

CHAPTER 13

PENGEMBANGAN SISTEM OTONOMI DENGAN MENGUNAKAN KECERDASAN ARTIFISIAL UNTUK TREM OTONOM

Bambang Riyanto Trilaksono¹ & Febry Pandu Wijaya²

¹Institut Teknologi Bandung, ²PT INKA

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pengembangan sistem otonomi untuk trem otonom menggunakan kecerdasan artifisial dengan dua tahap pengembangan, yaitu *tram driving assistance* dan trem otonom. Kemampuan otonomi yang dikembangkan pada trem otonom mencakup kemampuan mendeteksi objek di sekitar trem dan melakukan pelacakan, memenuhi batas kecepatan pada ruas jalan tertentu secara otomatis, menghindari tabrakan dengan penghalang, serta mengenali wajah masinis dan peringatan atensi masinis pada *tram driving assistance*. Pada trem otonom, sistem otonomi juga dilengkapi dengan *adaptive cruise control*, *emergency braking system*, dan pengenalan rambu lalu lintas secara otomatis. Sistem otonomi dilengkapi dengan sensor kamera, *light detection and ranging* (LiDAR), dan radar. *Pipeline* kecerdasan artifisial (*deep learning*) pada sistem otonomi yang mencakup sistem persepsi, lokalisasi, pemetaan, pengambilan keputusan, dan sistem kendali yang diimplementasikan pada *embedded* Nvidia GPU Drive dan diintegrasikan dengan sistem *drive-by-wire* pada trem elektrik berbasis baterai.

Kata kunci: trem listrik, sistem otonomi, *deep learning*, fusi sensor, *embedded* GPU

¹ **Bambang Riyanto Trilaksono** lahir di Banyuwangi pada 15 November 1962 dan saat ini bekerja sebagai dosen dan guru besar di Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB. Lulusan S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung (ITB) serta S2 dan S3 Waseda University, Jepang, ini merupakan salah satu pendiri dari Pusat AI, ITB, dan Kolaborasi Riset dan Inovasi Kecerdasan Artifisial (Korika) dan bertugas sebagai Wakil Rektor Bidang Riset, Inovasi dan Kemitraan ITB pada periode 2015–2019. Bambang juga merupakan *research fellow* di University of New South Wales (2012–sekarang), anggota dewan redaksi dari beberapa jurnal internasional, seperti *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, anggota IEEE dan Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia (AIPI) dan salah satu *founder* perusahaan pemula Riset Kecerdasan Buatan (www.riset.ai). Beliau juga terlibat dalam beberapa proyek industri, khususnya dalam pengembangan pesawat terbang N250 di PTDI dan KFX/IFX.

² **Febry Pandu Wijaya** lahir di Madiun pada 10 Februari 1984 dan bergabung dengan PT INKA (Persero), sebuah perusahaan manufaktur kereta dan transportasi darat, sejak tahun 2007. Ia menerima gelar sarjana dari Teknik Elektro ITB, gelar master dari Toyohashi University, dan gelar Ph.D. dari Electrical and Electronic Engineering, Chiba University, Jepang, pada tahun 2017. Sejak awal kariernya di INKA, ia banyak terlibat dalam proyek dan penelitian tentang KRDE, KRL, kereta *hybrid*, tram baterai, dan bus listrik. Saat ini, ia merupakan *leader* dari INKA untuk Pengembangan Sistem Otonomi Menggunakan Kecerdasan Artifisial pada Tram Baterai dengan ITB dan PT Riset Kecerdasan Buatan yang didanai oleh LPDP.

B. R. Trilaksono & F. P. Wijaya
Institut Teknologi Bandung (ITB), e-mail: briyanto1@gmail.com

@2023 Kolaborasi Riset dan Inovasi Industri Kecerdasan Artifisial (KORIKA) & Penerbit BRIN
B. R. Trilaksono and F. P. Wijaya, "Pengembangan sistem otonomi dengan menggunakan kecerdasan artifisial untuk trem otonom," in *Prosiding Use Cases Artificial Intelligence Indonesia: Embracing Collaboration for Research and Industrial Innovation in Artificial Intelligence*, B. R. Trilaksono, H. Riza, A. Jarin, N. D. S. Darmayanti, and S. Liawatimena, Eds. Jakarta: Penerbit BRIN, Februari 2023, ch. 13, pp. 137-152, doi: 10.55981/brin.668.c549

ISBN: 978-623-8052-49-3, E-ISBN: 978-623-8052-50-9

A. PENDAHULUAN

Transportasi umum yang aman dan nyaman merupakan elemen penting dari infrastruktur kota. Mengingat beberapa faktor, seperti kemacetan lalu lintas, masalah lingkungan, dan pertumbuhan kota yang pesat, transportasi umum harus menjadi cara yang paling menarik untuk berkeliling kota. Meningkatnya perhatian terhadap mobilitas listrik dan kepekaan yang lebih besar terhadap masalah lingkungan telah mendukung penyebaran trem dalam beberapa tahun terakhir (Pemerintah Kota Bogor, Provinsi Bali, dan Kota Surabaya) telah tertarik untuk menggunakan trem sebagai transportasi perkotaan mereka (sumber: internal PT INKA). Hal ini mungkin saja akan diikuti oleh berbagai kota lain di Indonesia, sehingga potensi kendaraan trem yang harus diproduksi menjadi meningkat pesat.

Istilah trem digunakan untuk angkutan umum kereta yang jalurnya sejajar dan berada di jalan raya. Ini berarti bahwa trem harus berbaur dengan sarana transportasi lain, seperti mobil dan sepeda motor, serta pejalan kaki. Dalam operasinya, trem harus membatasi kecepatannya untuk menghindari kecelakaan dengan alat transportasi lain yang menggunakan jalan raya. Selain membatasi kecepatan, trem juga biasanya terbatas pada jumlah gerbong yang hanya terdiri dari satu atau dua gerbong sehingga tidak mengganggu arus lalu lintas dan umumnya memiliki kapasitas antara 125–250 penumpang.

Saat ini, kecelakaan kereta api yang terjadi di Indonesia masih tergolong tinggi. Selama tahun 2019 telah terjadi 260 kali kecelakaan kereta api yang mengakibatkan 76 orang meninggal dunia. Salah satu penyebab kecelakaan adalah masalah kelelahan atau mengantuk yang dialami oleh masinis. Untuk mengantisipasi masalah tersebut, perlu ditambahkan fasilitas berupa sistem *assistant driver* yang dapat membantu masinis dalam melakukan kendali kereta atau trem. Lebih maksimal lagi, jika trem dapat berjalan secara otonom tanpa masinis sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi dalam transportasi publik [5][10][14][15][21]. Saat ini, kendaraan otonom dipandang sebagai solusi yang efektif dalam mengatasi masalah kecelakaan akibat pengemudi yang mengalami kelelahan, mengantuk, konsentrasi terganggu, dan sebagainya [10][11][16][18][19][20].

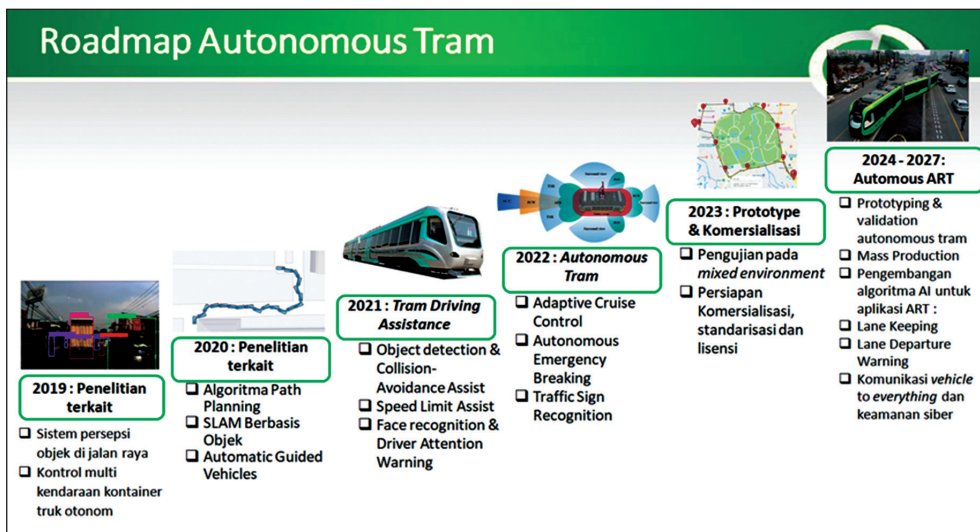
Penelitian ini membahas beberapa aspek dari proyek riset dan inovasi kendaraan otonom secara umum dan trem otonom secara khusus yang akan dilengkapi peta jalan riset dan inovasi terkait dengan proyek pengembangan trem otonom. Pembahasan akan dilanjutkan dengan pengembangan sistem otonomi dari trem otonom, antara lain menyangkut *deep learning* (AI pipeline) serta perangkat lunak dan perangkat keras yang dirancang dan dikembangkan. Setelah itu, disajikan secara ringkas hasil pengujian *assisted driving system* dari trem otonom yang dikembangkan, dilanjutkan dengan kesimpulan dan *lessons learned* dari pengembangan trem otonom yang menggunakan kecerdasan artifisial ini.

B. PEMBAHASAN

1. Kendaraan Otonom dan Trem Otonom

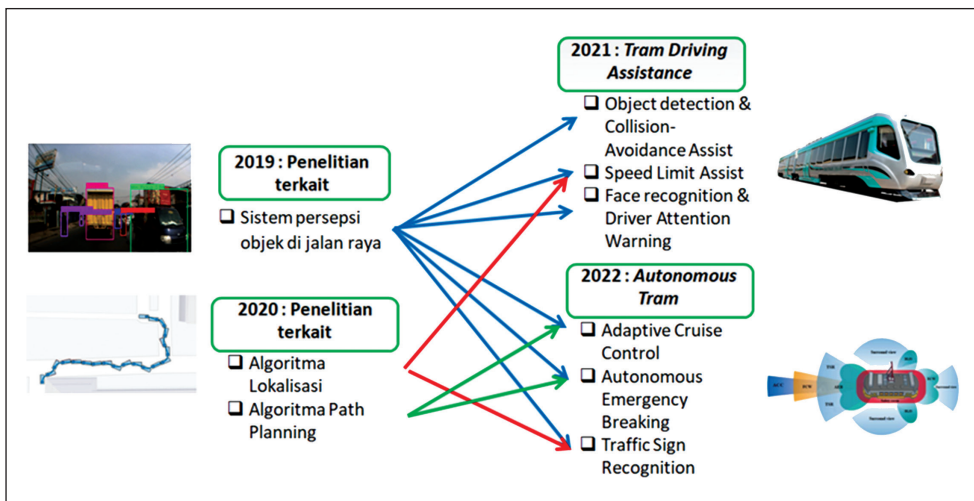
Berdasarkan pertimbangan di atas, Insitut Teknologi Bandung (ITB) bekerja sama dengan PT Industri Kereta Api (PT INKA) dan perusahaan pemula Riset Kecerdasan Buatan melakukan riset inovatif dengan judul *Pengembangan Sistem Otonomi dengan Menggunakan Kecerdasan Artifisial untuk Trem Otonom*. Riset ini dibiayai oleh LPDP dalam skema riset inovatif produktif. Dalam kerja sama ini, ITB berperan mengembangkan sistem otonomi yang mencakup AI *pipeline*, perangkat lunak, dan perangkat keras, antara lain sensor dari *embedded graphical processing unit* (GPU). PT INKA berperan menyediakan trem berbasis elektrik dan *drive-by-wire system* serta lingkungan pengujian di Madiun. Riset kecerdasan buatan berperan mengembangkan model AI untuk pengenalan wajah dan peringatan atensi masinis, serta supervisi dalam rekayasa data. Peta jalan riset dan inovasi yang menggambarkan tahapan riset dan inovasi yang telah, sedang, dan akan dilakukan dalam pengembangan kendaraan otonom secara umum dan trem otonom secara khusus ditunjukkan pada Gambar 1. Pengembangan sistem otonomi trem dilaksanakan pada periode 2021–2023 dan jangka lebih panjang, yaitu periode 2024–2027, dilakukan pengembangan *autonomous rail rapid transit* (ART).

Seperti diperlihatkan pada Gambar 1, telah dilakukan beberapa riset terkait dengan deteksi dan klasifikasi serta penjejakan objek lalu lintas berdasarkan kamera sebagai elemen penting dari kendaraan otonom [1][2][18][19][20]. Beberapa model *deep learning* telah dikembangkan untuk mendukung riset tersebut, salah satunya berbasis Yolo untuk mendeteksi objek lalu lintas yang beragam, sebagaimana banyak dijumpai di Indonesia. *Deep learning* merupakan paradigma penting dalam kecerdasan



Gambar 1. Peta Jalan Riset Pengembangan Trem Otonom (2019–2027)

artifisial yang berkembang dalam beberapa tahun terakhir dan didasarkan pada model dan prinsip kerja otak makhluk hidup secara umum, dan manusia secara khusus, yang disusun ke dalam sejumlah besar lapisan neuron [2][3][4][9]. Riset mengenai penjejak jalur juga dilakukan sehingga kendaraan otonom, dapat menetapkan jalur dari posisi awal menuju posisi tujuan dengan menghindari halangan. Dalam kaitan ini, algoritma baru telah dikembangkan dengan menggabungkan algoritma *randomly rapid tree* (RRT) dengan *ant colony systems* (ACS) maupun menggabungkan RRT dengan *particle swarm optimization* (PSO) [17]. Tujuan dari pengembangan algoritma ini adalah meningkatkan kecepatan konvergensi penelusuran jalur sambil berupaya menemukan panjang jalur yang lebih optimal (pendek) dibandingkan beberapa algoritma yang sudah ada. Penentuan peta dan posisi secara serentak *simultaneous localization and mapping* (SLAM) berbasis objek dengan menggunakan kamera tiga dimensi (3D) juga sudah dikembangkan. SLAM merupakan salah satu elemen penting dalam kendaraan otonom dengan tujuan mendapatkan lokasi kendaraan yang akurat, misalnya penggunaan *inertial measurement unit* (IMU) dan *global positioning system* (GPS), serta pembentukan peta berdasarkan sensor kamera, *light detection and ranging* (LiDAR), atau sonar [6][7][8][12]. Pembangunan peta diperlukan pada kendaraan otonom terutama pada wilayah baru yang belum ada atau tidak tersedia petanya. Apabila peta digital tersedia, misalnya dengan menggunakan Open Streetmap atau peta berdefinisi tinggi, dan telah terinstalasi pada sistem otonomi, pembangunan peta baru tidak lagi diperlukan. Dalam konteks ini, sedang dikembangkan peningkatan peta dengan objek baru yang belum tersedia pada peta yang ada atau digunakan.



Gambar 2. Peta Keterkaitan Penelitian Pengembangan Algoritma dengan Penelitian Sistem Otomasi Trem

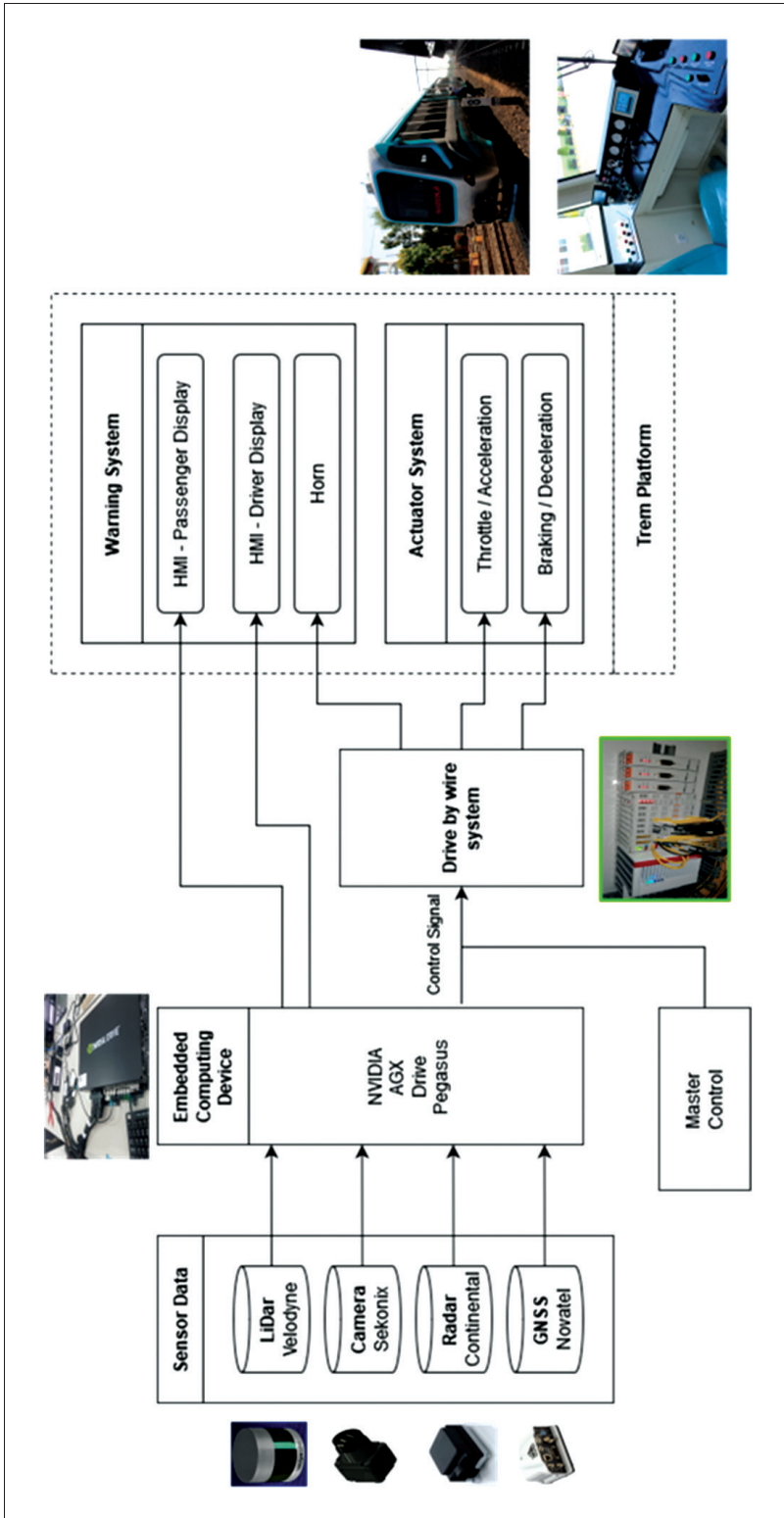
Keterkaitan antara penelitian mengenai pengembangan algoritma yang sudah dilakukan (algoritma sistem persepsi berbasis kecerdasan artifisial, SLAM/lokalisasi, dan *path planning*) dengan implementasi trem otonom (*tram driving assistance* dan *autonomous tram*) ditunjukkan oleh Gambar 2. Tanda panah memperlihatkan keterkaitan riset dan pengembangan yang telah dilakukan dengan sistem otonomi untuk trem otonom yang sedang atau akan dikembangkan.

2. Sistem Otonomi untuk Trem Otonom

Sebagai kendaraan yang bersifat mandiri, trem otonom perlu memiliki kemampuan mendeteksi objek berdasarkan semua sensor yang digunakan serta melakukan penghindaran halangan karena trem otonom beroperasi di lingkungan jalan raya dan bercampur dengan kendaraan lain, seperti mobil, angkot, sepeda motor, sepeda, bus, dan truk, serta pejalan kaki. Beberapa sensor yang dirancang dan digunakan pada trem otonom adalah sensor kamera, sensor LIDAR, dan sensor radar yang masing-masing memiliki karakteristik tersendiri sehingga dapat saling melengkapi. Trem otonom juga harus mampu untuk beroperasi dengan memenuhi batas kecepatan yang diizinkan pada ruas jalan rel tertentu sehingga tidak membahayakan, misalnya karena kemiringan jalan rel dan sebagainya. Dua tahapan pengembangan trem otonom yang dilakukan adalah perancangan *tram driving assistance* (2021–2022) dan pengembangan trem otonom (2022–2023).

Tram driving assistance dapat dianggap sebagai sistem semi-otonom yang berfungsi membantu masinis pada kondisi tertentu, khususnya pada kondisi yang berbahaya, misalnya pada situasi di mana kendaraan lain di sekitarnya atau pejalan kaki berada terlalu dekat dengan trem. Secara khusus, kemampuan ini penting dikembangkan pada trem yang beroperasi di Indonesia mengingat kecenderungan sebagian pengguna lalu lintas di Indonesia yang tidak menaati peraturan lalu lintas. Sistem otonomi pada *tram driving assistance* perlu dilengkapi kemampuan untuk mengenali wajah masinis dan peringatan atensi masinis. Sistem peringatan atensi perlu mendeteksi atensi masinis, misalnya pada situasi ketika masinis mengantuk atau tidak berkonsentrasi pada pengoperasian trem. Pada trem otonom yang saat ini sedang dikembangkan, ditambahkan beberapa fitur pada sistem otonominya, yaitu *adaptive cruise control*, *autonomous emergency breaking*, dan *traffic sign recognition*.

Untuk merealisasikan *tram driving assistance*, dikembangkan model *deep learning* yang memiliki kemampuan mendeteksi objek di sekitar trem dan melakukan pelacakan dengan memanfaatkan sensor kamera, LiDAR, dan radar yang diimplementasikan pada modul persepsi dari sistem otonomi yang dikembangkan. Jenis objek yang perlu dideteksi adalah sepeda motor, mobil, angkot, truk, bus, dan pejalan kaki. Model *deep learning* berbasis *convolutional neural networks* juga dikembangkan untuk



Gambar 3. Arsitektur Perangkat Keras Sistem Otonomi

mengidentifikasi wajah melalui kamera yang dipasang di ruang masinis dan dapat mengidentifikasi siapa yang menjadi masinis. Sistem peringatan juga direalisasikan dengan menggunakan model *deep learning* untuk mendeteksi apakah masinis sedang mengantuk atau atensinya sedang terganggu.

Arsitektur perangkat sistem otonomi untuk trem otonom yang dikembangkan diperlihatkan pada Gambar 3. Sebagaimana diperlihatkan pada gambar tersebut, sistem otonomi untuk trem otonom dilengkapi dengan sejumlah sensor, seperti kamera, LiDAR, dan radar. Sensor sejenis ini diperlukan karena trem otonom beroperasi pada lingkungan *mixed traffic*, atau dengan kata lain, beroperasi di samping atau di tengah jalan raya bersama-sama dengan berbagai jenis kendaraan lain, seperti sepeda, sepeda motor, angkot, mobil, bus, dan truk, atau pejalan kaki. Instalasi sensor tersebut pada trem otonom dan penempatannya diperlihatkan pada Gambar 4.

Penggunaan sensor kamera, LiDAR, dan radar pada kondisi lalu lintas seperti ini diperlukan untuk mempersepsi lingkungan yang ada di sekitar trem otonom. Secara khusus, sistem persepsi yang dilengkapi dengan sensor tersebut memiliki kemampuan untuk mendeteksi dan mengklasifikasi objek di sekitarnya. Deteksi



Gambar 4. Instalasi Sensor Kamera, LiDAR, dan Radar pada Trem Otonom

objek dilakukan dengan membentuk *bounding box* berbentuk dua atau tiga dimensi menggunakan *deep learning* berdasarkan sensor kamera, LiDAR, dan radar. Contoh inferensi model *deep learning* yang dikembangkan pada video yang ditangkap oleh kamera diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Deteksi objek pada video yang ditangkap oleh kamera dengan menggunakan *deep learning*.



Gambar 6. Fusi Sensor Kamera dan LiDAR. Gambar atas menunjukkan arsitektur fusi sensor kamera dan LiDAR, sedangkan gambar bawah memperlihatkan deteksi dua dimensi dengan menggunakan kamera dan deteksi tiga dimensi dengan menggunakan LiDAR [1].

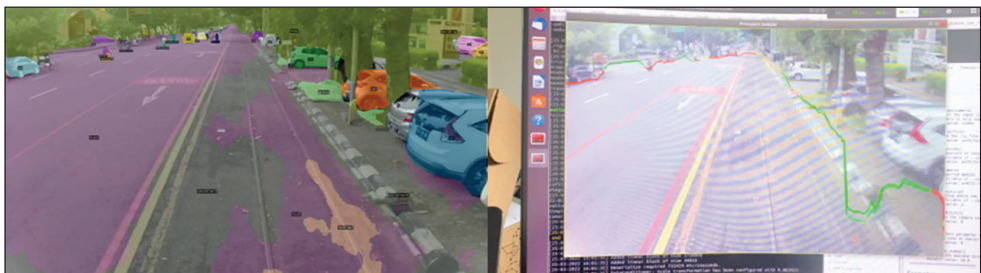
Melalui sensor LiDAR dan radar secara khusus dapat ditentukan jarak dan *bearing angle* terhadap semua objek di sekitar trem otonom. Fusi dari sensor LiDAR dan kamera juga dikembangkan untuk deteksi objek dengan menggunakan algoritma fusi sensor dan *deep learning* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6.

Deteksi objek tiga dimensi diperoleh dengan sensor LiDAR, sementara deteksi dua dimensi diperoleh dengan menggunakan kamera. Kedua pendeteksi objek ini digabungkan dengan algoritma fusi dan selanjutnya dilakukan asosiasi data [1]. Algoritma penjejakan digunakan untuk melakukan penjejakan objek secara waktu-nyata (*real-time*).

Segmentasi citra juga dikembangkan pada sistem persepsi yang berfungsi meningkatkan “kecerdasan” sistem persepsi, salah satunya dengan menggunakan salah satu metode segmentasi citra, yaitu segmentasi panoptik (*panoptic image segmentation*) berbasis *deep learning*, sistem otonomi dapat membedakan citra yang merupakan pepohonan, bangunan, udara, objek kendaraan di sekitar trem otonom, maupun bidang jalan (*drivable area*). Hasil inferensi model *deep learning* untuk segmentasi citra ini diperlihatkan pada Gambar 7.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 7, model *deep learning* yang dikembangkan dapat membangun pemisahan citra dari objek kendaraan, pepohonan, maupun bidang jalan yang dapat dilalui kendaraan otonom. Selain kemampuan mendeteksi objek, dikembangkan juga sistem pengenalan rambu lalu lintas berdasarkan citra yang ditangkap oleh kamera menggunakan model *deep learning* sehingga memiliki kemampuan untuk mendeteksi rambu atau semboyan yang digunakan sepanjang rel kereta otonom, termasuk kemampuan mendeteksi rambu pada situasi yang agak ekstrem, seperti pencahayaan yang agak redup (misalnya pada sore hari) atau pada situasi ketika gerimis.

Sistem persepsi ini selanjutnya berhubungan dengan sistem lokalisasi dan pemetaan. Sistem lokalisasi diperlukan untuk menentukan koordinat lokasi dari trem otonom dalam peta. Penentuan lokasi yang akurat sangat penting pada kendaraan otonom. Sistem ini menghitung koordinat lokasi berdasarkan sensor GPS dan IMU



Gambar 7. Inferensi segmentasi panoptik pada citra dengan menggunakan *deep learning*. Gambar kiri memperlihatkan segmentasi citra terhadap objek kendaraan dan pepohonan, sedangkan gambar kanan memperlihatkan segmentasi citra untuk menentukan bidang atau wilayah kendaraan beroperasi.

dengan tingkat ketelitian tertentu dengan pengembangan akurasi di bawah 10 cm. Jenis sensor GPS yang digunakan memanfaatkan satelit dan berbasis *real time kinematic* (RTK). Open Streetmap yang bersifat terbuka digunakan untuk peta. Informasi lokasi trem otonom selanjutnya ditunjukkan pada peta dan ditampilkan pada suatu *display*.

Dengan mendasarkan pada sistem deteksi objek, lokalisasi, dan peta, sistem pengambilan keputusan pada sistem otonomi akan melakukan beberapa keputusan, seperti melakukan percepatan dan pelambatan trem, membunyikan *buzzer* di ruang masinis, dan membunyikan klakson (*horn*). Modul pengambil keputusan terdiri dari *safety assessment*, pembuatan keputusan, dan sistem kendali. *Safety assessment* memungkinkan sistem otonomi untuk melakukan penilaian seberapa tingkat bahaya situasi tertentu di sekitar trem otonom. Penilaian ini dinyatakan dalam bentuk nilai probabilitas bahaya situasi tertentu dengan mendasarkan pada prediksi trajektori objek (kendaraan), posisi, dan kecepatan trem otonom. Sistem ini dirancang untuk merealisasikan fitur penting dari kendaraan otonom, seperti *emergency braking system* dan *collision avoidance*. Fitur *adaptive cruise control* juga dikembangkan yang memungkinkan trem otonom mengatur jarak (dan kecepatan) aman terhadap trem lain yang melaju didepannya. Salah satu metode kendali yang digunakan adalah *model predictive control* (MPC).

Seluruh AI *pipeline* dan algoritma yang digunakan pada sistem otonomi yang dirancang ini diimplementasikan pada Nvidia GPU Driveworks (Pegasus). Nvidia GPU Driveworks dengan nama Pegasus merupakan *embedded* GPU yang dikembangkan untuk kendaraan otonom yang mengandung beberapa GPU dalam satu *board*. Penerapan dan *deployment* model *deep learning*, pengembangan model *deep learning* sebagaimana yang umumnya dilakukan di lingkungan akademik tidaklah cukup. Model-model kecerdasan artifisial yang dikembangkan ini perlu di-*deploy* dan diuji pada platform komputasi yang digunakan pada *deployment* sistem ini, dalam kasus ini adalah *embedded* GPU Driveworks. Pada umumnya, pengembangan model *deep learning* pada proyek riset dan inovasi ini dilakukan melalui beberapa tahap sebagai berikut.

- a. Pengembangan model *deep learning* melalui *transfer learning* dari suatu *pretrained model* atau modifikasi dari model *deep learning* yang sudah dikembangkan para peneliti dan dilatih dengan memanfaatkan *dataset* yang tersedia daring, seperti Kitti dan NuScene, untuk kemudian dilatih terhadap *dataset* lokal yang diambil dan dikembangkan oleh tim riset. Model *deep learning* ini dikembangkan pada suatu server dengan beberapa GPU dan dilakukan menggunakan TensorFlow atau Pytorch.
- b. Pengembangan model *deep learning* pada server dan GPU dengan lingkungan perangkat lunak (Nvidia Driveworks) yang sama seperti pada Nvidia *embedded* GPU Drive (Pegasus) yang digunakan, dalam hal ini menggunakan TensorRT dengan versi yang sama.

- c. Implementasi AI *pipeline* dan algoritma terkait pada Nvidia *embedded GPU* Driveworks dengan menggunakan TensorRT.

Secara khusus, penilaian (*assessment*) yang dilakukan pada langkah ketiga tidak hanya terkait dengan kinerja model *deep learning* yang dikembangkan, seperti akurasi, *recall*, atau *f1-score*, tetapi juga kecepatan komputasi, misalnya dalam bentuk bingkai per detik (*frame per second*, fps). Evaluasi ini sangat penting karena model *deep learning* yang diimplementasikan pada *embedded GPU* akan diterapkan pada *safety-critical system*, yaitu trem otonom, di mana respons waktu dari berbagai model atau algoritma sangat perlu diperhatikan. Dalam hal ini, sering kali terjadi kompromi antara kinerja model *deep learning* waktu komputasinya. Dalam beberapa hal, kita sering kali tidak dapat mengembangkan dan menggunakan model *deep learning* tercanggih dan terkini karena terbatas oleh versi TensorRT yang digunakan pada *embedded GPU*. Dalam beberapa hal, suatu kompromi (*trade-off*) dalam desain dan *deployment* kecerdasan artifisial perlu dilakukan.

Secara umum, pengembangan model *deep learning* dan AI *pipeline* beserta simulasinya dilakukan di ITB dan Riset Kecerdasan Buatan, sementara integrasi pada platform trem dilakukan di PT INKA, Madiun. Pengambilan data lingkungan menggunakan sensor kamera, LiDAR, dan radar dilakukan di beberapa lokasi, seperti jalanan di Bandung, Solo (pada ruas rel trem Bathara Kresna), dan Madiun (PT INKA). Pengambilan data jalanan di Bandung dimaksudkan untuk memperoleh data video dan data LiDAR untuk deteksi objek, termasuk dalam kondisi agak ekstrem (kondisi hujan dan agak gelap, sekitar sore menjelang malam hari). Pengambilan data di Solo menggunakan dressin yang mirip dengan trem listrik dengan sistem otonomi yang dikembangkan dan terpasang sensor kamera, LiDAR, dan radar. Pengambilan data di Solo ini dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi lingkungan sesungguhnya pada jalur trem Bathara Kresna yang bersifat *mixed traffic*, termasuk berbagai objek kendaraan, pejalan kaki, dan berbagai rambu atau semboyan yang digunakan di jalur rel trem. Pengambilan data di Madiun dimaksudkan untuk merepresentasikan data dengan penempatan sensor yang sesungguhnya di trem yang dikembangkan sistem otonominya. Ketiga jenis *dataset* ini digunakan untuk melengkapi *dataset* yang tersedia secara daring, seperti Kitti, NuScene, dan FRSign [9] yang merepresentasikan kondisi di negara maju, sementara ketiga jenis data yang diambil sendiri merepresentasikan data lokal yang khas Indonesia. Mengingat pentingnya data yang diperoleh dari sensor tersebut, tim riset dan inovasi membentuk tim khusus rekayasa data yang bertugas mengelola data, melakukan pelabelan (anotasi), dan menyiapkan *dataset* yang diperlukan untuk membangun berbagai jenis model *deep learning*. Ketersediaan *dataset* yang bagus dalam jumlah cukup besar sangat penting dalam pengembangan model *deep learning* [2][3][4][13][18][19][20].

3. Integrasi, Pengujian, dan Eksperimen

Sebelum melakukan pengujian secara terintegrasi di lapangan, perlu dikembangkan suatu lingkungan simulasi yang melibatkan dua platform komputasi, yaitu server *personal computer* (PC) yang terinstalasi Carla dan Nvidia *embedded GPU*. Carla adalah lingkungan simulasi dan animasi yang biasa digunakan pada pengembangan kendaraan otonom. Kedua platform komputasi ini diintegrasikan dengan Carla untuk menampilkan animasi kendaraan di suatu lingkungan perkotaan, sedangkan AI *pipeline* yang diimplementasikan pada Nvidia *embedded GPU*. Dengan menggunakan lingkungan simulasi seperti ini, berbagai macam skenario pengoperasian trem otonom dapat dilakukan, termasuk situasi yang tidak dapat dilakukan pengujian riil di lapangan karena berbagai keterbatasan.

Integrasi sensor kamera, GPS, IMU, dan *embedded GPU* serta *drive-by-wire system* pada trem listrik dilakukan di PT INKA. *Fine tuning* algoritma lebih lanjut juga dilakukan pada tahap ini. Komunikasi antara *embedded GPU* sistem *drive-by-wire* secara khusus dilakukan untuk memastikan perintah yang diberikan oleh *embedded GPU* dalam berbagai jenisnya (percepatan, pelambatan, serta perintah membunyikan *buzzer* dan klakson) dapat dilaksanakan oleh trem melalui sistem *drive-by-wire*. Pengujian *driver assisted system* dilakukan pada tahun pertama riset dan inovasi dengan beberapa fitur, yaitu (a) deteksi objek dengan menggunakan kamera, (b) *collision avoidance assist*, (c) *speed limit assist*, (d) pengenalan wajah masinis, dan (e) peringatan atensi masinis.

Gambar 8 memperlihatkan *embedded GPU* dan sistem *display* yang terinstalasi di trem otonom. Lima fitur pengujian tersebut telah sukses diimplementasikan dan diuji di PT INKA. Gambar 9 menunjukkan peringatan atensi masinis.

Gambar 9 memperlihatkan bahwa status pengenalan wajah, pengenalan gerak mata kanan dan kiri, serta orientasi dari kepala masinis yang terdeteksi mengalami distraksi. Sistem pengenalan wajah dan status yang dideteksi oleh kamera di ruang masinis ini juga dapat mendeteksi kondisi mengantuk masinis. Jika salah satu dari kedua kondisi ini terdeteksi, sistem otonomi akan membangkitkan bunyi *buzzer* yang terpasang di ruang masinis untuk mengingatkan masinis agar lebih berkonsentrasi mengemudikan trem.

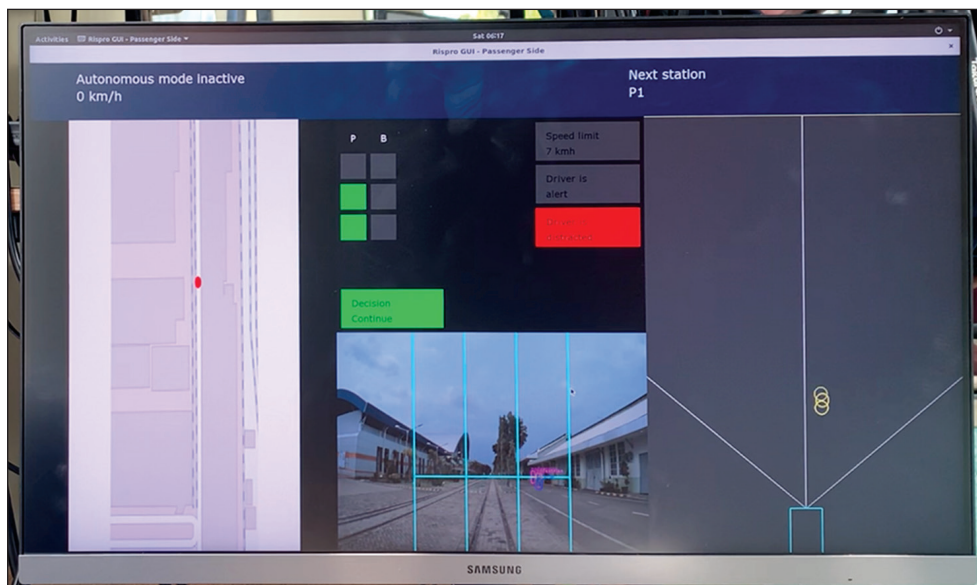


Gambar 8. Instalasi *Embedded GPU* dan Sistem *Display* terinstalasi pada Trem Otonom

Gambar 10 menunjukkan *display* dari *tram driving assistance system* pada pengujian eksperimental. Tampak dari gambar ini posisi trem pada peta, *display* yang menampilkan video hasil tangkapan kamera beserta objek terdeteksi dan *bird-eye view* dari trem dan posisi objek yang dideteksi. Sistem juga memperlihatkan batas wilayah pada bidang citra yang digunakan untuk membantu trem menghindari halangan ketika objek di sekitarnya berada terlalu dekat dengan trem.



Gambar 9. Sistem Pengenalan Wajah dan Peringatan Atensi Masinis



Gambar 10. *Display Tram Driving Assistance System* pada Pengujian Eksperimental di PT INKA

D. KESIMPULAN

Artikel ini telah menyajikan pengembangan sistem otonomi untuk trem otonom dengan sistem otonomi yang dibangun menggunakan sejumlah sensor, AI/DL *pipeline* yang diimplementasikan pada *embedded* GPU, dan berkomunikasi dengan *drive-by-wire system*. Sistem otonomi berbasis model *deep learning* telah berhasil dirancang dan diujikan pada trem semi-otonom, dan saat ini pengembangan sistem otonomi untuk trem otonom tanpa masinis sedang berjalan. Beberapa pelajaran dapat dipetik dalam pengalaman mengembangkan sistem otonomi untuk trem otonom adalah sebagai berikut.

1. Pengambilan data dan pembuatan dataset harus memperhatikan keterbatasan sesuai kondisi di lapangan.
2. Implementasi model deployment pada *embedded* GPU akan melibatkan siklus pengembangan lengkap (ML/DL DevOps) dan menyangkut kompromi antara kinerja model *deep learning* kecepatan komputasi.
3. Lokasi dan penempatan sensor perlu mempertimbangkan wilayah yang dapat dicakup sehingga persepsi terhadap lingkungan di sekitar kendaraan otonom cukup luas.
4. Aspek keamanan dalam pengembangan sistem otonomi sangat penting mendapat perhatian.

Informasi lebih lanjut dan video terkait dengan proyek riset dan inovasi pengembangan sistem otonomi untuk trem otonom ini dapat diakses melalui situs <https://av.itb.ac.id>.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT INKA dan Riset Kecerdasan Buatan untuk kerja sama yang baik dalam pengembangan sistem otonomi untuk trem otonom. Apresiasi dan ucapan terima kasih juga disampaikan kepada anggota tim riset dan inovasi, yaitu Arief S. Rochman, Egi Hidayat, Yulyan Wahyu, Sigit Santosa, Augie Widyotriatmo, Dhimas Bintang K., M. Aria R. Pohan, Ari Wibowo, M. Aulia, Hilda Widyastuti, Handoko S., Thomas, Yosua S.A., Christophorus Deo P, Khansa, Dewi Nala, M. Hasan H., Yudi P., Fachry, Aiezka R., Christofel R.G., Fikki M. A., Evan R. T., dan Tita R., atas kontribusi dan kerja samanya dalam proyek riset dan inovasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kim, A. Ošep, dan L. Leal-Taixé, “EagerMot : 3D multi object tracking via sensor fusion,” dalam *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2021.
- [2] M. Elgendy, *Deep Learning for Vision Systems*. New York, USA: Manning, 2020.
- [3] F. Chollet, *Deep Learning with Python*. New York, USA: Manning, 2021.
- [4] A. Zhang, Z. C. Lipton, M. Li, dan S. J. Smola, *Dive into Deep Learning*, 2022.
- [5] C. Di Palma, V. Galdi, V. Calderaro, dan F. De Luca, “Driver assistance system for trams: smart tram in smart cities,” dalam *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Madrid, Spanyol, 2020.
- [6] K. Doherty, D. Fourie, dan J. Leonard, “Multimodal semantic SLAM with probabilistic data association,” dalam *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Kanada, 2019.
- [7] Y. Dong dkk., “A novel texture-less object oriented visual SLAM system,” dalam *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, pp. 1–14.
- [8] D. Frost, V. Prisacariu, dan D. Murray, “Recovering stable scale in monocular SLAM using object-supplemented bundle adjustment,” *IEEE Transaction on Robotics*, vol. 34, no. 3, 736–747, 2018.
- [9] J. Harb, N. Rébena, R. Chosidow, G. Roblin, R. Potarusov, dan H. Hajri, “FRSign: A large-scale traffic light dataset for autonomous trains,” *ArXiv preprint arXiv:2002.05665*, 2020.
- [10] H. Liu, *Robot Systems for Rail Transit Applications*. Elsevier, 2020.
- [11] S. Liu, *Engineering Autonomous Vehicle and Robots: The Dragonfly Modular Based Approach*. New York: Wiley-IEEE Press, 2020.
- [12] I. Rusli, B.R. Trilaksono, dan W. Adiprawita, “RoomSLAM: Simultaneous localization and mapping with objects and indoor layout structure,” dalam *IEEE Access*, vol. 8, Oktober 2020, pp. 196992–197004.
- [13] S. Raschka, Y. Liu, dan V. Mirjalili, *Machine Learning with Pytorch and ScikitLearn: Develop Machine Learning and Deep Learning Models with Python*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2022.
- [14] Siemens. *On the Way to an Autonomous Tram*. (2019). [Daring] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9d7d12df-a30c-43bd-a06d-bff6dfe96543/presentation-it-pautonome-tram-e.pdf>
- [15] Siemens. *Teaching trams to drive (On the Way to Smart and Autonomous Trams: A Siemens Mobility Research Project)*. (2019). [Daring] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bc2811c4-3d26-460d-9472-9372d5ce32d7/autonomous-tram.pdf>

- [16] Systra. *Automated and Autonomous Public Transport: Possibilities, Challenges and Technologies*. (2020). [Daring] https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated_and_autonomous_public_transport_2018.pdf
- [17] M. A. Pohan, B.R. Trilaksono, S.P. Santosa, dan A.S. Rohman, "Path planning algorithm using the hybridization of rapidly random tree and ant colony systems," *IEEE Access*, vol. 9, November 2021, pp. 153599–153615.
- [18] D. Parekh dkk., "A review on autonomous vehicles: Progress, methods, and challenges," *Electronics*, vol. 11, no. 14, pp. 2162. doi: [10.3390/electronics11142162](https://doi.org/10.3390/electronics11142162)
- [19] Z. Zhu dkk., "Deep learning for autonomous vehicle and pedestrian interaction safety," *Safety Science*, vol. 145, 2022, doi: [10.1016/j.ssci.2021.105479](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105479)
- [20] J. Ren dkk., "Applying deep learning for autonomous vehicles: A survey," dalam *4th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data*, Chengdu, Cina, 2021.
- [21] S. Liu, L. Li, J. Tang, S. Wu, dan J. -L Gaudiot, *Creating Autonomous Vehicle Systems*. New York: Springer Cham, 2020, doi: [10.1007/978-3-031-01805-3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-01805-3).