Author



Received, 03 Desember 2024

Revised, 24 September 2025

Accepted, 13 Oktober 2025

Available Online, 20 Oktober 2025

Abstrak

Dukungan pemerintah terhadap trem otonom menandai urgensi adopsi kendaraan otonom (autonomous vehicles; AVs) di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi potensi transformasi transportasi oleh AVs dan mengidentifikasi strategi implementasi untuk pemerintah daerah. Metode Systematic Literature Review (SLR) diterapkan pada literatur 2016–2024 dari Scopus, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan AVs meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kemacetan dan polusi, serta memperkuat sektor ekonomi dan pariwisata. Tantangan utama adalah kebutuhan infrastruktur, kesenjangan regulasi, dan rendahnya penerimaan publik. Rekomendasi meliputi pentingnya peran pemerintah daerah dalam mendukung adopsi teknologi ini melalui kebijakan bertahap, investasi infrastruktur, dan program edukasi publik. Artikel ini diharapkan menjadi panduan praktis untuk pengembangan transportasi inovatif dan berkelanjutan di tingkat daerah.

Kata Kunci: Kendaraan Otonom, Transformasi Transportasi, Pemerintah daerah, Studi literatur sistematis, Infrastruktur dan Regulasi.

Abstract

Government support for autonomous trams signals the urgency of adopting autonomous vehicles (AVs) in Indonesia. This study aims to explore the transformative potential of AVs and to identify implementation strategies for local governments. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted on literature published between 2016 and 2024 in Scopus, IEEE Xplore, and Google Scholar. Findings indicate that AVs can improve transportation efficiency, reduce congestion and pollution, and strengthen economic sectors and tourism. Major challenges include infrastructure requirements, regulatory gaps, and low public acceptance. Recommendations emphasize the central role of local governments in supporting adoption through phased policies, infrastructure investment, and public education programs. This article is intended to serve as a practical guide for developing innovative and sustainable regional transportation.

Keywords: *Autonomous Vehicles, Transportation Transformation, Local Government, Systematic Literature Review, Infrastructure and Regulation.*

1. Pendahuluan

Kendaraan otonom (*autonomous vehicles* atau AVs) merupakan kendaraan yang mampu beroperasi tanpa pengemudi manusia dengan memanfaatkan sensor, kamera, radar, dan kecerdasan buatan (AI) untuk navigasi mandiri (Aria, 2019; Pohan, 2023; Pohan & Utama, 2023a). Teknologi ini telah menjadi fokus banyak negara maju sebagai solusi inovatif dalam meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kenyamanan transportasi (Gu dkk., 2023; Nascimento dkk., 2019; Zheng dkk., 2023). Di Indonesia, perhatian terhadap kendaraan otonom (AVs) meningkat baik di ranah akademik maupun kebijakan publik dan industri. Beberapa studi empiris dan kajian akademik baru-baru ini menelaah aspek penerimaan publik, determinan adopsi, serta kebutuhan regulasi untuk mendukung integrasi AV ke sistem transportasi perkotaan. Studi ini menunjukkan bahwa topik ini telah menjadi fokus riset lokal dan nasional (Sitinjak dkk., 2023). Selain itu, inisiatif-inisiatif penerapan teknologi otonom sudah tampak pada tingkat implementasi dan uji coba: misalnya program uji coba Autonomous Rail Transit (ART) di ibu kota baru (IKN) dan rencana perluasan teknologi serupa ke kota-kota lain, yang dilaporkan oleh instansi pemerintahan dan lembaga konsultasi pada 2024 (Rachmanie dkk., 2023; Sitorus, 2023). Di ranah akademik dan industri domestik juga terlihat kolaborasi riset-manufaktur, sebagai contoh kerja sama institusional untuk pengembangan trem otonom, yang menegaskan adanya dukungan teknologi lokal terhadap pengembangan moda otonom (Mulyadi dkk., 2022). Bersamaan dengan itu, kajian-kajian kebijakan yang mulai muncul merekomendasikan intervensi regulasi dan strategi perencanaan kota untuk mengakomodasi AV, yang mempertegas bahwa transformasi transportasi ini sudah mulai ditindak lanjuti banyak pihak dalam upaya perencanaan dan regulasi (Djohan dkk., 2025; Wiedyanoe dkk., 2024).

Implementasi AVs di berbagai kota dunia menunjukkan hasil positif. Singapura, melalui ST Engineering, menguji shuttle bus otonom di Pulau Sentosa untuk layanan wisata seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 (Kurniawan dkk., 2021). Di Cina, Didi Chuxing meluncurkan layanan RoboTaxi untuk transportasi publik di Shanghai, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 (Noesselt, 2020). Keberhasilan ini menunjukkan pentingnya memulai adopsi teknologi AVs di Indonesia guna meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kemacetan, dan

meningkatkan keselamatan jalan. Hal ini memerlukan sinergi antarpemangku kepentingan, khususnya pemerintah daerah, untuk memastikan implementasi yang berkelanjutan.



Sumber: www.liputan6.com

**Gambar 1. Pengujian Shuttle Bus Otonom di Pulau Sentosa, Singapura
Oleh ST Engineering**



Sumber: otomotif.bisnis.com

**Gambar 2. Layanan Robotaxi Oleh Didi Chuxing Di Wilayah Lalu Lintas
Shanghai, Cina**

Penelitian tentang penerapan AVs dalam masyarakat telah dilakukan oleh berbagai pihak. Dewi dan Krisdiyanto (2023) mengidentifikasi tantangan kesiapan masyarakat Jawa Barat, termasuk infrastruktur, regulasi, dan persepsi publik. Pohan dkk. (2019) menyoroti pengembangan algoritma perencanaan jalur berbasis falsifikasi Popper bagi AVs. Nurliyana dkk. (2023) menemukan preferensi masyarakat terhadap otomasi rendah (level 2), tetapi belum membahas dukungan infrastruktur. Sitinjak dkk. (2023) mengeksplorasi penerimaan masyarakat di Jakarta terhadap AVs dengan mengungkap kekhawatiran teknis dan hukum, tetapi solusi yang ditawarkan masih terbatas.

Rasdiyanti dkk. (2024) membahas strategi kebijakan AVs di Ibu Kota Nusantara, menyoroti peluang dan tantangan seperti ancaman siber. Pohan dan

Utama (2023b) memperkenalkan algoritma jalur berbasis ruang konfigurasi waktu, namun aplikasinya belum mencakup dinamika luas masyarakat Indonesia. Di tingkat internasional, Tran dan Le (2022) membandingkan regulasi AVs di ASEAN dan Eropa, sementara Tan dan Taeihagh (2021) menyoroti pendekatan adaptif Singapura terhadap regulasi. Moody dkk. (2020) dan Müller (2019) meninjau persepsi keselamatan serta penerimaan teknologi AVs global, tetapi konteksnya belum relevan untuk Indonesia. Hashim dan Omar (2017) menyusun kerangka adopsi teknologi yang komprehensif, meski belum mempertimbangkan kebutuhan lokal.

Berdasarkan kajian tersebut, terlihat adanya *research gap* yakni kurangnya kajian potensi penerapan teknologi AVs dan panduan strategis untuk implementasinya yang mempertimbangkan tantangan lokal. Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi AVs dalam mendukung transformasi transportasi daerah di Indonesia serta merancang strategi implementasi yang mempertimbangkan infrastruktur, regulasi, dan penerimaan masyarakat. *Novelty* artikel ini meliputi:

1. Mengintegrasikan analisis keunggulan teknologi AVs dengan langkah strategis implementasi untuk pemerintah daerah.
2. Memprioritaskan tantangan lokal seperti infrastruktur, regulasi, dan penerimaan masyarakat.
3. Menekankan peran AVs dalam mendukung transformasi transportasi berbasis kebutuhan daerah.

Metode *Systematic Literature Review* (SLR) digunakan untuk mengidentifikasi potensi dan tantangan penerapan AVs, seperti bus, trem, dan taksi. Hasil penelitian menunjukkan teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kemacetan dan polusi, serta meningkatkan keselamatan jalan. Namun, hambatan seperti infrastruktur, regulasi, dan penerimaan masyarakat memerlukan peran strategis pemerintah daerah melalui kebijakan, perencanaan, dan pengembangan infrastruktur yang terarah. Artikel ini diharapkan berkontribusi pada literatur ilmiah dan menjadi panduan transformasi transportasi yang inovatif dan berkelanjutan di Indonesia.

2. Metode Penelitian

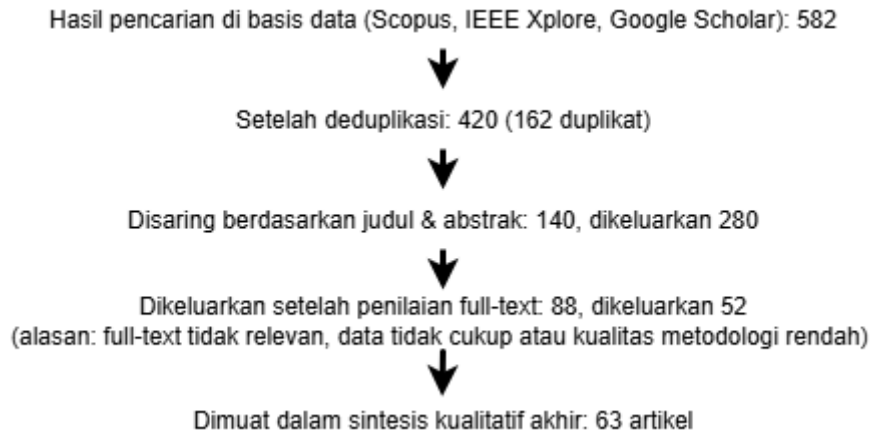
Bagian ini menjelaskan pendekatan SLR yang digunakan untuk menjawab pertanyaan penelitian secara sistematis dan transparan. Justifikasi metode, perumusan RQ, strategi pencarian, kriteria seleksi, prosedur ekstraksi dan analisis, serta langkah validasi.

SLR dipilih karena penelitian tentang AVs di Indonesia masih relatif terbatas. Metode SLR memungkinkan pemetaan bukti yang komprehensif dan sintesis tematik atas potensi, tantangan, serta strategi implementasi (Azarian dkk., 2023; Triandini dkk., 2019; Ulfa dkk., 2024). Metode ini juga meningkatkan reproduksibilitas dan transparansi temuan (Sideri dkk., 2018). Pedoman yang dijadikan rujukan mencakup Véras dkk. (2019).

Penelitian ini diformalkan menjadi tiga pertanyaan penelitian (RQ) berikut.

- RQ1: Apa potensi penerapan AVs dalam transformasi transportasi daerah di Indonesia?
- RQ2: Apa tantangan utama yang menghambat implementasi AVs di konteks daerah Indonesia?
- RQ3: Strategi apa yang dapat diterapkan oleh pemerintah daerah untuk mendukung adopsi AVs?

Pencarian literatur dilakukan pada basis data Scopus, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Periode pencarian mencakup tahun 2016 sampai 2024. Pencarian dilakukan pada 10 September 2024. String pencarian utama yang diaplikasikan antara lain kombinasi istilah bahasa Inggris dan Indonesia yang relevan, seperti "autonomous vehicle", "self-driving car", "autonomous tram", dan "kendaraan otonom" dikombinasikan dengan "Indonesia", "Southeast Asia", atau "ASEAN". Rekaman awal yang teridentifikasi berjumlah 582, terdiri dari 210 rekaman Scopus, 140 rekaman IEEE Xplore, dan 232 rekaman Google Scholar. Setelah proses deduplikasi jumlah tersisa 420 rekaman. Penyaringan judul dan abstrak menyisakan 140 rekaman untuk penilaian full-text. Setelah evaluasi full-text, 63 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis dalam sintesis tematik. Proses lengkap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi studi ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram PRISMA Proses Seleksi dan Penyaringan Artikel

Kriteria inklusi meliputi artikel berformat full-text yang peer-reviewed, berbahasa Indonesia atau Inggris, dan membahas potensi, tantangan, atau strategi implementasi AVs yang relevan dengan infrastruktur, regulasi, atau penerimaan masyarakat. Kriteria eksklusi mencakup dokumen yang hanya berupa abstrak, prosiding tanpa full-text, materi non-peer-review, serta artikel yang topiknya tidak relevan dengan aspek implementasi transportasi. Rentang publikasi yang dipertimbangkan adalah 2016 sampai 2024.

Data diekstraksi ke dalam spreadsheet standar oleh peneliti. Elemen data yang diambil meliputi identitas penulis dan tahun publikasi, konteks geografis, jenis teknologi AV, metodologi studi, temuan utama mengenai potensi dan tantangan, serta rekomendasi kebijakan atau praktik. Hasil ekstraksi kemudian diverifikasi ulang oleh peneliti. Analisis dilakukan secara tematik dengan prosedur open coding untuk mengidentifikasi konsep awal, axial coding untuk mengelompokkan konsep menjadi tema, dan selective coding untuk merumuskan kerangka strategi implementasi. Proses coding dibantu perangkat lunak NVivo untuk meningkatkan konsistensi kategorisasi. Hasil akhir disajikan sebagai tema utama, subtema, dan tabel ringkasan studi.

Setiap artikel dinilai kualitasnya menggunakan checklist adaptif yang mengevaluasi relevansi, metodologi, dan keandalan data. Penilaian dilakukan oleh dua penilai independen. Ketidaksepakatan diselesaikan oleh penilai ketiga. Tingkat kesepakatan antar-penilai dievaluasi menggunakan Cohen's kappa, dengan ambang $\geq 0,70$ sebagai batas kecukupan. Validitas internal ditegakkan melalui triangulasi

sumber, pengecekan ulang ekstraksi data, dan peer-review internal. Validitas eksternal diuji dengan melakukan cross-referencing terhadap laporan kebijakan nasional dan studi empiris internasional untuk menilai keterapan temuan pada konteks kebijakan.

3. Hasil Dan Pembahasan

Bab ini menguraikan hasil kajian sistematis mengenai potensi kendaraan otonom (AVs) dalam transformasi transportasi di Indonesia, tantangan implementasinya, serta strategi yang dapat diterapkan. Pembahasan meliputi analisis potensi teknologi ini untuk meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan pertumbuhan ekonomi, disertai identifikasi tantangan infrastruktur, regulasi, dan penerimaan masyarakat. Strategi implementasi yang relevan bagi pemerintah daerah juga dirancang dengan mempertimbangkan pembelajaran dari negara lain. Di akhir, dampak potensial teknologi ini terhadap masa depan transportasi di Indonesia dianalisis dari aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan.

Data bibliografis yang digunakan dalam naskah ini terdiri dari 60 entri referensi (tahun publikasi 2016–2025). Distribusi jumlah studi menurut tahun tercantum pada Tabel 1, sedangkan klasifikasi tematik singkat (berdasarkan fokus judul dan isi studi) disajikan pada Tabel 2 untuk memudahkan pembaca melihat konsentrasi topik dalam literatur yang dianalisis.

Tabel 1. Jumlah studi menurut tahun publikasi (2016–2025)

Tahun	Jumlah Referensi
2016	1
2017	1
2018	3
2019	10
2020	10
2021	5
2022	11
2023	14
2024	7
2025	1

**Tabel 2. Klasifikasi tematik singkat literatur yang dianalisis
 (jumlah referensi per tema)**

Tema utama	Jumlah Referensi	Keterangan singkat
Infrastruktur & teknologi (V2X, 5G, peta HD, charging, sensor)	22	Studi teknis dan infrastruktur operasional AVs.
Keselamatan & penerimaan publik (safety, acceptance, human factors)	15	Studi persepsi, keselamatan, dan uji sistem.
Regulasi & kebijakan (framework, adaptive governance, legal)	11	Tinjauan kebijakan, rekomendasi regulasi, kajian hukum.
Dampak ekonomi & pariwisata (logistik, pariwisata, pasar kerja)	7	Analisis dampak ekonomi, wisata, dan model bisnis.
Metodologi / alat (SLR, simulasi, algoritma, testbed)	8	Metode, alat uji, dan kajian metodologis.

3.1. Potensi Kendaraan Otonom dalam Transformasi Transportasi

Subbab ini akan membahas empat dimensi utama potensi kendaraan otonom, yaitu peningkatan efisiensi transportasi, pengurangan kemacetan dan polusi (Khofiya & Sumayya, 2024), peningkatan keselamatan perjalanan, serta penguatan sektor ekonomi dan pariwisata (Mandala & Fahlevvi, 2024).

3.1.1 Peningkatan Efisiensi Transportasi

Penerapan AVs menawarkan peluang untuk meningkatkan efisiensi transportasi melalui pengelolaan lalu lintas yang lebih baik, pengurangan konsumsi energi, dan optimalisasi kapasitas jalan. Dengan teknologi komunikasi antar kendaraan (*vehicle-to-vehicle*, V2V) dan kendaraan-ke-infrastruktur (*vehicle-to-infrastructure*, V2I), AVs dapat menyinkronkan pergerakan untuk mengurangi kemacetan, terutama di wilayah dengan lalu lintas padat seperti persimpangan. Selain itu, kemampuan mengemudi yang presisi dan algoritma perencanaan rute cerdas memungkinkan AVs memilih jalur dengan konsumsi energi paling efisien, yang menurut Chen dkk. (2019) dapat menurunkan konsumsi bahan bakar. Teknologi platooning yang diterapkan pada AVs juga berkontribusi dalam meningkatkan kapasitas jalan, sebagaimana diilustrasikan oleh simulasi lalu lintas yang dilakukan Xiao dkk. (2022).

Di sektor logistik, AVs mampu mengoptimalkan distribusi barang melalui operasi nonstop tanpa batasan waktu kerja manusia (Abosuliman & Almagrabi,

2021). Selain itu, penggunaan algoritma adaptif memungkinkan AVs merespons kondisi lalu lintas secara real-time, sehingga dapat memangkas waktu perjalanan (Kolarova dkk., 2019). Dengan efisiensi perjalanan yang lebih tinggi dan pengelolaan sumber daya transportasi yang optimal, AVs menawarkan solusi yang relevan bagi kota-kota besar di Indonesia dalam menghadapi tantangan urbanisasi dan kemacetan.

3.1.2 Pengurangan Kemacetan dan Polusi

Implementasi AVs memiliki potensi dalam mengurangi kemacetan dan polusi, dua permasalahan krusial yang dihadapi kota-kota besar di Indonesia. Dengan teknologi AI, V2V, dan V2I, AVs dapat mengatur aliran lalu lintas secara efisien. Misalnya, koordinasi waktu tempuh dan manuver dapat mengurangi titik-titik kemacetan di persimpangan atau jalan utama, seperti yang dilaporkan oleh Neufville, dkk. (2022). Teknologi ini juga memungkinkan sinkronisasi pergerakan kendaraan untuk mengurangi pola berhenti dan jalan (*stop-and-go*), yang seringkali menjadi penyebab utama kemacetan di daerah perkotaan padat.

Selain itu, AVs berkontribusi pada pengurangan polusi dengan optimalisasi konsumsi bahan bakar dan transisi ke kendaraan listrik. Dengan algoritma rute berbasis efisiensi energi, AVs dapat memilih jalur dengan emisi karbon terendah, sebagaimana dilaporkan oleh Silva dkk. (2022). Kombinasi kendaraan listrik otonom (*autonomous electric vehicles*, AEVs) dan sistem pengendalian emisi cerdas juga mempercepat transisi menuju transportasi rendah karbon, mendukung target keberlanjutan pemerintah Indonesia. Dengan solusi ini, AVs tidak hanya berkontribusi terhadap kelancaran lalu lintas, tetapi juga membantu menciptakan lingkungan urban yang lebih bersih dan sehat.

3.1.3 Peningkatan Keselamatan Perjalanan

Keselamatan lalu lintas adalah salah satu prioritas utama dalam pengembangan AVs, yang dirancang untuk mengurangi kecelakaan akibat kesalahan manusia, penyebab lebih dari 90% insiden lalu lintas global (Singh dkk., 2016). Dengan algoritma kecerdasan buatan, AVs mampu mengambil keputusan berbasis data secara real-time, memproses informasi dari berbagai sensor untuk mengoptimalkan respons dalam situasi lalu lintas yang kompleks. Kemampuan ini, dipadukan dengan sistem kendali otomatis yang presisi, memungkinkan AVs

mengatur kecepatan, jarak, dan posisi kendaraan dengan akurasi tinggi, sehingga meminimalkan risiko kecelakaan yang disebabkan oleh pengereman mendadak atau manuver berbahaya. Selain itu, teknologi seperti lidar dan kamera multispektral meningkatkan deteksi ancaman potensial, termasuk kendaraan berkecepatan tinggi atau pejalan kaki yang muncul tiba-tiba, bahkan dalam kondisi pencahayaan yang sulit (Zhao dkk., 2020). Sistem peringatan dini terintegrasi, seperti *autonomous emergency braking* (AEB), juga berperan penting dalam mencegah tabrakan.

Pada area berisiko tinggi seperti persimpangan tanpa sinyal, AVs menawarkan solusi melalui algoritma perencanaan gerak adaptif yang dapat beradaptasi dengan perilaku tidak terprediksi pengguna jalan lain. Studi menunjukkan bahwa penerapan algoritma fuzzy logic hierarchical mampu mengurangi risiko kecelakaan (Pohan dkk., 2024). Teknologi komunikasi V2I juga memungkinkan AVs untuk menerima informasi real-time dari jalan, meningkatkan keamanan dalam pengambilan keputusan. Selain mencegah kecelakaan, AVs dirancang untuk memitigasi dampaknya melalui manuver penghindaran risiko yang memprioritaskan keselamatan pengguna jalan lain, serta sistem perlindungan aktif dan pasif seperti sabuk pengaman adaptif dan kantong udara cerdas. Kombinasi teknologi ini menjadikan AVs sebagai solusi yang komprehensif untuk meningkatkan keselamatan lalu lintas secara signifikan.

3.1.4 Penguatan Sektor Ekonomi dan Pariwisata

Penerapan AVs memiliki potensi dalam memperkuat sektor ekonomi dan pariwisata di Indonesia. Teknologi ini mampu menghadirkan daya tarik baru bagi wisatawan melalui layanan inovatif seperti shuttle bus atau taksi otonom yang menawarkan tur interaktif dengan rute otomatis yang memperkenalkan budaya dan landmark lokal. Penelitian oleh Kurniawan dkk. (2021) dan (2020) menunjukkan bahwa integrasi AVs dalam pariwisata dapat meningkatkan daya tarik destinasi. Selain itu, AVs dapat digunakan sebagai "toko berjalan" otonom yang menjual produk lokal di lokasi strategis, seperti festival atau pasar malam. Dengan kemampuan beroperasi tanpa pengemudi, efisiensi logistik meningkat, membantu menjaga kualitas produk dan memperluas jangkauan penjualan.

Kendaraan otonom juga meningkatkan rasa aman wisatawan dengan mengurangi risiko kejahatan seperti penipuan oleh pengemudi, berkat integrasi sistem pengawasan cerdas yang terkoneksi dengan pusat kendali lalu lintas. Studi oleh Pervez dkk. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan persepsi keamanan dapat mendorong kunjungan wisatawan. Selain itu, AVs mendukung efisiensi logistik pariwisata dan berpotensi menurunkan biaya operasional (Cohen & Hopkins, 2019). Pengalaman perjalanan yang unik menggunakan AVs, seperti shuttle otonom di kawasan pedesaan, juga mendorong pengeluaran wisatawan pada layanan lokal. Dengan solusi ini, AVs tidak hanya mendukung kemajuan pariwisata, tetapi juga memperkuat daya saing ekonomi lokal.

Tabel 3 berikut merangkum temuan utama dari literatur pada tema-tema 3.1–3.4 dan menyajikan rekomendasi operasional yang diusulkan penulis beserta indikator kinerja yang dapat diadopsi oleh pemerintah daerah.

Tabel 3. Temuan dari Literatur (Findings) Dan Rekomendasi Penulis Untuk Pemerintah Daerah

Tema	Temuan dari literatur (findings)	Rekomendasi penulis (operasional dan indikator)
Efisiensi operasional	AVs meningkatkan pemanfaatan kapasitas jalan melalui V2V/V2I dan platooning; operasi nonstop meningkatkan produktivitas logistik.	Laksanakan pilot koridor efisiensi pada ruas berkualitas; target pengurangan waktu perjalanan koridor pilot $\geq 15\%$ dalam 12 bulan; indikator: waktu tempuh rata-rata dan throughput kendaraan.
Pengurangan kemacetan & emisi	Integrasi AEV dan rute efisien dapat menurunkan emisi jika didukung infrastruktur charging dan manajemen rute.	Sediakan stasiun charging cepat pada koridor pilot; target penurunan emisi koridor pilot $\geq 10\%$ dalam 24 bulan; indikator: konsumsi energi per-kendaraan dan estimasi CO ₂ .
Keselamatan	AVs mampu mengurangi kecelakaan akibat human error; efektivitas tergantung pada kualitas sensor dan data lokal.	Kembangkan dataset lokal dan uji multilapis sensor; indikator: insiden per-1000-km pada fase pilot menurun atau = 0 dibanding baseline.
Infrastruktur (fisik & digital)	Marka jalan, jaringan 5G/V2X, dan pusat data lokal sangat memengaruhi performa AV.	Prioritaskan perbaikan marka dan deployment V2I pada koridor; indikator: persentase koridor dengan 5G/V2I $\geq 80\%$ pada skala pilot.
Regulasi & governance	Kekurangan kerangka tanggung jawab dan mekanisme perizinan menghambat uji coba skala besar.	Adopsi perizinan bertahap dan model liability sementara; indikator: kebijakan lokal uji coba tertulis dan pedoman operasional diterbitkan.

3.2. Tantangan Implementasi Kendaraan Otonom di Indonesia

Subbab ini akan menguraikan berbagai tantangan yang dihadapi dalam mengimplementasikan kendaraan otonom di Indonesia. Tantangan tersebut mencakup kebutuhan infrastruktur yang memadai, kesenjangan regulasi dan kebijakan, serta penerimaan dan persepsi masyarakat.

3.2.1 Kebutuhan Infrastruktur yang Memadai

Implementasi AVs di Indonesia memerlukan infrastruktur yang komprehensif untuk mendukung operasionalnya secara aman dan efisien. Infrastruktur ini mencakup kualitas jalan yang memadai, jaringan komunikasi pintar berbasis teknologi 5G, dan sistem sensor jalan terintegrasi seperti radar, kamera lalu lintas, dan LIDAR (Othman, 2021). Jalan dengan marka yang jelas dan permukaan yang baik sangat penting karena sistem visual kendaraan otonom bergantung pada elemen ini. Selain itu, teknologi *vehicle-to-everything* (V2X) memungkinkan sinkronisasi data *real-time* untuk meningkatkan keselamatan, sebagaimana ditunjukkan oleh Hakak dkk. (2023), yang melaporkan bahwa penerapan jaringan 5G dapat mengurangi waktu respons kendaraan.

Aspek lain yang tidak kalah penting adalah stasiun pengisian daya kendaraan listrik, yang menjadi fondasi operasional AVs berbasis EV. Pusat data dan infrastruktur cloud juga dibutuhkan untuk memproses big data dari kendaraan secara simultan, sementara sistem manajemen lalu lintas berbasis AI dapat mengintegrasikan kendaraan otonom dengan lalu lintas konvensional secara adaptif Gokasar dkk. (2023). Kota-kota baru seperti Ibu Kota Nusantara (IKN) dapat menjadi model pengembangan infrastruktur ini dengan merancang jalur khusus AVs dan transportasi pintar (Berawi, 2022). Dengan pembangunan infrastruktur yang terencana, Indonesia dapat memaksimalkan potensi kendaraan otonom untuk masa depan transportasi.

3.2.2 Kesenjangan Regulasi dan Kebijakan

Kesenjangan regulasi dan kebijakan menjadi salah satu tantangan utama dalam implementasi AVs di Indonesia. Saat ini, Indonesia belum memiliki kerangka hukum komprehensif yang mengatur operasional AVs, baik di jalan umum maupun lingkungan terbatas. Ketidaksesuaian regulasi transportasi yang ada dengan teknologi baru, seperti persyaratan Surat Izin Mengemudi (SIM) untuk pengemudi

manusia, menciptakan celah hukum, terutama dalam menentukan tanggung jawab pada situasi kecelakaan yang melibatkan kendaraan otonom (Juliansyah, 2022). Selain itu, Indonesia belum mengadopsi standar keselamatan untuk uji coba atau sertifikasi AVs, berbeda dengan negara lain yang telah menerapkan protokol ketat untuk memastikan keamanan pengguna jalan (D. Lee & Hess, 2020).

Ketiadaan sinergi antarinstansi pemerintah turut menghambat penyusunan regulasi terpadu, misalnya dalam hal penggunaan frekuensi komunikasi V2X atau perencanaan infrastruktur pintar. Regulasi AVs juga memerlukan infrastruktur pengawasan yang andal dan aparat penegak hukum yang memahami teknologi ini, namun kedua aspek tersebut masih terbatas di Indonesia. Kurangnya koordinasi antar sektor serta lambatnya respons terhadap perkembangan teknologi global menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih terpadu dan progresif agar Indonesia dapat memanfaatkan potensi AVs secara optimal.

3.2.3 Penerimaan dan Persepsi Masyarakat

Penerimaan masyarakat terhadap AVs di Indonesia dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kekhawatiran akan keselamatan, pemahaman teknologi, dan dampak sosial-ekonomi. Masyarakat cenderung mempertanyakan keandalan AVs, terutama dalam menghadapi situasi kompleks, seperti lalu lintas padat atau cuaca ekstrem. Menurut Nurliyana dkk. (2023), mayoritas responden global merasa tidak nyaman dengan kendaraan yang sepenuhnya otonom. Ketidakpercayaan ini dapat diminimalkan melalui uji coba publik yang transparan dan kampanye edukasi yang memperlihatkan keunggulan keselamatan teknologi ini. Kurangnya literasi teknologi juga menjadi tantangan signifikan, terutama di Indonesia, di mana masyarakat yang kurang memahami teknologi cenderung bersikap skeptis. Program edukasi berbasis komunitas dan pendekatan partisipatif yang dibahas oleh Islam dkk. (2022) dapat membantu meningkatkan kepercayaan masyarakat.

Selain itu, ketakutan akan dampak sosial-ekonomi, seperti pengurangan lapangan kerja, menambah resistensi terhadap penerapan AVs. Strategi mitigasi, seperti program pelatihan ulang dan integrasi peran manusia dengan teknologi, dapat membantu mengurangi kekhawatiran ini. Budaya dan norma sosial di Indonesia, termasuk ketergantungan pada pengemudi manusia, juga berpengaruh pada penerimaan masyarakat. Oleh karena itu, pendekatan berbasis lokal, seperti

pilot project di kota besar, serta promosi oleh pemerintah dan media dengan menyoroti manfaat AVs, menjadi kunci penting dalam mengatasi hambatan ini. Dukungan kebijakan proaktif dan kampanye yang menekankan pengurangan emisi dan peningkatan keselamatan dapat secara signifikan memperbaiki persepsi masyarakat (Nair & Bhat, 2021).

3.3. Strategi Implementasi untuk Pemerintah Daerah

Subbab ini akan membahas berbagai strategi yang dapat diterapkan oleh pemerintah daerah untuk mendukung implementasi kendaraan otonom. Strategi ini meliputi kebijakan dan regulasi strategis, pengembangan infrastruktur teknologi dan transportasi, edukasi serta kampanye publik, dan kolaborasi dengan sektor swasta serta institusi penelitian.

3.3.1 Kebijakan dan Regulasi Strategis

Kebijakan dan regulasi strategis adalah fondasi utama dalam implementasi kendaraan otonom, memastikan keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan teknologi ini. Pemerintah daerah berperan penting dalam menyusun kerangka hukum yang mencakup aspek teknis, operasional, dan tanggung jawab hukum dalam kasus kecelakaan, seperti alokasi tanggung jawab antara produsen, operator, dan pemilik kendaraan. Standar internasional seperti SAE dapat menjadi acuan dalam menentukan tingkat otonomi kendaraan. Langkah awal dapat berupa uji coba berjenjang di zona tertentu, seperti kawasan industri atau wisata, yang didukung mekanisme perizinan bertahap untuk mengidentifikasi risiko dan memastikan keamanan (Coelingh dkk., 2018).

Untuk mendorong adopsi teknologi, insentif seperti pengurangan pajak dan subsidi R&D dapat merangsang investasi sektor swasta. Kebijakan juga harus memastikan interoperabilitas AVs dengan transportasi umum, mempermudah transisi moda transportasi melalui sinkronisasi teknologi seperti tiket elektronik dan jadwal operasional. Selain itu, standar keamanan data dan privasi sangat penting untuk melindungi pengguna dari ancaman siber (D. Lee & Hess, 2022).

3.3.2 Pengembangan Infrastruktur Teknologi dan Transportasi

Infrastruktur teknologi dan transportasi yang memadai adalah fondasi untuk mendukung implementasi AVs, termasuk integrasi dengan sistem transportasi konvensional. Pengembangan jalur khusus, seperti "dedicated autonomous vehicle

lanes," di kawasan industri atau wisata, dapat meningkatkan efisiensi dan keselamatan operasional AVs (Ye & Yamamoto, 2018). Selain itu, infrastruktur pintar berbasis teknologi V2I, seperti lampu lalu lintas cerdas dan sensor jalan, memungkinkan komunikasi real-time antara kendaraan dan lingkungan, yang terbukti mengurangi waktu tunggu (Bento dkk., 2019). Fasilitas pengisian daya kendaraan listrik juga harus diperluas di lokasi strategis dengan dukungan teknologi pengisian cepat, mendukung efisiensi operasional AVs.

Digitalisasi transportasi, termasuk peta 3D beresolusi tinggi dan jaringan 5G, menjadi kunci untuk navigasi yang akurat (J. Lee dkk., 2020). Integrasi AVs dengan transportasi umum melalui platform digital untuk ticketing terpadu dan aplikasi pemesanan kendaraan juga dapat mendorong penggunaan moda transportasi massal, sebagaimana ditunjukkan dalam studi oleh McPhee dkk. (2020). Untuk memastikan keamanan data dan keandalan operasional, diperlukan pusat data lokal yang memenuhi standar keamanan internasional. Pusat uji coba seperti "Mcity Test Facility" di Michigan, yang mensimulasikan berbagai kondisi operasional, dapat menjadi acuan untuk memastikan kesiapan teknologi sebelum penerapan secara luas (Tabor dkk., 2022).

3.3.3 Edukasi dan Kampanye Publik

Edukasi dan kampanye publik memegang peranan penting dalam mempercepat adopsi AVs dengan mengurangi resistensi masyarakat melalui peningkatan pemahaman dan kepercayaan terhadap teknologi ini. Pemerintah dapat mengedukasi masyarakat tentang dasar teknologi AVs melalui pelatihan di sekolah, universitas, atau pusat pelatihan komunitas. Kampanye keselamatan berbasis bukti, yang menonjolkan keunggulan teknologi AVs dalam mengurangi risiko kecelakaan dibandingkan kendaraan konvensional, terbukti mampu meningkatkan penerimaan. Selain itu, simulasi langsung, seperti uji coba shuttle bus otonom di Singapura (Kurniawan dkk., 2021), dapat memberikan pengalaman nyata kepada masyarakat, mengurangi kekhawatiran, dan membangun kepercayaan terhadap teknologi ini.

Pemanfaatan media massa dan digital, mulai dari artikel di media sosial hingga video edukasi di YouTube atau TikTok, dapat memperluas jangkauan informasi, terutama kepada generasi muda. Keterlibatan komunitas lokal melalui dialog publik

dan seminar juga efektif untuk menjawab kekhawatiran masyarakat secara langsung. Materi edukasi multibahasa sangat penting untuk menjangkau masyarakat di seluruh Indonesia, terutama di daerah dengan literasi teknologi rendah. Kampanye juga harus menekankan manfaat sosial dan ekonomi AVs, seperti pengurangan kecelakaan, efisiensi perjalanan, dan kontribusi terhadap pengurangan polusi, untuk menunjukkan dampak positif langsung pada kehidupan sehari-hari masyarakat.

3.3.4 Kolaborasi dengan Swasta dan Institusi Penelitian

Kolaborasi antara pemerintah daerah, sektor swasta, dan institusi penelitian memainkan peran sentral dalam mempercepat pengembangan AVs. Kemitraan ini memungkinkan penggabungan keahlian dan sumber daya untuk menciptakan inovasi teknologi dan infrastruktur yang mendukung. Perusahaan teknologi berkontribusi dalam pengembangan perangkat keras dan lunak seperti sensor, algoritma AI, dan sistem navigasi, sementara institusi penelitian memastikan keamanan melalui studi teknis dan uji coba. Selain itu, sektor swasta juga mempercepat pembangunan infrastruktur pintar seperti lampu lalu lintas terkoneksi dan stasiun pengisian daya kendaraan listrik.

Kerja sama ini juga mencakup pengujian teknologi di lapangan, skema pembiayaan, dan pengembangan kebijakan berbasis data. Uji coba AVs yang melibatkan pemerintah, universitas, dan perusahaan swasta, membantu mengidentifikasi kebutuhan masyarakat serta membangun kepercayaan publik. Sektor swasta berkontribusi dalam pembiayaan proyek-proyek ini, mengurangi beban pemerintah, sementara institusi penelitian mendukung perumusan kebijakan yang berbasis bukti. Selain itu, kolaborasi juga memperkuat keamanan siber dan privasi pengguna melalui pengembangan protokol perlindungan data. Kemitraan ini bahkan mencakup kampanye edukasi publik dan pelatihan sumber daya manusia untuk mendukung keberlanjutan teknologi AVs secara menyeluruh.

3.4. Dampak Potensial terhadap Masa Depan Transportasi

Subbab ini akan menguraikan dampak potensial kendaraan otonom terhadap masa depan sistem transportasi, mencakup transformasi transportasi umum, percepatan urbanisasi berkelanjutan, serta peningkatan konektivitas antarwilayah.

3.4.1 Transformasi Transportasi Umum

Transformasi transportasi umum melalui AVs diharapkan membawa perubahan signifikan terhadap sistem mobilitas perkotaan dan antarwilayah dengan menawarkan efisiensi, aksesibilitas, dan keberlanjutan yang lebih baik. AVs seperti shuttle bus dan trem dapat diintegrasikan sebagai feeder untuk transportasi massal, menghubungkan area permukiman dengan stasiun kereta atau terminal bus melalui perencanaan rute real-time yang mengurangi waktu tunggu (Iclodean dkk., 2020). Selain itu, absennya kebutuhan pengemudi manusia mengurangi biaya tenaga kerja dan konsumsi energi melalui perjalanan yang lebih efisien, memungkinkan penghematan dalam biaya operasional yang dapat dialihkan untuk peningkatan layanan. Dengan fleksibilitas rute berdasarkan permintaan, AVs juga meningkatkan aksesibilitas bagi kelompok rentan seperti lansia dan penyandang disabilitas melalui fitur otomatis yang mendukung inklusi sosial.

Selain manfaat operasional, AVs berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi suara, terutama jika menggunakan teknologi listrik. Keamanan transportasi umum juga meningkat melalui penghapusan kesalahan manusia, deteksi dini bahaya dengan sensor canggih, dan pengambilan keputusan yang akurat, yang menurut NHTSA, dapat menurunkan risiko kecelakaan di jalur padat (Wang dkk., 2020). Transformasi ini menjadikan transportasi umum lebih ramah lingkungan, aman, dan inklusif, sejalan dengan target keberlanjutan global.

3.4.2 Percepatan Urbanisasi Berkelanjutan

Kendaraan otonom memiliki potensi untuk mempercepat urbanisasi berkelanjutan melalui pengurangan polusi, peningkatan efisiensi tata ruang, dan integrasi transportasi multimoda. Electric Autonomous Vehicles (EAVs) dapat menekan emisi karbon dengan optimasi rute dan pengurangan konsumsi energi, sebagaimana ditunjukkan oleh Ercan dkk. (2022). Selain itu, kemampuan AVs untuk parkir sendiri di pinggiran kota memungkinkan efisiensi penggunaan lahan, seperti yang dilaporkan oleh Okeke (2020). Dengan mengurangi kebutuhan lahan parkir di pusat kota, ruang tersebut dapat dialihfungsikan untuk ruang hijau atau fasilitas publik. Dalam konteks transportasi multimoda, AVs berperan sebagai penghubung first-mile dan last-mile, meningkatkan aksesibilitas ke moda transportasi umum.

Lebih jauh, AVs mendukung konsep kota cerdas dengan mengurangi kemacetan dan meningkatkan konektivitas antarwilayah. Teknologi komunikasi kendaraan dan infrastruktur pintar (V2V dan V2I) memungkinkan pengelolaan lalu lintas yang lebih efisien, mengurangi waktu perjalanan (Bento dkk., 2019). Data yang dihasilkan oleh AVs juga menjadi alat penting dalam perencanaan kota. Selain itu, AVs meningkatkan konektivitas antara kota besar dan daerah pinggiran, di mana penerapan AVs dapat mengurangi ketimpangan akses transportasi. Hal ini menunjukkan bahwa AVs bukan hanya alat transportasi, tetapi juga katalisator bagi urbanisasi yang berkelanjutan.

3.4.3 Peningkatan Konektivitas Antarwilayah

Kendaraan otonom menghadirkan peluang untuk meningkatkan konektivitas antarwilayah melalui integrasi transportasi yang efisien dan fleksibel. Dengan teknologi navigasi berbasis kecerdasan buatan, AVs dapat menyesuaikan rute di berbagai kondisi jalan, menjembatani wilayah urban dan pedesaan. Studi Rahman dan Thill (2023) menunjukkan bahwa implementasi AVs di pedesaan meningkatkan akses masyarakat terhadap layanan esensial seperti kesehatan dan pendidikan. Selain itu, kemampuan AVs untuk beroperasi tanpa henti memungkinkan pengangkutan barang antarwilayah dengan lebih cepat, seperti dilaporkan oleh Kalusivalingam dkk. (2020).

Lebih jauh, AVs membantu mengurangi kesenjangan infrastruktur dengan teknologi sensor dan navigasi canggih, memungkinkan operasi di wilayah dengan jalan terbatas. Selain itu, AVs dapat memacu pengembangan wilayah baru, seperti di Singapura, di mana shuttle bus otonom meningkatkan kunjungan wisatawan. Dari sisi keselamatan, AVs mengurangi kecelakaan antarwilayah dengan menghilangkan faktor human error.

3.5. Usulan Kerangka Konseptual dan Roadmap Kebijakan Pemerintah Daerah

Kerangka konseptual yang diusulkan menghubungkan tiga elemen utama yang ditemukan dalam kajian ini, yaitu potensi teknis AVs, hambatan institusional dan infrastruktur, serta respons sosial-ekonomi, ke dalam rangka kerja tindakan bertahap yang dapat diadopsi oleh pemerintah daerah. Kerangka ini menempatkan pemerintah daerah sebagai koordinator lintas-sektor yang memfasilitasi

eksperimen terkontrol, investasi infrastruktur inti, dan program edukasi publik, sementara mitra swasta dan lembaga penelitian berperan sebagai penyedia teknologi, sumber daya pengujian, dan evaluator independen. Kebijakan implementasi dibagi menjadi beberapa fase pragmatis: fase persiapan (kesiapan regulasi, pembuatan koridor uji coba, pengembangan pusat data lokal), fase pilot (uji operasi di zona terbatas, integrasi V2I, pengukuran indikator keselamatan dan penerimaan publik), dan fase skala (penyusunan regulasi tanggung jawab hukum, integrasi ke sistem transportasi umum, serta ekstensifikasi infrastruktur pengisian EV). Roadmap kebijakan pada Tabel 4 mengaitkan setiap fase dengan aktor utama dan indikator keberhasilan yang operasional, sehingga pemerintah daerah memiliki panduan implementasi yang aplikatif dan terukur. Tabel berikut merangkum langkah-langkah kebijakan bertahap yang dapat diadopsi oleh pemerintah daerah, aktor pelaksana yang disarankan, serta indikator keberhasilan yang dapat dipantau untuk tiap fase implementasi.

Tabel 4. Usulan Peta Jalan Kebijakan bagi Pemerintah Daerah di Indonesia

Tahap	Jangka Waktu	Aksi Utama	Pihak Pelaksana	Key performance indicators (KPI)
Persi- apan	0–2 tahun	Pembentukan task force regional (Dishub, Bappeda, KOMINFO), penetapan koridor uji coba, harmonisasi perizinan lokal, audit infrastruktur jalan/marka	Pemerintah Daerah (Dishub + Bappeda) dengan dukungan pusat	Task force terbentuk; koridor uji coba ditetapkan; daftar kebutuhan infrastruktur tersedia
Uji coba	2–4 tahun	Pelaksanaan uji coba terkendali (bandara/kawasan wisata/kawasan industri), integrasi V2I dan sistem ticketing, monitoring keselamatan & kepuasan pengguna	Pemerintah Daerah + Pengembang/ Operator AV + Universitas	Uji coba berjalan; indikator keselamatan (insiden = 0 atau menurun), kepuasan pengguna $\geq 70\%$
Perlu- asan	4–8 tahun	Perluasan koridor, pengembangan stasiun pengisian EV, pembentukan regulasi tanggung jawab hukum, skema insentif untuk investasi	Pemerintah Daerah, Regulator Nasional, Investor Swasta	Jumlah layanan AV terintegrasi meningkat; jaringan charging tersedia di koridor utama

Institusionalisasi	>8 tahun	Integrasi penuh ke sistem transportasi umum, mekanisme kompensasi & reskilling untuk pekerja terdampak, standardisasi operasional	Pemerintah Nasional & Daerah, Serikat Pekerja, Lembaga Pendidikan	Penurunan emisi sektor transportasi di wilayah; program reskilling terimplementasi
--------------------	----------	---	---	--

Roadmap kebijakan yang diusulkan harus dilengkapi dengan mekanisme pendanaan dan strategi kolaborasi internasional agar implementasi koridor pilot dan skala-up dapat terbiayai dan memanfaatkan teknologi serta praktik terbaik global. Tabel 5 mengusulkan sumber pendanaan yang direkomendasikan, mekanisme kolaborasi internasional, dan peran masing-masing aktor pada setiap fase.

Tabel 5. Usulan Pendanaan dan Kolaborasi Internasional untuk Implementasi AVs di tingkat daerah

Sumber/Mekanisme	Peran/kontribusi	Proporsi kontribusi yang direkomendasikan per fase (Pesiapan > Uji Coba > Perluasan)	Keterangan kolaborasi internasional
Anggaran Pemerintah Daerah (APBD)	Pembiayaan awal task force, audit infrastruktur, izin lokal	50% > 30% > 20%	Dukungan administratif; fasilitasi perizinan
Skema Public-Private Partnership (PPP)	Investasi infrastruktur V2I, stasiun charging, operasional pilot	20% > 40% > 40%	Mitra swasta lokal dan nasional untuk investasi dan operasi
Hibah nasional / dana pusat	Pendanaan teknis, R&D, pusat data regional	20% > 20% > 20%	Sinkronisasi kebijakan nasional untuk scaling
Hibah internasional / bank pembangunan (ADB, World Bank, bilateral)	Bantuan teknis, pendanaan infrastruktur besar, capacity building	5% > 5% > 10%	Dukungan bagi studi kelayakan, jaminan pendanaan, transfer teknologi
Kolaborasi riset internasional & bilateral (universitas, lembaga riset)	Transfer teknologi, training, evaluasi independen	5% > 5% > 10%	Program exchange, pilot co-design, standardisasi teknis

Pembagian kontribusi yang ditunjukkan pada Tabel 5 bersifat indikatif untuk tujuan perencanaan kebijakan daerah dan mendukung pembuatan proposal

pendanaan nyata. Pemerintah daerah disarankan menyusun paket pembiayaan terintegrasi yang mengombinasikan APBD, investasi swasta, dan sumber pendanaan internasional, serta memprioritaskan mekanisme PPP yang jelas untuk mengelola risiko dan distribusi tanggung jawab operasional.

3.6. Matriks Potensi vs Tantangan vs Strategi dan Analisis kontekstual unik Indonesia

Untuk memudahkan perumusan kebijakan yang responsif terhadap kondisi lokal, Tabel 6 menyajikan matriks yang memetakan potensi utama AVs terhadap tantangan implementasi yang relevan di Indonesia serta strategi kebijakan dan operasional yang direkomendasikan untuk mengatasi masing-masing tantangan.

Tabel 6. Matriks potensi, tantangan, dan strategi implementasi untuk konteks daerah Indonesia

Potensi AVs	Tantangan utama di Indonesia	Strategi implementasi rekomendasi
Peningkatan efisiensi lalu lintas (V2V/V2I, platooning)	Kualitas marka jalan dan infrastruktur V2X tidak merata; dominasi sepeda motor	Terapkan pilot koridor pada ruas berkualitas tinggi; desain interaksi AV-motor dengan pengaturan kecepatan koridor; perbaikan marka prioritas di koridor uji coba
Pengurangan polusi (AEVs + rute efisien)	Keterbatasan jaringan charging dan pasokan listrik regional	Prioritaskan stasiun pengisian cepat di koridor pilot; integrasikan planning energi daerah dengan rencana charging AV
Peningkatan keselamatan lalu lintas	Kompleksitas perilaku pengguna jalan lokal (motor, pejalan kaki) dan cuaca tropis	Kembangkan dataset lokal untuk training sensor/algoritma; uji di kondisi cuaca lokal; gunakan sistem redundansi sensor (lidar + radar + kamera)
Penguatan pariwisata dan ekonomi lokal	Potensi resistensi dari sektor informal (pengemudi ojek/angkot); risiko pengurangan pekerjaan	Rancang model bisnis kolaboratif (mis. integrasi ojek online sebagai feeder), program reskilling, dan kesempatan bisnis lokal (AV sebagai platform layanan)
Operasional 24/7 untuk logistik	Ketidakpastian regulasi dan liability hukum	Uji coba di kawasan industri tertutup terlebih dahulu; susun kerangka tanggung jawab antara operator-produksen-pemda

Indonesia memiliki sejumlah karakteristik unik yang membedakan konteks implementasi AVs dibandingkan Singapura, China, atau negara-negara Eropa. Pertama, tingginya proporsi sepeda motor dan moda informal seperti ojek online dan angkot mengharuskan desain operasional AV yang mampu berinteraksi dengan kendaraan berukuran kecil dan pola perilaku yang lincah. Kedua, disparitas infrastruktur antarwilayah, dari kota besar hingga daerah terpencil, menuntut

pendekatan bertahap yang mengutamakan koridor berkualitas sebagai langkah awal sebelum skala luas. Ketiga, struktur pemerintahan yang relatif terdesentralisasi menempatkan pemerintah daerah sebagai aktor kunci, tetapi juga memperbesar kebutuhan koordinasi lintas institusi untuk isu seperti frekuensi V2X, perizinan, dan pengelolaan data. Keempat, sektor ekonomi informal yang besar berisiko terdampak oleh automasi; oleh karena itu strategi implementasi harus memasukkan mekanisme mitigasi yang konkret seperti program reskilling, insentif kolaboratif untuk memasukkan pekerja informal ke dalam ekosistem AV, serta penyusunan model bisnis yang mengintegrasikan operator informal sebagai pelaku feeder atau penyedia layanan tambahan. Kelima, dimensi sosial-budaya, termasuk kepercayaan publik terhadap teknologi dan norma berbagi ruang jalan, memerlukan kampanye edukasi yang disesuaikan dengan bahasa dan media lokal serta keterlibatan langsung komunitas ojek online dan asosiasi transportasi agar adopsi berjalan inklusif dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kendaraan otonom (AVs) memiliki potensi signifikan untuk mentransformasi sistem transportasi daerah di Indonesia. Untuk RQ1, studi menemukan bahwa AVs dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi kemacetan, dan menurunkan angka kecelakaan melalui optimasi rute dan koordinasi V2V/V2I. Untuk RQ2, hambatan utama meliputi kebutuhan infrastruktur fisik dan digital yang besar, kesenjangan regulasi, serta rendahnya penerimaan publik. Untuk RQ3, rekomendasi yang muncul bagi pemerintah daerah mencakup pelaksanaan uji coba bertahap di zona terpilih, investasi bertahap pada infrastruktur digital dan stasiun pengisian EV, pembaruan mekanisme perizinan uji coba, program edukasi publik, serta kolaborasi strategis dengan sektor swasta dan institusi penelitian. Kontribusi utama studi ini adalah penyajian sintesis SLR yang berfokus pada konteks lokal Indonesia, penekanan peran strategis pemerintah daerah, dan perumusan rekomendasi implementasi yang mengintegrasikan aspek teknis, kebijakan, dan sosial.

Studi ini memiliki keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, cakupan literatur dibatasi pada publikasi 2016–2024 dan pada basis data Scopus, IEEE Xplore, serta

Google Scholar; akibatnya, beberapa dokumen kebijakan lokal dan grey literature mungkin belum terwakili. Kedua, heterogenitas metode pada studi terinklusi membatasi generalisasi temuan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan studi empiris tingkat provinsi/kota, wawancara dengan pemangku kepentingan daerah, evaluasi pilot project, dan analisis dampak sosial-ekonomi jangka panjang. Meskipun demikian, temuan ini memberi dasar kebijakan awal dan arahan praktis bagi pemerintah daerah untuk memulai adopsi AVs secara aman, inklusif, dan berkelanjutan.

5. Daftar Pustaka

- Abosuliman, S. S., & Almagrabi, A. O. (2021). Routing and scheduling of intelligent autonomous vehicles in industrial logistics systems. *Soft Computing*, 25(18), 11975–11988.
- Aria, M. (2019). New fuzzy logic system for controlling multiple traffic intersections with dynamic phase selection and pedestrian crossing signal. *J. Eng. Sci. Technol*, 14, 1974–1983.
- Azarian, M., Yu, H., Shiferaw, A. T., & Stevik, T. K. (2023). Do we perform systematic literature review right? A scientific mapping and methodological assessment. *Logistics*, 7(4), 89.
- Bento, L. C., Parafita, R., Rakha, H. A., & Nunes, U. J. (2019). A study of the environmental impacts of intelligent automated vehicle control at intersections via V2V and V2I communications. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 41–59.
- Berawi, M. A. (2022). City of tomorrow: The new capital city of Indonesia. *International Journal of Technology*, 13(4). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i4.6011>
- Chen, Y., Gonder, J., Young, S., & Wood, E. (2019). Quantifying autonomous vehicles national fuel consumption impacts: A data-rich approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 122, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.10.012>
- Coelingh, E., Nilsson, J., & Buffum, J. (2018). Driving tests for self-driving cars. *IEEE Spectrum*, 55(3), 40–45. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8302386>
- Cohen, S. A., & Hopkins, D. (2019). Autonomous vehicles and the future of urban tourism. *Annals of tourism research*, 74, 33–42.
- Dewi, K., & Krisdiyanto, A. (2023). Pengembangan Sistem Transportasi Masa Depan: Mobilitas Berkelanjutan dan Otonom di Jawa Barat. *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(09), 750–760. <https://doi.org/10.58812/jmws.v2i09.626>

- Djohan, N. H., Indarti, E., & Malik, M. F. (2025). Legal reconstruction for autonomous vehicle use in Indonesia: Challenges and solutions in the age of artificial intelligence. *Masalah-Masalah Hukum*, 54(1), 13–24. <https://doi.org/10.14710/mmh.54.1.2025.13-24>
- Ercan, T., Onat, N. C., Keya, N., Tatari, O., Eluru, N., & Kucukvar, M. (2022). Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103472. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103472>
- Gokasar, I., Timurogullari, A., Deveci, M., & Garg, H. (2023). SWSCAV: Real-time traffic management using connected autonomous vehicles. *ISA Transactions*, 132, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.06.025>
- Gu, Z., Gao, L., Ma, H., Li, S. E., Zheng, S., Jing, W., & Chen, J. (2023). Safe-state enhancement method for autonomous driving via direct hierarchical reinforcement learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(9), 9966–9983.
- Hakak, S., Gadekallu, T. R., Maddikunta, P. K. R., Ramu, S. P., Parimala, M., De Alwis, C., & Liyanage, M. (2023). Autonomous Vehicles in 5G and beyond: A Survey. *Vehicular Communications*, 39, 100551. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100551>
- Hashim, H. H., & Omar, M. Z. (2017). Towards autonomous vehicle implementation: Issues and opportunities. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*, 1(2), 111–123. <https://doi.org/10.56381/jsaem.v1i2.15>
- Iclodean, C., Cordos, N., & Varga, B. O. (2020). Autonomous shuttle bus for public transportation: A review. *Energies*, 13(11), 2917. <https://doi.org/10.3390/en13112917>
- Islam, M. R., Abdel-Aty, M., Lee, J., Wu, Y., Yue, L., & Cai, Q. (2022). Perception of people from educational institution regarding autonomous vehicles. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14, 100620. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100620>
- Juliansyah, F. M. (2022). Kepastian Hukum Terhadap Mobil Berteknologi Auto Pilot Ditinjau Dari Perspektif Hukum Lalu Lintas Jalan di Indonesia. *Bureaucracy Journal: Indonesia Journal Of Law And Social-Political Governance*, 2(2), 794–805. <https://doi.org/10.53363/bureau.v2i2.108>
- Kalusivalingam, A. K., Sharma, A., Patel, N., & Singh, V. (2020). Enhancing Logistics Efficiency with Autonomous Vehicles: Leveraging Reinforcement Learning, Sensor Fusion, and Path Planning Algorithms. *International Journal of AI and ML*, 1(3).
- Khofiya, N., & Sumayya, S. A. (2024). Analisis sosial dan teknologi informasi dalam pengelolaan kualitas udara perkotaan: Studi kasus di Kota Jakarta dan

- Surabaya. *Jurnal Teknologi dan Komunikasi Pemerintahan*, 6(2).
<https://ejournal.ipdn.ac.id/index.php/JTKP/article/view/4714/2012>
- Kolarova, V., Steck, F., & Bahamonde-Birke, F. J. (2019). Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.011>
- Kurniawan, J. H., Chng, S., & Cheah, L. (2021). The Social Acceptance of Autonomous Vehicles. *IEEE Potentials*, 40(4), 39–44.
<https://doi.org/10.1109/MPOT.2020.2991059>
- Lee, D., & Hess, D. J. (2020). Regulations for on-road testing of connected and automated vehicles: Assessing the potential for global safety harmonization. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 136, 85–98.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.026>
- Lee, D., & Hess, D. J. (2022). Public concerns and connected and automated vehicles: safety, privacy, and data security. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01023-5>
- Lee, J., Lee, K., Yoo, A., & Moon, C. (2020). Design and implementation of edge-fog-cloud system through HD map generation from LiDAR data of autonomous vehicles. *Electronics*, 9(12), 2084.
<https://doi.org/10.3390/electronics9122084>
- Mandala, D. R. T. L., & Fahlevvi, M. R. (2024). Pemanfaatan teknologi informasi untuk promosi pariwisata melalui media sosial di Dinas Pariwisata Kabupaten Ngada. *Jurnal Teknologi dan Komunikasi Pemerintahan*, 6(1).
- McPhee, J. E., Antille, D. L., Tullberg, J. N., Doyle, R. B., & Boersma, M. (2020). Managing soil compaction—A choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? *Biosystems Engineering*, 195, 227–241.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.006>
- Moody, J., Bailey, N., & Zhao, J. (2020). Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison. *Safety Science*, 121, 634–650.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.07.022>
- Müller, J. M. (2019). Comparing technology acceptance for autonomous vehicles, battery electric vehicles, and car sharing—A study across Europe, China, and North America. *Sustainability*, 11(16), 4333.
<https://doi.org/10.3390/su11164333>
- Mulyadi, Y. T., Putra, M. R. R., Nazaruddin, Y. Y., & Mandasari, M. I. (2022). Digital Twin Model Development for Autonomous Tram Localization. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 5(2), 55–60.
<https://doi.org/10.31427/IJSTT.2022.5.2.3>
- Nair, G. S., & Bhat, C. R. (2021). Sharing the road with autonomous vehicles:

- Perceived safety and regulatory preferences. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 122, 102885. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102885>
- Nascimento, A. M., Vismari, L. F., Molina, C. B. S. T., Cugnasca, P. S., Camargo, J. B., de Almeida, J. R., Inam, R., Fersman, E., Marquezini, M. V., & Hata, A. Y. (2019). A systematic literature review about the impact of artificial intelligence on autonomous vehicle safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(12), 4928–4946.
- Neufville, R., Abdalla, H., & Abbas, A. (2022). Potential of connected fully autonomous vehicles in reducing congestion and associated carbon emissions. *Sustainability*, 14(11), 6910. <https://doi.org/10.3390/su14116910>
- Noesselt, N. (2020). City brains and smart urbanization: regulating ‘sharing economy’ innovation in China. *Journal of Chinese Governance*, 5(4), 546–567. <https://doi.org/10.1080/23812346.2020.1762466>
- Nurliyana, C., Lestari, Y. D., Prasetyo, E. A., & Belgiawan, P. F. (2023). Exploring drivers’ interest in different levels of autonomous vehicles: Insights from Java Island, Indonesia. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 19, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100820>
- Okeke, O. B. (2020). The impacts of shared autonomous vehicles on car parking space. *Case Studies on Transport Policy*, 8(4), 1307–1318. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.09.002>
- Othman, K. (2021). Impact of autonomous vehicles on the physical infrastructure: Changes and challenges. *Designs*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/designs5030040>
- Pervez, A., Marazi, N. F., Majumdar, B. B., Ruizhi, M., Lee, J., & Sahu, P. K. (2024). Investigating Indian commuters’ perceived crime risk on Autonomous Public Buses and ride-pooling services. *Transportation Research Record*, 03611981241257514. <https://doi.org/10.1177/03611981241257514>
- Pohan, M. A. R. (2023). Kajian literatur pemanfaatan kecerdasan buatan dalam merespons prioritas pembangunan Kota Bandung. *Jurnal Teknologi dan Komunikasi Pemerintahan*, 5(2), 250–273. <https://doi.org/10.33701/jtkp.v5i2.3620>
- Pohan, M. A. R., Trilaksono, B. R., Santosa, S. P., & Rohman, A. S. (2019). Algoritma Perencanaan Jalur Kendaraan Otonom di Lingkungan Perkotaan dari Sudut Pandang Filosofi Kuhn dan Filosofi Popper. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, 7(2), 145–156. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v7i2.2627>
- Pohan, M. A. R., & Utama, J. (2023a). Efficient Autonomous Road Vehicles Local Path Planning Strategy in Dynamic Urban Environment using RRTACS Bi-Directional

- Rule Templates and Configuration Time-Space. *Journal of Engineering Science and Technology*, 18(5), 2388–2397.
- Pohan, M. A. R., & Utama, J. (2023b). Enhancing Passenger Comfort and Safeness in the Local Path Planning Strategy for Autonomous Road Vehicles Operating in New Capital City of Indonesia. *2023 9th International Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSPIS59665.2023.10402743>
- Pohan, M. A. R., Utama, J., & Herdiana, B. (2024). Novel Motion Planning Strategy with Fuzzy Logic for Improving Safety in Autonomous Vehicles in Response to Risky Road User Behaviors. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(3), 471–484.
- Rachmanie, M. B. L., Widyastuti, D. T., & Widita, A. A. (2023). Investigating the prospect of Autonomous Tram (AT) transit considering daily mobility patterns and existing bus services coverage in Surakarta. *Built Environment Studies*, 4(1), 21–27. <https://doi.org/10.22146/best.v4i1.6887>
- Rahman, M. M., & Thill, J. C. (2023). Impacts of connected and autonomous vehicles on urban transportation and environment: A comprehensive review. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104649>
- Rasdiyanti, A. D., Hayat, H., & Suyeno, S. (2024). Indonesia Government Policy Strategy to Support Autonomous Vehicles Implementation for Public Transport. *ARISTO*, 12(2), 452–474. <https://doi.org/10.24269/ars.v12i2.7860>
- Sideri, S., Papageorgiou, S. N., & Eliades, T. (2018). Registration in the international prospective register of systematic reviews (PROSPERO) of systematic review protocols was associated with increased review quality. *Journal of Clinical Epidemiology*, 100, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2018.01.003>
- Silva, Ó., Cordera, R., González-González, E., & Nogués, S. (2022). Environmental impacts of autonomous vehicles: A review of the scientific literature. *Science of The Total Environment*, 830, 154615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154615>
- Singh, H., Kushwaha, V., Agarwal, A. D., & Sandhu, S. S. (2016). Fatal road traffic accidents: causes and factors responsible. *Journal of Indian Academy of Forensic Medicine*, 38(1), 52–54. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-0848.2016.00014.2>
- Sitinjak, C., Tahir, Z., Toriman, M. E., Lyndon, N., Simic, V., Musselwhite, C., Simanullang, W. F., & Hamzah, F. M. (2023). Assessing public acceptance of autonomous vehicles for smart and sustainable public transportation in urban areas: a case study of Jakarta, Indonesia. *Sustainability*, 15(9), 7445. <https://doi.org/10.3390/su15097445>
- Sitorus, B. (2023). Autonomous Rail Rapid Transit: Inovasi transportasi modern

- untuk mengatasi kendala-kendala konvensional di kota besar Indonesia. *Jurnal Kebijakan Publik*, 7(3). <https://doi.org/10.31957/jkp.v7i3.4182>
- Tabor, J., Dai, S., Sreenivasan, V., & Banerjee, S. (2022). μ City: a miniaturized autonomous vehicle testbed. *Proceedings of the 17th ACM Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture*, 25–30.
- Tan, S. Y., & Taeihagh, A. (2021). Adaptive governance of autonomous vehicles: Accelerating the adoption of disruptive technologies in Singapore. *Government Information Quarterly*, 38(2), 101546. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101546>
- Tran, D. V., & Le, C. T. Q. (2022). Developing a Regulatory Framework for Autonomous Vehicles: A Proximal Analysis of European Approach and Its Application to ASEAN Countries. *TalTech Journal of European Studies*, 12(2), 165–188. <https://doi.org/10.2478/bjes-2022-0016>
- Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Werla Putra, G., & Iswara, B. (2019). Metode Systematic Literature Review untuk Identifikasi Platform dan Metode Pengembangan Sistem Informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63–77. <https://doi.org/10.24002/ijis.v1i2.1916>
- Ulfa, E. S. S., Nisa, S., & Suriani, A. (2024). Systematic literature review: Pendidikan karakter di sekolah dasar. *Jurnal Pendidikan Sosial dan Konseling*, 2(1), 249–254.
- Véras, L. G. D. O., Medeiros, F. L. L., & Guimarães, L. N. F. (2019). Systematic literature review of sampling process in rapidly-exploring random trees. *IEEE Access*, 7, 50933–50953.
- Wang, J., Zhang, L., Huang, Y., & Zhao, J. (2020). Safety of autonomous vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 8867757. <https://doi.org/10.1155/2020/8867757>
- Wiedyanoe, S., Fonzone, A., Cowie, J., & Utomo, D. S. (2024). Exploring Policy Interventions to Support the Introduction of Autonomous Vehicles in Indonesia. *Jurnal Ilmu Kepolisian*, 18(2), 163–176. <https://doi.org/10.35879/jik.v18i2.456>
- Xiao, S., Ge, X., Han, Q. L., & Zhang, Y. (2022). Resource-efficient platooning control of connected automated vehicles over VANETs. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7(3), 579–589. <https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3155640>
- Ye, L., & Yamamoto, T. (2018). Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 512, 588–597. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.083>
- Zhao, X., Sun, P., Xu, Z., Min, H., & Yu, H. (2020). Fusion of 3D LIDAR and camera data for object detection in autonomous vehicle applications. *IEEE Sensors Journal*,

20(9), 4901–4913. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2966034>

Zheng, H., Chen, C., Li, S., Zheng, S., Li, S. E., Xu, Q., & Wang, J. (2023). Learning-based safe control for robot and autonomous vehicle using efficient safety certificate. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 4, 419–430.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>).