

Kinerja Mekanistik Campuran Beraspal dengan Mensubstitusi Agregat Kasar dengan Batu Vulkanik Merah

I Made Agus Ariawan*

Prodi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: agusariawan17@unud.ac.id

D. M. Priyantha Wedagama

Prodi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: priyantha@civil.unud.ac.id

I Nyoman Arya Thanaya

Prodi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: aryathanaya@unud.ac.id

I Gusti Agung Ratih Kusuma Wardani

Prodi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: ratiagugung99@gmail.com

I Putu Chandra Wibawa

Prodi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: chandrawibawa36@yahoo.com

Abstrak

Semakin terbatasnya ketersediaan batu vulkanik di alam menyebabkan bahan konstruksi perkerasan jalan menggunakan batu vulkanik hitam tercampur dengan batu vulkanik merah yang berat jenisnya lebih ringan dan berpori. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja mekanistik campuran beraspal dengan mensubstitusi agregat kasar dengan batu vulkanik merah hingga prosentase 10% pada ukuran butiran $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No.4 sesuai dengan kondisi di lapangan. Pembuatan campuran beraspal dilakukan dengan metode marshall. Karakteristik mekanistik diperoleh dari pengujian modulus kekakuan tarik tidak langsung/Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) sesuai BS EN 12697-26: 2012, pengujian rangkai dinamis/dynamic creep (BS EN 12697-25:2005) dan pengujian kelelahan tarik tidak langsung/Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) sesuai BS EN 12697-24:2012 menggunakan alat uji dynapave universal testing material (UTM) 30. Nilai-nilai karakteristik marshall campuran beraspal memenuhi spesifikasi Kementerian PUPR (2020), karakteristik kekakuan meningkat rata-rata 6,9% setiap penambahan substitusi 5% batu vulkanik merah. Ketahanan deformasi meningkat dengan nilai tipikal kemiringan rangkai menyimpulkan campuran beraspal dapat digunakan untuk beban lalu lintas berat ($ESA > 10^6$). Karakteristik ketahanan kelelahan lebih rendah (lebih awal runtuh) dibandingkan dengan tanpa substitusi dengan batu vulkanik merah dan terjadi penurunan ketahanan kelelahan sebesar 2,18% setiap penambahan substitusi 5% batu vulkanik merah.

Kata kunci: Kinerja mekanistik, campuran beraspal, substitusi, batu vulkanik merah

Abstract

The increasingly limited availability of volcanic stone in nature has caused road pavement construction materials to use black volcanic stone mixed with red volcanic stone, which is lighter in density and porous. This research aims to analyze the mechanistic performance of asphalt mixtures by substituting coarse aggregate with red volcanic stone up to a percentage of 10% at a granule size of $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No. 4 according to conditions in the field. The asphalt mixture is made using the marshall method. Mechanistic characteristics are obtained from indirect tensile stiffness modulus (ITSM) testing according to BS EN 12697-26: 2012, dynamic creep testing (BS EN 12697-25:2005) and indirect tensile fatigue testing (ITFT) according to BS EN 12697-24:2012 using a dynapave universal testing material (UTM) 30 test tool. The marshall characteristic values of the asphalt mixture meet the specifications of the Ministry of PUPR (2020), the stiffness characteristic increases by an average of 6.9 % for each additional substitution of 5% red volcanic stone. Deformation resistance increases with typical values of creep slope, concluding that asphalt mixtures can be used for heavy traffic loads ($ESA > 10^6$). The fatigue resistance characteristics are lower (earlier to collapse) compared to without red volcanic stone substitution and there is a decrease in fatigue resistance of 2.18% for each additional 5% red volcanic stone substitution.

Keywords: Mechanistic performance, asphalt mixture, substitution, red volcanic stone

* Penulis korespondensi: agusariawan17@unud.ac.id

1. Pendahuluan

Ketersediaan batu vulkanik ini saat ini mulai terbatas karena meningkatnya pekerjaan konstruksi dan terbatasnya ketersediaan di tempat pengambilan material (*quarry*). Batu vulkanik yang tersedia di alam, secara visual terdiri dari campuran batu vulkanik hitam dan batu vulkanik merah yang memiliki nilai penyerapan terhadap air yang tinggi, melebihi dari batas maksimal yang diisyaratkan sebesar 3% (Kementrian PUPR, 2020). Batuan vulkanik berwarna merah memiliki berat yang ringan, permukaan berpori atau poros (Khosama, 2012). Sifat ini identik dengan penyerapan agregat terhadap aspal dalam jumlah yang lebih banyak pada saat proses pembuatan campuran beraspal. Keberadaan batu vulkanik merah pada batu vulkanik sebagai material campuran beraspal diduga menyebabkan terjadinya penurunan karakteristik mekanis campuran beraspal. Struktur batu vulkanik merah yang berpori dan memiliki tingkat keausan yang tinggi mengakibatkan partikel batu vulkanik merah rentan untuk hancur (*degradasi*, *disintergrasi*) apabila menerima beban mekanis saat proses pencampuran, penghamparan, pemadatan maupun pada saat pelayanan terhadap lalu lintas.

Dampak dari batu vulkanik merah yang berpori berpengaruh pada nilai penyerapan agregat yang tinggi sehingga menyebabkan kadar aspal efektif dalam campuran beraspal berkurang dan berpotensi menimbulkan stripping (Yuniarti et al., 2023b). Nilai berat jenis serta penyerapan agregat mempengaruhi kepadatan dan rongga dalam campuran beraspal/VIM (Waani, 2013; Taringan, 2019; Gashi et al., 2017). Agregat dengan berat jenis tinggi menghasilkan VIM yang rendah (Adwang, 2020; Rondonuwu et al., 2013) dan nilai VIM yang tinggi mengindikasikan campuran beraspal bersifat poros dan mempengaruhi keawetan campuran beraspal (Putra et al., 2018). Semakin rendah nilai penyerapan agregat maka nilai VIM semakin rendah (Anggraini, 2018), peningkatan VIM dapat terjadi karena aspal sebagian besar terserap agregat dengan porositas dan penyerapan tinggi (Rizli et al., 2019). Agregat yang memiliki keausan tinggi memiliki berat jenis yang rendah (Rondonuwu et al., 2013). Semakin rendah tingkat keausan agregat akan menghasilkan campuran dengan karakteristik mekanistik dalam hal ini nilai kuat tarik tidak langsung (*Indirect Tensile Stiffness Modulus /ITSM*) yang tinggi (Yuniarti et al., 2023a).

Agregat dari batu vulkanik merah memiliki berat jenis rendah, nilai penyerapan dan keausan tinggi dibandingkan batu vulkanik hitam yang tersedia di alam khususnya yang diperoleh dari *quarry* Desa Kubu, Desa Selat dan Desa Butus – Kabupaten Karangasem Bali. Nilai berat jenis agregat yang rendah akan mempengaruhi sifat volumetric campuran beraspal diantaranya rongga dalam agregat/VMA (Hall, 2004). Agregat yang memiliki penyerapan air/porositas tinggi akan mempengaruhi kebutuhan kadar aspal yang cukup, dimana persentase kadar aspal merupakan parameter yang sensitif mempengaruhi sifat volumetric campuran beraspal (Minhas, 2019). Penyerapan air

tinggi pada agregat berpengaruh terhadap ketahanan campuran beraspal diantaranya ketahanan kelembapan akibat suhu dan air (Apeageyi et al., 2015). Pada penelitian ini agregat batu vulkanik merah digunakan sebagai substitusi pada agregat batu vulkanik hitam dengan prosentase dan ukuran butir sesuai dengan kondisi material di lapangan. Sehubungan dengan sifat batu vulkanik merah yang memiliki berat jenis rendah, nilai penyerapan dan keausan tinggi maka perlu dianalisis karakteristik campuran beraspal terutama sifat mekanisnya yang meliputi karakteristik marshall, modulus kekakuan (*stiffness*), ketahanan terhadap deformasi (*creep*) dan ketahanan kelelahan (*fatigue*) campuran beraspal yang menggunakan agregat batu vulkanik tercampur dengan batu vulkanik merah.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Batu vulkanik

Batu vulkanik (**Gambar 1**) terbentuk dari keluarnya magma gunung berapi berupa batuan yang mengendap dan mengalami deformasi serta perombakan (Zikril et al., 2019). Batu ini berbentuk bongkahan, umumnya berwarna hitam yang solid yang tercampur dengan batuan vulkanik berwarna merah (**Gambar 2**) dengan berat yang lebih ringan, permukaan berpori/poros (Khosama, 2012). Sifat porositas ini mempengaruhi jumlah zat cair yang diserapnya.

2.2 Asphalt concrete – wearing course (AC-WC)

AC-WC merupakan campuran beraspal panas dan lapisan yang paling atas dari struktur perkerasan jalan. Lapisan ini dirancang mempunyai tekstur permukaan yang kasar, kedap air dan memiliki ukuran gradasi



Gambar 1. Batu vulkanik



Gambar 2. Batu vulkanik merah

butiran yang lebih halus dibandingkan dengan lapisan dibawahnya (Kementrian PUPR, 2020). Sifat campuran yang diisyaratkan seperti ditampilkan pada **Tabel 1**.

2.3 Modulus kekakuan (stiffness modulus), ketahanan deformasi (Creep), kelelahan campuran beraspal (fatigue)

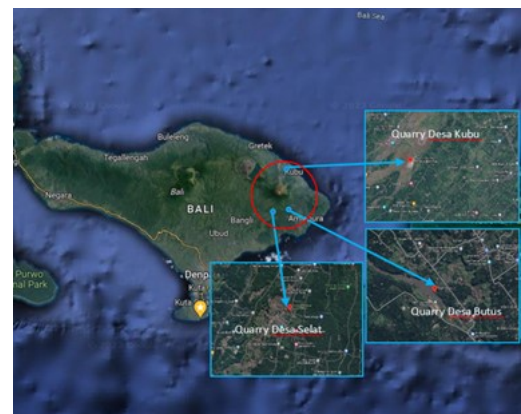
Campuran beraspal sensitif terhadap tegangan tarik dari pada tegangan tekan, sehingga perlu dilaksanakan pengujian terhadap modulus kekakuan tarik campuran beraspal. Kekakuan campuran beraspal merupakan salah satu sifat mekanis yang mempengaruhi kinerja kemampuan campuran beraspal untuk menahan dan menyebarkan beban. Pengujian modulus kekakuan dapat dilakukan dengan metode BS EN 12607-26:2012.

Ketahanan deformasi diartikan sebagai kemampuan campuran beraspal menerima pengulangan beban dalam jangka waktu tertentu. Pengujian kelelahan dilakukan dengan metode BS EN 12697-25:2005. Dari pengujian ketahanan terhadap deformasi melalui pengujian rangkai/creep, kemiringan dari kurva rangkai digambarkan dalam grafik hubungan antara kumulatif regangan tetap dan waktu pembebanan/loading cycle. Tipikal besar kemiringan/slope value yang diperoleh dari pengujian campuran beraspal hasil pengujian rangkai dinamis dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Fatigue didefinisikan sebagai keretakan pada campuran beraspal akibat beban berulang, besarnya beban biasanya lebih kecil dari kekuatan tarik. Umur kelelahan ditentukan oleh besarnya regangan serta kekakuan campuran beraspal menentukan hubungan antara tegangan dengan jumlah aplikasi beban sampai runtuh. Pengujian kelelahan dapat dilakukan dengan metode BS EN 12697-24:2012.

3. Metodologi

Penelitian diawali dengan pengambilan sampel agregat batu vulkanik di Kabupaten Karangasem Bali, tepatnya di quarry Desa Kubu, Desa Selat dan Desa Butus (**Gambar 3**) yang berasal dari hasil erupsi Gunung Agung pada periode tahun 1808 - 2017, dengan pertimbangan material pada quarry tersebut umum digunakan sebagai material konstruksi di Bali. Proses pemilahan dilakukan dan kandungan batu vulkanik merah terdapat pada ukuran butir 12,5 mm - 4,75 mm dengan prosentase 4 - 9% pada fraksi butir kasar. Pengujian properties agregat batu vulkanik dan aspal sesuai prosedur SNI dan pembuatan campuran beraspal menggunakan metode Marshall dengan memproporsikan agregat pada gradasi tengah dari campuran beraspal AC-WC. Kadar aspal optimum (KAO) ditentukan dengan Metode Bar-Chart dan KAO



Gambar 3. Lokasi pengambilan sampel agregat batu vulkanik

Tabel 1. Tipikal kemiringan minimum pengujian rangkai dinamis

Sifat-sifat campuran	AC-WC	
Jumlah tumbukan per bidang	Min	75
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min	0,6
	Maks	1,2
Rongga dalam campuran/VIM (%)	Min	3,0
	Maks	5,0
Rongga dalam agregat/VMA (%)	Min	15
Rongga terisi aspal/ VFB (%)	Min	65
Stabilitas Marshall (kg)	Min	800
Pelelehan (mm)	Min	2
	Maks	4
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min	90
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal (<i>refusal</i>)	Min	2

Sumber: Kementrian PUPR (2020)

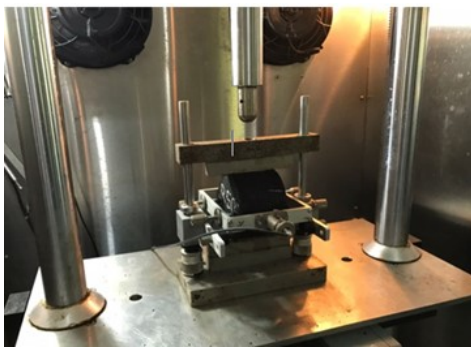
Tabel 2. Tipikal kemiringan minimum pengujian rangkai dinamis

Temperatur tahunan rata-rata perkerasan jalan (°C)	Beban lalu lintas berat >10 ⁶ ESA	Beban lalu lintas sedang 5x10 ⁵ - 10 ⁶ ESA	Beban lalu lintas ringan <5x10 ⁵ ESA
> 30	<0,5	0,5 - 3	>3 - 6
20 - 30	<1	1 - 6	>6 - 10
10 - 20	<2	2 - 10	-

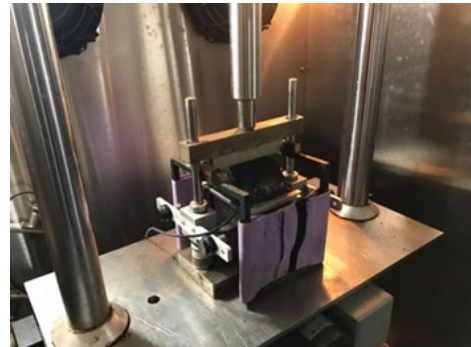
Sumber: Aderson, 1995

Tabel 3. Kebutuhan material agregat untuk campuran beraspal AC-WC

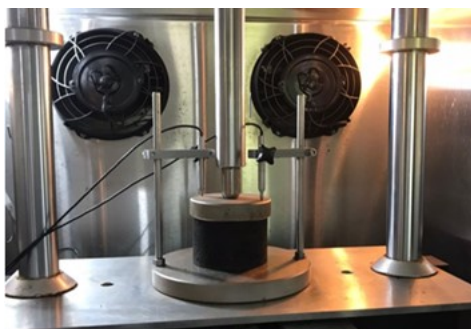
Material	Ayakan (mm)	Proporsi tertahan (%)	Bt Vul. hitam 100% 1 sampel (gram)	Bt vul. hitam 95% Bt vul. merah 5% 1 sampel (gram)		Bt vul. hitam 90% Bt vul. merah 10% 1 sampel (gram)	
				hitam	merah 5%	hitam	merah 10%
Agregat kasar 39%	19	0	0	0	0	0	0
	12,5	5	60	52,31	7,69	44,62	15,38
	9,5	11,5	138	120,31	17,69	102,62	35,38
Agregat halus 54,5%	4,75	22,5	270	235,38	34,62	200,77	69,23
	2,36	18	216	216	-	216	-
	1,18	12,5	150	150	-	150	-
	0,6	8,5	102	102	-	102	-
	0,3	6,5	78	78	-	78	-
	0,15	5	60	60	-	60	-
	0,075	4	48	48	-	48	-
Filler 6,5%		6,5	78	78	-	78	-
Total			1200			1200	
Kebutuhan aspal (% terhadap berat total campuran)							
6,00 % = 6,0/(100 – 6,0) x berat agregat				76,60		76,60	



Gambar 4. Pengujian ITSM campuran beraspal



Gambar 6. Pengujian ITFT campuran beraspal



Gambar 5. Pengujian rangkak (creep test) campuran beraspal

ditetapkan 6%, selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam membuat campuran beraspal yang fraksi butir kasarnya disubstitusi dengan batu vulkanik merah. Rancangan proporsi kebutuhan material agregat dapat diperlihatkan pada **Tabel 3**. Perincian kebutuhan material dilakukan dengan perlakuan substitusi batu vulkanik merah 5% dan 10% pada fraksi agregat tertahan pada saringan no. $\frac{1}{2}$ " - No.4 sesuai dengan kondisi di lapangan.

Modulus kekakuan campuran beraspal diuji dengan pengujian modulus kekakuan tarik tidak langsung/ Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) dengan mengukur regangan elastis yang sangat kecil pada campuran beraspal saat dibebani seperti ilustrasi pada **Gambar 4** dan pengujian dilakukan sesuai dengan metode BS EN 12697-26: 2012. Sifat ketahanan deformasi campuran beraspal akibat pembebanan diuji dengan pengujian rangkak dinamis/dynamic creep (**Gambar 5**) mengacu pada metode BS EN 12697-24: 2012. Nilai ketahanan rangkak dinamis ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan siklus pembebanan dengan regangan, nilai kemiringan rangkak dari hubungan siklus pembebanan dengan regangan, serta hubungan siklus pembebanan dengan kekakuan rangkak. Pengujian kelelahan tarik tidak langsung/ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) (**Gambar 6**) dilakukan untuk menganalisis sifat keretakan akibat kelelahan campuran beraspal karena jumlah beban berulang mengacu pada metode BS EN 12697-24: 2012. Nilai ITFT disajikan dalam bentuk grafik hubungan jumlah pengulangan beban sampai runtuh dengan tegangan serta hubungan jumlah pengulangan beban sampai runtuh dengan regangan. Pengujian

ITSM, dynamic creep dan ITFT menggunakan alat uji dynapave universal testing material (UTM) 30.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Karakteristik agregat batu vulkanik

Tabel 4 adalah ringkasan hasil pengujian agregat batu vulkanik. Untuk batu vulkanik hitam karakteristiknya memenuhi spesifikasi Kementerian PUPR (2020), namun berbeda dengan batu vulkanik merah yang nilai berat jenisnya lebih kecil, penyerapan terhadap air 7,26% (spesifikasi maks. 3%) dan nilai keausan 42,61% (spesifikasi maks. 40%). Hasil pemeriksaan aspal penetrasi 60/70 (**Tabel 5**) memenuhi syarat ketentuan aspal keras untuk campuran beraspal panas sesuai spesifikasi Kementerian PUPR (2020).

4.2 Karakteristik campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah

Ringkasan nilai karakteristik marshall campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah 5% -

10% dapat dilihat pada **Tabel 6**, dengan penambahan substitusi batu vulkanik merah terjadi penurunan nilai stabilitas, flow dan marshall quotient. Nilai VIM dan VMA meningkat serta VFB menurun. Pola perubahan karakteristik marshall sejalan dengan meningkatnya nilai keausan dan penyerapan serta menurunnya berat jenis campuran agregat dengan bertambahnya substitusi batu vulkanik merah. Hal yang sama juga diperoleh dari penelitian Waani (2013), tingginya nilai VIM pada campuran ditinjau dari sifat agregat dipengaruhi oleh berat jenis serta penyerapan agregat. Nilai VIM yang tinggi mengindikasikan campuran bersifat porus. (Putra et al., 2018) dan penggunaan material agregat dengan nilai penyerapan tinggi menimbulkan VIM yang bernilai tinggi (Taringan, 2019). Agregat dengan porositas tinggi lebih banyak menyerap aspal, memiliki kadar aspal efektif yang lebih sedikit serta tebal film aspal pada agregat dengan nilai rendah (Yuniarti et al., 2023a; Yuniarti et al., 2023b). Kadar aspal efektif yang rendah akan mempengaruhi tebal film aspal yang dipengaruhi oleh kadar aspal, jenis agregat maupun luas permukaan agregat (AIKofahi dan Khedaywi (2019). Peningkatan nilai VIM dipengaruhi aspal yang diserap

Tabel 4. Hasil pemeriksaan agregat batu vulkanik

Jenis pemeriksaan	Agg. bt vul. hitam	Agg. bt vul. merah	Spesifikasi
B.J. dan penyerapan agg. kasar			
B.J. Bulk	2,54	2,43	-
B.J. SSD	2,61	2,60	-
B.J. apparent	2,74	2,94	-
Penyerapan air	2,89%	7,26%	3%
B.J. dan penyerapan agg. halus			
B.J. Bulk	2,67	-	-
B.J. SSD	2,75	-	-
B.J. apparent	2,91	-	-
Penyerapan air	2,98%	-	3%
B.J. filler	2,61	-	-
Keausan agg. kasar	33,40%	42,61%	Maks 40%
Kelekatan agg. kasar	98,00%	-	Min 95%
Kadar lumpur		-	
Agg. kasar	0,73%	-	Maks 1%
Agg. halus	0,56	-	Maks 1%

Tabel 5. Hasil pemeriksaan aspal penetrasi 60/70

Jenis pemeriksaan	Aspal pen.60/70	Spesifikasi
Penetrasi aspal	66,2	60-70
Titik lembek aspal	50 °C	≥ 48 °C
Daktilitas aspal	145 cm	≥ 100 cm
Titik nyala	285 °C	≥ 232 °C
Berat jenis aspal	1,09	≥ 1,0
Kelarutan dalam thrichoroethylene	99,56%	≥ 99%
Kehilangan berat aspal/TFOT	0,19%	≥
Penetrasi setelah TFOT	62,4	≥ 54
Daktilitas setelah TFOT	128 cm	≥ 100 cm

Tabel 6. Karakteristik campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah

Karakteristik campuran	Hasil			Spesifikasi
	Bt vul. hitam 100%	Bt vul. hitam 95% Bt vul. merah 5%	Bt vul. hitam 90% Bt vul. merah 10%	
Stabilitas (Kg)	1866,54	1560,77	1336,20	Min 800 Kg
Stabilitas sisa (%)	91,93	-	-	Min. 90%
Flow (mm)	3,32	2,86	2,50	2,0 – 4,0
Marshall quotient (Kg/mm)	562,21	546,36	534,48	Min 250 Kg/mm
VIM marshall (%)	4,790	4,888	4,987	3,0 – 5,0
VMA (%)	15,201	15,207	15,213	Min. 15%
VFB (%)	68,497	67,883	67,221	Min. 65%

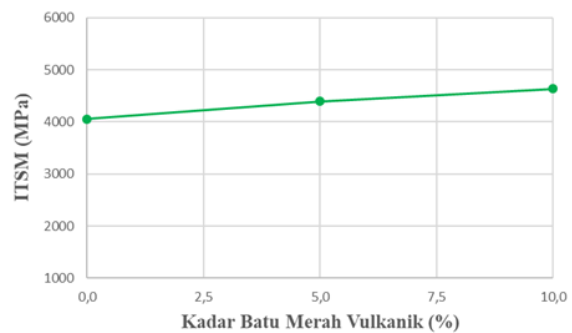
Tabel 7. Karakteristik nilai ITSM campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah

Substitusi batu vulkanik merah (%)	Nilai ITSM (MPa)
0	4055
5	4395
10	4634

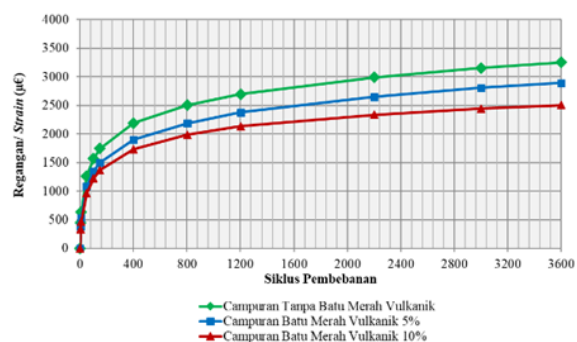
oleh agregat yang memiliki penyerapan tinggi sehingga mengurangi jumlah aspal yang mengisi rongga dalam campuran (Rizli et al., 2019). Semakin besar nilai abrasi agregat maka stabilitas campuran semakin menurun (Arifin et al., 2007). Semakin tinggi nilai keausan agregat maka semakin rendah nilai berat jenis agregat namun sebaliknya jika berat jenis bulk agregat semakin tinggi akan menghasilkan nilai VIM rendah (Rondonuwu et al., 2013). Sampai pada substitusi 10% batu vulkanik merah, karakteristik marshall campuran beraspal masih memenuhi spesifikasi Kementerian PUPR (2020).

4.3 Modulus kekakuan (stiffness modulus) campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah

Karakteristik nilai kekakuan campuran beraspal AC-WC hasil pengujian ITSM dengan variasi substitusi batu vulkanik merah 5% - 10% pada KAO 6% adalah 4055 - 4634 MPa (Tabel 7, Gambar 7). Nilai ITSM mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya substitusi vulkanik merah pada campuran beraspal hingga 10%. Nilai penyerapan batu vulkanik merah yang tinggi (7,26%) mempengaruhi kadar aspal efektif dan pemakaian KAO 6% menjadi kurang optimal dan akibatnya volume rongga udara (VIM) meningkat, campuran beraspal menjadi lebih kaku. Sifat kekakuan campuran beraspal dipengaruhi proporsi substitusi batu vulkanik merah, semakin besar substitusi batu vulkanik merah, kadar aspal efektif kurang optimal dan tebal selimut aspal menjadi lebih tipis dibandingkan campuran beraspal tanpa agregat batu vulkanik merah. Hal ini sebanding dengan penelitian Yuniarti et al., 2023b, agregat dengan porositas tinggi lebih banyak menyerap aspal dalam campuran sehingga pemakaian KAO tepatnya kadar aspal efektif dan tebal aspal menyelimuti agregat menjadi berkurang.



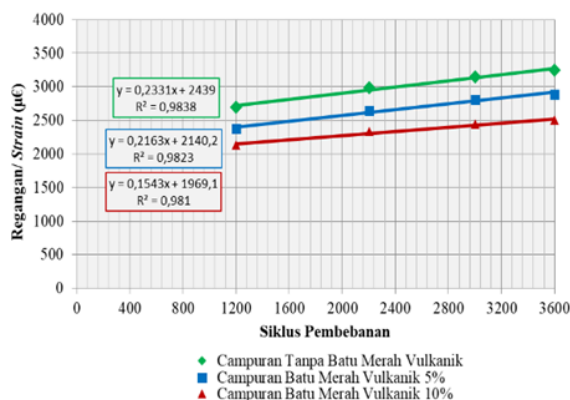
Gambar 7. Hubungan campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah dan nilai ITSM



Gambar 8. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah

4.4 Ketahanan deformasi (creep) campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah

Pola karakteristik ketahanan deformasi campuran beraspal AC-WC hasil pengujian dynamix creep pada variasi substitusi batu vulkanik merah 0% - 10% pada KAO 6% tergambarkan pada grafik Gambar 8. Bertambahnya substitusi batu vulkanik merah hingga 10% pada siklus pembebanan yang sama memberikan regangan yang lebih kecil. Campuran beraspal tanpa substitusi batu vulkanik merah (0%) bersifat lebih lentur dengan prosentase kadar aspal efektif yang sesuai, lebih tebal menyelimuti campuran agregat pada KAO sehingga campuran beraspal menjadi lentur. Prilaku ini sesuai dengan prilaku karakteristik kekakuan campuran beraspal yang lebih rendah dengan



Gambar 9. Grafik kemiringan rangkai hubungan siklus pembebanan dan regangan campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah

nilai ITSM yang lebih kecil. Semakin banyak substitusi batu vulkanik merah dalam campuran beraspal maka nilai regangan dalam menahan deformasi semakin kecil karena kadar aspal efektif bernilai rendah sehingga tebal selimut aspal menjadi lebih tipis dan campuran menjadi kaku.

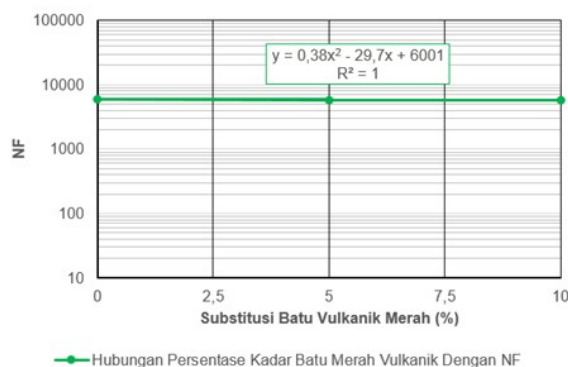
Gambar 9 menggambarkan grafik hubungan linier antara siklus pembebanan dan regangan yang terjadi yang dianalisis dari 4 titik uji terakhir hasil pengujian dynamic creep (**Gambar 8**), dimana koefisien variabel x merupakan kemiringan rangkai dinamis/dynamic creep sloop campuran beraspal dari diperoleh dari hasil analisis regresi linier. Bertambahnya substitusi batu vulkanik merah hingga 10% memberikan penurunan nilai kemiringan rangkai dari 0,2331 ke 0,1543. Menurunnya nilai ini memberi arti meningkatnya kemampuan campuran beraspal menahan deformasi dan jika dikaitkan dengan nilai modulus kekakuannya/ITSM memberikan kesesuaian. Substitusi batu vulkanik merah hingga 10% pada campuran beraspal mempunyai nilai kekakuan yang lebih besar (lihat **Tabel 7**). Sesuai tipikalnya (**Tabel 2**) campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% dapat digunakan untuk beban lalu lintas berat ($ESA > 10^6$) pada kondisi temperatur tahunan rata-rata perkerasan jalan $> 30^\circ C$ (Anderson, 1995).

4.5 Karakteristik kelelahan campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah

Karakteristik kelelahan dari pengujian ITFT pada campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah 0% - 10% pada KAO 6%, dapat digambarkan dalam bentuk grafik hubungan variasi substitusi batu merah vulkanik dengan jumlah pengulangan beban sampai runtuh (NF) seperti ditampilkan pada Gambar 10. Besarnya tegangan yang diaplikasikan 500 kPa, merupakan nilai maksimal yang digunakan pada saat pengujian sampel campuran beraspal saat menerima pembebanan sebelum terjadi keruntuhan. Nilai ketahanan terhadap kelelahan dari jumlah pengulangan beban sampai runtuh (NF) dapat dilihat pada **Tabel 8**. Campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% lebih awal runtuh (NF 5742) pada regangan tertentu dibandingkan dengan tanpa substitusi

Tabel 8. Jumlah pengulangan beban sampai runtuh (NF) campuran beraspal AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah

Substitusi batu vulkanik merah (%)	NF
0	6001
5	5862
10	5742



Gambar 10. Grafik hubungan campuran AC-WC dengan substitusi batu vulkanik merah dan nilai NF

batu vulkanik merah (NF 6001). Prilaku ini sangat berkaitan dengan nilai kekakuan/ITSM dan nilai ketahanan menahan deformasi yang lebih besar (regangan lebih kecil) dari campuran beraspal. Semakin kaku campuran beraspal dan semakin kecil regangan yang terjadi pada terjadinya deformasi, kurang tahan terhadap kelelahan, memiliki nilai jumlah pengulangan beban sampai runtuh yang lebih rendah.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik marshall campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% memenuhi spesifikasi Kementerian PUPR (2020).
2. Karakteristik modulus kekakuan/ITSM campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% meningkat rata-rata 6,9% setiap penambahan substitusi 5% batu vulkanik merah.
3. Karakteristik ketahanan deformasi/dynamix creef campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% meningkat. Sesuai tipikal kemiringan rangkai dynaminya campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% dapat digunakan untuk beban lalu lintas berat ($ESA > 10^6$) pada kondisi temperatur tahunan rata-rata perkerasan jalan $> 30^\circ C$.
4. Karakteristik ketahanan kelelahan/ITFT campuran beraspal dengan substitusi batu vulkanik merah hingga 10% lebih rendah (lebih awal runtuh) dibandingkan dengan tanpa substitusi batu vulkanik merah. Terjadi penurunan ketahanan kelelahan sebesar 2,18% setiap penambahan substitusi 5% batu vulkanik merah.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) Universitas Udayana yang telah membantu pendanaan hingga penelitian ini dapat diselesaikan.

Daftar Pustaka

- Aderson, A. 1995. *Gyropac and Matta Training Cours*. Australian Road Research Board Ltd.
- Adwang, J. 2020. *Kajian Perbedaan Campuran Beraspal Panas Yang Menggunakan Bahan Agregat Dengan Berat Jenis (Specific Gravity) yang Berbeda*. Jurnal Teknik Sipil-MACCA, 5 (2), 195-207.
- AIKofanhi, N. dan Khedaywi, T. 2019. *Evaluation the Effect of Asphalt Film Thickness on Stripping Resistance*. International Journal of applied Engineering Research, 14(2), 560-570.
- Anggraini, M. 2018. *Pengaruh Porositas Agregat Terhadap Rongga Dalam Campuran Beraspal Panas*. Jurnal Teknik Sipil Siklus, 4(1), 14-22.
- Apeageyi, A.K., Grenfell, J.R.A. dan Airey, G.D. *Influence of aggregate absorption and diffusion properties on moisture damage in asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 16(sup1), 404-422.
- Arifin, S., Kasan, M., dan Pradani, N. 2007. *Pengaruh Nilai Abrasi Agregat Terhadap Karakteristik Beton Aspal*. Jurnal SMARTTek, Vo.5, 22, 1-11.
- Aderson, A. 1995. *Gyropac and Matta Training Cours*. Australian Road Research Board Ltd.
- Adwang, J. 2020. *Kajian Perbedaan Campuran Beraspal Panas Yang Menggunakan Bahan Agregat Dengan Berat Jenis (Specific Gravity) yang Berbeda*. Jurnal Teknik Sipil-MACCA, 5 (2), 195-207.
- AIKofanhi, N. dan Khedaywi, T. 2019. *Evaluation the Effect of Asphalt Film Thickness on Stripping Resistance*. International Journal of applied Engineering Research, 14(2), 560-570.
- Anggraini, M. 2018. *Pengaruh Porositas Agregat Terhadap Rongga Dalam Campuran Beraspal Panas*. Jurnal Teknik Sipil Siklus, 4(1), 14-22.
- Apeageyi, A.K., Grenfell, J.R.A. dan Airey, G.D. *Influence of aggregate absorption and diffusion properties on moisture damage in asphalt mixtures*. Road Materials and Pavement Design, 16(sup1), 404-422.
- Arifin, S., Kasan, M., dan Pradani, N. 2007. *Pengaruh Nilai Abrasi Agregat Terhadap Karakteristik Beton Aspal*. Jurnal SMARTTek, Vo.5, 22, 1-11.
- BSI. 2005. BS EN 12697-25: 2005. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 25: Cyclic compression test*. BSI Standards Publication, UK.
- BSI. 2012a. BS EN 12697-24: 2012. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 24: Resistance to fatigue*. BSI Standards Publication, UK.
- BSI. 2012b. BS EN 12697-26: 2012. *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 26: Stiffness*. BSI Standards Publication, UK.
- Dep. PU. 1999. *Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal Dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak*. Jakarta: Yayasan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Dep. PU. 2003. RSNI M-01-2003. *Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat marshall*. Departemen Pekerjaan Umum, Pusat Penelitian Jalan Dan Jembatan, Bandung.
- Gashi, E., Sadiku, H. dan Misini, M. 2017. *A Review of Aggregate and Asphalt mixture Specific Gravity measurements and their impacts on Asphalt Mix Design Properties an Mix Acceptance*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 4(5), 195-201.
- Giroth, M. I., Sendow, T. K., dan Palenewe, S. C. N. 2019. *Perbandingan Kriteria Marshall Pada Campuran Aspal Panas (AC-WC) Yang Menggunakan Asbuton Modifikasi (Retona Blend) Dengan Aspal Penetrasi 60/70*. Jurnal Sipil Statik Universitas Sam Ratulangi, 7 (11), 1547-1556.
- Hall, K. D. 2004. *Using a Single Test to Determine Specific Gravity and Absorption of Aggregate Blends*. Journal of the Transportation Research Board, 1874, 3-10.
- Kementrian PUPR. 2020. *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Kementrian Pekerjaan umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.