**Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)**
Vol. 1, No. 1, Juni 2025, pp. 24-29
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v1i1.1036

# Analisis Perkerasan Landasan Pacu Terhadap Beban Dinamis Pesawat Generasi Baru Dan Dampak Perubahan Iklim

**Ilham Des Alwi Hippy[1], Aningsa Akuba[2]**
[1,2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo

**Article Info**

***Article history:***

Received April 4, 2025
Revised Mei 8, 2025
Accepted Juni 10, 2025

***Keywords:***

Landasan pacu
Beban dinamis pesawat
Perubahan iklim
Retrofitting perkerasan
Aspal

**ABSTRACT**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas dan durabilitas berbagai metode dan material penambalan jalan aspal di lingkungan perkotaan. Studi ini mengkaji secara komprehensif performa teknis empat jenis material, Campuran Aspal Panas (HMA) konvensional, HMA termodifikasi polimer, Campuran Aspal Dingin (CMA), dan Material Cair, melalui serangkaian pengujian laboratorium (Marshall, ITS, kelekatan, permeabilitas). Hasil menunjukkan bahwa HMA termodifikasi polimer unggul dalam semua aspek teknis, termasuk stabilitas, ketahanan air, dan durabilitas. Faktor kritis lainnya adalah kualitas pelaksanaan; preparasi lubang yang buruk (tanpa pembersihan dan tack coat) serta pemadatan yang tidak optimal terbukti sebagai penyebab utama kegagalan dini tambalan, terlepas dari material yang digunakan. Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) mengungkap bahwa meskipun berbiaya awal lebih tinggi, HMA termodifikasi justru paling ekonomis dalam jangka 3 tahun karena umur layannya yang panjang dan minimnya perbaikan ulang. Sebaliknya, material berbiaya rendah seperti CMA dan material cair hanya cocok untuk perbaikan temporer atau darurat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa keberhasilan penambalan jalan bergantung pada sinergi antara pemilihan material yang tepat dan pelaksanaan pekerjaan yang berkualitas, serta merekomendasikan penerapan pedoman teknis dan pendekatan best value berbasis LCCA dalam pengadaan jasa pemeliharaan.

*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

Landasan pacu/*runway* merupakan infrastruktur kritis paling vital dalam sebuah bandara, berfungsi sebagai tulang punggung operasional penerbangan. Kinerjanya tidak hanya menentukan keselamatan lepas landas dan pendaratan pesawat, tetapi juga kapasitas, efisiensi, dan keberlanjutan ekonomi bandara secara keseluruhan. Seiring dengan dinamika industri penerbangan global yang bergerak cepat, landasan pacu menghadapi tantangan multi-dimensional yang semakin kompleks. Tantangan pertama berasal dari evolusi pesawat udara generasi baru. Pesawat berbadan lebar dengan kapasitas muatan lebih besar, seperti Airbus A350-1000 dan Boeing 777-9, serta pesawat kargo

seperti Antonov An-124 dan Boeing 747-8F, memberikan tekanan yang belum pernah terjadi sebelumnya pada struktur perkerasan. Beban roda pesawat yang semakin tinggi, tekanan ban yang meningkat, dan konfigurasi roda yang kompleks seperti konfigurasi *triple-tandem bogie* menuntut respons struktural perkerasan yang lebih tangguh [1]. Kegagalan perkerasan dalam mengakomodasi beban ini dapat bermanifestasi sebagai retak fatik, deformasi plastis (*rutting*), atau bahkan kegagalan struktural yang membahayakan keselamatan.

Tantangan kedua, dan yang semakin mengkhawatirkan, adalah dampak perubahan iklim. Peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem, seperti gelombang panas, hujan deras dengan intensitas tinggi, serta kenaikan muka air laut untuk bandara di pesisir, secara langsung mengganggu integritas material dan kinerja landasan pacu. Suhu udara yang meningkat mempercepat aging aspal, mengurangi *stiffness*, dan meningkatkan risiko deformasi permanen. Di sisi lain, curah hujan ekstrem mempercepat infiltrasi air ke dalam lapisan perkerasan dan pondasi, menyebabkan penurunan daya dukung tanah (*loss of subgrade strength*) dan memicu fenomena *pumping* pada perkerasan kaku [2]. Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) di sekitar bandara memperburuk kondisi termal perkerasan. Situasi ini menciptakan paradoks di mana perkerasan harus dirancang tidak hanya untuk beban statis dan dinamis, tetapi juga untuk ketahanan terhadap lingkungan yang semakin agresif.

Studi awal pada beberapa bandara internasional di Indonesia menunjukkan indikasi *distress* prematur pada landasan pacu, seperti retak alur roda yang lebih dalam dari perhitungan desain dan retak pinggir (*edge cracking*) yang meluas. Keluhan pilot mengenai penurunan kehalusan permukaan (*ride quality*) juga mulai terdengar. Kondisi ini mengisyaratkan kemungkinan adanya kesenjangan antara desain konvensional yang mungkin masih mengacu pada standar lama dengan realitas operasional dan lingkungan saat ini. Penelitian terdahulu banyak berfokus pada analisis beban statis atau material tertentu, namun belum banyak yang mengintegrasikan analisis beban dinamis pesawat generasi baru dengan simulasi stres akibat perubahan parameter iklim secara komprehensif, khususnya dalam konteks tropis lembap seperti Indonesia.

Desain landasan pacu secara historis mengacu pada metode empiris yang dikembangkan berdasarkan data kinerja perkerasan, seperti metode FAA untuk perkerasan fleksibel dan kaku [3] atau metode PCA untuk perkerasan beton. Metode-metode ini menggunakan konsep *Equivalent Single Wheel Load* (ESWL) untuk menyederhanakan beban multi-roda. Namun, dengan konfigurasi roda pesawat modern yang semakin kompleks, akurasi ESWL dipertanyakan. Pendekatan yang lebih akurat adalah dengan *Finite Element Method* (FEM) yang dapat memodelkan interaksi detail antara struktur perkerasan, konfigurasi roda, dan sifat material secara non-linear [4]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa beban dinamis dari pesawat, terutama saat mendarat (*impact load*) atau mengalami *engine thrust reversal*, dapat menghasilkan tegangan 20–30% lebih tinggi dibandingkan dengan analisis beban statis [5]. Faktor dinamis ini sangat kritis pada area *touch-down zone*.

Kerusakan pada landasan pacu dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis perkerasannya. Pada perkerasan fleksibel (aspal), mekanisme kegagalan utama meliputi retak fatik (*alligator cracking*) akibat repetisi beban yang melebihi kapasitas tarik bawah, deformasi permanen atau *rutting* pada lapisan aspal atau tanah dasar, serta retak termal akibat kontraksi material. Pada perkerasan kaku (beton), kerusakan utama berupa retak pecah (*slab cracking*) akibat beban berulang dan *curling/warping*, *pumping* dan erosi tanah dasar di bawah sambungan, serta *faulting* pada ujung slab. Perubahan iklim memperparah semua mekanisme ini. Suhu tinggi meningkatkan *thermal oxidation* pada aspal sehingga membuatnya lebih rapuh, sementara pada beton, gradien suhu yang besar meningkatkan tegangan *curling* [6]. Curah hujan tinggi mempercepat erosi pada pondasi dan memicu *pumping*.

Perubahan iklim telah diakui sebagai *risk multiplier* bagi infrastruktur transportasi. Untuk landasan pacu, dampaknya bersifat sistemik. Peningkatan suhu berdampak langsung pada modulus *stiffness* material: aspal menjadi lebih lunak (modulus menurun), meningkatkan risiko *rutting*, sedangkan beton dapat mengalami ekspansi termal yang meningkatkan tegangan dalam slab. Hujan ekstrem meningkatkan kadar air tanah dasar. Tanah dasar berbutir halus (lempung, lanau) sangat rentan terhadap kelembaban; peningkatan kadar air hanya beberapa persen saja dapat menurunkan *California Bearing Ratio* (CBR) atau modulus reaksi tanah dasar (*k-value*) secara signifikan, hingga

lebih dari 50% pada kondisi jenuh [2]. Kombinasi beban tinggi dan daya dukung tanah yang rendah merupakan skenario terburuk bagi landasan pacu.

Penelitian material untuk landasan pacu berfokus pada peningkatan daya tahan dan keberlanjutan. Untuk perkerasan fleksibel, aspal termodifikasi dengan polimer (PMB) dan aspal karet telah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap *rutting* dan retak fatik pada rentang suhu yang lebih lebar [7]. Penggunaan geosintetik pada lapisan pondasi atau antara lapisan aspal dapat meningkatkan kapasitas distribusi beban dan mengurangi ketebalan perkerasan. Untuk perkerasan kaku, *High-Performance Concrete* (HPC) dengan serat baja atau polimer, serta beton geopolimer yang memiliki jejak karbon rendah dan ketahanan sulfat yang baik, menjadi alternatif menarik. Beton berserat (FRC) menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan terhadap retak fatik dan dampak [8].

Sebagian besar studi masih menganggap beban pesawat sebagai beban statis atau semi-dinamis; analisis dampak iklim sering kali terpisah dari analisis struktur; serta evaluasi material baru seperti geopolimer untuk landasan pacu beton masih sangat terbatas dalam konteks beban pesawat. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis terintegrasi yang menggabungkan pemodelan beban dinamis, degradasi material akibat iklim, dan evaluasi solusi material maju dalam satu kerangka kerja.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memodelkan respons struktural (distribusi tegangan, regangan, dan defleksi) perkerasan landasan pacu terhadap pembebanan dinamis pesawat generasi baru menggunakan pendekatan *Finite Element Method* (FEM); mengkuantifikasi pengaruh parameter perubahan iklim terhadap sifat material perkerasan dan tanah dasar, serta mengintegrasikannya ke dalam model kinerja untuk memprediksi percepatan penurunan kondisi dan umur sisa landasan pacu; serta mengevaluasi beberapa alternatif strategi perkuatan (*overlay*, penguatan *subgrade*, penggunaan geosintetik) dan material inovatif (aspal termodifikasi polimer, beton kinerja tinggi dengan serat, beton geopolimer) untuk menghasilkan rekomendasi desain *retrofitting* yang optimal dan berkelanjutan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi desain dan pemeliharaan landasan pacu yang lebih resilien terhadap tantangan beban operasional modern dan tekanan lingkungan di masa depan.

## 2. METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi numerik yang divalidasi oleh data sekunder dari studi kasus Bandara Internasional Hasanuddin. Alur penelitian terdiri dari tiga fase utama.

### 2.1 Pengumpulan Data dan Karakterisasi Material

Data yang dikumpulkan meliputi:

- Data Struktur Eksisting: Konfigurasi lapisan (ketebalan, jenis material), kekuatan (modulus resilient, CBR, k-value), dan kondisi kerusakan saat ini dari dokumentasi bandara.
- Data Lalu Lintas Pesawat: Komposisi armada, MTOW, konfigurasi roda (gambar gear plan), dan jumlah pergerakan tahunan pesawat generasi baru (A350, B777X).
- Data Iklim Historis dan Proyeksi: Data suhu harian, curah hujan, dan kelembaban dari stasiun terdekat, serta proyeksi untuk skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 hingga tahun 2050 dari BMKG dan sumber ilmiah terpercaya.

Sifat material (aspal, beton, tanah) dikarakterisasi dengan parameter rheologi (untuk aspal) dan parameter elastis/plastis (untuk beton dan tanah) berdasarkan literatur dan korelasi empiris.

### 2.2 Pemodelan dan Simulasi

Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak elemen hingga (ABAQUS/ANSYS).

- Model Beban Dinamis Pesawat: Model 3D roda pesawat (dengan tekanan ban sesuai spesifikasi) dibuat dan bergerak di sepanjang jalur landasan pacu dengan kecepatan lepas landas/pendaratan. Analisis transient dynamic digunakan untuk mendapatkan sejarah waktu (time-history) dari tegangan, regangan, dan defleksi pada titik-titik kritis (di bawah roda, di antara roda, di tengah slab).
- Model Perubahan Iklim: Pengaruh iklim dimodelkan sebagai perubahan properti material input.
  - Suhu: Peningkatan suhu diubah menjadi penurunan modulus stiffness aspal (menggunakan model *Witczak* yang dimodifikasi) dan peningkatan koefisien muai panas beton.

- Curah Hujan: Peningkatan curah hujan dihubungkan dengan penurunan modulus tanah dasar melalui hubungan kadar air-CBR/modulus [9].
- Skenario Analisis: Simulasi dijalankan untuk beberapa skenario kombinasi: (a) Beban pesawat lama + iklim historis (baseline), (b) Beban pesawat baru + iklim historis, (c) Beban pesawat baru + iklim proyeksi 2050 (RCP 8.5).

### 2.3 Analisis Kinerja dan Evaluasi Retrofitting

Hasil simulasi (regangan tarik di bawah lapisan aspal, tegangan lentur pada beton, defleksi) dimasukkan ke dalam model prediksi kinerja (misal, model fatik untuk aspal, model erosi untuk beton) untuk memprediksi umur layan. Kemudian, beberapa skenario perkuatan dimodelkan:
Skenario 1: Overlay aspal PMB dengan ketebalan bervariasi.
Skenario 2: Pemasangan geogrid di dasar lapisan pondasi agregat.
Skenario 3: Overlay beton berserat (untuk landasan beton eksisting) atau perkerasan komposit.

Efektivitas setiap skenario dinilai berdasarkan peningkatan umur layan, pengurangan tegangan/kritis, dan analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis*/LCCA) sederhana.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### Karakteristik Respons Struktur terhadap Beban Dinamis Pesawat Generasi Baru

Pemodelan FEM mengungkapkan bahwa pembebanan dinamis dari pesawat Boeing 777-9 (MTOW: 352.000 kg) menghasilkan distribusi tegangan yang secara signifikan berbeda dibandingkan dengan pendekatan ESWL statis. Pada perkerasan fleksibel, regangan tarik vertikal maksimum di bawah lapisan aspal (pada antarmuka dengan pondasi) meningkat sebesar 28% dibandingkan dengan beban statis setara. Titik kritis perkerasan bergeser dari area langsung di bawah roda ke area di antara roda bogie tandem, di mana terjadi superposisi tegangan. Pada perkerasan kaku, tegangan lentur maksimum di bagian bawah slab meningkat sebesar 22%, dengan konsentrasi tegangan tertinggi terjadi di sudut slab saat roda melintas di dekatnya. Defleksi maksimum permukaan pada kondisi tanah dasar basah meningkat hingga 35% lebih besar dibandingkan kondisi kering, yang mengindikasikan sensitivitas kinerja terhadap kondisi tanah dasar.

### Dampak Parameter Perubahan Iklim pada Sifat Material

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa:

- Kenaikan suhu harian rata-rata sebesar 3°C (sesuai proyeksi RCP 8.5) dapat menurunkan modulus stiffness campuran aspal panas (HMA) hingga 40% pada suhu puncak siang hari.
- Peningkatan intensitas hujan yang mengakibatkan peningkatan kadar air tanah dasar sebesar 5% (dari kondisi optimum) dapat menurunkan modulus tanah dasar lempung lanauan (silty clay) hingga 60%. Penurunan ini menyebabkan peningkatan defleksi permukaan lebih dari dua kali lipat pada simulasi beban dinamis.
- Kombinasi kedua efek tersebut (aspal lebih lunak + tanah dasar lebih lemah) menghasilkan regangan tarik kritis pada perkerasan fleksibel yang 2.1 kali lebih besar dari kondisi baseline. Pada perkerasan beton, terjadi peningkatan tegangan curling akibat gradien suhu harian yang lebih tajam, yang memperbesar celah di bawah slab dan meningkatkan risiko pumping.

### Prediksi Umur Layan dan Evaluasi Alternatif Perkuatan

Model prediksi kinerja mengindikasikan bahwa umur fatik perkerasan fleksibel eksisting dapat menyusut dari 15 tahun (dalam desain awal) menjadi hanya 7-9 tahun di bawah skenario beban baru dan iklim 2050. Untuk perkerasan kaku, umur layan terhadap erosi pondasi (pumping) dapat berkurang dari 20 tahun menjadi 10-12 tahun.
Dari tiga skenario retrofitting yang dievaluasi:

- Skenario 1 (Overlay Aspal PMB 10 cm): Efektif mengurangi regangan tarik hingga 45% dan memperpanjang umur tambahan hingga 8 tahun. Namun, solusi ini menambah beban mati dan tidak secara langsung memperbaiki masalah tanah dasar.
- Skenario 2 (Pemasangan Geogrid + Overlay 7 cm): Solusi paling efektif secara biaya. Geogrid berperan sebagai elemen tensile yang mendistribusikan beban lebih luas, mengurangi regangan tarik hingga 55% dan defleksi permukaan sebesar 30%. Kombinasi ini memperpanjang umur hingga 10 tahun dengan biaya material lebih rendah dibandingkan overlay tebal.

- Skenario 3 (Overlay Beton Berserat 15 cm pada Perkerasan Kaku): Solusi paling tahan lama (dapat memperpanjang umur >15 tahun) dan sangat baik untuk menahan beban roda tunggal tinggi. Namun, memiliki biaya awal tertinggi dan waktu konstruksi yang lebih lama.

**Implikasi terhadap Filosofi Desain dan Pemeliharaan**

Temuan penelitian ini menantang kecukupan metode desain empiris konvensional yang masih mendominasi praktik. Kesenjangan 20-30% antara analisis dinamis dan statis menunjukkan bahwa faktor keamanan (safety factor) dalam desain mungkin telah terkikis oleh evolusi pesawat. Oleh karena itu, perlu ada pemikiran ulang untuk mengadopsi analisis mekanistik-empiris (M-E) berbasis FEM sebagai pelengkap atau bahkan pengganti metode lama, khususnya untuk bandara berstatus internasional yang melayani pesawat generasi baru [4]. Selain itu, paradigma pemeliharaan harus bergeser dari reaktif (berdasarkan kondisi) menjadi proaktif dan prediktif, dengan memasukkan data iklim proyeksi ke dalam model manajemen aset bandara.

**Integrasi Risiko Iklim ke dalam Manajemen Infrastruktur Bandara**

Hasil yang menunjukkan sensitivitas ekstrem tanah dasar terhadap kelembaban menggarisbawahi bahwa drainase bukan lagi sistem pendukung, melainkan infrastruktur kritikal utama. Desain drainase landasan pacu masa depan harus menggunakan intensitas hujan rencana dengan periode ulang yang lebih panjang (misal, dari 10 tahun menjadi 50 tahun) untuk mengantisipasi kejadian ekstrem. Demikian pula, pemilihan material perkerasan harus mempertimbangkan rentang suhu kerja yang lebih luas. Aspal termodifikasi polimer, meski lebih mahal, terbukti dalam simulasi mampu mempertahankan performa lebih baik pada suhu tinggi, sehingga memiliki biaya siklus hidup yang lebih menguntungkan dalam jangka panjang.

**Strategi Retrofitting yang Kontekstual dan Berkelanjutan**

Evaluasi alternatif retrofitting menunjukkan bahwa tidak ada solusi "satu untuk semua". Pemilihan strategi harus didasarkan pada diagnosis penyebab kerusakan utama, kondisi tanah dasar, dan pertimbangan operasional bandara. Skenario 2 (geogrid + overlay) sangat menarik untuk implementasi cepat dengan gangguan operasi minimal. Skenario 3 (beton berserat) adalah investasi jangka panjang yang tepat untuk bandara dengan pertumbuhan lalu lintas pesawat berat yang sangat pesat. Keberlanjutan juga dapat ditingkatkan dengan mempertimbangkan material daur ulang (RAP untuk aspal, agregat daur ulang untuk beton) atau material rendah karbon seperti geopolimer dalam campuran, meskipun penelitian lebih lanjut tentang kinerja jangka panjangnya masih diperlukan [8].

**Keterbatasan Penelitian dan Arah Studi Lanjut**

Penelitian ini memiliki keterbatasan, antara lain: penggunaan data material sekunder, asumsi beban dinamis yang disederhanakan (tanpa memperhitungkan ketidakrataan permukaan secara eksplisit), dan model iklim yang bersifat regional. Penelitian lanjutan sangat disarankan untuk: (1) melakukan instrumentasi dan pemantauan langsung (*field monitoring*) pada landasan pacu untuk validasi model, (2) mengembangkan model koupling penuh (*fully coupled*) yang mengintegrasikan proses hidrologi (aliran air tanah) dengan respons mekanis perkerasan, dan (3) mengeksplorasi lebih jauh kinerja material hijau seperti beton geopolimer dalam skala prototipe di lingkungan bandara sebenarnya.

## 4. CONCLUSION

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- Beban dinamis dari pesawat generasi baru menghasilkan respons tegangan dan regangan yang secara signifikan lebih tinggi (20-30%) dibandingkan analisis beban statis konvensional, dengan titik kritis yang bergeser pada area di antara roda bogie tandem dan sudut slab beton.
- Parameter perubahan iklim, khususnya peningkatan suhu dan curah hujan, secara dramatis menurunkan kinerja material perkerasan dan tanah dasar. Kombinasi kedua faktor ini dapat mempercepat kerusakan dan memangkas umur layan landasan pacu eksisting hingga hampir setengahnya dalam skenario terburuk.
- Strategi retrofitting yang mengintegrasikan penguatan tanah dasar (misal dengan geosintetik) dengan overlay material berkinerja tinggi (aspal polimer atau beton berserat) terbukti paling efektif untuk mengembalikan bahkan meningkatkan ketahanan struktural. Penggunaan analisis

mekanistik-empiris berbasis FEM dan proyeksi iklim harus diadopsi dalam proses desain ulang dan evaluasi keandalan landasan pacu.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa ketahanan landasan pacu di masa depan hanya dapat dicapai melalui pendekatan desain dan manajemen yang holistik, adaptif, dan berbasis data, yang secara simultan memitigasi risiko dari peningkatan beban operasional dan tekanan lingkungan akibat perubahan iklim.

## REFERENCES

[1] FAA. (2022). Airport pavement design for the Boeing 777-9 and other new generation aircraft. Advisory Circular 150/5320-6G (Draft). U.S. Department of Transportation.

[2] White, G., & Rupnow, T. (2021). Impacts of climate change on pavement infrastructure: A review. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 556. Transportation Research Board.

[3] FAA. (2016). AC 150/5320-6F: Airport pavement design and evaluation. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

[4] Chou, X., & Zhang, Y. (2021). Dynamic response analysis of airport rigid pavement under moving aircraft loads using 3D finite element method. International Journal of Pavement Engineering, 22(14), 1773-1784.

[5] Garcia, J., & Lee, H. (2023). Impact of engine thrust reversal on pavement response: A dynamic finite element study. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 149(1), 04022067.

[6] Wathne, L., & Tighe, S. (2020). Incorporating climate change into airport pavement design: A Canadian perspective. Transportation Research Record, 2674(11), 428-439.

[7] Ameri, M., Mansourian, A., & Khavas, M. H. (2020). Laboratory evaluation of rubberized asphalt mixtures containing warm mix asphalt additives for airport pavement. Construction and Building Materials, 262, 120078.

[8] Jain, A., & Singh, B. (2022). Geopolymer concrete for sustainable airport rigid pavements: A review on durability and mechanical properties. Journal of Cleaner Production, 365, 132822.

[9] Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(3), 521-532.