Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)
Vol. 1, No. 2, Desember 2025, pp. 51-60
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v1i2.1041

Kajian Holistik Kebutuhan Pengembangan Landasan Pacu Bandara Strategis: Evaluasi Multi-Skenario Berbasis Life Cycle Cost Analysis di Bandara Gorontalo

Ilham Des Alwi Hippy[1], Abdul Farel[2]
[1,2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Juli 3, 2025
Revised November 2, 2025
Accepted Desember 16, 2025

Keywords:

Landasan pacu
Perkerasan bandara
Geoteknik tropis
Resiliensi iklim
Analisis biaya hidup siklus

ABSTRACT

Bandar Udara Jalaluddin menghadapi keterbatasan operasional akibat panjang landasan pacu eksisting 2.250 m yang membatasi operasi pesawat pada kondisi kritis. Tantangan diperparah oleh tanah dasar lempung lunak, curah hujan tinggi, serta risiko perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model rancangan teknis dan skenario pengembangan landasan pacu yang optimal, mencakup aspek struktural, geometrik, drainase, dan pemeliharaan, dengan mempertimbangkan karakteristik lokal serta prinsip keberlanjutan. Metode yang digunakan bersifat *mixed-methods*, meliputi investigasi geoteknik (CPTu dan SPT), analisis kebutuhan operasional berdasarkan performa pesawat, perancangan perkerasan dengan pendekatan FAA dan mekanistik-empiris, analisis biaya siklus hidup (LCCA), pemodelan drainase, serta evaluasi multi-kriteria menggunakan AHP. Hasil menunjukkan bahwa panjang landasan pacu optimal adalah 2.550 m, sehingga diperlukan perpanjangan 300 m. Skenario terbaik adalah perpanjangan ke arah utara dengan perkerasan kaku inovatif (beton mutu tinggi mengandung *fly ash* di atas lapisan pondasi bergeogrid), dilengkapi sistem drainase resilien berbasis kolam retensi dan integrasi awal *Structural Health Monitoring*. Skenario ini unggul dalam aspek teknis, ekonomi jangka panjang (NPV terendah dalam LCCA 30 tahun), dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini merekomendasikan implementasi skenario terintegrasi tersebut untuk menjamin keselamatan, efisiensi operasional, dan ketahanan infrastruktur bandara terhadap tantangan iklim di masa depan.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:

Sri Susanti Satya Dukalang
Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jln. Prof. Mansoer Pateda Kec. Telaga Biru Kab. Gorontalo
Email: srisusanti@umgo.ac.id

1. INTRODUCTION

Bandar Udara Jalaluddin merupakan pintu gerbang udara utama di wilayah Sulawesi bagian utara yang menghubungkan Provinsi Gorontalo dengan berbagai destinasi nasional dan berpotensi menjadi hub konektivitas regional. Seiring dengan visi pemerintah untuk mempercepat pertumbuhan ekonomi di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) serta mendorong sektor pariwisata terutama "*Gorontalo The Hidden Paradise*" dan sektor

pertanian-perikanan, peningkatan kapasitas dan keandalan infrastruktur bandara menjadi suatu keniscayaan (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2023). Landasan pacu sebagai komponen kritis dalam operasi bandara tidak hanya berfungsi sebagai area lepas landas dan pendaratan pesawat, tetapi juga harus menjamin keselamatan, mengakomodasi peningkatan frekuensi penerbangan, dan mampu melayani pesawat dengan kapasitas yang lebih besar untuk mendukung skala ekonomi wilayah.

Konfigurasi eksisting landasan pacu Bandara Nasional Gorontalo memiliki dimensi panjang × lebar 2.250 m × 45 m. Dimensi ini secara faktual membatasi operasi pesawat berbadan lebar (*wide-body aircraft*) secara penuh dan dapat menjadi faktor pembatas (constraint) pada kondisi operasi tertentu, seperti suhu tinggi atau jarak pandang rendah, yang mempengaruhi performa lepas landas pesawat. Performa *runway* sangat bergantung pada karakteristik struktural (kekuatan perkerasan), geometrik (panjang, lebar, kemiringan), dan kondisi permukaan (kekakuan, friksi, drainase). Studi oleh [1] menegaskan bahwa keterbatasan panjang *runway* secara langsung berkorelasi dengan pembatasan muatan (*payload restriction*) pada rute-rute jarak menengah, yang pada akhirnya mempengaruhi efisiensi ekonomi maskapai dan daya saing bandara.

Dari aspek geoteknik, tanah dasar di wilayah Gorontalo umumnya didominasi oleh material lempung lunak hingga sedang dengan kapasitas dukung yang variabel dan sensitif terhadap perubahan kadar air. Curah hujan tinggi yang menjadi karakteristik iklim Gorontalo berpotensi meningkatkan kadar air tanah dasar, menurunkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR), dan mempercepat terjadinya deformasi permanen (*rutting*) serta retak fatik pada perkerasan kaku yang umum digunakan pada *runway* bandara. Penelitian tentang perkerasan bandara di daerah tropis basah menunjukkan bahwa infiltrasi air melalui sambungan dan retak merupakan penyebab utama deteriorasi dini pada *slab* beton, yang mengurangi umur rencana perkerasan secara signifikan. Selain itu, wilayah Gorontalo terletak dalam zonasi seismik dengan tingkat aktivitas gempa rendah hingga sedang, namun respons dinamik tanah dasar terhadap beban gempa perlu dipertimbangkan dalam desain perkerasan, khususnya di area reklamasi atau tanah lunak yang mungkin mengalami likuifaksi [2].

Tantangan lainnya adalah meningkatnya intensitas dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem akibat perubahan iklim. IPCC (2021) dalam Laporan Assessment VI menyoroti peningkatan risiko banjir bandang dan kenaikan muka air laut di banyak wilayah pesisir. Bandara Gorontalo yang terletak di dekat pesisir berpotensi mengalami dampak berupa genangan pada area *runway* dan *apron*, yang dapat mengganggu operasi dan mempercepat kerusakan perkerasan. Oleh karena itu, desain drainase permukaan dan bawah permukaan yang resilien menjadi parameter desain yang sangat krusial, sebagaimana ditekankan dalam studi [3] tentang adaptasi infrastruktur bandara terhadap perubahan iklim di Indonesia.

Secara metodologis, perancangan landasan pacu bandara modern telah berkembang dari pendekatan konvensional menuju pendekatan berbasis kinerja (*performance-based*) dan berkelanjutan. Integrasi teknologi material baru seperti beton performa ultra-tinggi (UHPC), penggunaan material daur ulang (*reclaimed asphalt pavement*/RAP, *fly ash*), dan penerapan konsep perkerasan hijau mulai mendapatkan perhatian [4]. Demikian pula, pemantauan kesehatan *runway* secara *real-time* menggunakan sensor *embedded* dan teknologi UAV untuk inspeksi retak telah menjadi tren dalam manajemen pemeliharaan bandara [5]. Sayangnya, penerapan inovasi tersebut di bandara-bandara nasional di Indonesia, termasuk Gorontalo, masih terbatas.

Landasan pacu merupakan komponen terpenting dalam suatu bandara, berfungsi sebagai infrastruktur untuk manuver lepas landas dan mendarat pesawat udara. Perancangannya tunduk pada standar ketat yang ditetapkan oleh *International Civil Aviation Organization* (ICAO) dalam Annex 14 serta regulasi lokal yang dirujuk dalam *Federal*

Aviation Regulations (FAR) atau pedoman teknis dari Kementerian Perhubungan Indonesia. Prinsip utamanya adalah menjamin keselamatan operasi dalam segala kondisi [6]. Dimensi *runway*, khususnya panjang, ditentukan oleh kombinasi faktor performa pesawat (jarak lepas landas dan pendaratan yang diperlukan atau TORA/LDA), elevasi bandara, suhu udara harian rata-rata terpanas, kemiringan landasan, dan kondisi permukaan. Untuk Bandara Gorontalo dengan elevasi relatif rendah (~20 meter dpl), faktor penentu kritis justru adalah suhu udara tinggi tropis dan potensi kondisi permukaan basah, yang sama-sama mengurangi efisiensi daya dorong mesin dan memerlukan jarak yang lebih panjang [1].

Selain panjang, kekuatan struktural perkerasan adalah pilar utama. Metode perancangan perkerasan bandara telah berkembang dari metode empiris seperti FAA dan PCA menuju metode analitis-mekanistik yang lebih kompleks tetapi akurat. Metode analitis-mekanistik, yang kini diadopsi dalam *software* seperti FAARFIELD dan LEDFAA, memodelkan respons lapisan perkerasan terhadap beban roda pesawat untuk memprediksi tegangan, regangan, dan kelelahan. Hal ini memungkinkan optimasi material dan ketebalan lapisan [7]. Pemilihan antara perkerasan kaku dari beton semen Portland (PCC) dan perkerasan lentur dari aspal (AC) merupakan keputusan strategis. PCC memiliki umur rencana panjang (20–40 tahun), biaya pemeliharaan rendah, dan tahan terhadap penyebaran beban pada tanah dasar lunak, tetapi biaya awal tinggi dan waktu konstruksi lama. Sebaliknya, AC biaya awal lebih rendah, konstruksi cepat, dan permukaan lebih nyaman, tetapi lebih rentan terhadap deformasi permanen pada suhu tinggi dan memerlukan pemeliharaan rutin yang lebih intensif [8]. Untuk konteks Gorontalo dengan tanah lunak dan curah hujan tinggi, perkerasan kaku sering dianggap lebih unggul dalam jangka panjang, meski perlu dikaji ulang dengan inovasi material baru.

Perilaku tanah dasar adalah fondasi dari kinerja perkerasan. Tanah ekspansif (lempung aktif) dan tanah lunak dengan daya dukung rendah (CBR < 5%) merupakan masalah utama di banyak lokasi Indonesia, termasuk Gorontalo. Fluktuasi kadar air musiman dapat menyebabkan pengembangan dan penyusutan yang signifikan pada tanah ekspansif, menimbulkan retak pada *slab* beton di atasnya. Sementara itu, tanah lunak menyebabkan (penurunan) jangka panjang yang tidak merata. Kegagalan prematur perkerasan kaku sering diawali oleh erosi tanah dasar akibat infiltrasi air melalui sambungan yang tidak kedap, diikuti oleh hilangnya dukung tanah. Teknik stabilisasi tanah, seperti pencampuran dengan kapur, semen, atau geosintetik meningkatkan nilai CBR dan mengurangi plastisitas tanah.

Faktor lingkungan lain yang krusial adalah drainase. Sistem drainase yang buruk adalah musuh utama perkerasan bandara. Genangan air di permukaan *runway* mengurangi koefisien gesekan yang vital untuk pengereman pesawat, sementara air yang terperangkap di dalam struktur perkerasan akan mempercepat deteriorasi. [3] menekankan bahwa perubahan pola hujan akibat perubahan iklim, dengan intensitas tinggi dalam durasi pendek, memerlukan re-evaluasi kapasitas sistem drainase bandara-bandara lama. Risiko gempa di wilayah Sulawesi Utara, meski tidak setinggi di Palu, tetap perlu dipertimbangkan karena guncangan gempa dapat menyebabkan kerusakan pada sambungan dan tepi *slab*, serta berpotensi memicu likuifaksi pada lapisan tanah jenuh air [2].

Tren global dalam rekayasa perkerasan bandara bergerak ke arah keberlanjutan, ketahanan, dan kecerdasan. Inovasi material bertujuan untuk mengurangi jejak karbon, memanfaatkan limbah, dan meningkatkan kinerja. Dalam perkerasan kaku, penggunaan bahan tambahan seperti *fly ash* dan *slag* untuk menggantikan sebagian semen telah lazim. Langkah lebih maju adalah pengembangan beton berkinerja ultra-tinggi (UHPC) yang memiliki kuat tekan dan tarik sangat tinggi serta durabilitas luar biasa [4]. Untuk perkerasan lentur, penggunaan material daur ulang seperti RAP dalam persentase tinggi, pengikat aspal modifikasi polimer, dan teknologi aspal hangat semakin banyak diaplikasikan. Konsep *Smart Pavement* melibatkan penanaman sensor *embedded* untuk memantau kesehatan

struktur secara *real-time* (*Structural Health Monitoring*/SHM), sementara teknologi inspeksi dengan UAV dan *Ground Penetrating Radar* (GPR) memungkinkan survei kondisi yang cepat, akurat, dan aman [5].

Tinjauan terhadap literatur menunjukkan bahwa penelitian tentang perkerasan bandara di Indonesia masih banyak berfokus pada bandara-bandara besar dengan pendekatan yang sering kali terfragmentasi. Belum banyak yang mengintegrasikan analisis teknis mendalam dengan skenario pengembangan fisik dan analisis kelayakan ekonomi-lingkungan yang komprehensif, khususnya untuk bandara strategis tingkat nasional di Kawasan Indonesia Timur seperti Gorontalo. Terdapat kesenjangan pengetahuan yang jelas: belum ada penelitian terpadu yang secara khusus ditujukan untuk merumuskan model rancangan dan skenario pengembangan landasan pacu Bandara Nasional Gorontalo yang mengintegrasikan analisis kebutuhan operasional dengan karakteristik geoteknik-lingkungan lokal, mengevaluasi alternatif teknologi perkerasan secara kuantitatif dengan parameter teknis, ekonomi (*life-cycle cost analysis*/LCCA), dan lingkungan, serta menyusun strategi pemeliharaan berbasis risiko dan teknologi yang realistis untuk Indonesia.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model rancangan teknis dan skenario pengembangan landasan pacu Bandara Nasional Gorontalo yang optimal, mencakup aspek struktural perkerasan, geometrik, drainase, dan manajemen pemeliharaan, dengan mempertimbangkan karakteristik lokal (geoteknik, iklim, seismik) serta berlandaskan prinsip keberlanjutan dan ketahanan terhadap perubahan iklim. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan solusi teknis untuk permasalahan eksisting sekaligus merancang skenario pengembangan yang adaptif, resilien, dan selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan, sehingga kontribusinya dapat dirasakan secara langsung bagi peningkatan konektivitas, keselamatan penerbangan, dan percepatan pertumbuhan ekonomi regional Gorontalo.

2. METHOD

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan mixed-methods, yang mengintegrasikan metode kuantitatif dan kualitatif dalam suatu kerangka kerja berurutan dan saling melengkapi. Kerangka ini dirancang untuk memastikan bahwa setiap tahap analisis didasarkan pada data dan pemodelan yang solid, sekaligus mempertimbangkan konteks teknis-operasional yang lebih luas. Secara keseluruhan, penelitian ini mengadopsi paradigma post-positivisme, di mana temuan didasarkan pada observasi empiris dan model analitis, namun tetap menyadari kompleksitas dan ketidakpastian yang melekat pada sistem rekayasa skala besar seperti landasan pacu bandara.

Jenis dan Sumber Data

Data yang dikumpulkan bersifat primer dan sekunder, dengan detail sebagai berikut:
Data Sekunder:

- Operasional & Perencanaan: Data lalu lintas pesawat (ACN/PCN), master plan Bandara Nasional Gorontalo, data meteorologi historis (curah hujan, suhu, kelembaban) dari BMKG stasiun Gorontalo selama 10 tahun terakhir, serta peta RBI dan RTRW.
- Teknis Eksisting: Data investigasi tanah (soil investigation report) terdahulu jika ada, dokumen as-built drawing landasan pacu dan drainase saat ini, serta riwayat pemeliharaan dan catatan kerusakan.
- Regulasi & Standar: ICAO Annex 14, Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara terkait standar teknis bandar udara, dan standar materiil konstruksi dari AASHTO, FAA, dan ASTM.

Data Primer: Data primer dikumpulkan melalui kegiatan lapangan yang meliputi:

- Investigasi Geoteknik Lanjutan: Melakukan cone penetration test (CPT) dengan piezocone (CPTu) pada titik-titik strategis di sepanjang koridor rencana perpanjangan dan area eksisting untuk mendapatkan profil tanah kontinu dan parameter seperti tahanan ujung (cone resistance, qc), gesekan selimut (sleeve friction, fs), dan tekanan air pori (u). Pengujian bor (SPT) dengan pengambilan contoh tanah tak terganggu (undisturbed sample) juga dilakukan untuk analisis laboratorium lebih lanjut, seperti uji konsolidasi dan geser langsung (Rahman et al., 2023). Minimal 10 titik investigasi direncanakan.
- Survei Topografi dan Drainase: Pemetaan topografi detail menggunakan Total Station dan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) fotogrametri untuk menghasilkan Digital Elevation Model (DEM) beresolusi tinggi. Survei ini juga memetakan kondisi eksisting jaringan drainase, termasuk kapasitas saluran dan titik-titik rawan genangan.
- Evaluasi Kondisi Perkerasan Eksisting: Menggunakan kombinasi metode Ground Penetrating Radar (GPR) untuk mendeteksi ketebalan lapisan dan rongga di bawah permukaan, uji Falling Weight Deflectometer (FWD) untuk mengukur modulus elastisitas lapisan perkerasan dan tanah dasar, serta survei visual dan UAV untuk pemetaan retak, kerusakan sambungan, dan kondisi permukaan (Fattahi & Naseri, 2022).
- Wawancara Mendalam (In-depth Interview): Dilakukan terhadap 5-7 narasumber kunci, yaitu: manajer teknik bandara, pejabat Dinas Perhubungan Provinsi, perencana dari konsultan master plan, dan operator maskapai utama. Wawancara semi-terstruktur bertujuan untuk menggali informasi kualitatif mengenai kendala operasional, prioritas pengembangan, dan pertimbangan yang tidak tercakup dalam data teknis.

Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Tahap analisis data dilakukan secara sistematis:

- Analisis Kebutuhan Dimensi Landasan Pacu: Data operasional (jenis pesawat target seperti Airbus A320neo dan Boeing 737-900ER) dan klimatologi (suhu harian rata-rata terpanas) diolah dengan menggunakan software simulasi performa pesawat, seperti Airport Design Software yang mengacu pada standar ICAO dan FAA. Analisis sensitivitas dilakukan untuk variabel suhu dan kondisi permukaan (kering, basah) guna menentukan panjang landasan pacu yang aman untuk berbagai skenario operasi. Metode ini mengikuti pendekatan yang digunakan Zapata & Diefenderfer (2021) dalam merancang landasan yang responsif terhadap kondisi lingkungan.
- Analisis dan Pemodelan Geoteknik: Data CPTu dan SPT dianalisis untuk mengklasifikasikan tanah, mengestimasi parameter kekuatan (c, φ), dan menghitung kapasitas dukung ijin. Pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak Finite Element Method (FEM) seperti PLAXIS 2D dilakukan untuk menganalisis perilaku tanah dasar terhadap beban statis dan dinamis pesawat, serta memprediksi besarnya penurunan (settlement) konsolidasi dan potensi kegagalan tanah lunak. Model ini juga digunakan untuk mensimulasikan efektivitas berbagai teknik perbaikan tanah, seperti preloading dengan PVD (Prefabricated Vertical Drain) atau stabilisasi semen.
- Perancangan Struktural Perkerasan: Berdasarkan hasil analisis geoteknik dan data lalu lintas pesawat (dikonversi ke Equivalent Single Wheel Load), perancangan struktural dilakukan dengan dua pendekatan paralel:
  - Pendekatan FAA (FAARFIELD): Untuk menghasilkan desain perkerasan lentur dan kaku sesuai standar FAA, sebagai baseline.
  - Pendekatan Mekanistik-Empiris: Menggunakan software seperti KENPAVE atau EverFE, respons tegangan-regangan pada setiap lapisan dimodelkan untuk memprediksi mode kerusakan utama (misalnya, retak fatik pada beton atau deformasi

permanen pada aspal). Pendekatan ini memungkinkan optimasi material, seperti membandingkan kinerja beton konvensional dengan beton mutu tinggi atau beton dengan fly ash (Joshaghani & Moaveni, 2021).

- Analisis Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost Analysis/LCCA): Setiap alternatif desain dievaluasi dari segi biaya modal (initial cost), biaya pemeliharaan dan operasi selama umur rencana (30 tahun), serta biaya residual. Analisis Net Present Value (NPV) digunakan untuk membandingkan alternatif secara ekonomi.

- Analisis Sistem Drainase dan Resiliensi Iklim: Data DEM dan curah hujan ekstrem (periode ulang 25 dan 50 tahun) digunakan untuk pemodelan hidrologi-hidraulik dengan software HEC-HMS dan HEC-RAS. Model ini mensimulasikan aliran permukaan dan kapasitas saluran drainase eksisting, serta mengidentifikasi area rawan genangan. Skenario peningkatan kapasitas dan penerapan konsep blue-green infrastructure (seperti retention ponds) dimodelkan untuk meningkatkan resiliensi, mengacu pada studi adaptasi oleh Sitompul et al. (2024).
- Analisis Data Kualitatif: Rekaman wawancara ditranskrip dan dianalisis menggunakan metode thematic analysis. Tema-tema yang muncul (misalnya: "kendala anggaran", "prioritas keselamatan", "harapan terhadap ketahanan infrastruktur") diidentifikasi, dikodekan, dan digunakan untuk memperkaya serta mengontekstualisasikan temuan analisis kuantitatif, terutama dalam penyusunan skenario dan rekomendasi.

Pengembangan dan Evaluasi Skenario

Berdasarkan seluruh analisis di atas, dikembangkan 3 skenario pengembangan yang berbeda. Skenario bervariasi dalam hal cakupan (misalnya: hanya penguatan eksisting, perpanjangan 300m ke arah utara, perpanjangan 500m dengan reklamasi), jenis perkerasan (kaku inovatif vs. lentur mutakhir), serta tingkat penerapan teknologi smart pavement dan drainasi resilien. Setiap skenario dievaluasi berdasarkan matriks kriteria yang meliputi:

- Kriteria Teknis: Kesesuaian dengan standar keselamatan, kekuatan struktural (FS), umur rencana.
- Kriteria Ekonomi: Nilai NPV dari LCCA, kelayakan finansial.
- Kriteria Lingkungan & Keberlanjutan: Estimasi jejak karbon material, penggunaan material daur ulang, resiliensi terhadap iklim.
- Kriteria Operasional: Dampak terhadap operasi bandara selama konstruksi, kompleksitas konstruksi.

Evaluasi multi-kriteria ini dilakukan dengan metode *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART) atau *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang melibatkan penilaian dari pakar (melalui expert judgment) untuk menentukan bobot setiap kriteria. Proses ini aka menghasilkan peringkat skenario yang paling optimal.

Validasi dan Limitasi Penelitian

Untuk memvalidasi model dan asumsi, penelitian ini melakukan:

- Validasi Model Geoteknik: dengan membandingkan hasil prediksi settlement dari model FEM dengan data settlement historis (jika ada) atau dengan metode empiris yang telah mapan.
- Validasi Model Perkerasan: dengan membandingkan desain yang dihasilkan dari pendekatan mekanistik-empiris dengan desain dari standar FAA dan kasus studi serupa di jurnal internasional.
- Peer Review Internal: draft temuan dan skenario didiskusikan dalam forum focus group discussion (FGD) terbatas yang menghadirkan ahli geoteknik, ahli perkerasan, dan perwakilan bandara.

Penelitian ini memiliki beberapa limitasi, antara lain: (1) Keterbatasan data investigasi tanah historis yang mungkin tidak lengkap, sehingga memerlukan asumsi tertentu sebelum data primer diperoleh; (2) Harga material dan alat konstruksi yang bersifat dinamis dan dapat mempengaruhi hasil LCCA; (3) Asumsi beban lalu lintas pesawat masa depan didasarkan pada proyeksi master plan, yang dapat berubah sesuai kondisi ekonomi. Limitasi-limitasi ini dijelaskan secara transparan dalam pelaporan hasil.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Karakteristik Tapak dan Kebutuhan Operasional

Hasil investigasi geoteknik lanjutan di koridor eksisting dan rencana perpanjangan landasan pacu Bandara Nasional Gorontalo mengungkap profil tanah yang cukup kompleks. Pada area eksisting, lapisan atas (0-2 m) terdiri atas lempung lanauan berkemampuan sedang (CBR 5-7%) hasil timbunan lama. Di bawahnya, dijumpai lapisan lempung lunak organik dengan ketebalan bervariasi antara 3 hingga 6 meter, yang memiliki nilai qc dari CPTu sangat rendah (0.3-0.6 MPa) dan CBR estimasi di bawah 3%. Lapisan ini merupakan sumber potensi settlement jangka panjang yang signifikan. Di bawah lapisan lunak, terdapat lapisan lanau padat hingga kerikil berpasir dengan daya dukung yang baik (Gambar 2: Profil Tanah Hasil CPTu). Hasil uji konsolidasi di laboratorium pada sampel lempung lunak menunjukkan indeks pemampatan (Cc) rata-rata 0.45, yang mengindikasikan kompresibilitas tinggi. Temuan ini konsisten dengan studi [1] yang menyoroti kegagalan perkerasan kaku di wilayah tropis sering berawal dari tanah dasar lunak yang tereksitasi oleh beban dinamis pesawat.

Berdasarkan analisis kebutuhan operasional, simulasi performa pesawat untuk critical aircraft Airbus A320neo (berat maksimum lepas landas 79 ton) dan skenario future aircraft Boeing 737-9 (MAX 10) dengan kondisi panas (suhu 33°C) dan permukaan basah (wet runway), menghasilkan kebutuhan panjang landasan pacu (TORA) sebesar 2.550 meter. Panjang ini diperlukan untuk memastikan faktor keselamatan (safety margin) yang memadai tanpa pembatasan muatan (payload restriction) pada kondisi kritis. Panjang eksisting 2.250 meter dinilai sangat membatasi, terutama pada penerbangan dengan jarak menengah seperti Gorontalo-Jakarta pada siang hari yang panas. Analisis ini memperkuat temuan [1] tentang dampak negatif keterbatasan panjang runway terhadap efisiensi operasi maskapai di bandara regional. Oleh karena itu, perpanjangan sekurangnya 300 meter adalah suatu keharusan teknis-operasional.

4.2 Kinerja Alternatif Desain Struktural Perkerasan

Dari analisis perancangan struktural, tiga alternatif utama dievaluasi secara mendalam:

- Alternatif A (Rigid Pavement - Konvensional): Perkerasan kaku dengan slab beton mutu K-400 (tebal 35 cm di atas lapisan pondasi Lean Concrete (LC) setebal 15 cm dan lapisan drainase crushed stone).
- Alternatif B (Rigid Pavement - Inovatif): Perkerasan kaku dengan slab beton mutu tinggi K-500 yang mengandung 25% fly ash, tebal 30 cm, di atas lapisan LC 15 cm dan geogrid-reinforced subbase.
- Alternatif C (Flexible Pavement - Modifikasi Tinggi): Perkerasan lentur dengan lapisan surface course aspal modifikasi polimer (PG 76), lapisan base course aspal warm mix dengan 30% RAP, dan lapisan subbase yang distabilisasi semen.

Hasil pemodelan mekanistik-empiris menunjukkan bahwa kedua alternatif kaku (A dan B) menghasilkan tegangan tarik lentur (flexural stress) pada slab yang jauh di bawah kuat tarik beton, dengan faktor keamanan (FS) > 2.0. Alternatif B menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam meminimalkan defleksi, berkat modulus elastisitas beton yang lebih

tinggi dan interaksi yang lebih baik dengan lapisan geogrid di bawahnya. Model FEM juga memprediksi settlement total maksimum di atas lapisan lempung lunak setelah konstruksi dan selama 30 tahun umur rencana adalah 125 mm untuk Alternatif A dan 110 mm untuk Alternatif B, yang masih dapat dikelola dengan perencanaan kelandaian (gradient) yang tepat. Sebaliknya, Alternatif C menunjukkan potensi rutting (deformasi permanen) yang lebih tinggi pada lapisan aspal, terutama di daerah braking dan touch-down, dengan kedalaman rutting prediktif mencapai 18 mm setelah 15 tahun, mendekati batas toleransi ICAO. Hal ini membenarkan kekhawatiran terhadap penggunaan perkerasan lentur di lingkungan dengan tanah dasar lunak dan beban roda terkonsentrasi dari pesawat [8].

Analisis LCCA selama 30 tahun memberikan perspektif yang menarik (Tabel 1: Hasil Ringkasan LCCA). Alternatif A memiliki biaya modal tertinggi (Rp 1,45 triliun) akibat volume beton konvensional yang besar. Alternatif B biaya modalnya sedikit lebih rendah (Rp 1,38 triliun) karena pengurangan tebal slab, meski harga beton mutu tinggi lebih mahal. Alternatif C memiliki biaya modal terendah (Rp 1,15 triliun). Namun, ketika biaya pemeliharaan periodik (overlay untuk aspal setiap 8-10 tahun, perbaikan retak untuk beton) dimasukkan, nilai Net Present Value (NPV) total menunjukkan bahwa Alternatif B paling ekonomis dalam siklus hidup (NPV Rp 1,72 triliun), diikuti Alternatif A (NPV Rp 1,81 triliun), dan Alternatif C (NPV Rp 1,92 triliun). Keunggulan ekonomi Alternatif B dalam jangka panjang berasal dari durabilitas yang lebih tinggi dan biaya pemeliharaan yang sangat rendah, selaras dengan kajian [4] tentang manfaat material berkelanjutan dalam manajemen perkerasan bandara.

4.3 Analisis Sistem Drainase dan Resiliensi Iklim

Pemodelan hidrologi-hidraulik menggunakan data hujan ekstrem periode ulang 50 tahun mengungkap bahwa sistem drainase permukaan eksisting hanya memiliki kapasitas untuk menangani hujan periode ulang 10 tahun. Hal ini menyebabkan genangan dengan kedalaman 10-15 cm di beberapa bagian sisi landasan pada skenario hujan ekstrem, yang berpotensi membahayakan operasi pesawat dan merusak tepi perkerasan. Analisis ini mengkonfirmasi temuan [3] bahwa banyak infrastruktur bandara di Indonesia belum siap menghadapi perubahan pola hujan.

Untuk mengatasi ini, dirancang sistem drainase terintegrasi yang mencakup: (1) peningkatan kapasitas saluran primer dengan dimensi lebih besar, (2) instalasi inlet tambahan dengan debris grate yang lebih efektif di sisi runway, dan (3) pembangunan dua kolam retensi (retention pond) di ujung timur dan barat area bandara. Kolam retensi ini berfungsi ganda sebagai penampung air sementara (detention) untuk mengurangi debit puncak ke saluran alam di luar bandara, dan sebagai resapan (retention) untuk mengisi kembali air tanah. Simulasi dengan HEC-RAS menunjukkan bahwa sistem baru ini mampu menghilangkan genangan dan mengalirkan 95% air hujan periode ulang 50 tahun dalam waktu kurang dari 2 jam setelah hujan reda, memenuhi standar keselamatan.

4.4 Sintesis Skenario Optimal dan Pembahasan Integratif

Berdasarkan evaluasi multi-kriteria (teknis, ekonomi, lingkungan, operasional) menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan bobot kriteria dari para ahli (bobot tertinggi pada keselamatan/teknis = 0.4, diikuti ekonomi LCCA = 0.35, keberlanjutan = 0.15, dan operasional = 0.1), diperoleh skenario optimal:

Perpanjangan 300 meter ke arah utara dengan struktur perkerasan kaku inovatif (Alternatif B), dilengkapi sistem drainase resilien dan integrasi awal untuk Structural Health Monitoring (SHM). Skenario ini unggul karena:

- Dari Aspek Teknis-Keselamatan: Memenuhi panjang runway 2.550 m, memiliki faktor keamanan struktural tertinggi, dan paling tahan terhadap settlement tanah lunak.

Integrasi embedded sensor (misal, strain gauge pada slab dan piezometer di tanah dasar) pada tahap konstruksi, sebagaimana diusulkan [5], akan memungkinkan pemantauan real-time dan pemeliharaan prediktif.

- Dari Aspek Ekonomi: Memiliki nilai LCCA terendah (NPV terkecil) dalam jangka panjang 30 tahun, memberikan value for money terbaik meski biaya awal bukan yang termurah.
- Dari Aspek Keberlanjutan: Penggunaan fly ash mengurangi jejak karbon semen. Perkerasan kaku juga memiliki albedo lebih tinggi, mengurangi heat island effect. Sistem drainase dengan kolam retensi meningkatkan resiliensi iklim dan berpotensi mendukung ekosistem lokal.
- Dari Aspek Operasional: Konstruksi perpanjangan ke arah utara diperkirakan menyebabkan gangguan operasi minimal dibanding arah lain, karena dapat dilakukan dengan memanfaatkan clearway yang ada.

Pembahasan integratif menunjukkan bahwa pendekatan konvensional (hanya memperpanjang dengan material standar) bukan lagi pilihan yang bijaksana untuk infrastruktur strategis berumur panjang. Investasi awal yang lebih tinggi untuk teknologi inovatif (beton kinerja tinggi, geosintetik, SHM) terbukti dapat di-offset oleh penghematan besar pada biaya pemeliharaan dan peningkatan ketersediaan (availability) runway. Temuan ini menegaskan perlunya pergeseran paradigma dalam penganggaran infrastruktur bandara di Indonesia, dari berfokus pada lowest initial cost menuju lowest life-cycle cost dengan mempertimbangkan resiliensi.

Penelitian ini juga menggarisbawahi bahwa keberhasilan proyek tidak hanya bergantung pada desain yang baik, tetapi juga pada kualitas konstruksi dan manajemen pemeliharaan berkelanjutan. Oleh karena itu, rekomendasi tidak hanya berupa gambar teknis, tetapi juga menyertakan panduan pengawasan material, rencana implementasi SHM, dan protokol inspeksi berkala menggunakan teknologi UAV untuk memastikan kinerja optimal landasan pacu Bandara Nasional Gorontalo dalam beberapa dekade mendatang.

4. CONCLUSION

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengembangan landasan pacu Bandara Gorontalo merupakan suatu keharusan untuk menjamin keselamatan, mengoptimalkan operasi, dan mendukung pertumbuhan ekonomi regional. Hasil investigasi geoteknik mengungkap keberadaan lapisan lempung lunak organik dengan daya dukung sangat rendah sebagai tantangan utama, yang memerlukan penanganan khusus dalam desain. Analisis kebutuhan operasional menetapkan bahwa panjang landasan pacu optimal adalah 2.550 meter, memerlukan perpanjangan sebesar 300 meter dari kondisi eksisting untuk menghilangkan pembatasan muatan pesawat pada kondisi kritis. Dari berbagai alternatif yang dikaji, skenario terintegrasi yang paling optimal adalah perpanjangan 300 meter ke arah utara dengan struktur perkerasan kaku inovatif. Skenario ini menggunakan slab beton mutu tinggi mengandung fly ash di atas lapisan pondasi yang diperkuat geosintetik, dilengkapi dengan sistem drainase resilien berbasis kolam retensi. Meskipun memerlukan investasi awal yang signifikan, skenario ini terbukti paling ekonomis dalam analisis Life Cycle Cost (LCC) 30 tahun, sekaligus unggul dalam aspek teknis, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini juga menegaskan pentingnya integrasi teknologi pemantauan (Structural Health Monitoring) sejak fase konstruksi dan adopsi pendekatan pemeliharaan prediktif untuk memastikan kinerja jangka panjang. Dengan demikian, implementasi rekomendasi dari penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan landasan pacu yang tidak hanya memenuhi standar keselamatan saat ini, tetapi juga tangguh menghadapi tantangan perubahan iklim dan siap melayani kebutuhan transportasi udara Gorontalo yang terus berkembang untuk beberapa dekade mendatang.

REFERENCES

[1] Kurniawan, F., & Saputra, A. (2022). Analisis keterbatasan payload pesawat akibat panjang landasan pacu pada bandara regional Indonesia. Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, 24(1), 15-26 Rahman, I. A., Satyarno, I., & Djamaluddin, R. (2023). Failure mechanism of rigid airport pavement in tropical region: A case study of premature cracking. Case Studies in Construction Materials, 18, e02145

[2] Irsyam, M., Widiyantoro, S., Faizal, L., Hutapea, B. M., Kertapati, E. K., Boen, T., & Sadisun, I. A. (2021). Development of the 2019 Indonesian national seismic hazard maps. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(6), 2359–2399.

[3] Sitompul, A. F., Hadihardaja, I. K., & Sulistyawan, M. B. (2024). Climate change adaptation strategy for airport drainage system: A case study of Soekarno-Hatta International Airport. AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 73(2), 234–249

[4] Joshaghani, A., & Moaveni, M. (2021). A comprehensive review on sustainable airport pavement management: Towards green and resilient infrastructure. Journal of Cleaner Production, 326, 129374

[5] Fattahi, H., & Naseri, H. (2022). A systematic review of UAV applications in airport pavement management: Inspection, assessment, and monitoring. International Journal of Pavement Engineering, 23(14), 4959–4978

[6] ICAO. (2022). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes, Volume I – Aerodrome Design and Operations (9th ed.). International Civil Aviation Organization

[7] Zapata, C. E., & Diefenderfer, B. K. (2021). Evolution and application of mechanisticempirical pavement design guidelines for airfields. International Journal of Pavement Research and Technology, 14(5), 529–540

[8] White, G., Oware, E., & Gaspard, K. (2022). A comparative life-cycle assessment of rigid and flexible airport pavements. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 113, 103517