

Penentuan Nilai Modulus Elastisitas Perkerasan Landasan Pacu Menggunakan Metode *Backcalculation* dengan Program PCASE 7.0.7 (Studi Kasus: Bandara Rendani Manokwari)

Agus Erwansyah¹, Latif Budi Suparma^{1*}, Taqia Rahman¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: lbsuparma@ugm.ac.id

INTISARI

Bandara Rendani di Manokwari, Papua Barat, mengalami peningkatan pergerakan pesawat sebesar 10,22% pada tahun 2023, mencapai 6.092 pergerakan, sehingga Kementerian Perhubungan RI memperpanjang landasan pacu dari 2.000 meter menjadi 2.300 meter untuk menyesuaikan pertumbuhan lalu lintas udara dan memfasilitasi pesawat berbadan lebar, serta melakukan evaluasi kualitas perkerasan guna memastikan daya dukung optimal *runway*. Oleh karena itu, penelitian ini menentukan nilai modulus elastisitas perkerasan menggunakan data defleksi dari pengujian *heavy weight deflectometer* pada perpanjangan *runway* dengan metode *backcalculation* melalui program PCASE 7.0.7. Berdasarkan hasil *backcalculation* dengan program PCASE 7.0.7, maka diperoleh nilai modulus elastisitas untuk setiap lapisan struktur *runway*. Pada titik *centerline*, modulus elastisitas yang diperoleh adalah 972 MPa untuk HMA, 307 MPa untuk *base*, 269 MPa untuk *subbase*, dan 275 MPa untuk *subgrade* dengan RMS rata-rata 17,11%. Sementara itu, pada titik 3M *right*, nilai modulus elastisitas masing-masing lapisan adalah 962 MPa, 285 MPa, 272 MPa, dan 292 MPa dengan RMS rata-rata 13,94%. Sedangkan pada titik 3M *left*, nilai modulus elastisitas yang dihasilkan adalah 737 MPa untuk HMA, 379 MPa untuk *base*, 274 MPa untuk *subbase*, dan 267 MPa untuk *subgrade* dengan RMS yaitu 13,00%. Hasil *backcalculation* ini dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kinerja perkerasan *runway*.

Kata kunci: PCASE 7.0.7, *backcalculation*, *heavy weight deflectometer*, *back-calculated moduli*, *non-destructive testing*

1 PENDAHULUAN

Bandara Rendani di Manokwari, Papua Barat memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan mendukung kegiatan ekonomi di wilayah Papua Barat. Pada tahun 2023 terdapat jumlah pergerakan pesawat mencapai 6.092 artinya terjadi peningkatan sebesar 10,22% dibandingkan tahun 2022 dengan jumlah 5.527 pergerakan pesawat. Dalam hal ini mencerminkan adanya peningkatan transportasi udara di wilayah tersebut (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2024).

Untuk menyesuaikan dengan pertumbuhan lalu lintas udara dan memfasilitasi pendaratan pesawat berbadan lebar dalam kondisi kapasitas penuh, Kementerian Perhubungan Republik Indonesia telah mengimplementasikan proyek perpanjangan landasan pacu Bandara Rendani dari 2.000 meter menjadi 2.300 meter pada tahun 2023. Seiring dengan penyelesaian perpanjangan *runway* ini, evaluasi terhadap kualitas dan kekuatan struktur perkerasan *runway* menjadi penting untuk memastikan bahwa harus mampu menahan beban operasional pesawat secara efektif dan optimal.

Pengelola bandara memiliki tanggung jawab besar dalam pemeliharaan dan rehabilitasi *runway*, sehingga diperlukan metode evaluasi yang efisien, ekonomis, dan tidak merusak untuk menentukan kondisi perkerasan, terutama dalam menilai karakteristik material yang ada. Dengan kemajuan teknologi, pendekatan konvensional yang memerlukan penggalian atau uji destruktif kini dapat digantikan dengan metode yang lebih cepat dan tidak merusak, yang dikenal sebagai *non-destructive testing* (NDT) (Baldo dkk., 2021). Salah satu metode NDT yang umum digunakan dalam evaluasi perkerasan *runway* adalah pengujian *Heavy Weight Deflectometer* (HWD). Data defleksi yang diperoleh dari pengujian ini dapat digunakan untuk memperkirakan modulus elastisitas lapisan perkerasan melalui teknik *backcalculation*. Modulus elastisitas ini sangat penting dalam menilai kondisi dan kapasitas daya dukung perkerasan (Sun dkk., 2022).

Pada penelitian ini berfokus pada analisis modulus elastisitas perkerasan pada perpanjangan *runway* Bandara Rendani menggunakan metode *backcalculation* dengan bantuan *software* PCASE 7.0.7 menjadi langkah penting dalam mengevaluasi kualitas dan daya dukung perkerasan. Metode ini memungkinkan penilaian kondisi perkerasan secara efisien dan non-destruktif, sehingga hasilnya dapat digunakan sebagai dasar dalam strategi pemeliharaan dan rehabilitasi *runway*. Dengan evaluasi yang tepat, diharapkan *runway* Bandara Rendani dapat terus mendukung peningkatan lalu lintas udara serta memastikan keselamatan dan kelancaran operasional penerbangan di Papua Barat.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi yang menjadi objek pada penelitian ini adalah Bandar Udara Rendani Manokwari yang terletak Jalan Sowi Distrik Manokwari, Kabupaten Manokwari, Papua Barat. Pengambilan data uji *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) dilakukan di sepanjang landasan pacu bandar udara yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian (Google earth, 2024).

2.2 Data Penelitian

Data utama dalam penelitian ini diperoleh dari Balai Teknik Penerbangan Direktorat Jenderal Perhubungan Udara Kementerian Perhubungan melalui pengujian lapangan menggunakan alat *heavy weight deflectometer* di beberapa titik pada perkerasan lentur *runway* Bandar Udara Rendani Manokwari. Data yang diperoleh mencakup nilai defleksi pada berbagai jarak dari pusat beban. Selain itu, juga diperoleh data mengenai struktur perkerasan *runway*, seperti ketebalan setiap lapisan, suhu, dan informasi material perkerasan.

2.3 Nilai Seed Moduli

Nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*) merupakan *input* nilai modulus elastisitas awal yang digunakan sebagai asumsi dalam analisis perhitungan balik (Rahmawati dkk., 2022). Semakin realistis nilai *seed moduli* yang digunakan, maka semakin baik hasil perhitungan yang diperoleh. Nilai ini berperan penting dalam proses iterasi pada metode *deflection basin fit*. Penetapan nilai *seed moduli* dapat mengacu pada regulasi dari *Federal Aviation Administration* (FAA), atau sering kali menggunakan nilai perkiraan berdasarkan penelitian terdahulu. Selain itu, proses *backcalculation* juga dipengaruhi oleh nilai rasio *Poisson's*, karena seluruh material lapisan perkerasan diasumsikan bersifat elastis linier. Nilai rasio *Poisson's* dan *seed moduli* yang umum digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai rasio *poisson's* dan tipikal *seed moduli* (FAA, 2011)

Material	Rasio <i>Poisson's</i>	Tipikal Moduli (Mpa)	Low – High Moduli (Mpa)
<i>Asphalt Concrete</i>	0,25 – 0,40	3500	500 – 14000
<i>Asphalt-Treated base</i>	0,25 – 0,40	3500	700 – 10000
<i>Portland Cement Concrete</i>	0,10 – 0,20	35000	7000 – 60000
<i>Cement Treated Base</i>	0,15 – 0,25	5000	1400 – 14000
<i>Granular Base</i>	0,20 – 0,40	200	70 – 350
<i>Granular Subbase</i>	0,20 – 0,40	100	30 – 200
<i>Stabilized Soil</i>	0,15 – 0,30	350	70 – 1400
<i>Cohesive Soil</i>	0,30 – 0,45	50	20 – 170

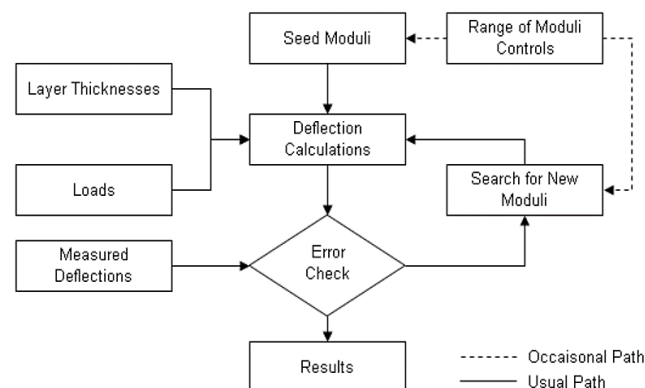
Penyesuaian dilakukan dengan memanfaatkan nilai modulus elastisitas yang diperoleh dari pengujian laboratorium sebelumnya serta data suhu hasil pengukuran HWD untuk memperoleh nilai *seed moduli* yang tepat. Nilai *seed moduli* dapat dihitung menggunakan grafik hubungan antara temperatur dan modulus elastisitas yang dilakukan oleh Faroz dan Herman (2017) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian modulus elastisitas berdasarkan temperatur (Faroz dan Herman, 2017)

Temperatur (°C)	Modulus Elastisitas (MPa)
20	6652,70
25	4514,68
30	2831,33
35	1593,09
40	764,95
45	285,10
50	66,49

2.4 Teknik Backcalculation

Perhitungan balik (*backcalculation*) adalah proses analisis yang bertujuan untuk menentukan nilai modulus elastisitas dari lapisan perkerasan dan *subgrade*, berdasarkan data defleksi yang diperoleh dari pengujian menggunakan alat *heavy weight deflectometer*. Proses ini menggunakan data defleksi untuk memperkirakan karakteristik material perkerasan yang tidak dapat diukur secara langsung, seperti kekakuan dan daya dukung setiap lapisan perkerasan serta *subgrade*. Lytton (1989) menjelaskan bahwa teknik *backcalculation* merupakan teknik analisis material berbasis *Non-Destructive Testing* (NDT) yang dilakukan secara *in-situ* (di lokasi), sehingga hasil analisisnya mampu merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Dalam NDT, proses *backcalculation* digunakan untuk menentukan sifat mekanis perkerasan, yang berkaitan dengan pengembangan korelasi yang sesuai dalam pembentukan *deflection bowl*. Proses *backcalculation* ini umumnya dilakukan dengan bantuan dalam berbagai *software* pendukung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Proses teknik *backcalculation* (Lytton, 1989)

Lytton (1989) menjelaskan parameter serta tahapan prosedur dalam proses *backcalculation* yang mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk lendutan terukur (*measured deflection*), ketebalan lapisan perkerasan, beban kendaraan, dan nilai modulus elastisitas awal (*seed moduli*). Selain itu, lendutan hasil analisis (*calculated deflection*) dibandingkan dengan nilai terukur melalui pemeriksaan *error check*, yang dihitung menggunakan metode penjumlahan kuadrat diferensiasi antara *measured deflection* dan *calculated deflection*. Hasil akhir dari proses ini mencakup nilai pengukuran dan perhitungan lendutan (*measured and calculated moduli*), selisih nilai (*differentiation*), persentase kesalahan, nilai modulus elastisitas hasil *backcalculation* (*backcalculated moduli*), serta total *error* yang diperoleh dari proses analisis.

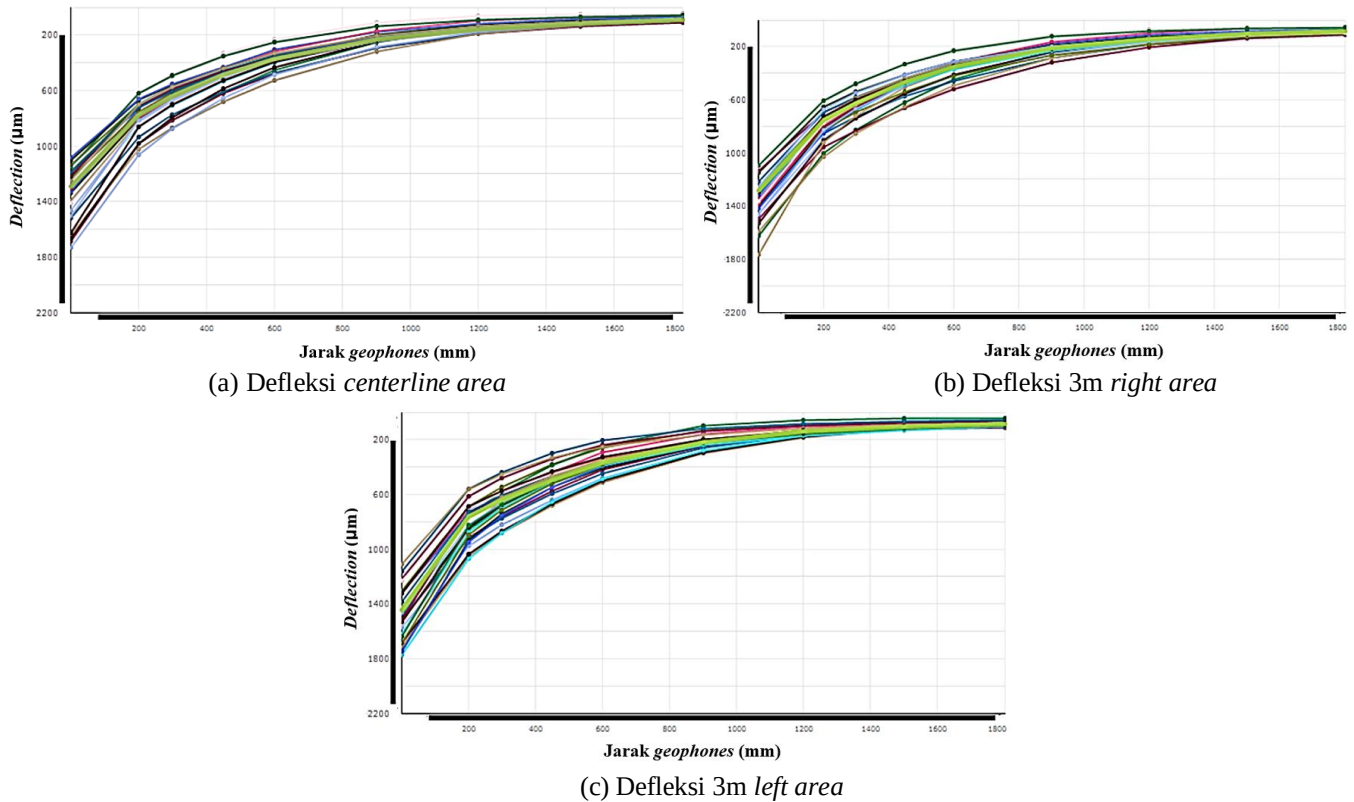
2.5 Program PCASE 7.0.7

Program PCASE (Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering) 7.0.7 merupakan perangkat lunak (*software*) yang dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers untuk mendukung analisis dan desain perkerasan, termasuk perhitungan modulus elastisitas menggunakan analisis *backcalculation*. Penggunaan *software* ini dilakukan dengan beberapa tahapan, dimulai dari *input* parameter awal seperti nilai defleksi, ketebalan lapisan perkerasan, nilai beban uji, serta *seed moduli* sebagai nilai awal perkiraan modulus elastisitas. Program *software* kemudian menjalankan proses iterasi untuk menyesuaikan modulus elastisitas setiap lapisan hingga nilai lendutan terhitung (*calculated deflection*) mendekati lendutan hasil pengukuran (*measured deflection*). Keakuratan hasil *backcalculation* dinilai berdasarkan nilai *root mean square* (RMS) *error*, dimana nilai RMS yang rendah menunjukkan hasil yang valid.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Visualisasi Data Defleksi *Heavy Weight Deflectometer*

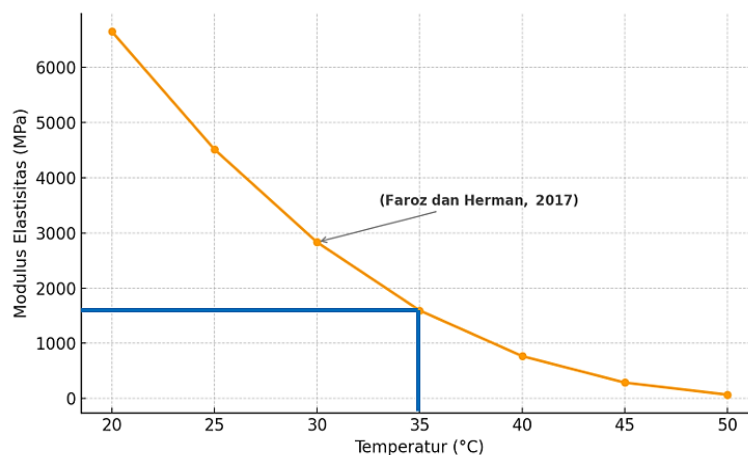
Visualisasi data defleksi perkerasan yang diperoleh melalui pengujian menggunakan *heavy weight deflectometer* (HWD) dapat dilihat pada Gambar 3 untuk grafik hasil pengujian untuk titik *centerline*, 3 meter ke kanan (3m right), dan 3 meter ke kiri (3m left). Data ini memberikan gambaran mendetail mengenai respons perkerasan terhadap beban dinamis, yang kemudian dianalisis untuk menentukan modulus elastisitas pada masing-masing lapisan perkerasan.



Gambar 3. Grafik defleksi pada titik (a) *centerline* (b) 3m right, dan (c) 3m left.

3.2 Parameter *Input* Program PCASE 7.0.7

Penentuan parameter *input* nilai *seed modulus* dalam penelitian ini didasarkan pada hubungan empiris antara modulus elastisitas dan temperatur, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4 grafik hasil penelitian Faroz dan Herman (2017). Berdasarkan data klimatologi, suhu terpanas tahunan di Manokwari tercatat mencapai 35°C. Hal ini, dilakukan interpolasi pada grafik tersebut dengan temperatur 35°C, maka diperoleh nilai *seed modulus* sebesar 1593 MPa.



Gambar 4. Hubungan antara temperatur dan modulus elastisitas.

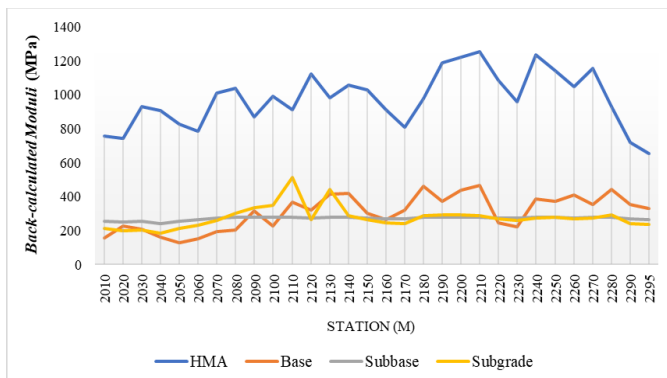
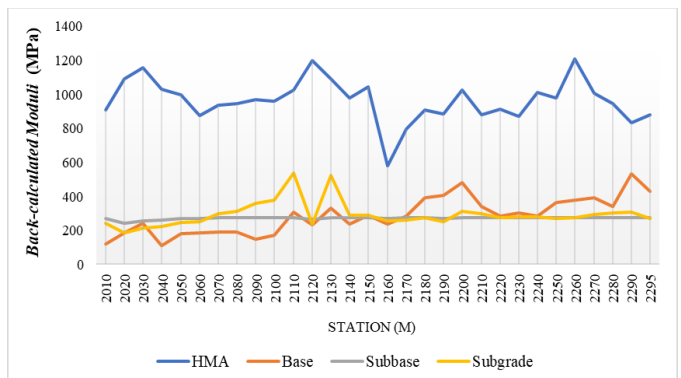
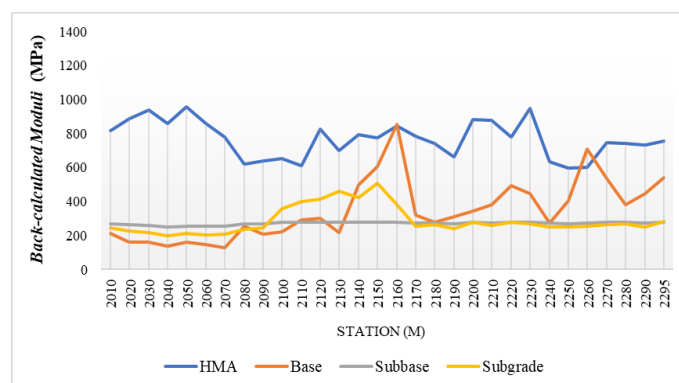
Hasil analisis nilai *seed moduli* dapat dilihat pada Tabel 3, yang menampilkan parameter *input* yang digunakan dalam analisis program PCASE 7.0.7. Parameter tersebut mencakup nilai *seed moduli* dan ketebalan masing-masing lapisan perkerasan. Ketebalan setiap lapisan perkerasan mengacu pada ketebalan lapisan eksisting, dengan lapisan HMA merupakan total ketebalan dari lapisan AC-WC, AC-BC, dan AC-Base. Pada lapisan *base*, nilai *seed moduli* menggunakan nilai berdasarkan FAA (2011) dengan jenis material *crushed aggregate base course* dengan rentang nilai 200-350 MPa dan untuk *subbase course* material *granular subbase course* dengan rentang nilai 100-200 MPa. Sedangkan untuk *subgrade* Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) untuk *subgrade* ditentukan berdasarkan CBR rencana minimum yang mengacu pada MDPJ (2017), yaitu sebesar 6%. Dari nilai CBR tersebut, diperoleh hasil Modulus Resilien (MR) sebesar 60 MPa.

Tabel 3. Parameter *Input* Program PCASE 7.0.7

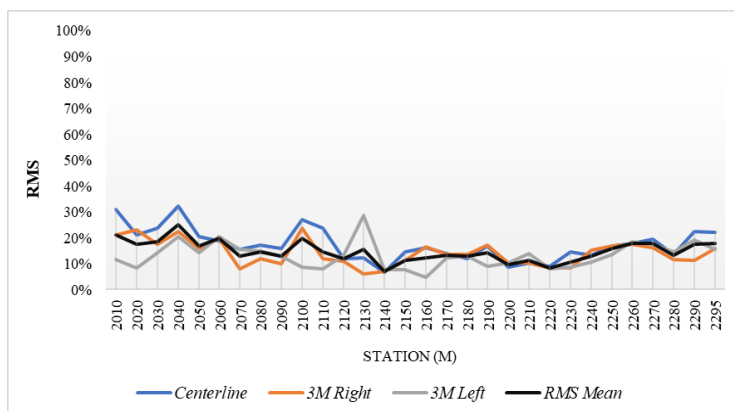
Layer	Deskripsi	Ketebalan (cm)	Seed Moduli (MPa)			Poisson's Ratio
			Centerline	3m right	3m left	
1	Hot Mix Asphalt	27	1593	1593	1593	0.35
2	Base Course	20	300	300	300	0.35
3	Subbase Course	35	150	150	150	0.35
4	Subgrade	-	62	62	62	0.40

3.3 Analisis *Backcalculation* Menggunakan Program PCASE 7.0.7

Hasil analisis *backcalculation* menggunakan program PCASE 7.0.7 ditampilkan dalam bentuk grafik dengan memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kondisi perkerasan *runway*. Gambar 5 memperlihatkan grafik *back-calculated moduli* pada tiga titik pengukuran, yaitu *centerline*, 3 meter kanan (3M *right*), dan 3 meter kiri (3M *left*). Grafik tersebut memberikan gambaran rinci mengenai variasi modulus elastisitas di sepanjang ruas landasan pacu yang berbeda.

(a) Modulus elastisitas *centerline area*(b) Modulus elastisitas 3m *right area*(c) Modulus elastisitas 3m *left area*Gambar 5. Grafik modulus elastisitas pada titik (a) *centerline* (b) 3m *right*, dan (c) 3m *left*.

Grafik RMS untuk titik *centerline*, 3 meter kanan (3m *right*), dan 3 meter kiri (3m *left*) yang ditampilkan pada Gambar 6. Nilai RMS digunakan untuk mengevaluasi tingkat fluktuasi modulus elastisitas perkerasan, yang dapat mengindikasikan variasi kekakuan struktural serta potensi area dengan ketidakseragaman atau kelemahan dalam perkerasan *runway*.



Gambar 6. Grafik nilai RMS pada titik *centerline*, 3m *right*, dan 3m *left*.

Pemilihan modulus elastisitas untuk setiap lapisan struktur *runway* dilakukan dengan mempertimbangkan pada nilai *root mean square* (RMS). Nilai RMS digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara data yang diukur dan model yang dihasilkan menggunakan program PCASE 7.0.7. Semakin kecil nilai RMS, maka semakin baik model tersebut dalam merepresentasikan kondisi aktual. Penentuan nilai modulus elastisitas yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi hasil nilai modulus elastisitas.

Titik	<i>Back-calculated Moduli</i>			
	HMA (MPa)	Base (MPa)	Subbase (MPa)	Subgrade (MPa)
<i>Centerline</i>	972	307	269	275
<i>3m Right</i>	962	285	272	292
<i>3m Left</i>	737	379	274	267

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *backcalculation* menggunakan program PCASE 7.0.7, diperoleh nilai modulus elastisitas lapisan struktur *runway* pada tiga titik pengukuran dari uji HWD, yaitu *centerline*, 3 meter ke kanan (3M *right*), dan 3 meter ke kiri (3M *left*) dari struktur perpanjangan *runway* di Bandara Rendani, Manokwari. Evaluasi ini juga mempertimbangkan nilai *root mean square* (RMS) sebagai indikator kestabilan modulus elastisitas. Pada titik *centerline*, modulus elastisitas yang diperoleh adalah 972 MPa untuk lapisan HMA, 307 MPa untuk lapisan *base course*, 269 MPa untuk lapisan *subbase course*, dan 275 MPa untuk lapisan *subgrade* dengan RMS rata-rata sebesar 17,11%. Sementara itu, pada titik 3M *right*, nilai modulus elastisitas masing-masing lapisan adalah 962 MPa, 285 MPa, 272 MPa, dan 292 MPa dengan RMS rata-rata adalah 13,94%. Sedangkan pada titik 3M *left*, nilai modulus elastisitas yang dihasilkan adalah 737 MPa untuk lapisan HMA, 379 MPa untuk lapisan *base course*, 274 MPa untuk *subbase course*, dan 267 MPa untuk lapisan *subgrade* dengan RMS rata-rata yaitu 13,00%. Dengan demikian, hasil *backcalculation* ini dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kinerja perkerasan *runway*, serta dalam perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi guna memastikan daya tahan dan keselamatan penerbangan.

REFERENSI

- Baldo, N., Miani, M., Rondinella, F., and Celauro, C. (2021). "A Machine Learning Approach to Determine Airport Asphalt Concrete Layer Moduli Using Heavy Weight Deflectometer Data." Sustainability. Switzerland.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2024). "Statistik Angkutan Udara Tahun 2023." Jakarta.
- Faroz, R. R., dan Herman, H. (2017). "Studi Pengaruh Temperatur terhadap Modulus Kekakuan Campuran Menggunakan Aspal Berpolimer Bitu Bale." *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 3(4), 24.
- Federal Aviation Administration. (2011). "AC 150/5370-11B Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements." Washington, D.C.

- Google Earth. (2024). "Rendani Airport, Sowi, Manokwari Regency, West Papua." Google. <https://earth.google.com/web/search/Rendani+Airport,+Sowi,+Manokwari+Regency,+West+Papua>.
- Lytton, R.L. (1989). "Backcalculation of Pavement Layer Properties Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Modulli." Texas.
- Kementerian PUPR. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) No. 02/M/BM/2017. Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta.
- Rahmawati, R., Suparma, B.L., dan Utomo, S.H.T. (2022). "Penentuan Nilai Modulus Elastisitas Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Perhitungan Balik." *Jurnal Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*, 8(2) 159-172 <https://doi.org/https://doi.org/10.26593/jhpji.v8i2.5999.159-172>.
- Sun, J., Chai, G., Oh, E., and Bell, P. (2022). "A Review of PCN Determination of Airport Pavements Using FWD/HWD Test". Chinese Society of Pavement Engineering.
- US Army Corps of Engineers. (2024). "User Guide Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering." United States Department of the Army.