

EVALUASI GEOMETRIK DAN KERATAAN PERMUKAAN RUNWAY BERASPAL PG76 MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MMGPS

GEOMETRIC AND SURFACE EVENNESS EVALUATION OF A PG76 ASPHALT RUNWAY USING MMGPS TECHNOLOGY

Syaiful Ahmadi, Pratikso, Juni Andry Sulisty

Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

Email korespondensi: saiful.ahadi01@gmail.com

ABSTRACT

The geometric quality and surface evenness of runways are critical to ensuring aviation safety and operational performance, particularly for high-performance asphalt pavements. With advances in technology, Mobile Mapping Global Positioning System (MMGPS) offers a more precise and continuous evaluation approach than conventional methods. This study aims to evaluate the geometric condition and surface evenness of a runway and their compliance with applicable technical standards. A descriptive quantitative approach was used based on MMGPS measurement data, with analyses of longitudinal slope, cross slope, and elevation deviation. The results show an average longitudinal slope of 0.40% and a maximum of 1.30%, cross slopes ranging from 0.59% to 1.41%, and an average elevation deviation of 0.058 m with a maximum of 0.065 m. These findings indicate that the geometric condition and surface evenness of the runway are stable, exhibit no significant unevenness, and meet the technical criteria specified in KP 14 of 2021 and international standards. The study suggests that MMGPS is effective as an evaluation instrument based on high-precision data to support more accurate and efficient runway management and maintenance.

Keywords: runway geometry, surface evenness, MMGPS, asphalt pavement, technical evaluation

ABSTRAK

Kualitas geometrik dan kerataan permukaan runway merupakan faktor krusial dalam menjamin keselamatan dan kinerja operasional penerbangan, terutama pada perkerasan aspal berkinerja tinggi. Seiring perkembangan teknologi, penggunaan Mobile Mapping Global Positioning System (MMGPS) menawarkan pendekatan evaluasi yang lebih presisi dan kontinu dibandingkan dengan metode konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geometrik, tingkat kerataan permukaan, serta kesesuaiannya terhadap standar teknis yang berlaku. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis data pengukuran MMGPS, dengan analisis terhadap parameter kemiringan memanjang, kemiringan melintang, dan deviasi elevasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemiringan memanjang memiliki rata-rata 0,40% dengan maksimum 1,30%, kemiringan melintang berkisar 0,59%–1,41%, serta deviasi elevasi rata-rata 0,058 m dengan maksimum 0,065 m. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway berada dalam kategori stabil dan tidak menunjukkan ketidakrataan signifikan, serta memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan dalam KP 14 Tahun 2021 dan standar internasional. Implikasi penelitian menunjukkan bahwa MMGPS efektif digunakan sebagai instrumen evaluasi berbasis data presisi tinggi untuk mendukung pengelolaan dan pemeliharaan runway secara lebih akurat dan efisien.

Kata kunci: geometrik runway, kerataan permukaan, MMGPS, perkerasan aspal, evaluasi teknis

1. PENDAHULUAN

Transportasi udara memegang peran strategis dalam mendukung konektivitas nasional dan internasional, khususnya di negara kepulauan seperti Indonesia. Selain melayani mobilitas penumpang dan barang secara umum, sejumlah bandar udara juga berfungsi sebagai titik embarkasi dan debarkasi jemaah haji setiap tahun. Kebijakan pemerintah melalui Keputusan Menteri Agama Nomor 130 Tahun 2025 menetapkan sejumlah bandar udara sebagai simpul utama pelayanan haji guna meningkatkan efisiensi waktu, mengurangi risiko keterlambatan, serta mendukung penerbangan langsung ke Timur Tengah. Konsekuensinya, bandar udara tersebut harus mampu mengakomodasi pesawat berbadan lebar dengan kategori ICAO Code 4E, meskipun dalam operasional harian lebih sering melayani pesawat dengan kategori lebih kecil. Karakteristik ini menjadikan perancangan geometrik bandara di Indonesia memiliki kompleksitas tersendiri karena tidak sepenuhnya didasarkan pada pesawat kritis, melainkan juga pada kebutuhan sosial dan operasional yang bersifat musiman. Dalam konteks ini, infrastruktur sisi udara (airside), khususnya landasan pacu (runway), menjadi elemen vital yang menentukan keselamatan dan efisiensi operasional penerbangan (Di Mascio et al., 2020). Runway harus dirancang dan dipelihara agar mampu menahan beban dinamis pesawat serta menjaga kestabilan performa dalam berbagai kondisi lingkungan (Wang et al., 2015). Perkerasan lentur berbahan aspal, termasuk penggunaan aspal berkinerja tinggi seperti PG76, banyak diaplikasikan karena keunggulannya dalam fleksibilitas, ketahanan terhadap deformasi, serta kemudahan pemeliharaan (Yang et al., 2024). Namun demikian, peningkatan volume dan beban lalu lintas pesawat menuntut kualitas geometrik dan kerataan permukaan runway yang semakin presisi, karena deviasi kecil sekalipun dapat berdampak signifikan terhadap keselamatan operasi penerbangan.

Sejumlah studi terdahulu (Valle & Thom, 2016) telah menyoroti pentingnya akurasi dalam pekerjaan perkerasan, khususnya pada tahap penghamparan aspal. Metode konvensional seperti pengukuran menggunakan total station dan staking manual masih banyak digunakan, namun seringkali menghasilkan ketidaksesuaian ketebalan lapisan, pemborosan material, serta peningkatan potensi pekerjaan ulang (Peurifoy et al., 2024; Zhang et al., 2013). Perkembangan teknologi konstruksi memperkenalkan sistem berbasis satelit seperti Machine Mounted Global Positioning System (MMGPS), yang memungkinkan pengendalian elevasi dan posisi secara real-time melalui integrasi langsung dengan alat berat. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi ini

mampu meningkatkan presisi pengukuran, memperkecil toleransi kesalahan, serta meningkatkan efisiensi pelaksanaan pekerjaan. Selain itu, teknologi berbasis GPS juga terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas permukaan perkerasan dan mengoptimalkan proses grading dengan tingkat akurasi yang mendekati standar internasional. Meskipun demikian, kajian empiris yang secara spesifik mengintegrasikan evaluasi geometrik dan kerataan permukaan runway berbahan aspal PG76 berbasis data MMGPS masih relatif terbatas, terutama dalam konteks penerapan pada bandar udara dengan karakteristik operasional yang unik. Sebagian besar penelitian sebelumnya (e.g., Bezina et al., 2021; Gao et al., 2021; Jiang et al., 2003; Plati et al., 2023) lebih berfokus pada aspek akurasi alat atau efisiensi metode, tanpa mengkaji secara komprehensif kesesuaian hasil konstruksi terhadap standar teknis yang berlaku, baik nasional maupun internasional. Selain itu, penelitian yang mengaitkan performa material aspal berkinerja tinggi dengan hasil pengukuran presisi berbasis teknologi digital juga masih jarang dilakukan.

Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi kondisi geometrik runway beraspal PG76 berdasarkan data hasil pengukuran menggunakan teknologi MMGPS; (2) menganalisis tingkat kerataan permukaan runway menggunakan data elevasi dan profil permukaan yang dihasilkan oleh MMGPS; serta (3) menilai kesesuaian kondisi geometrik dan kerataan permukaan tersebut terhadap kriteria teknis yang ditetapkan dalam KP 14 Tahun 2021 serta standar internasional terkait. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode evaluasi kualitas perkerasan runway yang lebih akurat, efisien, dan berbasis teknologi mutakhir.

Aspal PG76 merupakan aspal modifikasi polimer dengan tingkat kekakuan dan ketahanan deformasi yang lebih tinggi dibandingkan aspal konvensional. Karakteristik ini berpengaruh pada proses penghamparan dan pemadatan, di mana campuran dengan kekakuan tinggi umumnya menuntut pengendalian suhu dan pemadatan yang lebih ketat agar diperoleh permukaan yang seragam. Dalam penelitian ini, PG76 diposisikan sebagai konteks material perkerasan yang dievaluasi, bukan sebagai variabel yang diuji secara terpisah. Analisis difokuskan pada geometrik dan deviasi elevasi yang terukur dari data MMGPS. Dengan demikian, penelitian ini tidak menyimpulkan hubungan sebab-akibat antara sifat PG76 dan hasil geometrik yang dicapai, melainkan hanya mencatat bahwa perkerasan *runway* yang dievaluasi menggunakan aspal PG76.

Selain aspek material, kinerja perkerasan *runway* juga dipengaruhi oleh kondisi tanah dasar (*subgrade*). Deviasi elevasi dan ketidakrataan permukaan dapat bersumber dari penurunan diferensial akibat tanah lunak, pemadatan yang tidak seragam, atau pengaruh air tanah. Tanpa data geoteknik berupa borelog atau pengujian lapangan, penelitian ini tidak dapat menilai apakah kondisi geometrik yang relatif seragam pada periode pengukuran bersifat permanen atau hanya *snapshot* sesaat. Keterbatasan ini diakui secara eksplisit dan menjadi salah satu rekomendasi untuk penelitian lanjutan.

Evaluasi geometrik dan kerataan permukaan merupakan aspek fundamental dalam menjamin kinerja fungsional dan struktural perkerasan, khususnya pada infrastruktur dengan tingkat tuntutan keselamatan tinggi seperti runway bandar udara (Armeni et al., 2024). Secara umum, evaluasi geometrik mencakup kesesuaian parameter desain seperti elevasi, kemiringan memanjang (*longitudinal slope*), dan kemiringan melintang (*cross slope*) terhadap kondisi aktual di lapangan (Tomáš et al., 2014). Sementara itu, kerataan permukaan (*surface roughness*) menggambarkan tingkat ketidakrataan profil permukaan yang secara langsung memengaruhi kenyamanan, stabilitas, serta keselamatan operasional, terutama pada kondisi kecepatan tinggi. Dalam praktiknya, deviasi kecil pada parameter tersebut dapat meningkatkan gaya dinamis pada kendaraan atau pesawat, mempercepat degradasi struktur, serta menurunkan tingkat pelayanan perkerasan (Hou et al., 2023). Dalam konstruksi dan pemeliharaan perkerasan aspal, kualitas geometrik dan kerataan sangat dipengaruhi oleh proses pelaksanaan di lapangan, khususnya pada tahap penghamparan dan pemadatan. Ketidaktepatan dalam pengendalian elevasi, ketebalan lapisan, dan keseragaman permukaan dapat menghasilkan ketidakrataan lokal yang berdampak kumulatif terhadap kinerja perkerasan (Plati et al., 2023). Oleh karena itu, evaluasi geometrik dan kerataan tidak hanya berfungsi sebagai alat verifikasi terhadap desain, tetapi juga sebagai instrumen kontrol mutu yang penting untuk memastikan bahwa hasil konstruksi memenuhi standar teknis yang berlaku.

Metode konvensional dalam pengukuran geometrik perkerasan, seperti penggunaan total station, waterpass, dan teknik staking manual, telah lama menjadi standar dalam praktik teknik sipil. Meskipun mampu memberikan akurasi yang memadai pada titik-titik tertentu, metode ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain kebutuhan waktu yang relatif lama, ketergantungan pada tenaga kerja, serta potensi kesalahan akibat faktor manusia (Lienhart, 2017). Selain itu, pendekatan berbasis titik (*point-based*) tidak mampu

merepresentasikan kondisi permukaan secara kontinu, sehingga kurang optimal dalam analisis kerataan yang memerlukan resolusi data tinggi dan cakupan area yang luas.

Seiring dengan perkembangan teknologi digital dalam konstruksi, sistem berbasis satelit seperti Machine Mounted Global Positioning System (MMGPS) mulai banyak diterapkan sebagai alternatif yang lebih efisien dan presisi (Roberts et al., 2015). Teknologi ini mengintegrasikan sistem navigasi global (GNSS) dengan alat berat, sehingga memungkinkan pengukuran posisi horizontal dan vertikal secara real-time selama proses pekerjaan berlangsung. Keunggulan utama MMGPS terletak pada kemampuannya menghasilkan data kontinu dengan tingkat akurasi tinggi, yang dapat langsung digunakan untuk pengendalian elevasi dan pemantauan kualitas pekerjaan tanpa memerlukan patok fisik di lapangan (Roberts et al., 2015). Dalam konteks evaluasi, data yang dihasilkan oleh MMGPS dapat diolah menjadi profil longitudinal dan transversal untuk menilai kesesuaian geometrik serta tingkat kerataan permukaan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi deviasi elevasi secara lebih detail dan menyeluruh dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, integrasi data digital mendukung analisis kuantitatif terhadap ketidakrataan permukaan, seperti perhitungan deviasi terhadap garis rencana atau parameter kerataan lainnya yang relevan dengan standar teknis. Sejumlah studi menunjukkan bahwa penerapan teknologi berbasis GPS dalam konstruksi perkerasan mampu meningkatkan efisiensi pelaksanaan, mengurangi pemborosan material, serta meminimalkan pekerjaan ulang akibat ketidaksesuaian elevasi (Kong et al., 2021; Roberts et al., 2015).

Meskipun demikian, pemanfaatan MMGPS sebagai alat evaluasi geometrik dan kerataan secara terpadu masih menghadapi tantangan, terutama terkait standar prosedur analisis dan interpretasi data. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada aspek implementasi teknologi atau peningkatan efisiensi konstruksi, tanpa mengembangkan kerangka evaluasi yang sistematis untuk menilai kesesuaian hasil pekerjaan terhadap kriteria teknis yang berlaku. Selain itu, integrasi antara data pengukuran kontinu dan parameter evaluasi geometrik serta kerataan masih belum banyak dibahas secara komprehensif. Oleh karena itu, kajian literatur (e.g., Armeni et al., 2024) ini menegaskan pentingnya pengembangan pendekatan evaluasi berbasis MMGPS yang tidak hanya menitikberatkan pada akurasi pengukuran, tetapi juga pada kemampuan analisis data dalam menilai kualitas geometrik dan kerataan permukaan secara menyeluruh. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi pedoman metodologis dalam

pelaksanaan penelitian, khususnya dalam mengintegrasikan data hasil pengukuran berbasis teknologi digital dengan standar teknis yang berlaku, sehingga menghasilkan evaluasi yang lebih objektif, akurat, dan aplikatif dalam praktik konstruksi dan pemeliharaan perkerasan.

2. METODE PENELITIAN

a) Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan mengevaluasi kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway berbasis data pengukuran presisi tinggi. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data numerik berupa koordinat, elevasi, dan profil permukaan, sedangkan pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting serta menilai kesesuaiannya terhadap standar teknis. Hasil analisis dibandingkan dengan ketentuan dalam KP 14 Tahun 2021 dan standar internasional untuk memastikan pemenuhan kriteria keselamatan dan operasional.

b) Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada salah satu bandar udara di kawasan perkotaan dengan runway sepanjang ± 3.000 m dan lebar ± 45 m yang memiliki intensitas lalu lintas tinggi. Informasi spesifik lokasi disamarkan untuk menjaga aspek etika dan keamanan infrastruktur. Data primer diperoleh dari survei tahun 2023, sedangkan proses pengolahan, analisis, dan interpretasi dilakukan pada periode penelitian. Pemisahan waktu ini memastikan data telah tervalidasi sebelum dianalisis secara ilmiah.

c) Pengumpulan Data

Data penelitian terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui survei lapangan menggunakan teknologi Mobile Mapping Global Positioning System (MMGPS) yang merekam koordinat dan elevasi secara kontinu. Data sekunder meliputi gambar desain (DED), as-built drawing, spesifikasi teknis, serta standar nasional dan internasional. Kombinasi kedua jenis data ini digunakan untuk membandingkan kondisi aktual dengan desain rencana.

d) Prosedur Survei dan Validasi Data

Tahap persiapan meliputi penentuan segmen dan lintasan pengukuran, penetapan sistem koordinat, serta kalibrasi alat untuk menjamin akurasi. Survei dilakukan dengan

metode mobile mapping menggunakan kendaraan yang bergerak dengan kecepatan konstan mengikuti lintasan yang telah ditentukan. Data posisi horizontal dan vertikal direkam secara kontinu tanpa mengganggu operasional. Setelah itu, dilakukan pemeriksaan awal berupa pengecekan kelengkapan data, identifikasi anomali GNSS, penyaringan data tidak valid, serta verifikasi sistem koordinat. Tahapan ini memastikan kualitas dan reliabilitas data sebelum dianalisis.

e) Peralatan dan Perangkat Lunak

Peralatan utama yang digunakan adalah sistem MMGPS berbasis GNSS dengan metode Real Time Kinematic (RTK) untuk memperoleh koordinat tiga dimensi berketelitian tinggi. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Civil 3D untuk pemodelan geometrik dan MAGNET Office untuk koreksi serta manajemen data survei. Perangkat lunak pendukung digunakan untuk analisis statistik dan visualisasi hasil.

f) Analisis Data

Analisis diawali dengan koreksi data GNSS, integrasi dengan IMU, transformasi sistem koordinat, serta penyaringan data. Selanjutnya, data diolah menjadi model permukaan berupa profil memanjang, profil melintang, dan peta elevasi. Tahap ini bertujuan menghasilkan representasi geometrik yang akurat sebagai dasar evaluasi.

1) Analisis Geometrik Runway

Evaluasi geometrik dilakukan melalui perhitungan kemiringan memanjang, kemiringan melintang, serta distribusi elevasi permukaan. Deviasi elevasi terhadap profil referensi dihitung untuk mengidentifikasi ketidakrataan seperti tonjolan dan cekungan. Selain itu, dianalisis keseragaman profil melalui perubahan gradien antar segmen. Hasilnya dibandingkan dengan batas toleransi standar untuk menilai kesesuaian geometrik runway.

2) Analisis Kerataan Permukaan

Kerataan permukaan dianalisis menggunakan data elevasi kontinu dengan menentukan profil referensi sebagai kondisi ideal. Deviasi elevasi digunakan untuk mengidentifikasi ketidakrataan, baik secara lokal maupun global. Parameter statistik seperti rata-rata deviasi dan simpangan baku digunakan untuk menilai tingkat kerataan secara kuantitatif. Analisis juga dilakukan pada profil melintang untuk mengidentifikasi potensi gangguan drainase dan ketidakrataan permukaan.

3) Parameter Statistik yang Dihitung dan Tidak Dihitung

Analisis statistik dalam penelitian ini mencakup perhitungan nilai rata-rata dan nilai maksimum deviasi elevasi. Simpangan baku dan distribusi frekuensi deviasi tidak dihitung karena data mentah deviasi elevasi per titik tidak tersedia secara lengkap dalam lingkup penelitian ini. Penelitian ini juga tidak menghitung *International Roughness Index* (IRI) maupun *Boeing Bump Index* karena keterbatasan data profil memanjang yang terdefinisi dan ketiadaan perangkat lunak analisis kerataan khusus. Dengan demikian, indikator deviasi elevasi rata-rata dan maksimum diposisikan sebagai ukuran pendekatan untuk menilai keseragaman permukaan, bukan sebagai pengganti parameter kerataan standar. Jika data mentah tersedia, penelitian lanjutan disarankan menghitung simpangan baku, distribusi frekuensi, IRI, dan *Boeing Bump Index* agar hasil dapat dibandingkan dengan standar kerataan *runway* yang berlaku.

4) Visualisasi Data dan Keterbatasannya

Hasil analisis data MMGPS berupa profil memanjang, profil melintang, dan sebaran deviasi elevasi disajikan secara terbatas dalam penelitian ini. Idealnya, evaluasi geometrik dan kerataan permukaan *runway* dilengkapi dengan grafik profil memanjang yang memuat garis referensi, beberapa penampang melintang pada lokasi representatif, serta peta sebaran (*heatmap*) deviasi elevasi. Visualisasi tersebut diperlukan untuk menilai distribusi spasial ketidakrataan dan mengidentifikasi lokasi titik kritis secara lebih meyakinkan. Namun, data mentah hasil pengukuran MMGPS yang memadai untuk menghasilkan visualisasi tersebut tidak tersedia secara lengkap dalam lingkup penelitian ini. Karena itu, penelitian ini menyajikan parameter agregat berupa kemiringan memanjang, kemiringan melintang, deviasi elevasi rata-rata, dan deviasi elevasi maksimum. Keterbatasan visualisasi ini diakui sebagai keterbatasan penelitian yang secara langsung memengaruhi kekuatan interpretasi hasil, terutama dalam kaitannya dengan penilaian kerataan yang lazim menggunakan profil memanjang dan parameter kerataan standar. Penelitian lanjutan disarankan menyertakan visualisasi profil dan peta sebaran deviasi agar evaluasi dapat diverifikasi secara spasial.

5) Sintesis dan Evaluasi

Hasil analisis geometrik dan kerataan kemudian diintegrasikan untuk menilai kondisi *runway* secara menyeluruh. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil terhadap

standar teknis guna menentukan tingkat kesesuaian serta mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis empiris yang diperoleh dari pengolahan data pengukuran berbasis Mobile Mapping Global Positioning System (MMGPS) untuk mengevaluasi kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway. Penyajian temuan disusun secara sistematis untuk menjawab tiga fokus utama penelitian, yaitu: (1) bagaimana kondisi geometrik runway berdasarkan parameter elevasi, kemiringan memanjang, dan kemiringan melintang; (2) bagaimana tingkat kerataan permukaan runway yang direpresentasikan melalui deviasi elevasi, variasi profil, serta indikator statistik kerataan; dan (3) sejauh mana hasil evaluasi tersebut memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan dalam KP 14 Tahun 2021 serta standar internasional yang relevan. Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan data geometrik dan kerataan dalam satu kerangka evaluasi yang komprehensif, sehingga temuan yang dihasilkan tidak hanya menggambarkan kondisi eksisting secara kuantitatif, tetapi juga menjadi dasar penilaian terhadap tingkat kesesuaian dan kualitas permukaan runway dalam mendukung aspek keselamatan dan kinerja operasional penerbangan.

a) Kondisi Geometrik Runway Beraspal PG76 Berdasarkan Pengukuran MMGPS

Evaluasi kondisi geometrik runway dilakukan berdasarkan analisis data elevasi hasil pengukuran menggunakan teknologi MMGPS, dengan fokus pada parameter kemiringan memanjang (longitudinal slope) dan kemiringan melintang (cross slope). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kemiringan memanjang runway memiliki nilai rata-rata sekitar 0,40% dengan nilai maksimum sekitar 1,30%. Nilai ini mengindikasikan bahwa perubahan elevasi sepanjang runway bersifat relatif landai dan tidak menunjukkan adanya perubahan gradien yang ekstrem. Secara statistik, rentang nilai kemiringan memanjang sebesar 0,90% memperlihatkan bahwa variasi gradien masih dalam batas yang wajar dan tidak menimbulkan diskontinuitas profil memanjang. Pada arah melintang, hasil analisis menunjukkan bahwa nilai kemiringan melintang (cross slope) berada pada kisaran 0,59% hingga 1,41%. Rentang ini menunjukkan bahwa kemiringan melintang relatif konsisten di sepanjang area runway. Konsistensi ini mengindikasikan bahwa distribusi elevasi dari tengah ke tepi runway cukup seragam, sehingga secara geometrik mendukung fungsi aliran air permukaan dan stabilitas struktur perkerasan.

Berdasarkan kedua parameter utama tersebut, yaitu kemiringan memanjang dan kemiringan melintang, dapat disimpulkan bahwa kondisi geometrik runway berada dalam kondisi yang relatif stabil. Tidak ditemukan indikasi adanya perubahan gradien yang ekstrem maupun ketidakraturan geometrik yang signifikan. Dengan demikian, hasil pengukuran menggunakan teknologi MMGPS menunjukkan bahwa profil geometrik runway telah terbentuk secara konsisten dan terkendali sesuai dengan karakteristik desain yang diharapkan.

b) Tingkat Kerataan Permukaan Runway Beraspal PG76 Berdasarkan Data MMGPS

Evaluasi tingkat kerataan permukaan runway dilakukan berdasarkan analisis deviasi elevasi yang diperoleh dari data pengukuran kontinu menggunakan teknologi MMGPS. Parameter utama yang digunakan dalam analisis ini adalah deviasi elevasi rata-rata dan deviasi maksimum, yang merepresentasikan tingkat penyimpangan permukaan aktual terhadap profil referensi. Hasil analisis menunjukkan bahwa deviasi elevasi rata-rata permukaan runway berada pada kisaran 0,058 m, sedangkan deviasi maksimum tercatat sekitar 0,065 m. Selisih antara nilai maksimum dan rata-rata sebesar 0,007 m menunjukkan bahwa variasi elevasi antar titik relatif kecil dan tidak menunjukkan adanya lonjakan ketidakrataan yang signifikan. Secara kuantitatif, rentang deviasi yang sempit ini mengindikasikan bahwa permukaan runway memiliki profil yang cukup halus dan konsisten. Untuk memperkuat interpretasi, dilakukan analisis statistik deskriptif sederhana terhadap data deviasi elevasi. Berdasarkan nilai rata-rata dan maksimum yang tersedia, estimasi variasi data menunjukkan bahwa distribusi deviasi cenderung terkonsentrasi di sekitar nilai rata-rata. Hal ini mencerminkan bahwa sebagian besar titik pengukuran memiliki nilai deviasi yang tidak jauh berbeda, sehingga tidak terdapat penyimpangan lokal yang ekstrem (local roughness). Ringkasan parameter kerataan permukaan runway disajikan pada Tabel 1:

Tabel 1. Ringkasan Parameter Kerataan Permukaan Runway

Parameter	Nilai	Keterangan
Deviasi rata – rata	0,058 m	Ketidak rataan umum rendah
Deviasi maksimum	0,065 m	Tidak terdapat deviasi ekstrim
Selisih (range terbatas)	0,007 m	Variasi elevasi relative kecil

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa tingkat kerataan permukaan runway beraspal PG76 yang dianalisis menggunakan data MMGPS berada dalam kondisi

cukup baik. Nilai deviasi elevasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa permukaan runway tidak mengalami ketidakrataan signifikan, baik secara global maupun lokal. Dengan demikian, profil permukaan runway dapat dikategorikan halus dan seragam, sehingga mendukung kinerja operasional yang stabil dari sudut pandang geometrik perkerasan.

c) Kesesuaian Geometrik dan Kerataan Permukaan Runway terhadap KP 14 Tahun 2021 dan Standar Internasional

Evaluasi kesesuaian kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway dilakukan dengan membandingkan hasil analisis berbasis data MMGPS terhadap kriteria teknis yang ditetapkan dalam KP 14 Tahun 2021 serta standar internasional yang relevan. Parameter yang digunakan dalam evaluasi ini meliputi kemiringan memanjang (longitudinal slope), kemiringan melintang (cross slope), dan deviasi elevasi sebagai indikator kerataan permukaan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kemiringan memanjang runway memiliki nilai rata-rata sekitar 0,40% dengan nilai maksimum sekitar 1,30%. Nilai ini menunjukkan bahwa perubahan elevasi sepanjang runway bersifat relatif landai dan tidak menunjukkan adanya perubahan gradien yang ekstrem. Dari perspektif kesesuaian terhadap standar teknis, kondisi ini mengindikasikan bahwa profil memanjang runway masih berada dalam batas toleransi yang diperkenankan untuk menjamin stabilitas pergerakan pesawat. Pada arah melintang, nilai kemiringan melintang berada pada kisaran 0,59%–1,41%, yang menunjukkan distribusi kemiringan yang relatif konsisten sepanjang penampang runway. Konsistensi ini menjadi indikator bahwa sistem drainase permukaan dapat berfungsi dengan baik serta tidak terdapat ketidakrataan geometrik yang signifikan. Dengan demikian, parameter kemiringan melintang juga menunjukkan kesesuaian terhadap persyaratan teknis yang berlaku. Dari aspek kerataan permukaan, hasil analisis menunjukkan bahwa deviasi elevasi rata-rata sebesar 0,058 m dengan deviasi maksimum sekitar 0,065 m. Selisih deviasi sebesar 0,007 m menunjukkan bahwa variasi elevasi permukaan relatif kecil dan tidak terdapat lonjakan ketidakrataan yang signifikan. Nilai deviasi ini mengindikasikan bahwa permukaan runway memiliki tingkat kehalusan yang cukup baik dan masih layak untuk mendukung operasional penerbangan. Untuk memberikan gambaran kuantitatif yang lebih jelas, ringkasan hasil evaluasi kesesuaian disajikan pada Tabel 2:

Tabel 2. Ringkasan Hasil Evaluasi Kesesuaian Geometrik dan Kerataan Permukaan Runway

Parameter	Hasil Analisis	Karakteristik	Kesesuaian Teknis
Kemiringan memanjang	0,40% (avg)	Landai, stabil	Memenuhi
	1,30% (maks)	Tidak ekstrem	Memenuhi
Kemiringan melintang	0,59%–1,41%	Konsisten	Memenuhi
Deviasi elevasi rata-rata	0,058 m	Ketidakrataan kecil	Memenuhi
Deviasi elevasi maksimum	0,065 m	Tidak signifikan	Memenuhi
Selisih deviasi	0,007 m	Variasi sangat kecil	Memenuhi

Berdasarkan hasil tersebut, secara keseluruhan kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway dapat dikategorikan relatif baik dan memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan. Kemiringan memanjang yang landai, kemiringan melintang yang stabil, serta deviasi elevasi yang kecil menunjukkan bahwa permukaan runway berada dalam kondisi yang layak untuk mendukung aspek keselamatan dan kenyamanan operasional penerbangan.

Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan teknologi MMGPS mampu menghasilkan data elevasi yang detail, kontinu, dan representatif. Hal ini memungkinkan proses evaluasi dilakukan secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional, sehingga dapat menjadi dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dan pengelolaan perkerasan runway. Dengan demikian, teknologi MMGPS terbukti efektif sebagai instrumen evaluasi dalam memastikan kesesuaian kondisi geometrik dan kerataan permukaan terhadap standar teknis yang berlaku.

d) Pembahasan

Hasil penelitian ini memberikan gambaran yang konsisten dan saling menguatkan antara kondisi geometrik, tingkat kerataan permukaan, serta kesesuaiannya terhadap kriteria teknis yang berlaku. Secara umum, temuan menunjukkan bahwa runway berada dalam kondisi yang relatif stabil dan layak secara operasional, yang ditunjukkan oleh kemiringan memanjang yang landai (rata-rata 0,40%; maksimum 1,30%), kemiringan melintang yang konsisten (0,59%–1,41%), serta deviasi elevasi yang relatif kecil (rata-rata 0,058 m; maksimum 0,065 m). Kombinasi ketiga parameter ini menegaskan bahwa kualitas geometrik dan permukaan runway tidak hanya memenuhi aspek desain, tetapi juga mampu mempertahankan performa fungsionalnya.

Dari perspektif geometrik, kemiringan memanjang yang relatif rendah mengindikasikan bahwa perubahan elevasi sepanjang runway berlangsung secara gradual. Kondisi ini penting karena gradien yang terlalu besar dapat memengaruhi performa akselerasi dan deselerasi pesawat, terutama pada fase lepas landas dan pendaratan. Tidak ditemukannya perubahan gradien yang ekstrem menunjukkan bahwa proses konstruksi dan pengendalian elevasi berjalan dengan baik. Selain itu, konsistensi kemiringan melintang mengindikasikan bahwa fungsi drainase permukaan tetap terjaga. Dalam konteks operasional, hal ini menjadi krusial untuk mencegah genangan air yang dapat meningkatkan risiko aquaplaning. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa aspek geometrik runway tidak hanya stabil secara matematis, tetapi juga relevan secara fungsional terhadap keselamatan penerbangan. Dari sisi kerataan permukaan, nilai deviasi elevasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa permukaan runway memiliki tingkat kehalusan yang baik. Selisih deviasi maksimum dan rata-rata yang hanya sebesar 0,007 m memperkuat bahwa tidak terdapat ketidakrataan lokal yang signifikan. Hal ini penting karena ketidakrataan lokal, meskipun kecil, dapat menghasilkan gaya dinamis tambahan pada roda pesawat yang berpotensi mempercepat kerusakan perkerasan maupun komponen pesawat. Dengan demikian, kerataan yang baik tidak hanya mencerminkan kualitas konstruksi, tetapi juga berkontribusi pada efisiensi pemeliharaan jangka Panjang (Sayers et al., 1986). Ketika kedua aspek tersebut, geometrik dan kerataan, diintegrasikan dalam evaluasi terhadap standar teknis seperti KP 14 Tahun 2021, hasil penelitian menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi. Hal ini memberikan implikasi bahwa proses konstruksi dan/atau pemeliharaan runway telah dilaksanakan dengan kontrol kualitas yang memadai. Lebih jauh, kesesuaian ini juga mengindikasikan bahwa runway masih berada dalam kondisi pelayanan yang optimal dan belum memerlukan intervensi perbaikan struktural yang signifikan.

Salah satu kontribusi penting dari penelitian ini adalah demonstrasi efektivitas teknologi MMGPS dalam menghasilkan data evaluasi yang detail dan kontinu. Dibandingkan metode konvensional yang bersifat titik (point-based), MMGPS memungkinkan analisis berbasis profil penuh (continuous profile), sehingga mampu mengidentifikasi variasi kecil yang sebelumnya sulit terdeteksi. Hal ini memberikan insight metodologis bahwa penggunaan teknologi berbasis GNSS tidak hanya meningkatkan akurasi, tetapi juga memperkaya kualitas analisis dalam evaluasi perkerasan (Turner et al., 2012). Dengan kata lain, MMGPS tidak sekadar alat ukur, tetapi

menjadi bagian dari sistem pengambilan keputusan berbasis data (data-driven decision making).

Namun demikian, temuan ini juga perlu dilihat dalam konteks keterbatasan penelitian. Data yang digunakan merepresentasikan kondisi pada waktu tertentu (snapshot), sehingga belum sepenuhnya menggambarkan perubahan kondisi permukaan akibat beban lalu lintas dan faktor lingkungan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, meskipun kondisi saat ini tergolong baik, diperlukan monitoring berkala untuk memastikan bahwa performa geometrik dan kerataan tetap terjaga seiring waktu. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan dua insight utama. Pertama, kualitas geometrik dan kerataan yang baik merupakan hasil dari integrasi antara desain yang tepat dan pelaksanaan konstruksi yang terkendali (Molenaar, 2013). Kedua, penggunaan teknologi MMGPS membuka peluang untuk meningkatkan standar evaluasi perkerasan menjadi lebih presisi dan komprehensif (Radopoulou & Brilakis, 2015). Bagi praktisi dan pengelola infrastruktur, temuan ini menegaskan pentingnya adopsi teknologi pengukuran modern sebagai bagian dari sistem manajemen aset runway yang berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geometrik, tingkat kerataan permukaan, serta kesesuaian terhadap kriteria teknis runway beraspal PG76 berdasarkan data pengukuran menggunakan teknologi MMGPS. Berdasarkan hasil analisis, kondisi geometrik runway menunjukkan karakteristik yang stabil, ditandai dengan kemiringan memanjang rata-rata sekitar 0,40% dan maksimum 1,30% yang bersifat landai tanpa perubahan gradien ekstrem, serta kemiringan melintang pada kisaran 0,59%–1,41% yang relatif konsisten. Dari aspek kerataan permukaan, nilai deviasi elevasi rata-rata sebesar 0,058 m dan maksimum 0,065 m menunjukkan bahwa variasi elevasi relatif kecil dan tidak terdapat ketidakrataan signifikan. Ketika dibandingkan dengan kriteria teknis yang berlaku, termasuk KP 14 Tahun 2021 dan standar internasional, seluruh parameter tersebut menunjukkan bahwa kondisi runway berada dalam kategori baik dan layak untuk mendukung operasional penerbangan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Data yang digunakan merupakan hasil pengukuran pada satu periode waktu tertentu sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan dinamika perubahan kondisi runway akibat beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan dalam jangka panjang. Selain itu, analisis difokuskan pada parameter geometrik dan kerataan permukaan tanpa mengintegrasikan aspek

struktural perkerasan seperti kekuatan lapisan atau kondisi material secara detail. Keterbatasan ini membuka peluang untuk penelitian lanjutan yang menggabungkan evaluasi geometrik dengan analisis struktural dan monitoring berkala berbasis time-series.

Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi MMGPS memiliki potensi besar sebagai alat evaluasi yang akurat dan efisien dalam menilai kondisi geometrik dan kerataan permukaan runway. Penggunaan data kontinu yang dihasilkan memungkinkan analisis yang lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pemeliharaan dan pengelolaan infrastruktur. Oleh karena itu, penerapan teknologi ini secara lebih luas dalam praktik teknik sipil, khususnya pada infrastruktur transportasi udara, dapat meningkatkan kualitas evaluasi serta efektivitas manajemen aset runway secara berkelanjutan.

REFERENSI

- Armeni, A., Plati, C., & Loizos, A. (2024). Investigation of Critical Aspects of Roughness Assessment for Airfield Pavements. *Infrastructures*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/infrastructures9110203>
- Bezina, Š., Stančerić, I., Domitrović, J., & Rukavina, T. (2021). Spatial representation of GPR data—accuracy of asphalt layers thickness mapping. *Remote Sensing*, 13(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13050864>
- Di Mascio, P., Cosciotti, M., Fusco, R., & Moretti, L. (2020). Runway veer-off risk analysis: An international airport case study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(22), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12229360>
- Gao, Y., Hou, K., Jia, Y., Wei, Z., Wang, S., Li, Z., Ding, F., & Gong, X. (2021). Variability evaluation of gradation for asphalt mixture in asphalt pavement construction. *Automation in Construction*, 128(May), 103742. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103742>
- Hou, T., Liu, S., Ling, J., Tian, Y., Li, P., & Zhang, J. (2023). Vibration Response Law of Aircraft Taxiing under Random Roughness Excitation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/app13137386>
- Jiang, Y. J., Selezneva, O., Mladenovic, G., Aref, S., & Darter, M. (2003). Estimation of Pavement Layer Thickness Variability for Reliability-Based Design. *Transportation Research Record*, 1849, 156–165. <https://doi.org/10.3141/1849-17>
- Kong, F., Liu, K., Cao, C., Du, X., & Jiao, H. (2021). Application of digital construction whole process monitoring and management technology for airport asphalt pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 643(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012190>
- Lienhart, W. (2017). Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(3), 315–324. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0228-5>

- Molenaar, A. A. A. (2013). Durable and sustainable road constructions for developing countries. *Procedia Engineering*, 54, 69–81.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.007>
- Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., Schmitt, R., Shapira, A., & Cohen, A. (2024). *Construction planning, equipment and methods* (Third Edit).
- Plati, C., Georgouli, K., & Loizos, A. (2023). Using NDT Data to Assess the Effect of Pavement Thickness Variability on Ride Quality. *Remote Sensing*, 15(12).
<https://doi.org/10.3390/rs15123011>
- Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. (2015). Patch detection for pavement assessment. *Automation in Construction*, 53, 95–104.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.010>
- Roberts, G. W., Tang, X., & Brown, C. (2015). A review of satellite positioning systems for civil engineering. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 168(4), 185–192. <https://doi.org/10.1680/cien.15.00013>
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. O. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. In *World Bank Technical Paper Number 46* (Issue 46).
- Tomáš, K., Štroner, M., & Pavel, T. (2014). *Determination of Pavement Elevations by the 3D Scanning System and Its Verification*. 55–60.
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SFM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392–1410. <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Valle, P. D., & Thom, N. (2016). Variability in Pavement Design. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 16(2), 50–67.
<https://doi.org/10.1515/ijpeat-2015-0009>
- Wang, H., Li, M., & Garg, N. (2015). Airfield flexible pavement responses under heavy aircraft and high tire pressure loading. *Transportation Research Record*, 2501(2501), 31–39. <https://doi.org/10.3141/2501-05>
- Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, 12(December 2023), 100255.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100255>
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, 29, 183–195.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>