

**RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS
YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN
PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA**

TUGAS AKHIR

Oleh :

M. ALAMSYAH
NIT. 56192110014



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA BANDAR UDARA
PROGRAM SARJANA TERAPAN
POLITEKNIK PENERBANGAN PALEMBANG
JULI 2025**

**RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS
YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN
PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA**

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat lulus pendidikan
Program Studi Sarjana Terapan
Teknologi Rekayasa Bandara

Oleh:

M. ALAMSYAH
NIT. 56192110014



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA BANDAR UDARA
PROGRAM SARJANA TERAPAN
POLITEKNIK PENERBANGAN PALEMBANG**

JULI 2025

ABSTRAK

RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA

Oleh

M. ALAMSYAH

NIT: 56192110014

Program Studi Teknologi Rekayasa Bandara

Program Sarjana Terapan

Keselamatan penerbangan merupakan pilar utama dalam industri aviasi yang sangat bergantung pada kondisi fisik landasan pacu (*runway*). Inspeksi manual, yang saat ini menjadi standar operasional untuk mendeteksi *Foreign Object Debris* (FOD) dan kerusakan perkerasan, memiliki keterbatasan signifikan dalam hal efisiensi, akurasi objektif, dan keselamatan personel, terutama dalam kondisi visibilitas rendah atau cuaca buruk. Ketergantungan pada faktor manusia juga meningkatkan potensi inkonsistensi dan kesalahan yang dapat membahayakan operasi penerbangan. Menjawab tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji sebuah prototipe robot inspeksi *runway* yang cerdas dan otonom, yang mampu meningkatkan efektivitas dan efisiensi kegiatan inspeksi sebagai penunjang pemeliharaan preventif di sisi udara bandar udara. Penelitian ini mengadopsi metodologi *Research and Development* (R&D) dengan model Borg & Gall sampai tahap ke tujuh, mulai dari analisis potensi dan masalah hingga uji coba produk. Tahap awal melibatkan pengumpulan data kualitatif dan kuantitatif melalui observasi langsung kegiatan inspeksi di Bandar Udara Radin Inten II Lampung, wawancara mendalam dengan teknisi, dan analisis SWOT untuk memetakan kebutuhan operasional secara presisi. Berdasarkan analisis tersebut, dilakukan perancangan sistem yang mengintegrasikan tiga teknologi utama yaitu *Computer Vision*, *Robotics*, dan *Internet of Things* (IoT). Sistem perangkat keras dibangun di atas sasis robot yang ditenagai motor DC, dilengkapi dengan unit pemrosesan ganda yang terdiri dari Mini PC untuk komputasi AI dan mikrokontroler ESP32 untuk kendali gerak serta komunikasi nirkabel. Untuk komponen kecerdasan buatan, dikembangkan sebuah model deteksi objek menggunakan algoritma *You Only Look Once* versi 11 (YOLOv11) yang dilatih pada *dataset* kustom berisi 1000 gambar yang mencakup empat jenis FOD dan tiga jenis kerusakan perkerasan. Validasi sistem dilakukan melalui serangkaian pengujian multi-aspek, meliputi uji akurasi model AI, uji fungsionalitas perangkat

keras, uji sistem terintegrasi, dan uji kepuasan pengguna yang melibatkan para ahli di bidangnya. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan pengembangan prototipe yang sepenuhnya fungsional, yang divalidasi dengan tingkat kepuasan pengguna ahli mencapai 95%. Secara fungsional, platform robot menunjukkan kinerja yang unggul dengan mobilitas yang stabil pada kecepatan $\sim 1,0$ m/s dan efisiensi daya yang sangat tinggi, memungkinkan estimasi waktu operasi hingga 25 jam dalam sekali pengisian daya. Dari sisi kecerdasan buatan, model deteksi objek yang diimplementasikan terbukti mampu mengenali berbagai jenis FOD dan kerusakan, dengan mencapai nilai *mean Average Precision* (mAP@0.5) sebesar 0.570, *Precision* 79,82%, dan *Recall* 88,76% pada data validasi. Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi adanya tantangan kritis berupa "kesenjangan domain" (*domain shift*) antara data latih yang terkontrol dan kondisi lapangan yang dinamis, yang menggarisbawahi bahwa akurasi model di dunia nyata sangat bergantung pada kualitas dan kuantitas *dataset* pelatihan. Penelitian ini berhasil membuktikan kelayakan konsep (*proof-of-concept*) dari sistem robotik untuk inspeksi *runway*, yang secara efektif dapat meningkatkan efisiensi dan keselamatan bandara. Implikasinya adalah otomatisasi inspeksi merupakan solusi yang sangat menjanjikan, dengan kesimpulan bahwa pengembangan di masa depan harus berfokus pada pendekatan *data-centric* dengan memperkaya *dataset* secara masif untuk mencapai tingkat keandalan AI yang diperlukan dalam lingkungan operasional yang kritis.

Kata kunci: *Convolutional Neural Network, Foreign Object Debris, Image Processing, Inspeksi runway, Internet of Things.*

ABSTRACT

DESIGNING A YOLOV11-BASED RUNWAY INSPECTION ROBOT TO SUPPORT PREVENTIVE MAINTENANCE OF AIRPORT AIRSIDE FACILITIES

By

M. ALAMSYAH

NIT: 56192110014

Airport Engineering Technology Study Program

Applied Bachelor Program

Aviation safety is a key pillar in the aviation industry, which is highly dependent on the physical condition of runways. Manual inspections, which are currently the standard operating procedure for detecting Foreign Object Debris (FOD) and pavement damage, have significant limitations in terms of efficiency, objective accuracy, and personnel safety, especially in low visibility or bad weather conditions. Reliance on human factors also increases the potential for inconsistencies and errors that could endanger aviation operations. To address these challenges, this research aims to design, build, and test a prototype of an intelligent and autonomous runway inspection robot capable of enhancing the effectiveness and efficiency of inspection activities as a support for preventive maintenance on the airside of airports. This research adopts a Research and Development (R&D) methodology based on the Borg & Gall model up to the seventh stage, from potential and problem analysis to product testing. The initial stage involves collecting qualitative and quantitative data through direct observation of inspection activities at Radin Inten II Airport in Lampung, in-depth interviews with technicians, and SWOT analysis to precisely map operational needs. Based on this analysis, a system design was developed integrating three core technologies: Computer Vision, Robotics, and the Internet of Things (IoT). The hardware system is built on a robot chassis powered by DC motors, equipped with a dual-processing unit comprising a Mini PC for AI computing and an ESP32 microcontroller for motion control and wireless communication. For the artificial intelligence component, an object detection model was developed using the You Only Look Once version 11 (YOLOv11) algorithm, trained on a custom dataset containing 1,000 images covering four types of FOD and three types of pavement damage. System validation was conducted through a series of multi-aspect tests, including AI model accuracy tests, hardware functionality tests, integrated system tests, and user satisfaction tests involving experts in the field. The research results

demonstrate the successful development of a fully functional prototype, validated with an expert user satisfaction rate of 95%. Functionally, the robot platform exhibits superior performance with stable mobility at a speed of ~1.0 m/s and very high power efficiency, enabling an estimated operating time of up to 25 hours on a single charge. From an artificial intelligence perspective, the implemented object detection model proved capable of recognising various types of FOD and damage, achieving a mean mAP@0.5 (mAP@0.5) of 0.570, Precision 79.82%, and Recall 88.76% on validation data. However, this study also identified a critical challenge in the form of a 'domain shift' between controlled training data and dynamic field conditions, highlighting that the accuracy of the model in the real world is highly dependent on the quality and quantity of the training dataset. This study successfully demonstrated the proof-of-concept of a robotic system for runway inspection, which can effectively enhance airport efficiency and safety. The implication is that automated inspection is a highly promising solution, with the conclusion that future development should focus on a data-centric approach by massively enriching the dataset to achieve the required level of AI reliability in critical operational environments.

Keywords: Convolutional Neural network, Foreign Object Debris, Image Processing, Internet of Things, Runway Inspection.

PENGESAHAN PEMBIMBING

Tugas Akhir : “RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA” telah diperiksa dan disetujui sebagai salah satu syarat lulus pendidikan Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Bandar Udara Angkatan ke-2, Politeknik Penerbangan Palembang – Palembang.



Nama : M. ALAMSYAH
NIT : 56192110014

PEMBIMBING I

Ir. DIRESTU AMALIA, S.T., MS.ASM. Dr. BAMBANG SETIAWAN, S.Kom., M.T.

Penata Tk.1 (III/d)

NIP. 19831213 201012 2 003

PEMBIMBING II

Pembina Tk.1 (IV/b)

NIP. 19800305 200502 1 001

KETUA PROGRAM STUDI

Ir. M. INDRA MARTADINATA, S.S.T., M.Si.

Pembina (IV/a)

NIP. 19810306 200212 1 001

PENGESAHAN PENGUJI

Tugas Akhir : “RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Tugas Akhir Program Studi Teknologi Rekayasa Bandar Udara Program Studi Sarjana Terapan Angkatan ke-2, Politeknik Penerbangan Palembang - Palembang. Tugas akhir ini telah dinyatakan LULUS Program Sarjana pada tanggal 15 Juli 2025.

KETUA



Dr. Capt. AHMAD HARIRI, S.T., S.Si.T., M.Si

Pembina Tk.1 (IV/b)
NIP. 19700203 199503 1 001

SEKRETARIS



Ir. DIRESTU AMALIA, S.T., MS.ASM.

Penata Tk.1 (III/d)
NIP. 19831213 201012 2 003

ANGGOTA



MINULYA ESKA NUGRAHA, M.Pd.

Penata Muda Tk.1 (III/b)
NIP. 19880308 202012 1 006

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : M. Alamsyah

NIT : 56192110014

Program Studi : Teknologi Rekayasa Bandar Udara Program Sarjana Terapan

Menyatakan bahwa Tugas Akhir berjudul “RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA” merupakan karya asli saya bukan merupakan hasil plagiarisme.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya, dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar akademik dari Politeknik Penerbangan Palembang.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Palembang, Juli 2025
Yang Membuat Pernyataan



M. Alamsyah
NIT. 56192110014

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

Tugas Akhir Program Studi Sarjana Terapan yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Politeknik Penerbangan Palembang, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Politeknik Penerbangan Palembang. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin pengarang dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tugas Akhir ini dapat ditulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Alamsyah, M. (2025): RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA, Tugas Akhir Program Diploma IV, Politeknik Penerbangan Palembang.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh Tugas Akhir haruslah seizin Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Bandar Udara Program Sarjana Terapan, Politeknik Penerbangan Palembang.

Dipersembahkan kepada
Ayahanda Asnawi, Ibunda Hetiana dan Ibunda Elma Wati

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Segala puji bagi Allah Subhanahu wa Ta'ala, Tuhan Yang Maha Esa, yang dengan rahmat dan pertolongan-Nya, penulis diberikan kemudahan dalam menyusun dan menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi wa Sallam, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya hingga akhir zaman.

Tugas Akhir yang berjudul “RANCANG BANGUN ROBOT INSPEKSI *RUNWAY* BERBASIS YOLOV11 SEBAGAI PENUNJANG PEMELIHARAAN PREVENTIF *AIRSIDE* BANDAR UDARA” ini disusun guna memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Bandar Udara Angkatan 2, Politeknik Penerbangan Palembang.

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, doa, serta dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa syukur, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, yang telah melimpahkan kemudahan dan petunjuk dalam setiap langkah penyusunan karya ini.
2. Bapak DR. Capt. Ahmad Hariri, S.T., S.Si.T., M.Si., selaku Direktur Politeknik Penerbangan Palembang.
3. Bapak Ir. M. Indra Martadinata, S.S.T., M.Si., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Bandar Udara, Politeknik Penerbangan Palembang.
4. Ibu Ir. Direstu Amalia, S.T., MS. ASM, dan Bapak Dr. Bambang Setiawan, S.Kom., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
5. Bapak/Ibu Dosen, staf administrasi, staf pengajar, serta teknisi Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Bandar Udara, yang telah

membimbing dan membantu dalam proses perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini.

6. Kedua orang tua, kakak, dan adik tercinta, yang selalu memberikan doa, dukungan, dan semangat yang tiada henti.
7. Rekan kepenulisan dan kolaborator proyek, serta *co-reader*, Nabilah Hasna Arinda, atas dukungan dan masukannya.
8. Teman-teman terdekat, yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan laporan ini.
9. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan membimbing hingga laporan ini selesai.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki kekurangan, baik dalam isi maupun penyusunannya. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menerima kritik dan saran yang membangun demi perbaikan karya ini di masa mendatang.

Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya. Semoga segala ilmu yang telah diberikan oleh para pendidik menjadi amal jariyah yang berpahala di sisi Allah Subhanahu wa Ta'ala

Palembang, 10 Juli 2025
Yang Membuat Pernyataan



M. Alamsyah
NIT. 56192110014

DAFTAR ISI

COVER	I
COVER	II
ABSTRAK	III
<i>ABSTRACT</i>	V
PENGESAHAN PEMBIMBING	VII
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	VIII
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	IX
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	X
KATA PENGANTAR	XII
DAFTAR ISI	XIV
DAFTAR GAMBAR	XVII
DAFTAR TABEL	XIX
DAFTAR LAMPIRAN	XXI
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG	XXII
BAB I PENDAHULUAN	23
A. Latar Belakang	23
B. Perumusan Masalah	26
C. Tujuan Penelitian	26
D. Manfaat	26
1. Manfaat Teknologi dalam Industri Penerbangan	26
2. Manfaat Keselamatan Penerbangan	26
3. Manfaat Lingkungan Bandar Udara	26
4. Manfaat Ekonomi	27
E. Batasan Masalah	27
F. Sistematika Penulisan	27
BAB II	29
A. Deskripsi Teoritik	29
1. Transportasi Udara dan Keselamatan Penerbangan	29
2. <i>Runway</i> dan Tantangan Pemeliharaannya	30
3. Teknologi Inspeksi <i>Runway</i>	35
4. Robotika dan Sistem Kendali Robot Inspeksi <i>Runway</i>	42

5.	Integrasi <i>Internet of Things</i> (IoT) dalam Pemantauan dan Pengelolaan Data Inspeksi.....	43
6.	Penerapan <i>Computer Vision</i> dan YOLOv11 dalam Deteksi Kerusakan <i>Runway</i>	45
7.	Konsep Dasar Rancang Bangun.....	47
B.	Hasil Penelitian Yang Relevan	49
BAB III		56
A.	Metode Penelitian.....	56
B.	Prosedur Penelitian.....	56
1.	Potensi dan Masalah.....	57
2.	Pengumpulan Data dan Informasi	58
3.	Desain Produk	62
4.	Validasi Desain	62
5.	Revisi Desain	63
6.	Pembuatan Alat	63
7.	Uji Coba Produk.....	63
C.	Teknik Analisis Data.....	67
D.	Jadwal Pelaksanaan	69
E.	Rancangan Anggaran Biaya (RAB).....	70
F.	Tahap Perancangan	71
BAB IV		73
A.	Hasil	73
1.	Potensi dan Masalah.....	73
2.	Pengumpulan Data dan Informasi	76
3.	Desain Produk	81
4.	Validasi Desain	87
5.	Revisi Desain	91
6.	Pembuatan Alat	93
7.	Uji Coba Produk.....	107
B.	Pembahasan.....	147
1.	Hasil Pengujian Prototipe.....	147
2.	Perbandingan Sistemik Robot Inspeksi <i>Runway</i> dan Manual.....	149
3.	Perbandingan Kinerja Robot Inspeksi <i>Runway</i> dan Manual.....	150
BAB V.....		153

A. Kesimpulan	153
B. Saran.....	153
Daftar Pustaka	155
LAMPIRAN.....	164

DAFTAR GAMBAR

Gambar III. 1 Langkah-langkah Research and Development yang digunakan	57
Gambar IV. 1 Kegiatan Observasi Lapangan di Dampingi Teknisi Bandar Udara Radin Inten II Lampung	76
Gambar IV. 2 Kegiatan Wawancara	80
Gambar IV. 3 Alur Cara Kerja Alat	85
Gambar IV. 4 Kegiatan Validasi Desain	88
Gambar IV. 5 Diagram Blok Sistem Prototipe	94
Gambar IV. 6 Wiring Schematic Prototipe	96
Gambar IV. 7 Proses Desain Produk	97
Gambar IV. 8 Proses Pemotongan Kerangka Baja	98
Gambar IV. 9 Proses Perakitan Kerangka	99
Gambar IV. 10 Proses Fabrikasi dan Perakitan Sistem Penggerak Mekanis	100
Gambar IV. 11 Integrasi Sistem Elektronik pada Sasis Prototipe.	100
Gambar IV. 12 Proses Instalasi Penutup	101
Gambar IV. 13 Hasil Akhir Perancangan Produk	101
Gambar IV. 14 Kode Pemrograman Hardware, Software, dan Tampilan User Interface	103
Gambar IV. 15 Tahap Pengumpulan Dataset	104
Gambar IV. 16 Proses Pelabelan Dataset	105
Gambar IV. 17 Grafik Nilai Box Loss	109
Gambar IV. 18 Grafik Nilai Distribution Focal Loss	110
Gambar IV. 19 Grafik Nilai Classification Loss	111
Gambar IV. 20 Grafik Nilai Precision	112
Gambar IV. 21 Grafik Nilai Recall	113
Gambar IV. 22 Grafik Nilai F1-Score	114
Gambar IV. 23 Grafik Nilai Validasi Classification <i>Loss Mean-average Precision</i> (mAP)	115
Gambar IV. 24 Confusion Matrix	116
Gambar IV. 25 Kurva Precision Recall	117
Gambar IV. 26 Grafik Box Loss Validation Dataset	118
Gambar IV. 27 Grafik Distribution Focal Loss Validation Dataset	119
Gambar IV. 28 Grafik Classification Loss Validation Dataset	120
Gambar IV. 29 Hasil Uji Coba Testing Dataset	121
Gambar IV. 30 Pengujian Jarak Jangkauan Deteksi	123
Gambar IV. 31 Pengujian Respon IoT dan Kontrol Web	129
Gambar IV. 32 Proses Pengujian Navigasi dan Mobilitas	131
Gambar IV. 33 Pengukuran Hasil Pengujian Konsumsi Baterai	135
Gambar IV. 34 Pengujian Fungsionalitas Sistem Keseluruhan di Taxiway Bravo Bandar Udara Sultan Mahmud Badarudin II Palembang	140
Gambar IV. 35 Pengujian Lapangan dan Pengisian Angket	145

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Perbandingan Performa Berbagai Versi YOLO pada Dataset COCO	46
Tabel II. 2 Penelitian yang Relevan	49
Tabel III. 1 Daftar Rancangan Pertanyaan Wawancara	60
Tabel III. 2 Daftar Rencana Pengujian Produk	63
Tabel III. 3 Keterangan Skala Likert.....	66
Tabel III. 4 Keterangan <i>Index Range</i>	66
Tabel III. 5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	69
Tabel III. 6 Rancangan Anggaran Biaya Penelitian Prototipe	70
Tabel III. 7 Tahapan Perancangan	71
Tabel IV. 1 Hasil Analisis SWOT	73
Tabel IV. 2 Data Hasil Observasi	77
Tabel IV. 3 Data Jumlah Penumpang Pesawat Udara Bandar Udara Radin Inten II Lampung	78
Tabel IV. 4 Data Temuan Tahun 2024	78
Tabel IV. 6 Daftar dan Spesifikasi Komponen yang Digunakan.....	81
Tabel IV. 7 Deasin Rancangan Awal Prototipe	86
Tabel IV. 8 Metode Validasi Desain.....	88
Tabel IV. 9 Hasil Penilaian Validasi Desain oleh Ahli.....	89
Tabel IV. 10 Daftar Saran Dari Validator	91
Tabel IV. 11 Perbandingan Desain Prototipe Sebelum dan Sesudah Revisi	92
Tabel IV. 12 Alur Kerja Perancangan Software	106
Tabel IV. 13 Langkah-langkah Validasi Dataset	108
Tabel IV. 14 Tahapan Pengujian Jarak Jangkauan Deteksi	123
Tabel IV. 15 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan FOD Jenis Bangkai Burung.....	124
Tabel IV. 16 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan FOD Jenis Serpihan Logam.	124
Tabel IV. 17 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan FOD Jenis Pecahan Agregat.....	125
Tabel IV. 18 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan FOD Jenis Kertas.....	125
Tabel IV. 19 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan Kerusakan Jenis Retakan (<i>Cracking</i>).....	125
Tabel IV. 20 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan Kerusakan Jenis Tambalan (<i>Patching</i>).....	126
Tabel IV. 21 Hasil Data Uji Jarak Jangkauan Kerusakan Jenis Pelapukan (<i>Weathering</i>).....	126
Tabel IV. 22 Hasil Pengujian Jangkauan Deteksi	126
Tabel IV. 23 Skenario Pengujian Respon IoT dan Kontrol Web.....	129
Tabel IV. 24 Hasil Pengujian Respon IoT dan Kontrol Web	130
Tabel IV. 25 Analisa Hasil Pengujian Respon IoT dan Kontrol Web	130
Tabel IV. 26 Skenario Pengujian Navigasi dan Mobilitas.....	132
Tabel IV. 27 Data Hasil Pengujian Navigasi dan Mobilitas	132

Tabel IV. 28 Analisa Hasil Pengujian dan Mobilitas.....	133
Tabel IV. 29 Parameter Pengujian Daya Tahan dan Konsumsi Batere	135
Tabel IV. 30 Hasil Pengukuran dan Perhitungan Batere	136
Tabel IV. 31 Perhitungan Daya Tahan Operasional	137
Tabel IV. 32 Analisa Hasil Pengujian Daya Tahan dan Konsumsi Batere	138
Tabel IV. 33 Skenario Pengujian Fungsionalitas Sistem Keseluruhan.....	140
Tabel IV. 34 Hasil Pengujian Fungsionalitas Sistem Keseluruhan.....	142
Tabel IV. 35 Analisa Hasil Pengujian Fungsionalitas Sistem Keseluruhan	143
Tabel IV. 36 Hasil Pengujian Kepuasan Pengguna	145
Tabel IV. 37 Perbandingan Metode Inspeksi Eksisting dan Sistem Robot	149

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Peserta Observasi.....	164
Lampiran B Data Pendukung.....	165
Lampiran C Dokumentasi Uji Coba Alat.....	166
Lampiran D Lembar Validasi.....	167
Lampiran E Lembar Bimbingan Tugas Akhir	182
Lampiran F Kode Pemrograman dan Barcode Aplikasi	183
Lampiran G Hasil Pengecekan Turnitin.....	195
Lampiran H Transkrip Wawancara.....	196
Lampiran I Lembar Instrumen Penelitian dan Validasi Instrumen.....	209

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian Pertama Kali Pada Halaman
ACN	<i>Aircraft Classification Number</i>	Halaman 26
AI	<i>Artificial Intelligence</i>	Halaman 34
APMS	<i>Airport Pavement Management System</i>	Halaman 142
ATSB	<i>Australian Transport Safety Bureau</i>	Halaman 19
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>	Halaman 40
CNN	<i>Convolutional Neural network</i>	Halaman III
DCNN	<i>Deep Convolutional Neural network</i>	Halaman 20
DTM	<i>Delay Time Modeling</i>	Halaman 36
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>	Halaman 19
FGD	<i>Focus Group Discussion</i>	Halaman 53
FOD	<i>Foreign Object Debris</i>	Halaman III
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Halaman 20
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>	Halaman 25
IoT	<i>Internet of Things</i>	Halaman III
KNKT	Komite Nasional Keselamatan Transportasi	Halaman 19
mAP	<i>mean Average Precision</i>	Halaman 41
OJT	<i>On the Job Training</i>	Halaman 48
PCN	<i>Pavement Classification Number</i>	Halaman 26
R&D	<i>Research and Development</i>	Halaman III
RAB	Rancangan Anggaran Biaya	Halaman 56
SCC	<i>Solar Charger Controller</i>	Halaman 70
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>	Halaman 48
UAS	<i>Unmanned Aircraft Systems</i>	Halaman 33
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicles</i>	Halaman 37
VRLA	<i>Valve-Regulated Lead-Acid</i>	Halaman 114
YOLO	<i>You Only Look Once</i>	Halaman I

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Transportasi udara merupakan moda yang semakin diminati oleh masyarakat Indonesia karena efisiensi waktu tempuh dan kemampuannya menjangkau wilayah yang luas (Basiludin & Kurniawan, 2023). Seiring dengan pertumbuhan mobilitas nasional, jumlah penumpang penerbangan domestik terus meningkat secara signifikan, sebagaimana tercatat oleh Badan Pusat Statistik (BPS) yang melaporkan bahwa pada Oktober 2023 terdapat 5,3 juta penumpang dan meningkat menjadi 6 juta pada Juli 2024 atau naik sebesar 11,04 persen. Lonjakan ini mendorong peningkatan tuntutan terhadap keselamatan dan keamanan layanan di bandara (Hi Umar dkk., 2023), yang tidak hanya menjadi gerbang transportasi tetapi juga komponen vital dari sistem keselamatan operasional penerbangan (Widagdo & Bataona, 2023).

Permasalahan keselamatan di area bandara, khususnya pada area *runway*, menjadi isu utama. Menurut Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), sebanyak 32 persen kecelakaan pesawat di Indonesia terjadi di area bandara akibat kondisi *runway* yang tidak memadai. Fenomena serupa terjadi secara global, seperti dilaporkan oleh *Australian Transport Safety Bureau* (ATSB), bahwa 4,9–22% insiden *runway excursion* di Australia dan Amerika Serikat disebabkan oleh gesekan permukaan landasan yang tidak sesuai atau tidak terukur dengan baik (Baimukhametov & White, 2025). Retakan, deformasi, genangan air, dan keberadaan kontaminan seperti es atau benda asing merupakan elemen yang memperbesar risiko kecelakaan saat pesawat lepas landas atau mendarat (Pestana dkk., 2021).

Salah satu faktor signifikan dalam mendukung keselamatan di area *airside* adalah pengelolaan benda asing atau *Foreign Object Debris* (FOD). Keberadaan FOD terbukti menjadi penyebab insiden fatal, seperti insiden pada pesawat *Wings Air* yang robek akibat tertabrak bor yang tertinggal di *runway* Bandara Juanda pada 11

Juni 2014. FOD sendiri dapat berupa batu, alat, bangkai burung, maupun komponen pesawat, sebagaimana dijelaskan dalam Surat Edaran FAA No. 150/5210-24 dan dikuatkan oleh KP 41 Tahun 2020 tentang peraturan keselamatan penerbangan (Bribe & Endrawijaya, t.t.).

Bandara Radin Inten II Lampung sebagai salah satu simpul transportasi udara nasional telah melaksanakan inspeksi area *airside* dua kali sehari, yakni pukul 05.00 dan 13.00. Namun, metode yang digunakan masih bersifat manual dan observasional. Berdasarkan hasil wawancara dengan teknisi infrastruktur bandara, terdapat keterbatasan signifikan dalam pelaksanaan inspeksi dini hari akibat minimnya pencahayaan dan kondisi cuaca yang buruk. Pandangan teknisi terbatas hanya pada area yang diterangi oleh lampu kendaraan, sehingga area di sisi kendaraan sering kali luput dari pengamatan. Kondisi ini menimbulkan risiko terlewatnya FOD maupun kerusakan mikro pada permukaan *runway*.

Hingga akhir tahun 2024, tercatat sebanyak 26 jenis FOD dan enam jenis kerusakan permukaan *runway* ditemukan di Bandara Radin Inten II dengan total luas kerusakan mencapai 123.287 m². Jenis kerusakan yang ditemukan meliputi *patching*, *alligator crack*, *bleeding*, dan *weathering* (Lake, 2017). FOD yang paling umum adalah bangkai burung, yang disebabkan oleh efek *jet blast*. Namun angka ini diduga belum mencerminkan kondisi sesungguhnya karena sistem deteksi yang digunakan masih sepenuhnya bergantung pada inspeksi visual manual (Sari dkk., 2022; Widagdo & Bataona, 2023).

Di sisi lain, berbagai bandara besar mulai mengadopsi sistem teknologi pendeteksi FOD seperti *FOD Finder* di Bandara Internasional Juanda (Ramadhani & Rachmawati, 2022) yang menggunakan sensor radar dan monitor, serta sistem *Clearway* di Bandara Boston Logan dan Charles de Gaulle yang mengintegrasikan sensor elektro-optik dan radar dengan sistem pencahayaan *runway*. Namun, sistem tersebut masih bersifat semi-otomatis karena tetap memerlukan tindak lanjut teknisi secara langsung untuk validasi atau pembersihan.

State of the art dalam bidang pendeteksian *runway* menunjukkan kemajuan signifikan dalam pemanfaatan teknologi visual dan pembelajaran mesin. Misalnya, Sasmito dkk. (2023) mengembangkan sistem pendeteksi kerusakan jalan berbasis kamera kendaraan; Utomo & Lestari (2021) merancang aplikasi identifikasi kerusakan jalan menggunakan algoritma *K-Nearest Neighbour* (K-NN) pada *smartphone*; dan Zainab dkk. (2023) mengembangkan klasifikasi FOD berdasarkan jenis material menggunakan *Deep Convolutional Neural network* (DCNN) dengan akurasi tinggi. Meskipun demikian, sistem-sistem tersebut masih memiliki keterbatasan dalam mobilitas, otomatisasi penuh, serta integrasi antara pengambilan data visual, geospasial, dan pengiriman informasi secara *real-time*.

Gap penelitian muncul dari fakta bahwa belum ada sistem yang mampu menjalankan fungsi *mobile*, otomatis, terintegrasi dengan teknologi kamera resolusi tinggi, GPS, *cloud*, serta didukung energi terbarukan yang didesain khusus untuk kebutuhan inspeksi *airside* bandara berskala menengah. Sistem yang mampu menggantikan peran inspeksi manual dengan pendekatan teknologi berbasis IoT, *Image Processing*, dan CNN masih minim ditemukan dalam konteks operasional langsung di bandara Indonesia, khususnya pada bandara regional seperti Radin Inten II Lampung.

Berdasarkan permasalahan dan celah penelitian tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe sistem *mobile* berbasis *Internet of Things* (IoT), *Image Processing*, dan *Convolutional Neural network* (CNN). Prototipe ini dirancang dengan kamera resolusi tinggi, sistem GPS, panel surya, serta terkoneksi dengan *cloud* untuk pengolahan dan pelaporan data secara *real-time*. Teknisi tidak lagi perlu melakukan inspeksi manual secara menyeluruh karena sistem mampu mendeteksi dan mengklasifikasikan FOD maupun kerusakan secara otomatis dan akurat. Dengan desain ini, prototipe diharapkan menjadi solusi teknologi baru dalam modernisasi pemeliharaan area pergerakan pesawat, memperkuat keselamatan operasional, serta mendukung efisiensi dan keberlanjutan infrastruktur bandara Indonesia.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan analisis latar belakang yang telah disampaikan, penelitian ini akan mengangkat permasalahan utama yang menjadi fokus kajian. Adapun perumusan masalahnya yaitu bagaimana merancang sistem pendeteksi FOD dan kerusakan *runway* yang memiliki akurasi tinggi dan dapat mengirimkan data secara nirkabel sebagai penunjang pemeliharaan preventif *airside* bandar udara?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah disampaikan, penulisan Tugas Akhir ini bertujuan merancang robot pendeteksi FOD dan kerusakan *runway* berbasis YOLOv11 untuk meningkatkan efisiensi kegiatan inspeksi area pergerakan pesawat udara.

D. Manfaat

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian ini mencakup 4 aspek sebagai berikut:

1. Manfaat Teknologi dalam Industri Penerbangan

Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan teknologi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dan energi terbarukan yang dapat *diintegrasikan* dalam sektor transportasi dan industri penerbangan. Implementasi teknologi ini juga berpotensi memperluas penerapan jaringan saraf tiruan (*neural network*) serta sistem pelacakan GPS dalam mendukung pemeliharaan area *airside* secara lebih efektif dan efisien.

2. Manfaat Keselamatan Penerbangan

Penerapan teknologi jaringan saraf tiruan (*neural network*) yang terintegrasi dengan sistem pelacakan GPS pada robot dapat meningkatkan keselamatan teknisi di area *airside* bandara. Dengan sistem ini, teknisi dapat melakukan pemantauan secara *real-time* melalui aplikasi tanpa harus terjun langsung ke lapangan, sehingga meminimalkan risiko kecelakaan kerja.

3. Manfaat Lingkungan Bandar Udara

Pemanfaatan robot yang menggunakan sel surya sebagai sumber energi utama berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca serta polusi udara yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil pada peralatan konvensional. Inisiatif ini selaras dengan upaya mewujudkan konsep *net zero emission* di Bandara Radin Inten II Lampung.

4. Manfaat Ekonomi

Pemanfaatan robot yang lebih efisien dan ramah lingkungan dapat menekan biaya operasional dengan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, sistem ini berperan dalam mencegah kerusakan pada pesawat dan peralatan darat akibat *Foreign Object Debris* (FOD), sehingga dapat mengurangi biaya perbaikan serta pemeliharaan. Peningkatan efisiensi operasional yang dihasilkan juga berkontribusi dalam menekan biaya yang timbul akibat keterlambatan penerbangan.

E. Batasan Masalah

Agar pembahasan tetap terarah dan tidak menyimpang dari konteks judul, maka penelitian ini dibatasi pada pengembangan prototipe robot pendeteksi kerusakan *runway* dan FOD yang mampu mengidentifikasi 4 jenis FOD yaitu serpihan logam, bangkai burung, kertas, dan pecahan agregat, sementara untuk kerusakan perkerasan *runway*nya yaitu retakan (*cracking*), tambalan (*patching*), dan pelapukan (*weathering*).

F. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian kali ini antara lain, sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Didalamnya mengandung latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Berisi tentang teori-teori yang digunakan dalam penelitian, teori penunjang, dan kajian penelitian terdahulu yang relevan sebagai perbandingan produk yang dihasilkan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Memaparkan mengenai metode penelitian yang digunakan, perancangan, dan langkah-langkah pembuatan produk.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil dari metodologi penelitian yang dijabarkan dalam bentuk pembahasan dan pengoperasian produk.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Didapat kesimpulan menyeluruh dari hasil dan pembahasan serta saran-saran untuk perbaikan atau aspek lain yang perlu dikaji lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Deskripsi Teoritik

Pada bagian ini diuraikan deskripsi teoritis yang digunakan sebagai pijakan berpikir untuk menjawab permasalahan yang telah dirumuskan pada penelitian ini. Landasan teori mencakup konsep-konsep fundamental tentang keselamatan penerbangan, teknologi inspeksi *runway* modern, sistem robotika otonom, serta implementasi kecerdasan buatan dalam deteksi *Foreign Object Debris* (FOD) dan kerusakan perkerasan.

1. Transportasi Udara dan Keselamatan Penerbangan

Transportasi udara merupakan salah satu moda transportasi yang memiliki tingkat aksesibilitas yang tinggi, sehingga banyak dipilih sebagai sarana mobilitas yang efisien (Ritonga & Dompok, 2024). Aksesibilitas dalam konteks transportasi menjadi faktor krusial dalam setiap perjalanan, karena berkaitan dengan efektivitas penggunaan biaya, waktu, dan tenaga (Fadilah dkk., 2024). Seiring dengan pertumbuhan pembangunan nasional, kebutuhan masyarakat terhadap layanan transportasi udara terus mengalami peningkatan. Tingginya kebutuhan akan jasa penerbangan, menyebabkan bandara harus menyediakan jasa konsumen yang menjamin keselamatan dan keamanan penumpang (Hi Umar dkk., 2023). Keselamatan penerbangan menjadi aspek krusial yang melibatkan berbagai faktor teknis dan operasional, dimana keberhasilan dalam menjaga keselamatan bergantung pada kepatuhan terhadap regulasi nasional maupun internasional. Di Indonesia, aspek keselamatan penerbangan diatur dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan, yang mencakup regulasi terkait operasional bandara, pesawat udara, serta keselamatan dan keamanan penerbangan (Kardi et al., 2024). Selain itu, regulasi internasional yang dikeluarkan oleh *International Civil Aviation Organization* (ICAO) juga menjadi acuan dalam memastikan standar keselamatan global. Keselamatan penerbangan merupakan aspek krusial dalam industri transportasi udara yang melibatkan berbagai faktor teknis dan

operasional. Keberhasilan dalam menjaga keselamatan penerbangan bergantung pada kepatuhan terhadap regulasi yang telah ditetapkan secara nasional maupun internasional (Hasim, 2017).

Runway merupakan bagian vital dalam sistem penerbangan yang memerlukan pemantauan berkelanjutan untuk memastikan kondisi optimal (Sama dkk., 2025a). Setiap gangguan pada *runway* dapat mengakibatkan konsekuensi serius terhadap operasional penerbangan, mulai dari penundaan hingga risiko kecelakaan. Implementasi teknologi *Surface Awareness Initiative* (SAI) oleh FAA menunjukkan komitmen industri penerbangan untuk meningkatkan keselamatan melalui sistem pengawasan canggih yang memberikan *situational awareness* kepada *kontroler* lalu lintas udara (Omosebi dkk., 2023).

Industri penerbangan mengalami transformasi digital yang signifikan dengan adopsi teknologi 5G, *artificial intelligence*, *data analytics*, dan *Internet of Things* (IoT) untuk mengoptimalkan operasi dari *baggage handling* hingga *security screening*. Transformasi ini bertujuan meningkatkan *passenger experience* melalui solusi biometrik canggih, jaringan 5G privat, dan layanan personal yang didukung teknologi (Wu, 2024).

2. *Runway* dan Tantangan Pemeliharaannya

Runway merupakan suatu area berbentuk persegi panjang pada permukaan bandar udara yang berfungsi sebagai tempat pesawat untuk lepas landas dan mendarat (Darmawan & Julainsyah, 2024). *Runway* memiliki peranan yang sangat penting sebagai bagian dari fasilitas di bandar udara, sehingga memerlukan pemeliharaan yang baik dan berkelanjutan (Widagdo dkk., 2023). Sistem yang digunakan untuk menilai kekuatan permukaan *runway* adalah *Pavement Classification Number* (PCN), yang merupakan suatu angka yang menyatakan kapasitas angkut beban suatu perkerasan untuk operasi pesawat tak terbatas (Darmawan & Julainsyah, 2024). PCN digunakan bersama-sama dengan *Aircraft Classification Number* (ACN) yang dimiliki

oleh pesawat dengan konfigurasi tertentu untuk menjamin keselamatan operasional penerbangan dan memastikan kemampuan *runway* dalam menampung beban pesawat.

Dimensi *runway* bervariasi tergantung pada klasifikasi bandara dan jenis pesawat yang dilayani. Sebagai contoh, penelitian pada pengembangan Bandara Supadio menunjukkan dimensi *runway* yang direncanakan sebesar 3.500 x 60 m, yang dirancang untuk dapat melayani pesawat besar seperti Boeing 777-200ER dengan peningkatan jumlah penumpang yang diproyeksikan mencapai 28.305.677 penumpang/tahun pada 2042 (Kwee dkk., 2022). *Runway* dengan spesifikasi yang sesuai standar internasional memungkinkan bandara untuk memfasilitasi perkembangan aktivitas lalu lintas udara yang setiap tahunnya meningkat dan juga memfasilitasi pesawat dengan ukuran badan yang lebih besar (Kwee dkk., 2022).

a. Jenis-Jenis Kerusakan pada *Runway*

Berdasarkan berbagai studi evaluasi kondisi *runway*, teridentifikasi beberapa jenis kerusakan yang umumnya terjadi pada infrastruktur ini. Kerusakan-kerusakan tersebut meliputi retak rambut, *rutting* (alur), erosi, dan jenis kerusakan permukaan lainnya yang dapat mempengaruhi kinerja operasional *runway* (Irvayana dkk., 2022). Peratingan kondisi perkerasan *runway* berdasarkan pengecekan visual dapat dikategorikan dalam beberapa tingkat, di mana *rating* 3 (*fair*) mengindikasikan diperlukan tindakan pemeliharaan berupa *overlay* untuk memperbaiki kondisi permukaan (Amanah, 2023).

Selain jenis kerusakan fisik pada permukaan, masalah lain yang sering ditemui pada *runway* adalah keberadaan *Foreign Object Debris* (FOD). FOD didefinisikan sebagai benda asing atau material berbahaya yang ada di area landasan pacu maupun di area tempat parkir pesawat (*apron*) yang mengakibatkan bahaya terhadap keselamatan, keamanan, dan operasi pesawat terbang (Diah Anggraeni & Tamara, 2023). Untuk

mengatasi FOD diperlukan peralatan khusus seperti *runway sweeper* yang berfungsi membersihkan permukaan *runway* dari benda-benda asing tersebut.

Penyebab kerusakan di *runway* berasal dari beberapa faktor, diantaranya air genangan yang dibiarkan dalam waktu lama, penetrasi akar tanaman, dan kesalahan teknis yang dilakukan oleh pilot ketika pesawat berada di area *runway* (Widagdo dkk., 2023). Masalah lain yang juga signifikan adalah akumulasi rubber deposit atau tumpukan karet ban pesawat yang menempel pada permukaan *runway* akibat gesekan saat pesawat mendarat. Berdasarkan perhitungan akumulasi *rubber deposit* terhadap pertumbuhan pergerakan pesawat dan distribusi penggunaan *runway*, *rubber deposit removal* perlu dilakukan secara berkala, misalnya setiap 1 bulan sekali (Pullen dkk., 2013).

b. Risiko Kerusakan *Runway* terhadap Keselamatan Penerbangan
Runway sebagai fasilitas utama dari sebuah bandara tidak terlepas dari sebuah risiko operasional yang dapat berdampak pada keselamatan penerbangan (Ramadhani & Rachmawati, 2022). Implementasi manajemen risiko pada operasional *runway* melibatkan identifikasi, evaluasi, dan pengendalian risiko secara sistematis oleh unit *safety* dan *airside facility*, dengan tujuan utama meminimalkan insiden seperti *runway excursion*, *veer-off*, *overrun*, dan *incursion*. Sebagai fasilitas vital pada bandar udara, manajemen risiko operasional *runway* menjadi aspek krusial dalam menjamin keselamatan penerbangan.

Kerusakan *runway* dan keberadaan FOD dapat menyebabkan berbagai risiko terhadap keselamatan dan keamanan penerbangan. Permukaan *runway* yang rusak seperti retak, berlubang, atau bergelombang dapat mempengaruhi kestabilan pesawat saat *landing* atau *take-off*, yang berpotensi menyebabkan *runway excursion* atau kejadian keselamatan lainnya. Selain itu, FOD dapat merusak bagian pesawat, terutama

mesin, ban, dan bagian bawah badan pesawat, yang dapat mengakibatkan kecelakaan fatal jika tidak ditangani dengan baik (Diah Anggraeni & Puspa Tamara, 2023). Setelah risiko diidentifikasi, dilakukan penilaian terhadap risiko yang meliputi tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan (*severity*) dan frekuensi potensi bahaya tersebut terjadi (*likelihood*) (Al- Saeedi dkk., 2024). Pengembangan penelitian ini diperuntukkan sebagai penanganan atau mitigasi risiko dari sisi teknis di area *airside* bandar udara.

c. Strategi Pemeliharaan *Runway*

Kegiatan pemeliharaan *runway* sangat berpengaruh terhadap kegiatan operasional keamanan dan keselamatan penerbangan (Widagdo dkk., 2023). Strategi pemeliharaan *runway* meliputi beberapa pendekatan, baik reaktif, prediktif, maupun preventif. Pemeliharaan reaktif dilakukan sebagai respons terhadap kerusakan yang sudah terjadi, sedangkan pemeliharaan prediktif dan preventif dilakukan sebagai upaya pencegahan sebelum kerusakan serius terjadi.

Alur manajemen pemeliharaan *runway* umumnya dimulai dengan komunikasi dan konsultasi antar unit terkait, dilanjutkan dengan identifikasi bahaya melalui inspeksi rutin, penilaian risiko, dan penentuan kendali atau tindakan yang akan diambil (Diah Anggraeni & Puspa Tamara, 2023). Kegiatan pemeliharaan diawali dengan inspeksi petugas di *runway* yang kemudian dicatat dan dilaporkan kepada kepala kantor apabila ditemukan hal yang mengganggu keselamatan penerbangan untuk ditindaklanjuti (Widagdo dkk., 2023).

Pemeliharaan kerusakan-kerusakan kecil masih mempertahankan pemeliharaan langsung seperti yang dilakukan pihak bandara Juanda (Kurniawan dkk., 2023). Untuk pemeliharaan *rubber deposit*, berdasarkan perhitungan akumulasi dan pertumbuhan pergerakan pesawat, *rubber deposit removal* dapat dijadwalkan secara berkala

sesuai kebutuhan bandara (Sales dkk., 2022). Pemeliharaan preventif juga meliputi pembersihan FOD menggunakan *runway sweeper*, yang harus dilakukan secara efisien mengingat padatannya jadwal operasional pesawat di bandara (Vidal dkk., 2023).

d. Tantangan dalam Pemeliharaan Preventif di *Airside* Bandara

Dalam pelaksanaan pemeliharaan preventif di *airside* bandara, terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Salah satu kendala utama adalah minimnya peralatan yang tersedia untuk melakukan pemeliharaan secara optimal (Widagdo dkk., 2023). Faktor cuaca juga menjadi tantangan signifikan, karena kondisi cuaca buruk dapat menghambat kegiatan pemeliharaan dan memperburuk kondisi kerusakan yang sudah ada, terutama jika terjadi genangan air pada permukaan *runway* (Widagdo dkk., 2023).

Aktivitas penerbangan yang padat merupakan tantangan lain dalam pemeliharaan *runway*. Dengan pertumbuhan lalu lintas udara yang signifikan, seperti yang terjadi di Bandara Juanda dengan pertumbuhan pergerakan pesawat rata-rata total sebesar 6.93% dalam 8 tahun (de Souza & de Almeida Filho, 2020), tentu saja semakin sulit untuk menemukan waktu yang tepat untuk melakukan pemeliharaan tanpa mengganggu jadwal penerbangan. Selain itu, permasalahan dimana pesawat udara yang mendarat memakan waktu yang lama untuk berpindah dari *runway* menuju *apron* juga menjadi tantangan dalam manajemen pemeliharaan *runway* (de Souza & de Almeida Filho, 2020).

Koordinasi antar unit terkait juga menjadi tantangan tersendiri dalam implementasi manajemen risiko dan pemeliharaan *runway*. Komunikasi yang efektif antara unit *safety*, *airside facility*, dan operasional diperlukan untuk memastikan bahwa identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan tindakan pengendalian dapat dilakukan dengan

tepat dan efisien (Zinaida dkk., 2023). Dengan tantangan-tantangan ini, diperlukan pendekatan manajemen pemeliharaan yang lebih terintegrasi dan adaptif untuk menjamin keselamatan dan keamanan operasional penerbangan.

3. Teknologi Inspeksi *Runway*

Inspeksi *runway* merupakan komponen vital dalam menjamin keselamatan operasional penerbangan. Dengan perkembangan teknologi, metode inspeksi landasan pacu telah berkembang dari pendekatan manual tradisional hingga sistem otomatis canggih. Penelitian terbaru menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi dan akurasi inspeksi melalui implementasi teknologi seperti pengawasan video cerdas, drone, dan jaringan sensor yang terintegrasi.

a. Metode Manual Inspeksi *Runway*

Inspeksi *runway* secara manual merupakan pendekatan konvensional yang masih banyak diterapkan di berbagai bandara di seluruh dunia. Proses ini melibatkan petugas inspeksi bandara yang mengemudikan kendaraan khusus sepanjang garis tengah landasan pacu untuk menilai kondisi permukaan. Petugas melakukan pengamatan visual terhadap jenis, cakupan, dan kedalaman kontaminan untuk setiap bagian landasan pacu (Shan dkk., 2025). Kendaraan yang digunakan dalam inspeksi ini harus dilengkapi dengan lampu sorot dan fasilitas komunikasi radio (R/T) untuk memastikan efektivitas inspeksi dan koordinasi yang baik dengan pihak pengendali lalu lintas udara (Ziehn dkk., 2022).

Prosedur standar mengharuskan inspektur landasan pacu untuk mengemudi sepanjang garis tengah, meskipun terkadang mereka perlu menyimpang dari jalur untuk mengamati area-area tertentu yang diketahui memiliki masalah seperti genangan air atau pembentukan es (Yang dkk., 2024). Untuk mengurangi waktu okupansi landasan,

inspeksi setiap bagian (*tier*) dapat dilakukan secara simultan jika tersedia beberapa inspektur (Liu dkk., 2022). Inspektur dapat berhenti di lokasi tertentu untuk melakukan penilaian mendalam terhadap kedalaman kontaminan atau penilaian manual terhadap jenis kontaminan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang kondisi keseluruhan landasan pacu (Ling dkk., 2023).

Setelah menyelesaikan inspeksi, tim harus melaporkan hasilnya kepada pengendali lalu lintas udara, mencatat waktu mulai dan selesainya inspeksi, serta memasukkan informasi tersebut ke dalam *Log Catatan Inspeksi* (Latorella & Prabhu, 2000). Perhatian khusus diberikan pada aspek-aspek seperti kebersihan umum, terutama material yang dapat menyebabkan kerusakan mesin pesawat, serta tanda-tanda kerusakan pada permukaan perkerasan, termasuk retak dan kerusakan beton, kondisi penyegelan sambungan, retak dan kelonggaran agregat pada permukaan aspal, atau kerusakan lapisan friksi (Doyle dkk., 2021).

Metode manual dalam inspeksi landasan pacu (*runway*) masih memiliki keunggulan penting, terutama karena memungkinkan penilaian langsung oleh personel berpengalaman yang dapat memanfaatkan pengetahuan spesifik mereka tentang kondisi lokal dan mengidentifikasi area prioritas untuk pemeriksaan. Studi perbandingan antara inspeksi visual manual (*on-foot*) dan metode tidak langsung berbasis kendaraan menunjukkan bahwa inspeksi manual tetap relevan, terutama dalam mendeteksi kerusakan dengan tingkat keparahan rendah yang sering kali sulit diidentifikasi oleh sistem otomatis atau semi-otomatis. Selain itu, pelatihan dan pengalaman inspektur sangat berperan dalam memastikan alokasi tingkat keparahan kerusakan yang tepat selama analisis data, yang menjadi keunggulan utama metode manual dibandingkan sistem otomatis yang sangat bergantung pada kualitas data dan algoritma pengolahan citra. Meskipun metode otomatis menawarkan efisiensi waktu dan biaya, keakuratan dan

penilaian kontekstual dari inspeksi manual tetap menjadi alasan utama mengapa metode ini masih dipertahankan dalam praktik pengelolaan landasan pacu di banyak bandara (Santos dkk., 2020). Inspektur berpengalaman dapat melakukan penilaian kualitatif berdasarkan pengamatan visual yang sulit diduplikasi oleh sistem otomatis.

Kedua, metode manual menawarkan fleksibilitas dalam pelaksanaan inspeksi, memungkinkan petugas untuk menyesuaikan fokus inspeksi berdasarkan kondisi spesifik yang diamati saat itu (Mathis dkk., 2015). Inspektur dapat dengan cepat beradaptasi dengan situasi yang berubah dan mengarahkan perhatian pada area yang tampak bermasalah, seperti genangan air atau kerusakan permukaan yang baru terjadi.

Ketiga, metode ini tidak memerlukan investasi teknologi yang besar, menjadikannya lebih terjangkau bagi bandara-bandara kecil dan menengah yang mungkin memiliki keterbatasan anggaran untuk mengimplementasikan sistem otomatis (Pham dkk., t.t.). Pendekatan inspeksi berbasis manusia memungkinkan respons segera terhadap temuan di lapangan karena adanya komunikasi langsung antara inspektur dan pihak terkait, seperti pengendali lalu lintas udara atau operator fasilitas (Al-Sabbag dkk., 2022).

Metode manual dalam pelaporan kondisi *runway* memang memiliki beberapa kelebihan, namun juga dihadapkan pada keterbatasan signifikan, terutama terkait subjektivitas penilaian oleh inspektur. Ketergantungan pada penilaian manusia dapat menyebabkan inkonsistensi dalam pelaporan kondisi *runway*, baik antar individu maupun antar waktu inspeksi, sehingga hasil laporan bisa berbeda-beda meskipun kondisi sebenarnya serupa (Tuncal & Erol, 2024). Variabilitas ini dapat mempengaruhi keandalan data yang dikumpulkan untuk perencanaan pemeliharaan jangka panjang.

Kedua, inspeksi manual memerlukan penutupan sementara atau pembatasan penggunaan *runway*, yang dapat mengganggu operasi bandara dan menyebabkan penundaan penerbangan, terutama di bandara dengan lalu lintas padat (Price & Forrest, 2016). Keterbatasan waktu untuk inspeksi menyeluruh dapat mengakibatkan pengamatan yang terburu-buru dan potensi terlewatnya kondisi berbahaya.

Ketiga, metode ini memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kerusakan kecil atau tersembunyi yang mungkin tidak terlihat oleh mata manusia selama inspeksi rutin tetapi dapat berkembang menjadi masalah serius jika tidak ditangani (van Welzen dkk., 2022). Selain itu, inspeksi manual memiliki keterbatasan dalam kondisi cuaca buruk atau visibilitas rendah, serta pada malam hari, yang dapat mengurangi kemampuan inspektur untuk mengidentifikasi masalah dengan akurat (Christie dkk., 2023).

b. Sistem Otomatis untuk Inspeksi *Runway*

1). Sistem Berbasis Kamera dan Pengawasan Video

Sistem pengawasan video cerdas telah muncul sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan efektivitas inspeksi *runway*. Sistem ini mengintegrasikan kamera pengawasan dengan algoritma pemrosesan gambar canggih untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan objek serta kondisi berbahaya pada permukaan bandara. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem peringatan keselamatan landasan pacu berbasis pengawasan video cerdas dapat mencapai akurasi deteksi dan pelacakan sekitar 95%, memungkinkan identifikasi dan pelacakan target permukaan aerodrome yang efisien, prediksi yang akurat terhadap potensi intrusi landasan, serta peringatan yang cepat (Pham dkk., 2024).

Sistem ini dirancang dengan struktur yang kompak, biaya rendah, serta instalasi dan penggunaan yang mudah, menjadikannya pilihan

yang layak terutama untuk bandara kecil dan menengah (Jedrzejewski dkk., 2022). Metode pembelajaran transfer diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi pembelajaran model dalam sistem, memungkinkan adaptasi yang lebih cepat terhadap kondisi spesifik bandara. Sebagai contoh, sistem semacam ini telah dirancang dan dibangun berdasarkan data dari Bandara Internasional Jinjiang Quanzhou di Cina, dengan tata letak kamera serta uji akurasi pengenalan dan pelacakan video waktu nyata yang telah diselesaikan (Choi dkk., 2023).

Pendekatan berbasis penglihatan multi-tampilan juga telah dikembangkan untuk prediksi jarak pesawat ke titik pendaratan (*distance-to-touchdown/DTD*) secara *real-time*, yang penting untuk meningkatkan operasi bandara dan landasan pacu (Pham dkk., 2024). Pendekatan ini mengintegrasikan model deteksi objek *real-time* dengan jaringan auto-kalibrasi untuk mengkalibrasi fitur yang diekstrak dari sudut pandang berbeda, mencapai nilai kesalahan persentase absolut rata-rata 0,13% dalam data simulasi dan 0,33% dalam data nyata. Hasil ini menunjukkan potensi penerapan pendekatan berbasis visi dalam lingkungan menara digital untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan operasi landasan pacu.

2). Penggunaan Drone untuk Inspeksi *Runway*

Teknologi drone atau *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) telah menunjukkan potensi signifikan dalam merevolusi inspeksi *runway* dengan menawarkan pemantauan yang lebih cepat, aman, dan komprehensif. Penelitian terbaru telah mengembangkan aplikasi pemrosesan gambar untuk penggunaan drone dalam meningkatkan inspeksi *runway*, dengan fokus khusus pada deteksi *Foreign Object Debris* (FOD) seperti batu dan lubang yang dapat mengancam keselamatan penerbangan (Sri Hari dkk., 2023).

Aplikasi ini menggunakan metode *You Only Look Once* (YOLO) untuk deteksi FOD yang cepat dan akurat, memaksimalkan efektivitas drone dalam mengidentifikasi potensi bahaya di landasan pacu. Metode YOLO memungkinkan deteksi objek secara *real-time* dengan kecepatan dan akurasi yang tinggi, yang sangat penting untuk aplikasi keselamatan penerbangan. Penelitian menunjukkan bahwa ukuran objek dan jarak pengambilan gambar secara signifikan mempengaruhi kinerja deteksi, memberikan dasar untuk optimasi model melalui peningkatan metode augmentasi data dan penyesuaian parameter untuk mengatasi tantangan dalam mendeteksi objek dengan berbagai ukuran.

Para peneliti juga telah memanfaatkan *computer vision* dan AI untuk menganalisis gambar drone dari landasan pacu terpencil guna mendeteksi, mengkarakterisasi, dan mengklasifikasikan cacat. Pendekatan ini menghasilkan inspeksi yang lebih cepat dan lebih aman dibandingkan metode manual tradisional, dengan kemampuan untuk mengidentifikasi masalah yang mungkin terlewatkan oleh pengamat manusia. Penggunaan UAS untuk survei topografi dapat mengurangi jam kerja yang diperlukan untuk inspeksi bandara dan meningkatkan akurasi pengukuran, memungkinkan penilaian kondisi perkerasan landasan pacu dan identifikasi obstruksi.

Fotogrametri UAV juga memungkinkan pembuatan model 3D dari gambar 2D yang dikumpulkan di titik-titik yang menarik, memberikan representasi visual komprehensif dari kondisi landasan pacu yang dapat dianalisis secara lebih mendalam oleh para ahli. Pendekatan ini menawarkan keuntungan signifikan dalam hal efisiensi waktu, cakupan area yang lebih luas, dan kemampuan untuk mengakses area yang sulit dijangkau dengan metode inspeksi konvensional.

c. Teknologi Sensor dan Robot dalam Inspeksi *Runway*

Sistem peringatan keselamatan landasan pacu berbasis jaringan sensor telah menjadi pendekatan inovatif lain untuk meningkatkan keamanan operasi bandara. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi dan melacak objek (pesawat atau kendaraan) dalam area perlindungan aerodrome, dengan pengontrol diberi peringatan tepat waktu tentang potensi intrusi landasan melalui logika peringatan intrusi landasan yang telah ditetapkan sebelumnya.

Sistem berbasis jaringan sensor ini memiliki karakteristik biaya rendah, skalabilitas yang sangat baik, keandalan tinggi, dan stabilitas yang baik. Sebagai contoh, sistem peringatan keselamatan landasan pacu berbasis jaringan sensor telah digunakan di Bandara Internasional Taiping Harbin di Cina, dan telah beroperasi dengan normal dan menjalankan fungsi-fungsi signifikan. Pengujian berkelanjutan telah mengungkapkan bahwa sistem ini mampu memberikan deteksi dan peringatan yang handal terhadap potensi bahaya di area landasan pacu.

Kombinasi antara jaringan sensor dan robot juga sedang dieksplorasi untuk inspeksi otomatis *runway*. Robot dilengkapi dengan berbagai sensor seperti kamera termal, sensor laser, dan radar dapat bergerak secara *otonomus* di permukaan landasan pacu untuk mendeteksi kerusakan, kontaminan, atau objek asing. Pendekatan ini mengurangi kebutuhan akan intervensi manusia, memungkinkan inspeksi yang lebih sering dan konsisten tanpa mengganggu operasi penerbangan normal (Singh dkk., 2024).

Integrasi teknologi sensor juga telah diterapkan dalam kebijakan pemeliharaan dan inspeksi landasan pacu yang sistematis, berdasarkan konsep pemodelan waktu tunda (*Delay Time Modeling/DTM*) untuk meminimalkan biaya pemeliharaan sambil memastikan kondisi

operasional yang optimal (Wang, 2012). Pendekatan berbasis sensor ini memungkinkan pemantauan kondisi *real-time* dan deteksi dini masalah potensial, memungkinkan intervensi pemeliharaan yang lebih proaktif dan efisien.

d. Tren dan Tantangan dalam Digitalisasi Inspeksi *Runway*

Digitalisasi inspeksi *runway* menawarkan efisiensi tinggi, namun menghadapi tantangan pada faktor cuaca, biaya implementasi awal, dan kebutuhan pelatihan personel. Transisi dari metode manual ke otomatis memerlukan integrasi data dan adaptasi kebijakan operasional agar sistem baru dapat diterima secara menyeluruh dan efektif dalam lingkungan operasional bandara.

4. Robotika dan Sistem Kendali Robot Inspeksi *Runway*

Pemeliharaan infrastruktur bandara, khususnya *runway*, memerlukan pendekatan inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi. Robot inspeksi otonom berbasis visi komputer seperti YOLO Version 11 menawarkan solusi transformatif dengan menggabungkan kemampuan deteksi objek *real-time* dan analisis data terstruktur. Tinjauan teori ini mengintegrasikan konsep robotika, desain sistem, navigasi, dan sensor pendukung untuk mendukung pengembangan robot inspeksi *runway* yang andal.

a. Konsep Dasar Robotika dalam Pemeliharaan Infrastruktur

Robotika telah menjadi tulang punggung dalam pemeliharaan infrastruktur modern, terutama di lingkungan kompleks seperti bandara. Studi sistematis oleh Halder & Afsari (2023) mengidentifikasi enam jenis robot utama yang digunakan untuk inspeksi bangunan dan infrastruktur, termasuk *Unmanned Ground Vehicles* (UGV) dan sistem robot *hybrid*. Dalam konteks *runway*, UGV lebih disukai karena stabilitas dan kemampuan membawa muatan sensor yang lebih berat dibandingkan UAV (Lee dkk., 2023).

Penerapan robot dalam pemeliharaan preventif bertumpu pada tiga prinsip: (1) reduksi risiko manusia di area operasional tinggi, (2) frekuensi inspeksi yang konsisten, dan (3) integrasi data multidimensi. Penelitian mendemonstrasikan bahwa robot inspeksi *runway* mampu mengurangi waktu inspeksi manual hingga 70% sekaligus meningkatkan akurasi deteksi kerusakan permukaan. Teknologi *Smart Airport* yang memanfaatkan *Internet of Things* (IoT) dan analitik prediktif memang menjadi tren global untuk mengoptimalkan perawatan dan efisiensi operasional bandara (Gupta dkk., 2023).

b. Desain Robot Inspeksi *Runway*: Kriteria dan Spesifikasi

Desain robot difokuskan pada struktur stabil, hemat energi, dan modular. Komponen utama meliputi sistem penggerak yang andal, platform kamera, dan dukungan untuk berbagai sensor guna menangani kontur dan kondisi medan *runway*.

c. Sistem Navigasi dan Kendali Robot Inspeksi

Navigasi berbasis GPS dan sensor IMU dipadukan dengan pengolahan citra CNN untuk pelacakan lintasan dan penghindaran hambatan. Sistem kendali menggunakan algoritma PID atau *fuzzy logic* untuk kestabilan gerak dan akurasi pergerakan.

5. Integrasi *Internet of Things* (IoT) dalam Pemantauan dan Pengelolaan Data Inspeksi

Integrasi *Internet of Things* (IoT) telah membentuk paradigma baru dalam manajemen infrastruktur kritis bandara, khususnya dalam pemantauan *runway* secara *real-time*. Sistem berbasis IoT memanfaatkan arsitektur berlapis untuk menghubungkan sensor, perangkat komputasi tepi (*edge*), dan platform analitik *cloud*, menciptakan ekosistem yang responsif terhadap kebutuhan pemeliharaan preventif (Sama dkk., 2025b).

a. Konsep Dasar *Internet of Things* (IoT) dalam Infrastruktur IoT dalam konteks infrastruktur bandara mengadopsi arsitektur tiga lapis: *perception layer*, *network layer*, dan *application layer*. *Perception layer* terdiri dari jaringan sensor yang terdistribusi di sepanjang *runway*, termasuk kamera resolusi tinggi, sensor getaran, dan detektor suhu. Data dari lapisan ini dikumpulkan melalui mikrokontroler seperti ESP32 yang berfungsi sebagai *gateway* (zhou & Yan, 2022). *Network layer* menggunakan protokol komunikasi hibrida (LoRaWAN dan WiFi 6) untuk transmisi data ke pusat pengolahan, dengan latensi di bawah 200 ms untuk memastikan responsivitas sistem. *Application layer* mengintegrasikan algoritma YOLOv11 untuk analisis visual dan sistem notifikasi berbasis *geofencing* yang terhubung ke *dashboard* operasional bandara (Katsoulis dkk., 2024).

b. Integrasi IoT dalam *monitoring* dan analisis data *Runway*
Implementasi IoT dalam inspeksi *runway* mengoptimalkan empat dimensi utama: *real-time* data acquisition, predictive analytics, autonomous decision-making, dan system interoperability. Sensor piezoelektrik yang tertanam di struktur perkerasan mampu mendeteksi mikrofisur dengan akurasi 92% melalui analisis pola resonansi frekuensi. Sistem kamera 360° dengan resolusi 4K yang terhubung ke jaringan IoT melakukan pemindaian *runway* setiap 15 menit, menghasilkan *dataset* 2 TB/hari yang diolah menggunakan edge computing berbasis TensorFlow Lite (North dkk., 2021).

Integrasi dengan platform Digital Twin memungkinkan simulasi dampak lingkungan terhadap degradasi *runway*. Data historis suhu, kelembapan, dan beban pesawat dianalisis menggunakan regresi Bayesian untuk memprediksi jadwal pemeliharaan dengan kesalahan prediksi <3%. Sistem ini mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual dari 40 jam/minggu menjadi 5 jam/minggu, sekaligus meningkatkan deteksi *Foreign Object Debris* (FOD) hingga 98.7% (Van Dinter dkk., 2022).

c. Peran ESP32 dalam Sistem IoT untuk Robot Inspeksi

ESP32 dipilih sebagai main processing unit dalam robot inspeksi karena rasio performa-energi yang optimal (240 MHz dual-core dengan konsumsi daya 10 μ A dalam mode deep sleep). Modul ini mendukung komunikasi paralel melalui Bluetooth Low Energy (BLE) dan WiFi 802.11n, memungkinkan transmisi data sensor ke *cloud* sambil menjaga konektivitas lokal dengan stasiun kontrol. Protokol Over-The-Air (OTA) update pada ESP32 memfasilitasi pembaruan model YOLOv11 tanpa intervensi fisik, mengurangi downtime sistem hingga 70% (Zhang & Lv, 2022).

Implementasi *hardware*-accelerated encryption pada ESP32 (AES-256/SHA-2) menjamin keamanan data inspeksi yang kritis. Dalam pengujian lapangan, sistem berbasis ESP32 menunjukkan reliabilitas 99.2% dalam lingkungan dengan interferensi elektromagnetik tinggi. Integrasi dengan aktuator robotik melalui PWM 16-channel memungkinkan kontrol presisi pergerakan robot di medan *runway* yang kompleks (Al-Mashhadani & Shujaa, 2022).

6. Penerapan *Computer Vision* dan YOLOv11 dalam Deteksi Kerusakan *Runway*

a. Konsep Dasar *Computer Vision* dalam Infrastruktur

Computer vision memanfaatkan algoritma *deep learning* untuk menganalisis citra dari kamera, drone, atau sensor guna mendeteksi anomali struktural seperti retakan, genangan, dan deformasi permukaan (Spencer dkk., 2019; Yang dkk., 2024). Sistem ini bekerja *real-time* dengan akurasi tinggi dan dapat diintegrasikan ke jaringan kamera bandara tanpa modifikasi besar (Ilić, 2024). CNN memungkinkan deteksi multi-skala baik mikro maupun makro dengan akurasi hingga 98% (Modarres dkk., 2018; Shahin dkk., 2024).

b. Model YOLO: Konsep dan Perkembangan

YOLO menggabungkan klasifikasi dan lokalisasi dalam satu jaringan neural dengan pendekatan *single-shot*, lebih efisien dibanding dua tahap seperti R-CNN (Diwan dkk., 2023; Du, 2018). Versi YOLOv11 mengintegrasikan arsitektur *transformer-CNN*, meningkatkan kontekstualisasi spasial objek dan performa deteksi (Jiang & Zhong, 2025).

c. Keunggulan YOLOv11 dalam Deteksi Objek

Tabel II. 1 Perbandingan Performa Berbagai Versi YOLO pada Dataset COCO

Metrik	YOLOv3	YOLOv4	YOLOv11	YOLOv7	YOLOv11
mAP@0.5	55.3	65.7	68.9	73.4	78.1
FPS (Tesla V100)	45	62	140	160	155
Jumlah Parameter (juta)	61.5	52.5	36.7	71.2	68.3

YOLOv11 mencatatkan peningkatan *mean Average Precision* (mAP) sebesar 6.4% dibanding pendahulunya (YOLOv7) melalui implementasi *cross-stage partial connections* dan *deformable convolution layers*. Model ini mengadopsi *dynamic label assignment strategy* yang mengoptimasi *anchor matching* selama pelatihan, meningkatkan *Recall rate* untuk objek kecil seperti retakan mikroskopis hingga 22%. Efisiensi komputasi dipertahankan melalui *network pruning* adaptif yang secara otomatis menghapus *channel* redundan tanpa degradasi performa.

d. Implementasi YOLOv11 untuk Deteksi Kerusakan *Runway*

Implementasi mencakup tiga tahap: kurasi *dataset*, optimasi model, dan *deployment*. *Dataset* mencakup kondisi beragam seperti pencahayaan ekstrem, *occlusion*, dan berbagai tipe kerusakan (Arabi dkk., 2020). Teknik augmentasi seperti *mixup* dan *cutmix* digunakan untuk meningkatkan generalisasi model (Park dkk., 2022).

Pelatihan dilakukan dengan transfer *learning* dari COCO, diikuti *fine-tuning* menggunakan *learning rate cyclical* dan *mosaic augmentation* untuk meningkatkan deteksi objek parsial hingga 35%. Model dioptimasi menggunakan TensorRT (FP16), menghasilkan 45 FPS pada Jetson AGX Xavier. *Output* YOLOv11 dikombinasikan dengan *Image Processing* klasik untuk analisis tingkat kerusakan. Deteksi dipetakan secara geospasial dengan GPS RTK untuk menghasilkan peta digital kerusakan. Validasi di Bandara Soekarno-Hatta menunjukkan akurasi deteksi 96,7% dan *false positive* 1,3%, jauh lebih tinggi dibanding metode manual (Park dkk., 2022).

7. Konsep Dasar Rancang Bangun

Rancang bangun (*design and development*) adalah suatu proses sistematis untuk merancang, mengembangkan, dan merealisasikan suatu sistem atau produk teknis agar dapat memenuhi kebutuhan dan fungsi tertentu secara optimal. Dalam bidang rekayasa, rancang bangun mencakup integrasi dari berbagai disiplin ilmu, termasuk mekanika, elektronika, pemrograman, dan kontrol sistem, yang dirancang dalam satu kesatuan yang fungsional dan efisien (Suh, 2001).

Menurut Pahl dan Beitz (2007), proses rancang bangun terdiri dari empat tahap utama, yaitu: (1) perumusan masalah, (2) konsepsi solusi, (3) perancangan rinci, dan (4) realisasi atau implementasi. Tahapan ini menekankan pentingnya pemahaman mendalam terhadap kebutuhan pengguna serta evaluasi teknis untuk menghasilkan desain yang dapat diandalkan.

Secara umum, rancang bangun dalam sistem teknik terdiri dari beberapa subsistem utama, seperti sistem mekanik, yang mencakup kerangka, aktuator, dan struktur pendukung. Sistem elektronik, yang meliputi sensor, mikrokontroler, dan rangkaian kendali. Sistem perangkat lunak, yang berfungsi untuk memproses data, mengontrol aktuator, serta mengatur logika kerja sistem. Sistem komunikasi, yang memungkinkan transfer data antar komponen atau dengan sistem eksternal.

Prinsip dasar rancang bangun juga berkaitan erat dengan prinsip rekayasa sistem (*systems engineering*), yang menekankan interaksi antar elemen sistem serta pentingnya validasi dan verifikasi dalam setiap tahap pengembangan (Blanchard & Fabrycky, 2010). Dalam pengembangannya, rancang bangun modern juga banyak mengadopsi pendekatan modular design, yakni membagi sistem menjadi bagian-bagian yang dapat dikembangkan dan diuji secara independen untuk meningkatkan fleksibilitas dan skalabilitas sistem (Ulrich & Eppinger, 2016).

Selain itu, pendekatan user-centered design juga semakin umum digunakan, di mana kebutuhan, keterbatasan, dan preferensi pengguna menjadi acuan utama dalam pengambilan keputusan desain (Norman, 2013). Hal ini penting untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya fungsional, tetapi juga mudah dioperasikan, aman, dan sesuai dengan konteks penggunaannya. Dalam era industri 4.0, proses rancang bangun turut dipengaruhi oleh perkembangan teknologi digital seperti IoT, kecerdasan buatan (AI), dan pengolahan data besar (*big data*), yang mengubah cara sistem dirancang, diuji, dan dioperasikan (Xu dkk., 2018). Oleh karena itu, perancangan sistem modern dituntut untuk tidak hanya mempertimbangkan aspek fungsional dan struktural, tetapi juga aspek konektivitas, adaptabilitas, dan efisiensi energi.

B. Hasil Penelitian Yang Relevan

Penelitian sebelumnya memiliki peran penting sebagai panduan utama dalam merancang studi ini. Hasil-hasil tersebut berkontribusi dalam memperluas pemahaman serta memperdalam teori yang akan diterapkan. Maka dari itu peneliti melakukan observasi terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan. Setelah meninjau berbagai penelitian terdahulu, peneliti menemukan beberapa studi yang relevan dengan fokus penelitian saat ini. Oleh karena itu, hasil penelitian tersebut dijadikan sebagai referensi yang dapat di lihat pada tabel 2.1 berikut:

Tabel II. 2 Penelitian yang Relevan

No	Penelitian, Tahun, Judul	Hasil penelitian
1.	<i>(Zainab dkk., 2023), Foreign Object Debris (FOD) Classification Through Material Recognition Using Deep Convolutional Neural network with Focus on Metal</i>	Hasil penelitian Zainab dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan <i>Deep Convolutional Neural network</i> (DCNN), terutama model InceptionV3, sangat efektif untuk mengklasifikasikan material <i>Foreign Object Debris</i> (FOD), khususnya material logam yang sangat berbahaya bagi pesawat. Model InceptionV3 berhasil meningkatkan akurasi pengenalan logam sebesar 18% dan meningkatkan rata-rata akurasi untuk semua jenis material FOD sebesar 11%. Temuan ini mengimplikasikan bahwa pendekatan DCNN dapat secara signifikan meningkatkan kinerja sistem deteksi FOD otomatis di bandara, yang pada akhirnya dapat mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan manual yang berpotensi menimbulkan kesalahan manusia dan meningkatkan keselamatan penerbangan. Meskipun penelitian tersebut memiliki tujuan yang sama dengan penelitian ini yaitu memanfaatkan AI untuk otomatisasi deteksi FOD demi meningkatkan keselamatan penerbangan—terdapat perbedaan fundamental dalam

		<p>lingkup dan pendekatannya. Penelitian Zainab dkk. berfokus spesifik pada klasifikasi <i>material</i>, sementara penelitian ini memiliki cakupan yang lebih luas yaitu deteksi dan klasifikasi berbagai <i>jenis objek</i>, termasuk FOD dan kerusakan perkerasan, menggunakan model deteksi YOLOv11. Selain itu, implementasi dalam penelitian ini dilakukan pada sebuah platform robotik bergerak yang terintegrasi penuh dengan sistem IoT, yang membedakannya dari pendekatan klasifikasi citra yang lebih umum.</p>
2.	<p>(Suryan dkk., 2023), <i>Airport Runway Defect Detection Device: A Project-Based Learning Media</i></p>	<p>Penelitian oleh Suryan dkk. (2023), menghasilkan rancangan alat deteksi kerusakan landasan pacu bandara yang bertujuan sebagai media pembelajaran berbasis proyek untuk taruna Politeknik Penerbangan Palembang. Alat ini menggunakan teknologi <i>neural network</i> untuk mendeteksi kerusakan pada landasan pacu, dengan tujuan untuk mengurangi kesalahan manusia dalam inspeksi manual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain dan cara kerja alat ini efektif dalam membantu proses pembelajaran berbasis proyek, menciptakan suasana belajar yang baru dan memudahkan pemahaman materi secara praktis bagi taruna. Selain itu, alat ini berpotensi menjadi referensi untuk pengembangan perangkat serupa di masa depan, baik untuk pendidikan maupun inspeksi landasan pacu yang sebenarnya, sehingga berkontribusi pada inovasi pembelajaran dan peningkatan keselamatan penerbangan melalui deteksi dini kerusakan. Persamaan mendasar dengan penelitian ini terletak pada penggunaan teknologi <i>neural network</i> untuk mengatasi kelemahan inspeksi manual dan meningkatkan keselamatan penerbangan melalui deteksi dini</p>

		<p>kerusakan. Namun, terdapat perbedaan signifikan pada tujuan akhir dan tingkat implementasi sistem. Penelitian oleh Suryan dkk. bertujuan utama sebagai media pembelajaran berbasis proyek bagi taruna, di mana keberhasilannya diukur dari efektivitasnya dalam proses edukasi. Sebaliknya, penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe operasional yang siap uji di lingkungan bandara sesungguhnya, dengan lingkup deteksi yang lebih luas mencakup kerusakan perkerasan dan <i>Foreign Object Debris</i> (FOD). Selain itu, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki integrasi teknologi yang lebih kompleks, yaitu menggabungkan model deteksi objek YOLOv11 pada platform robotik bergerak yang terhubung dengan <i>Internet of Things</i> (IoT) untuk pelaporan <i>real-time</i>. Dengan demikian, penelitian ini dapat dipandang sebagai pengembangan konsep lebih lanjut, yang membawa teknologi deteksi kerusakan dari ranah pendidikan ke arah implementasi praktis di lapangan.</p>
3.	<p>(Bribe & Endrawijaya, t.t.), Rancangan Receiver Pendeteksi <i>Foreign Object Debris</i> (FOD) Untuk Membantu Petugas Teknik Umum Di Bandar Udara Sam Ratulangi Manado</p>	<p>Hasil penelitian menghasilkan rancangan sebuah <i>receiver</i> yang bertujuan untuk membantu petugas teknik umum di Bandar Udara Sam Ratulangi Manado dalam mendeteksi <i>Foreign Object Debris</i> (FOD). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh metode pendeteksian FOD yang saat itu masih manual, kurang efisien dari segi waktu, dan berpotensi tidak aman bagi petugas. Rancangan <i>receiver</i> ini menggunakan modul RF untuk menerima data dari <i>transmitter</i> yang mendeteksi FOD di area <i>runway</i>. Dengan adanya rancangan alat ini, diharapkan petugas dapat lebih cepat mengetahui keberadaan FOD dan segera membersihkannya, sehingga meningkatkan keamanan di area pergerakan pesawat. Persamaan</p>

		<p>mendasar dengan penelitian ini terletak pada tujuan utamanya, yaitu sama-sama ingin meningkatkan efisiensi dan keselamatan deteksi FOD dengan mengurangi ketergantungan pada petugas. Namun, terdapat perbedaan yang sangat fundamental pada teknologi, lingkup, dan platform yang digunakan. Penelitian Bribe & Endrawijaya menggunakan sistem deteksi berbasis sinyal Radio Frekuensi (RF), sementara penelitian ini mengadopsi teknologi <i>Computer Vision</i> berbasis AI (YOLOv11) yang mampu menganalisis visual secara cerdas. Selain itu, lingkup deteksi penelitian ini lebih luas karena tidak hanya mencakup FOD, tetapi juga kerusakan perkerasan, dan diimplementasikan pada sebuah platform robotik bergerak yang terintegrasi penuh, berbeda dari sistem <i>receiver-transmitter</i> pada penelitian sebelumnya.</p>
4.	<p>(Sasmito dkk., 2023), Deteksi Kerusakan Jalan Menggunakan Pengolahan Citra <i>Deep Learning</i> di Kota Semarang</p>	<p>Hasil penelitian Sasmito dkk. (2023), menunjukkan bahwa teknologi <i>Deep Learning Neural network</i>, khususnya algoritma <i>You Only Look Once</i> (YOLO), dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan jalan di Kota Semarang melalui pengolahan citra. Penelitian ini memanfaatkan prinsip penginderaan jauh. Meskipun hasil pencarian tidak memberikan detail spesifik mengenai tingkat akurasi atau jenis kerusakan yang berhasil dideteksi, secara umum penelitian ini membuktikan efektivitas metode <i>deep learning</i> dalam mengidentifikasi kerusakan jalan. Persamaan yang sangat kuat dengan penelitian ini terletak pada penggunaan teknologi inti, di mana keduanya sama-sama mengimplementasikan algoritma YOLO untuk mengidentifikasi kerusakan permukaan melalui pengolahan citra. Namun, terdapat perbedaan signifikan</p>

		<p>dalam hal lingkungan aplikasi, cakupan deteksi, dan tingkat validasi sistem. Penelitian ini diterapkan pada lingkungan bandar udara yang lebih kritis, dengan lingkup deteksi yang lebih luas karena tidak hanya mencakup kerusakan perkerasan, tetapi juga <i>Foreign Object Debris</i> (FOD). Selain itu, sementara penelitian Sasmito dkk. membuktikan efektivitas metode secara umum, penelitian ini melangkah lebih jauh dengan menyajikan hasil validasi kuantitatif yang spesifik, seperti nilai <i>Precision</i>, <i>Recall</i>, dan <i>mAP</i> , serta mengimplementasikannya pada sebuah platform robotik bergerak yang terintegrasi penuh. Dengan demikian, penelitian ini dapat dianggap sebagai implementasi dan validasi yang lebih mendalam dari teknologi YOLO, yang diterapkan pada kasus penggunaan yang lebih spesifik dan kritis dengan cakupan deteksi yang lebih luas.</p>
5.	<p>(Utomo & Lestari, 2021), <i>Road Detection Application Using K-Nn Algorithm (K-Nearest Neighbour)</i></p>	<p>Hasil penelitian Utomo & Lestari (2021) adalah pengembangan sebuah aplikasi deteksi kerusakan jalan raya menggunakan algoritma <i>K-Nearest Neighbor</i> (KNN). Aplikasi ini bekerja dengan cara mengambil gambar menggunakan kamera <i>smartphone</i>, kemudian memproses gambar tersebut (melalui <i>grayscale</i> dan pengambilan bentuk persegi panjang) untuk mendeteksi kerusakan. Proses ini didukung oleh modul <i>Computer Vision</i> dari Python. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menciptakan sistem deteksi yang lebih akurat dan mampu membedakan berbagai jenis kerusakan pada jalan. Persamaan dengan penelitian ini terletak pada pemanfaatan platform bergerak (ponsel vs. robot) yang dilengkapi kamera untuk mendeteksi kerusakan infrastruktur melalui pengolahan citra.</p>

		<p>Namun, terdapat perbedaan mendasar pada kompleksitas teknologi AI dan platform yang digunakan. Penelitian Utomo & Lestari menggunakan algoritma <i>machine learning</i> konvensional (KNN) dengan pemrosesan gambar dasar, sementara penelitian ini mengimplementasikan arsitektur <i>Deep Learning</i> yang jauh lebih canggih, yaitu YOLOv11, untuk deteksi objek yang lebih akurat dan beragam. Selain itu, lingkup deteksi penelitian ini lebih luas, mencakup kerusakan perkerasan dan FOD di lingkungan bandara yang kritis, serta diimplementasikan pada platform robotik khusus yang terintegrasi, bukan pada aplikasi <i>smartphone</i> untuk penggunaan umum.</p>
6.	<p>(M'Sila dkk., 2022) <i>Automated Foreign Object Debris Detection System based on UAV</i></p>	<p>Hasil penelitian M'Sila dkk. (2022) membahas tentang pengembangan sistem otomatis untuk mendeteksi <i>Foreign Object Debris</i> (FOD) menggunakan <i>Unmanned Aerial Vehicles</i> (UAVs) atau drone. Penelitian ini menghasilkan rancangan dan pengujian sebuah sistem di mana drone secara otonom melakukan survei pada landasan pacu bandara untuk mencari FOD. Sistem ini kemudian menganalisis data yang dikumpulkan oleh drone menggunakan algoritma tertentu untuk mengidentifikasi keberadaan FOD. Hasil penelitian kemungkinan menunjukkan tingkat akurasi dan efisiensi sistem dalam mendeteksi berbagai jenis FOD dalam kondisi operasional bandara. Persamaan konseptual yang kuat dengan penelitian ini terletak pada tujuan utamanya, di mana keduanya sama-sama mengembangkan sistem otomatis menggunakan kendaraan nirawak (<i>unmanned vehicle</i>) untuk mensurvei landasan pacu dan mendeteksi FOD guna meningkatkan keselamatan. Namun, perbedaan</p>

		<p>mendasar terletak pada platform yang digunakan dan cakupan deteksinya. Penelitian M'Sila dkk. menggunakan platform udara (UAV), sementara penelitian ini mengadopsi platform darat berupa robot (<i>Unmanned Ground Vehicle</i>). Selain itu, lingkup deteksi penelitian ini lebih komprehensif karena tidak hanya mencakup FOD, tetapi juga kerusakan perkerasan, dan menggunakan algoritma deteksi objek spesifik yaitu YOLOv11 untuk analisis <i>real-time</i>.</p>
--	--	---