



ANALISIS PENERAPAN *DEEP LEARNING* PADA *EMBEDDED SYSTEM* UNTUK UAV SURVEILLANCE

Adi Murtopo^{1*}

¹Prodi Teknik Elektronika Pertahanan Akademi Militer
adimurtopo@nikelektronikahan.akmil.ac.id^{1*}

Ahmad Nur Ahsan^{2*}

²Prodi Teknik Elektronika Pertahanan, Akademi Militer
ahmadnur@nikelektronikahan.akmil.ac.id^{2*}

ABSTRAK

Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah mendorong transformasi sistem pengawasan modern pada berbagai sektor, termasuk keamanan, pertahanan, mitigasi bencana, dan pemantauan wilayah. Integrasi *deep learning* pada *embedded system* memungkinkan UAV tidak hanya berfungsi sebagai platform akuisisi data, tetapi juga sebagai sistem cerdas yang mampu melakukan analisis visual secara *real-time* langsung pada perangkat melalui konsep *edge computing*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance, meliputi perkembangan teknologi, keunggulan implementasi, tantangan teknis, serta peluang pengembangannya di masa depan. Penelitian menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan studi literatur. Data diperoleh dari jurnal ilmiah, prosiding konferensi, buku akademik, dan publikasi relevan periode 2020–2026. Analisis data dilakukan melalui reduksi data, kategorisasi tema, sintesis temuan, dan interpretasi kritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* pada *embedded system* mampu meningkatkan kemampuan deteksi objek secara otomatis, mempercepat respons sistem, meningkatkan efisiensi operasional, serta mengurangi ketergantungan terhadap server eksternal. Namun demikian, implementasi masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan kapasitas komputasi, konsumsi energi, kebutuhan optimasi model, dan keandalan sistem pada lingkungan dinamis. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi *deep learning* dan *embedded system* memiliki prospek yang sangat besar dalam pengembangan UAV surveillance modern, khususnya untuk mendukung sistem keamanan dan pertahanan berbasis teknologi cerdas.

Kata kunci: *Deep Learning, Embedded System, UAV Surveillance, Edge Computing, Artificial Intelligence.*

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF *DEEP LEARNING* ON *EMBEDDED SYSTEMS* FOR UAV SURVEILLANCE

ABSTRACT

The development of *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) technology has accelerated the transformation of modern surveillance systems across various sectors, including security, defense, disaster mitigation, and territorial monitoring. The integration of *deep learning* into *embedded systems* enables UAVs not only to function as data acquisition platforms but also as intelligent systems capable of performing *real-time* visual analysis directly on-device through the concept of *edge computing*. This study aims to analyze the application of *deep learning* on *embedded systems* for UAV surveillance, covering technological developments, implementation advantages, technical challenges, and future opportunities. This research employs a qualitative method using a literature review approach. Data were collected from scientific journals, conference proceedings, academic books, and relevant publications from 2020–2026. Data analysis was conducted through data

reduction, thematic categorization, synthesis of findings, and critical interpretation. The results indicate that implementing deep learning on embedded systems improves automatic object detection, accelerates system response, enhances operational efficiency, and reduces dependence on external servers. However, several challenges remain, including computational limitations, energy consumption, model optimization requirements, and system reliability in dynamic environments. This study concludes that the integration of deep learning and embedded systems has significant potential in advancing modern UAV surveillance, particularly for intelligent security and defense systems.

Keywords: Deep Learning, Embedded System, UAV Surveillance, Edge Computing, Artificial Intelligence.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dalam satu dekade terakhir telah memberikan dampak signifikan terhadap transformasi sistem pengawasan modern di berbagai sektor, baik sipil maupun militer. UAV dimanfaatkan secara luas dalam pemantauan wilayah, keamanan perbatasan, mitigasi bencana, pertanian presisi, pemetaan geospasial, hingga operasi pertahanan karena memiliki mobilitas tinggi, fleksibilitas misi, biaya operasional yang relatif efisien, serta kemampuan menjangkau area yang sulit diakses manusia secara langsung (Tang et al., 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa UAV telah berkembang dari sekadar platform terbang tanpa awak menjadi komponen strategis dalam ekosistem pengawasan berbasis teknologi.

Secara faktual, pada sebagian besar sistem pengawasan konvensional, UAV masih berfungsi utama sebagai platform akuisisi data visual melalui sensor kamera, sedangkan proses analisis citra umumnya dilakukan oleh operator manusia atau diproses pada server eksternal setelah data dikirim melalui jaringan komunikasi. Model operasi seperti ini masih banyak digunakan karena relatif sederhana dan mudah diintegrasikan dengan sistem komando yang telah ada. Namun demikian, pendekatan tersebut menimbulkan sejumlah keterbatasan, antara lain latensi komunikasi, kebutuhan bandwidth yang tinggi, ketergantungan pada kualitas jaringan, meningkatnya beban kerja operator, serta potensi human error dalam proses identifikasi objek atau pengambilan keputusan (Zhou et al., 2023). Dalam skenario pengawasan yang membutuhkan respons cepat,

keterlambatan beberapa detik saja dapat menurunkan efektivitas misi secara signifikan.

Secara normatif, sistem pengawasan UAV idealnya tidak hanya berfungsi sebagai alat pengumpul data, tetapi juga mampu melakukan analisis situasi secara mandiri, cepat, dan akurat langsung di lapangan. UAV modern seharusnya memiliki kemampuan mengenali objek, mengklasifikasikan ancaman, serta memberikan dukungan keputusan secara real-time tanpa bergantung sepenuhnya pada operator manusia atau infrastruktur komputasi jarak jauh. Dengan demikian, kebutuhan terhadap sistem pengawasan cerdas berbasis otonomi menjadi semakin penting seiring meningkatnya kompleksitas ancaman dan dinamika lingkungan operasi.

Seiring berkembangnya *Artificial Intelligence* (AI), khususnya *deep learning*, kemampuan sistem visual mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Algoritma seperti Convolutional Neural Network (CNN), YOLO, SSD, dan MobileNet terbukti mampu melakukan deteksi objek, klasifikasi citra, segmentasi visual, serta pengenalan pola secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi (Goodfellow et al., 2021). Dalam konteks UAV surveillance, teknologi ini memungkinkan wahana mengenali target seperti manusia, kendaraan, bangunan, jalur pergerakan, atau objek tertentu secara otomatis, sehingga mempercepat proses observasi dan meningkatkan kualitas informasi yang dihasilkan.

Di sisi lain, kemajuan teknologi *embedded system* membuka peluang implementasi model AI secara langsung pada perangkat UAV melalui konsep *edge computing*. Pada pendekatan ini, proses

inferensi dilakukan di sisi perangkat (*on-device processing*), sehingga data citra tidak perlu selalu dikirim ke cloud atau pusat komando untuk dianalisis. Mekanisme tersebut mampu menurunkan latensi, mengurangi konsumsi bandwidth, meningkatkan keamanan data, serta mempercepat respons sistem dalam situasi operasional yang kritis (Shi et al., 2021). Dengan kata lain, integrasi *embedded system* dan *deep learning* menjadi fondasi penting dalam pengembangan UAV cerdas generasi baru.

Meskipun demikian, secara faktual penerapan *deep learning* pada *embedded system* masih menghadapi berbagai tantangan teknis. Perangkat *embedded* umumnya memiliki keterbatasan pada kapasitas CPU/GPU, memori, ruang penyimpanan, serta suplai daya yang bergantung pada baterai UAV. Selain itu, model *deep learning* yang kompleks sering kali membutuhkan sumber daya komputasi besar, sehingga menimbulkan *trade-off* antara akurasi, kecepatan inferensi, dan efisiensi energi. Tantangan lainnya adalah menjaga stabilitas performa sistem pada kondisi lingkungan dinamis, seperti perubahan cahaya, cuaca buruk, getaran platform, dan objek berukuran kecil yang diamati dari ketinggian (Sze et al., 2020).

Secara normatif, sistem UAV berbasis *embedded AI* seharusnya dirancang dengan model yang ringan, efisien, adaptif, dan tetap memiliki performa tinggi pada berbagai kondisi operasional. Optimalisasi model melalui teknik *pruning*, *quantization*, *knowledge distillation*, serta pemanfaatan akselerator komputasi menjadi kebutuhan penting agar sistem mampu bekerja secara berkelanjutan di lapangan. Selain itu, integrasi antara perangkat keras, algoritma, dan sistem komunikasi perlu dibangun secara harmonis agar UAV dapat beroperasi secara andal dan aman.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas deteksi objek berbasis UAV dan edge AI, namun kajiannya masih tersebar pada fokus tertentu, seperti pengembangan algoritma, evaluasi perangkat keras, atau aplikasi spesifik pada sektor sipil. Masih terbatas penelitian

yang mengulas secara komprehensif keterkaitan antara *deep learning*, *embedded system*, dan kebutuhan UAV surveillance dalam perspektif sistem terintegrasi, khususnya yang relevan untuk lingkungan pertahanan modern. Kesenjangan inilah yang menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance secara menyeluruh, meliputi perkembangan teknologi, manfaat implementasi, tantangan teknis, serta peluang pengembangannya di masa depan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi kontribusi akademik maupun praktis dalam pengembangan sistem pengawasan cerdas yang adaptif, efisien, dan relevan terhadap kebutuhan keamanan nasional serta pertahanan modern.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perkembangan dan penerapan teknologi *deep learning* pada *embedded system* untuk mendukung sistem UAV surveillance?
2. Apa saja keunggulan dan tantangan teknis dalam implementasi *deep learning* pada *embedded system* untuk aplikasi pengawasan berbasis UAV?
3. Bagaimana peluang pengembangan penerapan *deep learning* pada *embedded system* dalam meningkatkan efektivitas sistem UAV surveillance, khususnya pada bidang keamanan dan pertahanan modern?

Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perkembangan dan penerapan teknologi *deep learning* pada *embedded system* untuk mendukung sistem UAV surveillance.
2. Mengidentifikasi keunggulan serta tantangan teknis dalam implementasi *deep learning* pada *embedded system*

pada aplikasi pengawasan berbasis UAV.

3. Menganalisis peluang pengembangan penerapan *deep learning* pada *embedded system* dalam meningkatkan efektivitas sistem UAV surveillance, khususnya pada bidang keamanan dan pertahanan modern.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis
 - a. Menambah khazanah ilmu pengetahuan di bidang elektronika, kecerdasan buatan, *embedded system*, dan teknologi UAV surveillance.
 - b. Menjadi referensi akademik bagi peneliti, dosen, mahasiswa, maupun praktisi yang ingin mengkaji penerapan *deep learning* pada sistem pengawasan berbasis UAV.
 - c. Memberikan kontribusi konseptual mengenai integrasi *deep learning* dan *embedded system* dalam pengembangan sistem sensor cerdas modern.
2. Manfaat Praktis
 - a. Bagi institusi pertahanan dan keamanan, hasil penelitian dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan sistem pengawasan cerdas berbasis UAV untuk mendukung pemantauan wilayah, keamanan perbatasan, dan operasi taktis.
 - b. Bagi industri teknologi, penelitian ini dapat menjadi acuan dalam merancang perangkat *embedded AI* yang efisien dan adaptif untuk kebutuhan UAV modern.
 - c. Bagi pengembang sistem, hasil kajian ini dapat memberikan gambaran mengenai keunggulan, tantangan, serta strategi implementasi *deep learning* pada perangkat dengan sumber daya terbatas.
 - d. Bagi masyarakat umum, pengembangan UAV surveillance berbasis AI berpotensi meningkatkan efektivitas pemantauan bencana,

pengawasan lingkungan, serta layanan publik lainnya.

3. Manfaat Strategis
 - a. Mendorong kemandirian teknologi nasional dalam pengembangan UAV cerdas berbasis kecerdasan buatan.
 - b. Meningkatkan kesiapan pertahanan modern melalui pemanfaatan teknologi surveillance yang lebih cepat, akurat, dan efisien.
 - c. Membuka peluang penelitian lanjutan terkait *autonomous drone*, *multi-sensor intelligence*, dan sistem pengawasan berbasis *edge computing*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif dengan pendekatan studi literatur (*literature review*). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada analisis konseptual dan komprehensif mengenai penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance, meliputi perkembangan teknologi, manfaat implementasi, tantangan teknis, serta peluang pengembangannya di masa depan. Metode kualitatif digunakan untuk memahami fenomena teknologi melalui penelaahan berbagai sumber tertulis yang relevan, sehingga mampu menghasilkan interpretasi yang mendalam dan sistematis terhadap topik penelitian.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal nasional dan internasional, prosiding konferensi, buku akademik, laporan penelitian, *white paper*, serta dokumen resmi yang berkaitan dengan *deep learning*, *embedded system*, UAV, computer vision, dan *edge computing*. Referensi yang digunakan diprioritaskan berasal dari publikasi tahun 2020–2026 agar sesuai dengan perkembangan teknologi terkini dan memiliki relevansi yang tinggi terhadap permasalahan penelitian.

Pengumpulan data dilakukan melalui teknik dokumentasi dan penelusuran literatur dengan memanfaatkan berbagai basis data ilmiah dan repositori digital, seperti Google

Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, serta Garuda/SINTA. Proses pencarian referensi menggunakan beberapa kata kunci, antara lain *Deep Learning for UAV Surveillance*, *Embedded System for Object Detection*, *AI in UAV System*, *Edge Computing for Drone*, dan *Smart Sensor UAV*. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria relevansi topik, kredibilitas sumber, kebaruan publikasi, serta kontribusi ilmiah terhadap penelitian.

Teknik analisis data dilakukan dengan menggunakan analisis isi (*content analysis*) dan analisis deskriptif kualitatif. Tahap pertama adalah reduksi data, yaitu menyeleksi referensi yang paling relevan dengan fokus penelitian dan mengeliminasi data yang tidak sesuai. Tahap kedua adalah kategorisasi data, yaitu mengelompokkan temuan ke dalam beberapa tema utama, seperti perkembangan UAV surveillance, implementasi *deep learning*, *embedded system* dan *edge computing*, keunggulan sistem, tantangan teknis, serta peluang penerapan pada bidang keamanan dan pertahanan. Tahap ketiga adalah sintesis data, yaitu membandingkan hasil penelitian terdahulu, menemukan pola hubungan antar konsep, serta mengidentifikasi gap penelitian. Tahap keempat adalah interpretasi data, yaitu menafsirkan hasil sintesis secara kritis untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan, yaitu merumuskan temuan utama penelitian secara sistematis dan objektif.

Untuk menjaga validitas data, penelitian ini menggunakan triangulasi sumber, yaitu membandingkan informasi yang diperoleh dari berbagai referensi ilmiah yang berbeda. Pendekatan ini dilakukan agar data yang digunakan memiliki tingkat konsistensi, objektivitas, dan keandalan yang tinggi. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance serta menjadi dasar rekomendasi pengembangan sistem pengawasan modern di masa mendatang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, hasil kajian literatur menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance berkembang pesat dan memiliki prospek besar dalam meningkatkan efektivitas sistem pengawasan modern. Pembahasan berikut disusun sesuai dengan tiga rumusan masalah penelitian.

Perkembangan dan Penerapan *Deep Learning* pada *Embedded System* untuk UAV Surveillance.

Perkembangan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang dipadukan dengan kecerdasan buatan telah mengubah paradigma sistem pengawasan dari sistem pasif menjadi sistem cerdas yang mampu melakukan analisis secara mandiri. Jika sebelumnya UAV hanya berfungsi sebagai platform pengambil gambar atau video, saat ini UAV telah berkembang menjadi perangkat otonom yang dapat mengenali objek, melacak target, dan memberikan peringatan dini secara otomatis.

Penerapan *deep learning* pada UAV umumnya memanfaatkan algoritma seperti *Convolutional Neural Network* (CNN), *You Only Look Once* (YOLO), *Single Shot Detector* (SSD), dan *MobileNet* untuk mendeteksi objek dari citra udara. Model-model tersebut digunakan karena mampu memproses data visual dengan tingkat akurasi tinggi dan kecepatan inferensi yang baik. Menurut Tang et al. (2024), *deep learning* telah menjadi pendekatan dominan dalam object detection berbasis UAV karena memiliki performa lebih unggul dibanding metode pengolahan citra tradisional.

Dalam implementasinya, model *deep learning* dapat dijalankan pada *embedded system* yang dipasang langsung pada UAV, seperti NVIDIA Jetson Nano, Jetson Xavier, Raspberry Pi dengan AI accelerator, FPGA, atau perangkat sejenis. Integrasi ini memungkinkan proses inferensi dilakukan langsung pada perangkat (*on-device processing*), sehingga UAV mampu melakukan deteksi objek

secara *real-time* tanpa harus selalu mengirim data ke server pusat. Hal ini sangat penting dalam misi pengawasan yang membutuhkan respons cepat.

Penelitian Zhang et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan YOLOv8 pada perangkat *edge* mampu memberikan performa *real-time detection* dengan akurasi yang baik pada skenario pengawasan udara. Sementara itu, Zhou et al. (2023) menjelaskan bahwa penerapan *edge computing* pada UAV surveillance dapat menurunkan latensi komunikasi dan meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan.

Di Indonesia, pemanfaatan UAV juga semakin berkembang dalam bidang keamanan, kebencanaan, dan pemetaan wilayah. Menurut Indri dan Murtopo (2025), integrasi kecerdasan buatan pada drone militer berpotensi meningkatkan kemampuan pengintaian, pengawasan perbatasan, serta efektivitas operasi pertahanan nasional. Hal ini menunjukkan bahwa tren global pengembangan UAV cerdas juga relevan dengan kebutuhan strategis di Indonesia.

Berdasarkan hasil kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa perkembangan *deep learning* pada *embedded system* telah mendorong transformasi UAV menjadi sistem surveillance yang lebih adaptif, cepat, dan cerdas.

Keunggulan dan Tantangan Teknis Implementasi Deep Learning pada Embedded System untuk UAV Surveillance.

a. Keunggulan Implementasi.

Salah satu keunggulan utama penerapan *deep learning* pada *embedded system* adalah kemampuan deteksi objek secara otomatis. Sistem dapat mengenali target seperti manusia, kendaraan, bangunan, maupun aktivitas tertentu tanpa harus dianalisis terus-menerus oleh operator manusia. Hal ini dapat mengurangi beban kerja personel serta meningkatkan efisiensi operasi pengawasan.

Keunggulan berikutnya adalah penerapan konsep *edge computing*, yaitu pemrosesan data dilakukan langsung pada UAV. Dengan demikian, latensi akibat

pengiriman data ke cloud dapat dikurangi secara signifikan. Menurut Shi et al. (2021), *edge computing* memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan efisien, terutama pada sistem yang membutuhkan *respons real-time*.

Selain itu, penggunaan *embedded AI* juga memberikan keuntungan dari sisi keamanan data. Data sensitif hasil pengawasan tidak harus selalu dikirim ke server eksternal, sehingga risiko intersepsi data dapat diminimalkan. Dalam konteks pertahanan, aspek ini menjadi sangat penting karena berkaitan dengan kerahasiaan informasi operasi.

Keunggulan lain adalah skalabilitas sistem, yaitu teknologi ini dapat diterapkan pada berbagai sektor, seperti keamanan wilayah, pemantauan bencana, pengawasan lingkungan, pertanian cerdas, hingga operasi militer. Menurut Rahmaniar dan Hernawan (2022), sistem visual berbasis *deep learning* pada *embedded platform* memiliki fleksibilitas tinggi untuk berbagai aplikasi lapangan.

b. Tantangan Teknis.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, implementasi *deep learning* pada *embedded system* juga menghadapi beberapa tantangan. Tantangan pertama adalah keterbatasan sumber daya komputasi. Perangkat *embedded* umumnya memiliki CPU/GPU, RAM, dan kapasitas penyimpanan yang jauh lebih kecil dibanding komputer server. Akibatnya, model *deep learning* berukuran besar sulit dijalankan secara optimal.

Menurut Sze et al. (2020), model *deep neural network* modern membutuhkan komputasi tinggi, sehingga perlu dilakukan optimasi agar sesuai untuk perangkat *edge*. Beberapa teknik yang umum digunakan adalah model *pruning*, *quantization*, *knowledge distillation*, dan penggunaan arsitektur ringan seperti MobileNet atau Tiny-YOLO.

Tantangan kedua adalah konsumsi energi. UAV bergantung pada baterai, sehingga proses inferensi AI yang berat dapat mengurangi waktu terbang. Semakin tinggi beban komputasi, semakin besar pula konsumsi daya sistem. Oleh karena

itu, efisiensi energi menjadi aspek penting dalam desain UAV cerdas.

Tantangan ketiga adalah robustness sistem terhadap lingkungan dinamis. Kinerja model dapat menurun pada kondisi cahaya rendah, hujan, kabut, getaran platform, atau ketika objek berukuran kecil diamati dari ketinggian tinggi. Menurut Zhu et al. (2022), object detection berbasis UAV masih menghadapi kesulitan dalam skenario citra kompleks dan perubahan lingkungan ekstrem.

Di Indonesia, tantangan geografis seperti wilayah kepulauan, hutan lebat, pegunungan, dan kondisi cuaca tropis juga menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan dalam implementasi UAV surveillance berbasis AI.

Berdasarkan hasil kajian, keberhasilan implementasi *deep learning* pada *embedded system* sangat bergantung pada keseimbangan antara akurasi model, kecepatan inferensi, efisiensi energi, dan keandalan sistem di lapangan.

Peluang Pengembangan dalam Meningkatkan Efektivitas UAV Surveillance pada Bidang Keamanan dan Pertahanan Modern.

Hasil studi literatur menunjukkan bahwa peluang pengembangan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance masih sangat luas. Salah satu arah pengembangan utama adalah penggunaan multi-sensor fusion, yaitu penggabungan data dari kamera RGB, kamera termal, LiDAR, radar mini, dan GPS untuk meningkatkan akurasi deteksi target. Dengan pendekatan ini, UAV dapat bekerja lebih baik pada siang maupun malam hari serta pada kondisi cuaca yang kurang ideal.

Peluang berikutnya adalah pengembangan autonomous UAV, yaitu UAV yang mampu merencanakan rute patroli, mendeteksi ancaman, melacak target, dan kembali ke pangkalan secara mandiri. Teknologi ini sangat potensial untuk patroli perbatasan, pengawasan laut, dan pengintaian wilayah rawan konflik.

Dalam konteks pertahanan modern, UAV berbasis *embedded AI* dapat digunakan sebagai bagian dari sistem

Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR). Menurut Valavanis dan Vachtsevanos (2021), UAV merupakan elemen penting dalam ISR modern karena mampu menyediakan data situasional secara cepat dan akurat.

Di Indonesia, pengembangan UAV cerdas berpotensi mendukung pengawasan wilayah perbatasan darat dan laut yang sangat luas. Selain itu, sistem ini dapat dimanfaatkan untuk pengamanan objek vital nasional, penanggulangan bencana, pencarian dan pertolongan (SAR), serta pemantauan kawasan strategis. Menurut Indri dan Murtopo (2025), integrasi AI pada drone militer dapat meningkatkan kecepatan deteksi ancaman dan efektivitas pengambilan keputusan dalam operasi TNI.

Peluang lainnya adalah pengembangan swarm UAV, yaitu beberapa UAV yang bekerja secara kolaboratif. Dengan teknologi ini, area pengawasan yang luas dapat dipantau secara simultan dan lebih efisien dibanding satu platform tunggal.

Namun demikian, pengembangan ke depan juga perlu memperhatikan aspek *cybersecurity*, regulasi penggunaan UAV, etika AI, serta kemandirian industri nasional agar teknologi yang dihasilkan tidak bergantung sepenuhnya pada pihak luar.

Secara keseluruhan, penerapan *deep learning* pada *embedded system* memiliki peluang besar untuk meningkatkan efektivitas UAV surveillance, baik pada sektor sipil maupun pertahanan, melalui sistem yang lebih cerdas, responsif, dan adaptif terhadap dinamika ancaman modern.

Sintesis Pembahasan.

Berdasarkan ketiga rumusan masalah yang telah dianalisis, dapat dipahami bahwa perkembangan teknologi menunjukkan integrasi *deep learning* dan *embedded system* telah mendorong transformasi UAV dari sekadar platform akuisisi data menjadi sistem surveillance cerdas yang mampu melakukan analisis visual secara mandiri dan *real-time*.

Implementasi teknologi ini memberikan berbagai keunggulan, antara

lain kemampuan deteksi objek secara otomatis, respons sistem yang lebih cepat, peningkatan efisiensi operasional, serta keamanan data yang lebih baik melalui pemrosesan lokal pada perangkat. Namun demikian, penerapannya masih menghadapi sejumlah tantangan utama, terutama terkait keterbatasan kapasitas komputasi perangkat *embedded*, konsumsi energi yang memengaruhi durasi operasi UAV, serta kebutuhan menjaga keandalan sistem pada lingkungan yang dinamis dan kompleks.

Di sisi lain, peluang pengembangan teknologi ini sangat besar, khususnya untuk mendukung bidang pertahanan, keamanan wilayah, patroli perbatasan, mitigasi bencana, dan penguatan sistem pengawasan nasional berbasis kecerdasan buatan. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penerapan *deep learning* pada *embedded system* merupakan arah strategis dan prospektif dalam pengembangan UAV surveillance masa depan yang lebih adaptif, efisien, dan responsif terhadap kebutuhan operasi modern.

SIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan *deep learning* pada *embedded system* untuk UAV surveillance menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dan menjadi salah satu inovasi strategis dalam sistem pengawasan modern. Integrasi kedua teknologi tersebut telah mengubah fungsi UAV dari sekadar alat pengambil data visual menjadi platform cerdas yang mampu melakukan deteksi objek, analisis situasi, dan pengambilan keputusan awal secara real-time di sisi perangkat. Keunggulan utama implementasi teknologi ini terletak pada kemampuan deteksi otomatis, peningkatan kecepatan respons, efisiensi operasional, serta pengurangan ketergantungan terhadap komunikasi data ke server eksternal melalui konsep *edge computing*. Selain itu, aspek keamanan data menjadi lebih baik karena proses analisis dilakukan secara lokal pada perangkat UAV. Namun demikian,

implementasi *deep learning* pada *embedded system* masih menghadapi beberapa tantangan penting, seperti keterbatasan kapasitas komputasi, konsumsi energi yang memengaruhi waktu operasi UAV, kebutuhan optimasi model agar ringan namun tetap akurat, serta keandalan sistem dalam menghadapi kondisi lingkungan yang dinamis dan kompleks. Secara keseluruhan, peluang pengembangan teknologi ini sangat besar, terutama untuk mendukung sistem pengawasan pada bidang pertahanan, keamanan wilayah, patroli perbatasan, mitigasi bencana, dan berbagai kebutuhan strategis lainnya. Oleh karena itu, *deep learning* pada *embedded system* dapat dipandang sebagai arah pengembangan utama dalam mewujudkan UAV surveillance masa depan yang lebih adaptif, efisien, dan cerdas.

Saran

Berdasarkan kesimpulan penelitian, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan model ringan dan efisien perlu terus dilakukan agar algoritma *deep learning* dapat berjalan optimal pada perangkat *embedded* dengan sumber daya terbatas.
2. Integrasi multi-sensor seperti kamera termal, LiDAR, radar mini, dan GPS perlu dikembangkan untuk meningkatkan akurasi deteksi dan keandalan sistem pada berbagai kondisi lingkungan.
3. Peningkatan keamanan siber sistem UAV menjadi aspek penting yang harus diperhatikan untuk mencegah gangguan, intersepsi data, atau serangan terhadap sistem berbasis AI.
4. Penguatan kemandirian teknologi nasional perlu didorong melalui kolaborasi antara perguruan tinggi, industri, dan institusi pertahanan agar Indonesia mampu mengembangkan UAV cerdas secara mandiri sesuai kebutuhan strategis nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2021). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Sage Publications.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2021). *Deep learning*. MIT Press.
- Indri, E., & Murtopo, A. (2025). Integrasi kecerdasan buatan dalam drone militer: Analisis teknologi dan implementasi pada TNI Angkatan Darat. *Jurnal Elektrosista*, 12(2), 123–130.
- Kirac, E., & Özbek, S. (2024). Deep learning based object detection with unmanned aerial vehicle equipped with embedded system. *Journal of Aviation*, 8(1), 35–44. <https://doi.org/10.30518/jav.1369996>
- Li, H., Chen, Y., & Zhao, M. (2022). Intelligent UAV visual analytics using deep learning methods. *Applied Artificial Intelligence*, 36(4), 221–239. <https://doi.org/10.1080/08839514.2022.2034567>
- Madasamy, K., Subramaniam, U., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., & Blaabjerg, F. (2021). Embedded system-based object surveillance detection system with small drone using deep YOLO. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2021(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13640-021-00574-2>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2020). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (4th ed.). Sage Publications.
- Rahmaniar, W., & Hernawan, A. (2022). Implementasi computer vision berbasis embedded system untuk pengawasan area menggunakan UAV. *Jurnal Teknologi Informatika dan Komputer*, 7(2), 45–53.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges for intelligent systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(4), 2212–2225. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3031234>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sze, V., Chen, Y., Yang, T., & Emer, J. (2020). Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey. *Proceedings of the IEEE*, 108(10), 1657–1687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2995530>
- Tang, G., Ni, J., Zhao, Y., & Gu, Y. (2024). A survey of object detection for UAVs based on deep learning. *Remote Sensing*, 16(1), 149. <https://doi.org/10.3390/rs16010149>
- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2021). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>
- Zhang, X., Wang, Y., & Li, H. (2024). Real-time detection sensor for UAV using YOLOv8 algorithm. *Sensors*, 25(19), 6246. <https://doi.org/10.3390/s25196246>
- Zhou, Y., Wang, S., & Liu, J. (2023). Edge computing based intelligent UAV surveillance system using deep learning. *IEEE Access*, 11, 34567–34579. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267891>
- Zhu, H., Chen, Y., & Wang, L. (2022). Deep learning-based object detection for unmanned aerial vehicle applications: A review. *Applied Sciences*, 12(9), 4521. <https://doi.org/10.3390/app12094521>
- Wolf, W. (2020). *Computers as components: Principles of embedded computing system design* (4th ed.). Morgan Kaufmann.