

Penentuan Modulus Resilien Berdasarkan *Indirect Tensile Strength* (ITS) pada Campuran AC-WC Menggunakan Aspal PG-76 dengan Gradasi KP 14 Tahun 2021

**BARKAH WAHYU WIDIANTO^{1*}, OKA PURWANTI¹, SOFYAN TRIANA¹,
NURUL FAUZIAH²**

¹ Dosen Program Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

² Mahasiswa Program Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: barkah@itenas.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan aspal PG-76 dengan gradasi KP 14 Tahun 2021 pada campuran AC-WC bertujuan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi dan retak. Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) dilakukan untuk menentukan modulus elastisitas campuran berdasarkan tegangan dan regangan. Metode melibatkan pembuatan benda uji Marshall, pengujian volumetrik, serta ITS pada dua kondisi: terkondisi dan tidak terkondisi. Kadar aspal optimum ditentukan sebesar 6%. Hasil menunjukkan nilai ITS pada benda uji terkondisi sebesar 935 kPa (0,94 MPa); sedangkan pada benda uji tidak terkondisi sebesar 1.119 kPa (1,12 MPa). Nilai Tensile Strength Ratio (TSR) mencapai 84%, memenuhi standar KP 14 Tahun 2021. Modulus resilien pada benda uji terkondisi sebesar 733 MPa dan 1.050 MPa pada benda uji tidak terkondisi. Hasil modulus resilien tersebut memiliki potensi penerapan yang baik dalam konstruksi lapisan permukaan fasilitas sisi udara bandara.

Kata kunci: modulus resilien, aspal PG-76, kuat tarik tidak langsung, KP 14 Tahun 2021

ABSTRACT

The application of PG-76 asphalt with KP 14 Year 2021 gradation in AC-WC mixtures aims to enhance resistance against deformation and cracking. The Indirect Tensile Strength (ITS) test was conducted to determine the elastic modulus based on stress-strain response. The methodology included Marshall specimen preparation, volumetric testing, and ITS evaluation under conditioned and unconditioned states. The Optimum Asphalt Content (OAC) was determined as 6%. Results showed an ITS value of 935 kPa (0.94 MPa) for conditioned specimens and 1119 kPa (1.12 MPa) for unconditioned specimens. The calculated Tensile Strength Ratio (TSR) reached 84%, meeting KP 14 Year 2021 requirements. Resilient modulus values were found to be 733 MPa for conditioned specimens and 1050 MPa for unconditioned specimens. The result of resilience modulus exhibits strong potential for application in surface layer construction at airside airport facilities.

Keywords: resilient modulus, PG-76 asphalt, indirect tensile strength, KP 14 Year 2021

1. PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur perkerasan Bandara yang dipengaruhi banyak faktor, terutama meningkatnya lalu lintas pesawat udara. Salah satu komponen penting dalam konstruksi perkerasan lentur adalah lapisan atas atau *wearing course*, yang umumnya menggunakan campuran Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) [1,2]. Campuran ini harus memiliki ketahanan terhadap beban berulang, suhu ekstrem, serta kondisi lingkungan seperti curah hujan tinggi agar tidak cepat mengalami kerusakan seperti retak dan *stripping* sehingga dibutuhkan material dan desain campuran yang optimal untuk memenuhi kriteria tersebut [3–6]. Penggunaan aspal modifikasi seperti Performance Grade 76 (PG-76) menjadi solusi dalam meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan mekanis campuran beraspal. Aspal PG-76 memiliki karakteristik viskositas tinggi dan titik lembek yang lebih baik dibandingkan aspal konvensional, sehingga mampu menahan deformasi plastis pada suhu tinggi dan tetap fleksibel pada suhu rendah. Selain itu, penggunaannya juga bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada aspal impor, seiring dengan peningkatan produksi domestik dalam beberapa tahun terakhir [4,7–9]. Penggunaan aspal jenis ini dalam campuran AC-WC semakin relevan dalam konteks pembangunan infrastruktur transportasi udara.

Sebagai pendukung utama kinerja campuran, gradasi agregat juga menjadi faktor kritis dalam pencapaian kinerja campuran beraspal. Spesifikasi KP 14 Tahun 2021 memberikan panduan desain gradasi agregat yang dirancang khusus untuk aplikasi di bandar udara, dengan fokus pada distribusi ukuran partikel yang seimbang antara kepadatan dan rongga. Gradasi yang tepat dapat meningkatkan *interlocking* antar agregat, sehingga memperkuat ikatan dengan aspal dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen serta kelelahan akibat repetisi beban [3,10,11]. Penerapan gradasi ini diharapkan mampu memberikan performa campuran yang lebih baik dibandingkan spesifikasi sebelumnya. Untuk mengevaluasi kinerja mekanis campuran secara menyeluruh, salah satu metode uji yang digunakan adalah pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS). Metode ini membantu dalam menilai ketahanan campuran terhadap retak tarik dan *stripping* melalui parameter *Tensile Strength Ratio* (TSR), yaitu perbandingan kuat tarik antara benda uji yang direndam dan tidak direndam. Hasil dari penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi aspal PG-76 dan gradasi KP 14 tahun 2021 mampu mencapai nilai TSR di atas standar minimum 80%, menunjukkan ketahanan *stripping* yang memadai [12–15]. Oleh karena itu, pemanfaatan kedua material ini dalam campuran AC-WC layak dikaji lebih lanjut sebagai alternatif teknologi dalam pembangunan infrastruktur perkerasan di bandar udara.

Pendekatan lain yang semakin populer dalam evaluasi kinerja campuran beraspal adalah penentuan modulus resilien berdasarkan hasil pengujian ITS. Modulus resilien merupakan parameter penting dalam perencanaan struktur perkerasan jalan karena merepresentasikan kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula setelah menerima beban berulang. Penelitian [15–18] menunjukkan bahwa modulus resilien dapat dihitung secara teoritis menggunakan data tegangan-regangan dari pengujian ITS, sehingga memberikan gambaran awal mengenai elastisitas campuran. Selain itu, penggunaan modulus resilien hasil ITS memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam simulasi respons struktural perkerasan di lapangan [19–22], terutama pada fasilitas sisi udara yang menghadapi beban akses berat dan paparan lingkungan ekstrem. Dengan demikian, pengujian ITS tidak hanya berguna untuk menilai ketahanan *stripping*, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk menentukan modulus resilien sebagai parameter dasar dalam perencanaan struktur perkerasan lentur.

2. METODOLOGI

2.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental, melalui serangkaian tahapan sistematis untuk mengkaji performance AC-WC dengan aspal Performance Grade 76 (PG-76) dan gradasi KP 14 Tahun 2021 berdasarkan pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS). Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan dan analisis data sekunder mengenai spesifikasi KP 14 Tahun 2021, karakteristik aspal PG-76, serta gradasi agregat yang digunakan dalam campuran AC-WC [3,23]. Setelah itu dilakukan pengujian awal terhadap material penyusun campuran, termasuk pengujian sifat fisik agregat seperti berat jenis, penyerapan air, abrasi Los Angeles, nilai setara pasir (*sand equivalent*), dan kadar butir lolos saringan No. 200. Pengujian aspal mencakup viskositas, penetrasi, titik lembek, dan titik nyala sesuai standar ASTM dan SNI.

Setelah memastikan semua bahan memenuhi persyaratan teknis, dilanjutkan dengan proses desain campuran menggunakan gradasi KP 14 Tahun 2021 untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO). Proses ini didasarkan pada kombinasi parameter Marshall dan volumetrik yang melibatkan variasi kadar aspal antara 5% hingga 7,5%. Hasil pengujian Marshall digunakan sebagai dasar dalam pembuatan benda uji ITS. Benda uji dibuat dalam bentuk silinder dengan dimensi diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm sesuai standar ASTM D4867. Pengujian ITS dilakukan pada dua kondisi: tidak terkondisi (tanpa perendaman) dan terkondisi (setelah direndam selama 24 jam pada suhu 60°C). Data tegangan dan regangan dari pengujian ini kemudian digunakan untuk menghitung modulus resilien [24] menggunakan **Persamaan 1**.

$$MR = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

dengan: σ adalah tegangan tarik dan ε adalah regangan balik (*recoverable strain*).

Pengujian ITS dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tarik tidak langsung dan perhitungan TSR (*Tensile Strength Ratio*). Pengujian ini menjadi indikator ketahanan *stripping* campuran [12,25,26]. Hasil pengujian tersebut selanjutnya dihitung dengan kuantitatif serta dikorelasikan berdasarkan persyaratan KP 14 Tahun 2021. Pengolahan data hasil pengujian dilakukan secara sistematis dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mendukung interpretasi kinerja campuran secara visual.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Material Penyusun Campuran

Pengujian material penyusun campuran dilakukan untuk memastikan bahwa agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan aspal PG-76 memenuhi persyaratan teknis sesuai spesifikasi KP 14 Tahun 2021. Adapun hasil pengujian Aspal PG 76 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Berdasarkan pengujian dihasilkan semua material memenuhi kriteria yang ditetapkan. Aspal PG-76 memiliki nilai penetrasi sebesar 54,6 dmm; titik lembek 70,5°C; viskositas 0,66 Pa.s; dan titik nyala 318°C; menunjukkan karakteristik termal dan reologi yang baik (Nurul Fauziah, 2024). Pengujian agregat seperti abrasi Los Angeles (19,3%); kadar lumpur (<1%); dan nilai setara pasir (85%) juga memenuhi standar KP 14 Tahun 2021.

Hasil ini selaras dengan penelitian yang menyatakan bahwa aspal PG-76 memiliki stabilitas termal yang tinggi [7], sehingga cocok digunakan di daerah tropis seperti Indonesia. Selain itu, gradasi agregat yang digunakan berada dalam batas gradasi KP 14 Tahun 2021, terutama

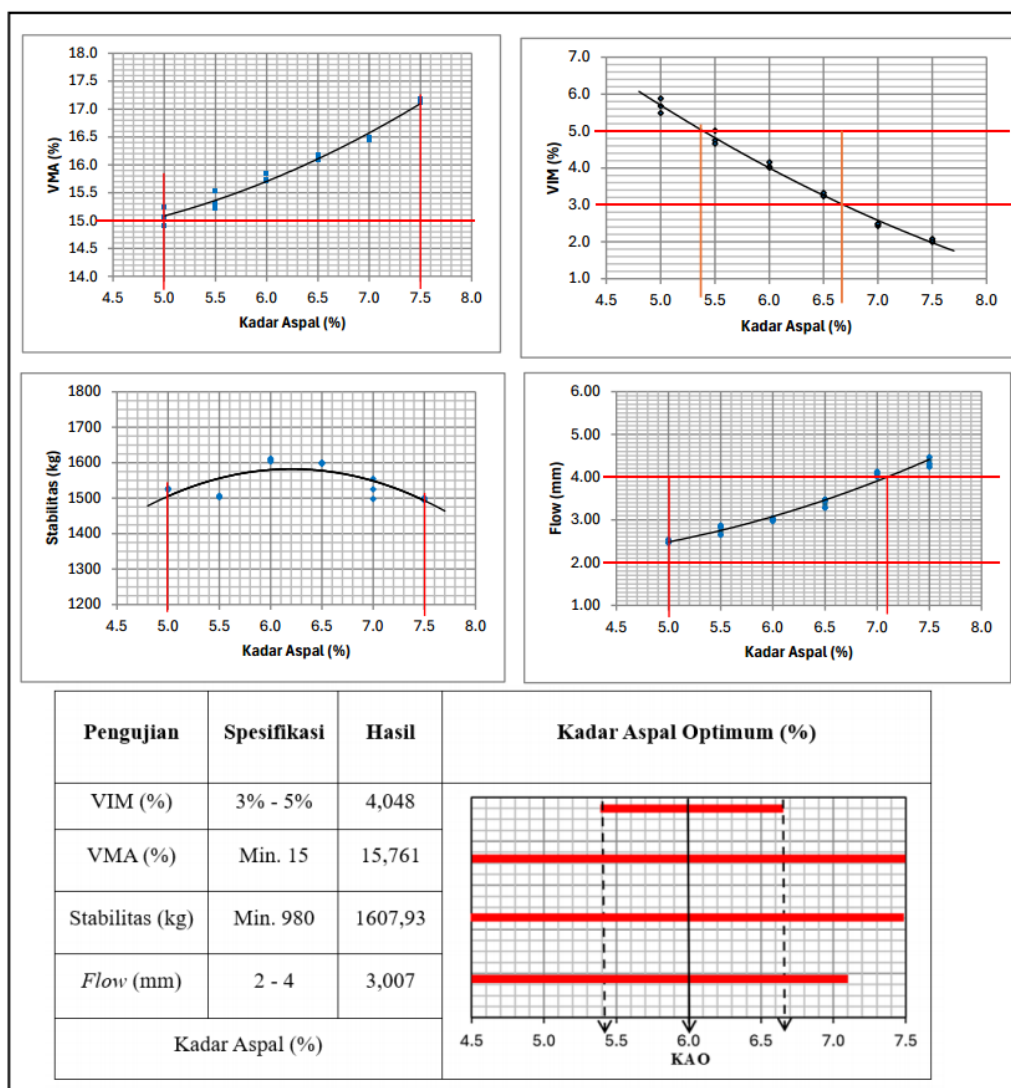
pada fraksi No. 8 hingga No. 200, memberikan distribusi partikel yang optimal untuk meningkatkan *interlocking* dan kepadatan campuran.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengujian Aspal PG 76

Pengujian	Persyaratan	Standar Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
Berat Jenis Aspal	Min. 1,0	SNI 2441:2011	1,032	Memenuhi
Pengujian Viskositas pada temperatur 135°C [Pa.s]	Maks. 3,0	ASTM D4402	0,66	Memenuhi
Penetrasi, 100 g, 5 detik, 25°C [dmm]	Dilaporkan	ASTM D5	54,6	-
Titik Lembek [°C]	Dilaporkan	ASTM D36	70,5	-
Titik Nyala [°C]	Min. 230	ASTM D92	318	Memenuhi

3.2 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Proses penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan berdasarkan parameter Marshall dan volumetrik sesuai KP 14 Tahun 2021. Nilai KAO yang diperoleh adalah 6%, berdasarkan grafik hubungan antara kadar aspal dengan stabilitas, VIM, VMA, dan *flow* (**Gambar 1**). Pada kadar tersebut, campuran menunjukkan stabilitas sebesar 1.603 kg; *flow* sebesar 2,97 mm; VIM 4,3%; dan VMA 16,2%.



Gambar 1. Penentuan kadar aspal optimum AC-WC dengan aspal PG-76

Gambar 1, menunjukkan bahwa pada kadar aspal 6%, semua parameter Marshall berada dalam rentang spesifikasi KP 14 Tahun 2021, yaitu stabilitas minimum 1.300 kg, *flow* antara 2–4 mm, VIM 3–5%, dan VMA \geq 15%. Hasil ini mendukung penelitian [10,27], yang menyimpulkan bahwa kadar aspal optimum sangat dipengaruhi oleh distribusi gradasi agregat dan sifat reologi aspal.

3.3 Hasil Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)

Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap retak tarik dan stripping, yang merupakan penyebab utama kerusakan pada lapisan perkerasan lentur. Dalam penelitian ini, pengujian ITS dilakukan pada dua kondisi benda uji: tidak terkondisi (tanpa perendaman) dan terkondisi (setelah direndam dalam air selama 24 jam pada suhu 60°C). Benda uji dibuat sesuai standar ASTM D4867 dengan dimensi diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm menggunakan alat *Marshall Testing Machine* yang dimodifikasi.

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh nilai ITS pada benda uji tidak terkondisi sebesar 1119 kPa (1,12 MPa) dan pada benda uji terkondisi sebesar 935 kPa (0,94 MPa). Nilai rasio kuat tarik (*Tensile Strength Ratio/TSR*) dihitung dari perbandingan kedua kondisi tersebut, yaitu sebesar 84%, memenuhi persyaratan minimum KP 14 Tahun 2021 yang mensyaratkan $TSR \geq 80\%$ [23]. Hasil pengujian kuat tarik langsung pada 2 kondisi tersebut saat kadar aspal optimum yaitu 6% dapat dilihat pada **Tabel 2** untuk benda uji terkondisi dan **Tabel 3** untuk benda uji tidak terkondisi.

Tabel 2. Hasil Pengujian Indirect Tensile Strength Terkondisi

Dial [kg]	Beban [kg]	P [kN]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	H _{rata-rata} [mm]	d [mm]	S _{tm} [kPa]	S _{tm} [MPa]
924	985,72	9,67	64,20	66,30	66,00	65,50	101,40	926,194	0,926
955	1.014,78	9,95	66,90	64,70	65,50	65,70	101,40	950,596	0,951
994	1.016,80	9,97	67,70	66,30	68,10	67,37	101,40	928,917	0,929
Σ								935,235	0,935

Dari **Tabel 2**, perhitungan *Indirect Tensile Strength* terkondisi (S_{tm}) pada benda uji terkondisi pada *Indirect Tensile Strength* kondisi KAO adalah 0,935 MPa atau 935 kPa.

Tabel 3. Hasil Pengujian Indirect Tensile Strength Tidak Terkondisi

Dial [kg]	Beban [kg]	P [kN]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	H _{rata-rata} [mm]	d [mm]	S _{td} [kPa]	S _{td} [MPa]
1.185	1.249,97	12,26	66,10	66,00	66,10	66,07	101,40	1.164,412	1,164
1.076	1.147,88	11,26	65,30	65,50	65,70	65,50	101,40	1.078,554	1,079
1.139	1.199,13	11,76	64,60	66,40	67,50	66,17	101,40	1.115,361	1,115
Σ								1.119,442	1,119

Dari **Tabel 3**, perhitungan *Indirect Tensile Strength* tidak terkondisi (S_{td}) pada benda uji yang kedua adalah rata-rata 3 benda uji tidak terkondisi adalah 1,12 MPa atau 1.119 kPa.

Perhitungan perbandingan dari 2 kondisi ini dapat dilihat pada **Tabel 4** yang menjelaskan bahwa perbandingan nilai benda uji atau *Tensile Strength Ratio* (TSR) pada 2 kondisi yaitu sebesar 84% dimana nilai tersebut memenuhi persyaratan dari spesifikasi KP 14 Tahun 2021 yaitu minimum 80%.

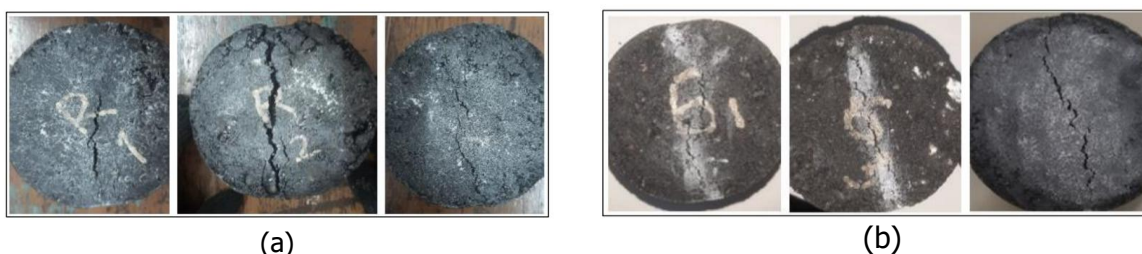
Tabel 4 Perbandingan Benda Uji 2 Kondisi (*Tensile Strength Ratio*)

Terkondisi (S_{tm})	Tidak Terkondisi (S_{td})	TSR [%]	Keterangan
935,235	1.119,442	83,545	Memenuhi

Dari **Tabel 4** di atas perhitungan perbandingan nilai benda uji atau Tensile Strength Ratio (TSR) kedua benda uji adalah 84%. Perbedaan nilai ITS antara kedua kondisi menunjukkan bahwa paparan air berdampak pada penurunan kekuatan tarik campuran. Namun, penurunan sebesar 16,4% masih berada dalam batas aman; mengindikasikan bahwa ikatan antara aspal dan agregat tetap kuat meskipun dalam kondisi basah. Hasil penelitian ini mendukung temuan penelitian sebelumnya [12,13], yang menyatakan bahwa kombinasi aspal modifikasi seperti PG-76 dengan gradasi agregat yang tepat mampu meningkatkan ketahanan *stripping* hingga di atas 80%.

3.4 Analisis Performa Berdasarkan Pola Retak

Pola retak yang terbentuk selama pengujian ITS memberikan informasi visual tentang mekanisme kegagalan campuran.



Gambar 2. Pola retak (a) terkondisi; (b) tidak terkondisi

Gambar 4 menunjukkan pola retak pada benda uji terkondisi dan tidak terkondisi. Pada kedua kondisi, retak terbentuk secara simetris sepanjang sumbu vertikal benda uji, menunjukkan distribusi tegangan yang merata dan kualitas campuran yang baik. Pola retak *Indirect Tensile Strength* pada benda uji terkondisi lebih tidak kontinu dibandingkan benda uji tidak terkondisi, mengindikasikan adanya pengaruh lemah dari penyerapan air terhadap integritas struktur campuran. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa aspal modifikasi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan ikatan antar partikel meski dalam kondisi jenuh air [25,26].

3.5 Pengaruh Gradasi KP 14 Tahun 2021 terhadap Kinerja ITS

Gradasi agregat sangat mempengaruhi sifat mekanis campuran beraspal. Dalam penelitian ini digunakan gradasi KP 14 Tahun 2021, yang dirancang khusus untuk aplikasi bandar udara dengan fokus pada stabilitas dan daya tahan terhadap beban repetitif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa gradasi yang digunakan berada dalam rentang spesifikasi KP 14 Tahun 2021, dengan distribusi ukuran partikel yang optimal untuk menciptakan interlocking yang baik antar agregat.

Pola distribusi gradasi ini membantu meningkatkan densitas campuran sehingga mengurangi jumlah rongga udara (VIM), yang berkontribusi pada peningkatan nilai ITS. Hasil ini selaras dengan penelitian yang menyimpulkan bahwa gradasi agregat yang lebih rapat dapat meningkatkan kekuatan tarik tidak langsung [10,27] hingga 15–20%, selama kadar aspal disesuaikan secara tepat.

3.6 Kinerja Aspal PG-76 dalam Meningkatkan Ketahanan Tarik

Aspal PG-76 memiliki karakteristik reologi yang unggul, termasuk viskositas tinggi dan elastisitas yang baik pada suhu ekstrem. Penggunaannya dalam campuran AC-WC berhasil meningkatkan ikatan antara aspal dan agregat, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap deformasi dan *stripping*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal PG-76 memenuhi semua parameter teknis sesuai KP 14 Tahun 2021, termasuk titik lembek sebesar 70,5°C; penetrasi sebesar 54,6 dmm; dan viskositas sebesar 0,66 Pa.s.

Karakteristik tersebut menjadikan aspal PG-76 sebagai pilihan ideal untuk daerah tropis seperti Indonesia, di mana variasi suhu harian cukup signifikan. Penelitian [12,26,28] juga melaporkan bahwa aspal PG-76 memiliki performa yang lebih stabil dibandingkan aspal konvensional dalam lingkungan panas, dengan penurunan nilai ITS kurang dari 10% setelah paparan suhu tinggi berkepanjangan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi aspal PG-76 dan gradasi KP 14 Tahun 2021 pada campuran AC-WC memberikan kinerja yang memadai dalam hal ketahanan tarik dan stripping. Nilai TSR sebesar 84% menunjukkan bahwa campuran layak digunakan pada proyek infrastruktur perkerasan Bandar Udara dengan intensitas curah hujan tinggi.

Dengan mempertimbangkan hasil ini, penggunaan aspal PG-76 dan gradasi KP 14 Tahun 2021 dapat direkomendasikan sebagai alternatif material dalam desain campuran beraspal di Indonesia. Selain itu, penggunaan aspal domestik ini juga akan mengurangi ketergantungan pada impor, sekaligus meningkatkan ketahanan material dalam menghadapi kondisi cuaca ekstrem [26,28].

3.7. Penentuan Modulus dari Hasil Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)

Nilai modulus dapat dihitung dari perbandingan nilai tegangan dengan regangan. Hasil dari perhitungan modulus pada saat KAO dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6** di bawah ini.

Tabel 5. Hasil Analisis Modulus Resilien pada Benda Uji Terkondisi

$z = 13 \text{ mm}$					$d = 101,4 \text{ mm}$	
P [kg]	h [mm]	$Flow$ [mm]	Tegangan σ [N/mm ²]	Regangan ϵ [mm/mm]	Modulus Resilien [MPa]	Modulus Resilien [GPa]
986	65,50	3,87	11,352	0,015	743,632	0,744
1.015	65,70	3,89	11,652	0,015	759,300	0,759
1.017	67,37	4,14	11,386	0,016	697,178	0,697
Σ					733,370	0,733

Dari **Tabel 5**, hasil dari perbandingan regangan dan tegangan, maka didapatkan nilai modulus resilien rata-rata benda uji terkondisi pada kadar aspal optimum 6% untuk campuran AC-WC dengan Aspal PG-76 adalah 733 MPa atau 0,733 GPa.

Tabel 6. Hasil Analisis Modulus Resilien pada Benda Uji Tidak Terkondisi

$z = 13 \text{ mm}$					$d = 101,4 \text{ mm}$	
P [kg]	h [mm]	$Flow$ [mm]	Tegangan σ [N/mm ²]	Regangan ϵ [mm/mm]	Modulus Resilien [MPa]	Modulus Resilien [GPa]
1.250	66,07	3,97	14,272	0,016	911,300	0,911
1.148	65,50	2,86	13,220	0,011	1.171,772	1,172
1.199	66,17	3,25	13,671	0,013	1.066,344	1,066
Σ					1.049,805	1,050

Dari **Tabel 6**, hasil dari perbandingan regangan dan tegangan, maka didapat untuk nilai modulus resilien rata-rata benda uji tidak terkondisi pada kadar aspal optimum 6% untuk campuran AC-WC dengan Aspal PG-76 adalah 1.050 MPa atau 1,05 GPa.

Hasil pengujian ITS juga digunakan untuk menghitung modulus resilien rata-rata campuran. Berdasarkan analisis data; modulus resilien pada benda uji terkondisi mencapai 733 MPa (0,73 GPa); sedangkan pada benda uji tidak terkondisi sebesar 1.119 MPa (1,12 GPa). Nilai modulus resilien yang tinggi menunjukkan kemampuan campuran dalam mempertahankan elastisitasnya meskipun mengalami beban berulang dan paparan lingkungan. Nilai modulus resilien yang tinggi berkorelasi positif dengan ketahanan deformasi permanen dan retak pada lapis perkerasan lentur [7]. Hal ini menjelaskan mengapa penggunaan aspal PG-76 bersama gradasi KP 14 Tahun 2021 dapat meningkatkan umur layan perkerasan di bandar udara dengan intensitas lalu lintas penerbangan yang tinggi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa:

1. Aspal PG-76 yang digunakan dalam penelitian memenuhi semua persyaratan teknis sesuai KP 14 Tahun 2021 berdasarkan hasil pengujian penetrasi, titik lembek, dan viskositas.
2. Gradasi agregat yang digunakan berada dalam batas gradasi KP 14 Tahun 2021, menunjukkan distribusi ukuran partikel yang optimal untuk meningkatkan stabilitas campuran.
3. Kadar Aspal Optimum (KAO) yang diperoleh adalah sebesar 6%, dengan stabilitas rata-rata 1.608 kg dan *flow* sebesar 3,01 mm; memenuhi spesifikasi KP 14 Tahun 2021.
4. Hasil pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) menunjukkan nilai kuat tarik tidak langsung sebesar 1.119 kPa (tidak terkondisi) dan 935 kPa (terkondisi), menghasilkan nilai *Tensile Strength Ratio* (TSR) sebesar 84%.
5. Pola retak aksial simetris tanpa fragmentasi besar menunjukkan ikatan aspal-agregat yang baik serta distribusi gradasi optimal sesuai KP 14 Tahun 2021.

4.2 Saran

Saran dari penelitian ini menunjukkan bahwa:

1. Untuk meningkatkan ketepatan data modulus resilien, disarankan menggunakan alat *Universal Materials Testing and Accelerated Aging Apparatus* (UMATTA) dalam penelitian lanjutan.
2. Perlu dilakukan pengujian tambahan seperti *fatigue life test* dan *rutting resistance test* untuk evaluasi kinerja campuran secara menyeluruh.
3. Hasil penelitian ini direkomendasikan untuk diimplementasikan dalam proyek infrastruktur transportasi nyata, terutama pembangunan landas pacu bandara, dengan monitoring kondisi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. D., Firdaus, & B. W., Widiyanto, (2024). "Evaluasi Modulus Elastisitas, Sisa Umur Layan, dan Overlay pada Perkerasan Lentur Menggunakan Program Elmod 6", *Prosiding FTSP Series 7 Seminar Nasional dan Desiminasi Tugas Akhir*, pp. 181–185.
- [2] E. M., Basuki, & B.W. Widiyanto, (2024). "Perbandingan Umur Layan terhadap Perubahan Nilai Parameter Desain pada Perkerasan Kaku di Apron Bandar Udara", *Berkala Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi*, 2(3), pp. 717–726.
- [3] D., Az-Zahra, & S., Sukirman, (2023). "Studi Banding Nilai Parameter Marshall Perkerasan AC-WC Menggunakan Spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 1 dan KP 14 Tahun 2021", *Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir 2023*, pp. 591–596.
- [4] R., Ferbiansyah, A. M., Indriani, & G., Utomo, (2023). "Analisis Durabilitas Campuran AC-WC Menggunakan Asphalt Buton Pen 60/70 dan Asphalt PG76 Perbandingan

- 40:60", *KoNTekS17 2023 (PROCEEDING) e-ISSN:3031-6308 : Tema Struktural*, 1(3), pp. 461–469. <https://doi.org/10.62603/konteks.v1i3.48>
- [5] Y. T., Rante, & Susilowati, (2024). "Analisis Campuran Panas Aspal Beton (LASTON AC-WC) dengan Batas Gradasi Menerus Agregat Campuran No. IV (Quarry Ex . Kali Mio, Desa Mio, NTT)", *Buletin Profesi Insinyur: Juli-Desember*, 7(2), pp. 71–80. <https://doi.org/10.20527/bpi.v7i2.245>
- [6] D., Sarwono, F. P., Pramesti, & F. M. Nugroho, (2017). "Studi Karakteristik Campuran Asphalt Concrete Wearing Course Dengan Asbuton Emulsi Sebagai Bahan Pengikat", *MATRIKS TEKNIK SIPIL*, 5(4), pp. 1349–1361. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v5i4.36916>
- [7] M. A., Amrin, A., Gaus, & M., Darwis, (2017). "Studi Kuat Tarik Tidak Langsung Pada Campuran Asphalt Concrete Menggunakan Asbuton", *Jurnal Sipil Sains*, 7(14), pp. 1–12. <http://ejournal.unkhair.ac.id/index.php/sipils/article/view/499>
- [8] B. W., Widiyanto, R. C., Audiwahyu, & E.M. Basuki, (2023). "Model Penurunan Umur Layan terhadap Perubahan Nilai Parameter Desain Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku Runway Bandar Udara", *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), pp. 167–177. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v9i2.80>
- [9] N. K., Wintari, N. Desi, & S. Gusty, (2024). "Analysis of Optimum Asphalt Content of Lasbutag Mixture (Buton Aggregate Asphalt Coating) Modified by Waste Oil and Diesel as Modifier", *ASTONJADRO*, 13(2), pp. 499–508. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v13i2.15168>
- [10] I., Ginting, A., Marpaung, B., Hario, & Supriyono, (2017). "Evaluasi Gradasi Agregat Pada Campuran AC-WC Menggunakan Teori Fractal", *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(2), pp 1–11.
- [11] H. A., Omar, N. I. M., Yusoff, M., Mubarak, & H., Ceylan, (2020). "Effects of moisture damage on asphalt mixtures", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(5), pp. 600–628. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>
- [12] J. P., Zaniewski, & G., Srinivasan, (2004). "Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential", Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown.
- [13] A., Almusawi, B., Sengoz, & A., Topal, (2021). "Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures", *Construction and Building Materials*, 268, 121140. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121140>
- [14] E. Y., Hajj, P. E., Sebaaly, & P., Kandiah, (2010). "Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in airfield HMA pavements", *Journal of Transportation Engineering*, 136(3), pp. 181–189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000090)
- [15] A. K., Arshad, H., Awang, E., Shaffie, W., Hashim, & Z. A., Rahman, (2018). "Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content", *E3S Web of Conferences* 34, 01026, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401026>
- [16] R. T., Bethary, & D. E., Intari, (2021). "Modulus Resilien Campuran Beraspal Modifikasi Polimer AC-WC Menggunakan Filler Gypsum", *Jurnal Transportasi Forum Studi Transportasi (FSTPT)*, 21(3), pp. 165–172. <https://doi.org/10.26593/jtrans.v21i3.5446.165-172>
- [17] E. Y., Adiman, T., Iduwin, & A., Setiawan, (2021). "Pengembangan Metode Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Pada Campuran Aspal", *Jurnal Teknik Sipil Universitas Abulyatama*, 7(2), pp. 94–102. <https://doi.org/10.30601/jtsu.v7i2.2040>
- [18] Y., Liang, T., Bai, X., Zhou, F., Wu, C., Chenxin, C., Peng, L., Fuentes, L. F., Walubita, W., Li, & X., Wang, (2023). "Assessing the Effects of Different Fillers and Moisture on Asphalt Mixtures' Mechanical Properties and Performance", *Novel Green Pavement Materials and Coatings*, 13(2), pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings13020288>

- [19] G. R., Chehab, Y. S., Hamdar, & A. J., Haddad, (2019). "Investigating High-Temperature PG Grade Adjustment Recommendations for Airfield Pavements", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(5), pp. 365–373. <https://doi.org/10.1177/0361198119838259>.
- [20] E., Yaghoubi, M. R., Ahadi, M. A., Sheshpoli, & H. J., Pahlevanloo, (2013). "Evaluating the Performance of Hot Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement and Engine Oil as Rejuvenator", *IJTE: International Journal of Transportation Engineering*, 1(2), pp. 115–124. <https://doi.org/10.22119/ijte.2013.3237>
- [21] M., Naser, M. T., Abdel-Jaber, R., Al-shamayleh, N., Louzi, & R., Ibrahim, (2022). "Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts", *Transportation Engineering*, 10, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>.
- [22] R., Khan, J., Grenfell, A., Collop, G., Airey, & H., Gregory, (2013). "Moisture damage in asphalt mixtures using the modified SATS test and image analysis", *Construction and Building Materials*, 43, pp. 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.003>
- [23] Kementerian Perhubungan, (2021). "Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor: KP 14 Tahun 2021 tentang Spesifikasi Teknis Pekerjaan Fasilitas Sisi Udara Bandar Udara", Kementerian Perhubungan, Jakarta.
- [24] Suherman, (2012). "Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lapis Antara (AC-BC) yang Menggunakan Material Hasil Daur Ulang (RAP) AC Lapis Antara (AC-Binder Course, AC- BC) dan AC Lapis Pondasi (AC-Base) Perencanaan Campuran Beton Aspal Lapis", *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 10(1), pp. 51–58.
- [25] K. L., Vasconcelos, L. B., Bernucci, & J. M., Chaves, (2012). "Effect of Temperature on the Indirect Tensile Strength Test of Asphalt Mixtures", *5th Eurasphalt Eurobitume Congress*.
- [26] R. F. P., Kamdem, J. A., Adedeji, & M. M., Hassan Mostafa, (2023). "A Study on Indirect Tensile Strength for the Determination of Resilient Modulus of Warm Mix Asphalt", *Transportation Research Procedia*, 69, pp. 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.236>
- [27] M., Naser, M., Abdel-Jaber, R., Al-Shamayleh, R., Ibrahim, N., Louzi, & T., AlKhrrissat, (2023). "Improving the Mechanical Properties of Recycled Asphalt Pavement Mixtures Using Steel Slag and Silica Fume as a Filler", *Building Materials, and Repair & Renovation*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/buildings13010132>
- [28] M. A., Esfahani, & M. N., Jahromi, (2020). "Optimum parafibre length according to mechanical properties in hot mix asphalt", *Road Materials and Pavement Design*, 21(3), pp. 683–700. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1527240>