

Pengaruh Jenis Air terhadap Marshall Quotient dan Kepadatan Campuran Aspal dengan Durasi Perendaman yang Berbeda

Rachmat Hakiki^{1*}, Agus Subrianto², Rajinda Syadzali Bintang³, Muzayyanah⁴, Rifda Fathricia Afifah⁵, Ade Novilia Putra Kurniawan⁶

¹⁻⁶ Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: rachmat.hakiki@polsri.ac.id¹

Abstract. *This study aims to analyze the effect of soaking asphalt pavement using various types of water, namely seawater, brackish water, and freshwater, on the Marshall characteristics, specifically the Marshall Quotient (MQ) and density. The method used is experimental in the laboratory with a Pen 60/70 asphalt mixture. The Marshall specimens were prepared using the Marshall method and soaked for two durations, namely 30 minutes and 24 hours, in each water variation. After soaking, tests were conducted to evaluate the characteristics of the asphalt mixture. The results of the study indicate that soaking with seawater has the most detrimental effect on Marshall characteristics, with a decrease in MQ of 41.67% and a density reduction of 2.29%. In contrast, soaking with freshwater shows better effects, with a decrease in MQ of 15.38% and a density reduction of 1.15%. The effect of brackish water falls between the two. These findings indicate that the type of water used in soaking plays a crucial role in determining the quality of the asphalt mixture.*

Keywords: Asphalt Mixture; Density; Marshall Quotient; Seawater; Soaking.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perendaman perkerasan aspal menggunakan berbagai jenis air, yaitu air laut, air payau, dan air tawar, terhadap karakteristik Marshall, khususnya Marshall Quotient (MQ) dan kepadatan. Metode yang digunakan adalah eksperimental di laboratorium dengan campuran aspal Pen 60/70. Benda uji Marshall dibuat menggunakan metode Marshall dan direndam selama dua durasi, yaitu 30 menit dan 24 jam, dalam masing-masing variasi air. Setelah perendaman, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi karakteristik campuran aspal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perendaman dengan air laut memberikan pengaruh yang paling merugikan terhadap karakteristik Marshall, dengan penurunan MQ sebesar 41,67% dan kepadatan 2,29%. Sebaliknya, perendaman dengan air tawar menunjukkan pengaruh yang lebih baik, dengan penurunan MQ sebesar 15,38% dan kepadatan 1,15%. Pengaruh air payau berada di antara keduanya. Temuan ini mengindikasikan bahwa jenis air yang digunakan dalam perendaman berperan penting dalam menentukan kualitas campuran aspal.

Kata kunci: Air Laut; Campuran Aspal; Kepadatan; Marshall Quotient; Perendaman.

1. LATAR BELAKANG

Perkerasan beraspal merupakan salah satu komponen penting dalam infrastruktur jalan karena berfungsi menyediakan permukaan yang aman, nyaman, dan mampu mendukung beban lalu lintas selama umur rencana. Kinerja perkerasan tidak hanya ditentukan oleh karakteristik material penyusunnya, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi antara aspal, agregat, air, temperatur, dan beban lalu lintas. Kualitas campuran beraspal yang memenuhi persyaratan karakteristik volumetrik dan mekanis menjadi salah satu faktor penting dalam mempertahankan kinerja dan umur layanan perkerasan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap faktor lingkungan yang dapat memengaruhi karakteristik campuran aspal diperlukan untuk mendukung pengembangan perkerasan yang lebih tahan lama.

Salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap durabilitas perkerasan beraspal adalah air atau kelembapan (*moisture*). Air yang masuk ke dalam campuran dapat mengurangi ikatan antara aspal dan agregat serta memengaruhi kohesi bahan pengikat.

Kondisi tersebut dapat berkembang menjadi stripping, ravelling, retak, deformasi permanen, dan kerusakan permukaan lainnya. *Moisture* damage merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh sifat aspal, karakteristik agregat, desain campuran, kadar rongga, temperatur, tingkat kejenuhan, durasi paparan air, dan pembebanan lalu lintas (Kakar et al., 2015; Soenen et al., 2020). Dengan demikian, keberadaan air dalam lingkungan perkerasan tidak dapat dipandang hanya sebagai faktor eksternal, tetapi sebagai salah satu faktor yang dapat mengubah karakteristik dan kinerja campuran secara langsung.

Pada tingkat material, air dapat memengaruhi interaksi pada antarmuka aspal–agregat. Molekul air yang berada pada permukaan agregat dapat mengurangi adhesi antara aspal dan agregat sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya debonding dan stripping. Guo et al. (2020) menjelaskan bahwa sifat adhesi aspal–agregat merupakan salah satu faktor fundamental yang menentukan stabilitas struktural dan ketahanan campuran terhadap kerusakan. Oleh karena itu, perubahan kondisi air yang bersentuhan dengan campuran beraspal berpotensi menghasilkan perubahan karakteristik mekanis, terutama ketika kontak berlangsung dalam waktu yang semakin lama.

Permasalahan tersebut menjadi semakin penting pada wilayah yang memiliki curah hujan tinggi, genangan, banjir, maupun kawasan pesisir. Pada lingkungan pesisir, perkerasan jalan dapat mengalami kontak dengan air tawar, air payau, dan air laut. Ketiga jenis air tersebut memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, terutama dalam hal kandungan garam dan ion terlarut. Air tawar secara umum memiliki kandungan garam yang relatif rendah, sedangkan air laut memiliki salinitas yang jauh lebih tinggi. Air payau berada pada kondisi transisi antara keduanya. Perbedaan karakteristik tersebut secara teoritis dapat menghasilkan tingkat pengaruh yang berbeda terhadap interaksi air dengan aspal dan agregat.

Keberadaan garam dalam lingkungan perkerasan dapat memberikan mekanisme kerusakan tambahan dibandingkan dengan air tanpa kandungan garam yang tinggi. Feng et al. (2022) melalui kajian terhadap durabilitas campuran aspal dalam lingkungan salin menunjukkan bahwa paparan garam dapat menyebabkan penurunan kinerja campuran melalui berbagai mekanisme, termasuk penetrasi larutan, degradasi struktur internal, perubahan sifat material, dan kristalisasi garam. Pengaruh tersebut dapat semakin kompleks ketika lingkungan mengalami perubahan kelembapan dan siklus basah–kering. Dengan demikian, evaluasi campuran beraspal pada lingkungan yang mengandung garam perlu mempertimbangkan tidak hanya keberadaan air, tetapi juga karakteristik larutan dan lamanya kontak dengan campuran.

Penelitian eksperimental juga menunjukkan bahwa paparan larutan yang mengandung klorida dapat memengaruhi kinerja campuran beraspal. Wang et al. (2021) melaporkan bahwa lingkungan klorida dapat menyebabkan penurunan kinerja campuran, termasuk stabilitas pada temperatur tinggi, ketahanan terhadap retak temperatur rendah, dan ketahanan terhadap kerusakan akibat air. Juli-Gándara et al. (2020) juga menunjukkan bahwa keberadaan natrium klorida (NaCl) dapat memengaruhi modulus dan umur lelah campuran beraspal. Pada tingkat bahan pengikat, Yu et al. (2013) menemukan bahwa paparan larutan garam dapat memengaruhi sifat reologi aspal, terutama setelah proses penuaan jangka panjang. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kandungan garam merupakan faktor lingkungan yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi durabilitas material beraspal.

Penelitian mengenai lingkungan asin dan lembap juga menunjukkan bahwa kombinasi kelembapan dan garam dapat mempercepat degradasi campuran. Zhang et al. (2019) menunjukkan bahwa lingkungan asin dan lembap dapat menyebabkan penurunan sifat mekanis dan stabilitas air campuran beraspal. Siklus basah–kering dalam lingkungan tersebut dapat memperkuat proses kerusakan karena larutan dapat masuk ke dalam pori campuran dan kemudian mengalami penguapan atau kristalisasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh lingkungan terhadap campuran aspal tidak hanya ditentukan oleh jenis air, tetapi juga oleh durasi dan pola kontak antara air dengan campuran.

Dalam konteks Indonesia, sejumlah penelitian telah mengkaji pengaruh air laut terhadap campuran beraspal. George et al. (2015) menunjukkan bahwa perendaman campuran beraspal dalam air laut dapat menurunkan stabilitas dan Marshall Quotient (MQ) serta meningkatkan kelelahan plastis. Fahmi et al. (2017) juga menunjukkan bahwa perendaman air laut dapat menurunkan durabilitas campuran aspal beton, meskipun penggunaan limbah Ethylene Vinyl Acetate (EVA) mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh lingkungan laut. Selanjutnya, Adly (2021) mengkaji campuran AC-WC dengan modifikasi steel slag dan menemukan bahwa kondisi perendaman air laut memengaruhi karakteristik Marshall campuran. Hasil tersebut memperkuat bahwa paparan air laut merupakan salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam desain dan evaluasi perkerasan pada kawasan pesisir.

Selain pengaruh jenis air, durasi perendaman juga merupakan faktor penting dalam menentukan tingkat perubahan karakteristik campuran. Pangemanan et al. (2015) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan durasi perendaman dapat menurunkan stabilitas dan Marshall Quotient serta meningkatkan nilai flow. Temuan tersebut

menunjukkan adanya kecenderungan penurunan kinerja campuran seiring meningkatnya paparan terhadap lingkungan air. Wiyono dan Susilowati (2020) juga menunjukkan pentingnya kondisi pemadatan dan penggunaan bahan tambah anti-stripping dalam mempertahankan karakteristik campuran beton aspal. Sementara itu, Sumiati et al. (2019) menunjukkan bahwa modifikasi campuran dengan limbah plastik HDPE dapat dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan campuran terhadap kondisi cuaca ekstrem.

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan bahwa air, garam, dan durasi paparan dapat memengaruhi kinerja campuran beraspal, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*). Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada perbandingan kondisi kering dan basah, air tawar dan air laut, atau menggunakan larutan NaCl dengan konsentrasi tertentu sebagai representasi lingkungan salin. Pendekatan tersebut memberikan informasi penting mengenai mekanisme kerusakan, tetapi belum sepenuhnya menggambarkan variasi jenis air yang dijumpai pada lingkungan sebenarnya. Khususnya, penelitian yang membandingkan air tawar, air payau, dan air laut secara simultan pada campuran aspal yang sama masih relatif terbatas.

Air payau menjadi variabel yang penting untuk dikaji karena merupakan kondisi transisi antara air tawar dan air laut yang banyak dijumpai pada kawasan muara, pesisir, rawa pasang surut, serta wilayah yang mengalami intrusi air laut. Dibandingkan air laut, penelitian mengenai pengaruh air payau terhadap karakteristik mekanis campuran aspal masih lebih terbatas. Padahal, perbedaan tingkat salinitas memungkinkan adanya respons campuran yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian berdasarkan gradien karakteristik air, mulai dari air tawar hingga air payau dan air laut, dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai sensitivitas campuran aspal terhadap lingkungan air.

Selain itu, penelitian terdahulu menggunakan variasi durasi perendaman yang berbeda-beda sehingga hasil antarpelitian sulit dibandingkan secara langsung. Perbedaan material, kadar aspal, jenis agregat, temperatur, dan waktu perendaman juga dapat menyebabkan perbedaan respons campuran. Oleh sebab itu, diperlukan rancangan eksperimen yang mengendalikan variabel material dan metode pengujian serta secara sistematis membandingkan jenis air dan durasi perendaman dalam satu kerangka eksperimen. Pendekatan tersebut memungkinkan perubahan karakteristik campuran diamati secara lebih objektif.

Berdasarkan penelitian ini terletak pada penerapan desain eksperimen komparatif dua faktor, yaitu jenis air yang terdiri atas air tawar, air payau, dan air laut serta durasi perendaman selama 30 menit dan 24 jam, terhadap campuran aspal dengan aspal penetrasi

60/70. Kombinasi tersebut menghasilkan enam kondisi perlakuan yang memungkinkan evaluasi perubahan kinerja campuran secara lebih sistematis. Berbeda dengan penelitian yang hanya membandingkan air laut dan air tawar atau menggunakan larutan garam sebagai media pengujian, penelitian ini memasukkan air payau sebagai kondisi antara untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan karakteristik campuran berdasarkan perbedaan lingkungan air.

Karakteristik campuran yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), densitas, VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate), dan VFA (Voids Filled with Asphalt). Stabilitas dan flow digunakan untuk mengevaluasi respons mekanis campuran terhadap pembebanan, sedangkan MQ digunakan untuk menggambarkan hubungan antara stabilitas dan deformasi. Parameter volumetrik berupa densitas, VIM, VMA, dan VFA digunakan untuk melihat perubahan struktur internal campuran akibat perlakuan perendaman. Evaluasi secara simultan terhadap parameter tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai perubahan karakteristik campuran akibat perbedaan jenis air dan durasi paparan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis air, yaitu air tawar, air payau, dan air laut, serta durasi perendaman 30 menit dan 24 jam terhadap karakteristik Marshall campuran aspal Pen 60/70. Penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi jenis air dan durasi perendaman yang memberikan pengaruh paling besar terhadap karakteristik campuran. Hasil penelitian selanjutnya dapat menjadi dasar dalam memahami perilaku campuran beraspal pada lingkungan yang memiliki tingkat salinitas berbeda, khususnya pada kawasan pesisir dan daerah yang berpotensi mengalami genangan atau banjir rob. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi pendukung dalam pemilihan material dan strategi peningkatan durabilitas perkerasan sehingga kinerja dan umur layanan jalan dapat dipertahankan secara lebih efektif.

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat Fisik Agregat

Hasil rekapitulasi pengujian sifat-sifat fisik agregat yang dilakukan pada material agregat kasar 1/2 dan agregat kasar 1/1 pada Tabel 1. dan agregat halus berupa pasir pada Tabel 2. adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil rekapitulasi pengujian sifat fisik agregat kasar.

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian Agregat Kasar		Satuan
	1/2	1/1	
Analisa Saringan	8,339	6,417	-
Berat Jenis Bulk	2,541	2,565	-
Berat Jenis SSD	2,591	2,617	-
Berat Jenis Semu	2,674	2,705	-
Berat Jenis Efektif	2,607	2,635	-
Penyerapan	1,968	2,020	%
Kadar Air	0,623	1,153	%
Kadar Lumpur	3,198	5,913	%
Bobot Isi Gembur	1,387	1,354	gr/cm ³
Bobot Isi Padat	1,561	1,509	gr/cm ³
Keausan Agregat	23,984	-	%

Tabel 2. Hasil rekapitulasi pengujian sifat fisik agregat halus.

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Satuan
Analisa Saringan	3,547	-
Berat Jenis Bulk	2,569	-
Berat Jenis SSD	2,618	-
Berat Jenis Semu	2,701	-
Berat Jenis Efektif	2,635	-
Penyerapan	1,883	%
Kadar Air	0,887	%
Kadar Lumpur	2,101	%
Bobot Isi Gembur	1,445	gr/cm ³
Bobot Isi Padat	1,542	gr/cm ³

Hasil Pengujian Filler

Penelitian ini menggunakan *filler* berupa semen *Portland* tipe 1 dan abu batu. Hasil rekapitulasi pengujian *filler* pada **Tabel 3.** adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil rekapitulasi pengujian *filler*.

Jenis Filler	Hasil	Satuan
Semen <i>Portland</i>	3,106	gr/ cm ³
Abu Batu	3,866	-

Hasil Pengujian Aspal

Penelitian ini menggunakan aspal padat dengan penetrasi 60/70. Hasil rekapitulasi pengujian sifat fisik aspal pada Tabel 4. Adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil rekapitulasi pengujian sifat fisik aspal.

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat Jenis Aspal	1,055	-
Titik Lembek Aspal	55,5	°C
Penetrasi	64,1	mm
Daktilitas	150	cm

Hasil Pengujian Kandungan Air

Hasil pengujian kandungan air pada penelitian ini meliputi pemeriksaan kadar NaCl (*Natrium Klorida*) dan Kadar Fe (*Besi*). Hasil rekapitulasi pengujian kandungan air pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil rekapitulasi pengujian kandungan air laut dan air payau.

Nama Sampel	Parameter Uji	Metode Uji	Hasil Analisa
Air Laut	Kadar NaCl	Potensiometri	64.24 ppt
Air Payau			423,7 ppm

Hasil Pengujian Marshall**Hasil Pengujian Marshall untuk Mendapatkan Kadar Aspal Optimum (KAO)**

Hasil rancangan campuran untuk pembuatan benda uji adalah hasil rancangan agregat campuran yang telah diperoleh dari hasil pengujian dengan variasi aspal sebesar 5%, 5,5%, dan 6% pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi hasil pengujian *Marshall* untuk mendapatkan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Karakteristik Campuran	Sat.	Kadar Aspal			Spek.
		5	5,5	6	
Stabilitas	kg	1096,33	1376,00	1431,50	Min.800
Flow	Mm	3,04	3,42	3,72	2-4
VIM	%	5,66	2,48	0,41	3-5
VFA	%	65,89	80,81	90,00	Min.65
VMA	%	16,64	15,25	14,91	Min. 15
Marshall Quotient	kg/mm	360,34	402,34	384,60	-

Berdasarkan grafik Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 dihasilkan variasi kadar aspal 5,10% sampai dengan 5,40%. Maka dapat disimpulkan bahwa Kadar Aspal Optimum (KAO) untuk penelitian ini adalah sebesar 5,25%.

Hasil Pengujian Marshall dengan Berbagai Variasi Air

Campuran pengujian *Marshall* berupa modifikasi Kadar Aspal Optimum (KAO) yang telah diperoleh sebelumnya yaitu sebesar 5,25% dengan waktu dan suhu perendaman yang berbeda yaitu 30 menit dan 24 jam dengan suhu masing-masing yaitu 25°C dan 60°C pada Tabel 7. dan Tabel 8.

Tabel 7. Rekapitulasi hasil pengujian *Marshall* dengan berbagai variasi air waktu perendaman 30 menit

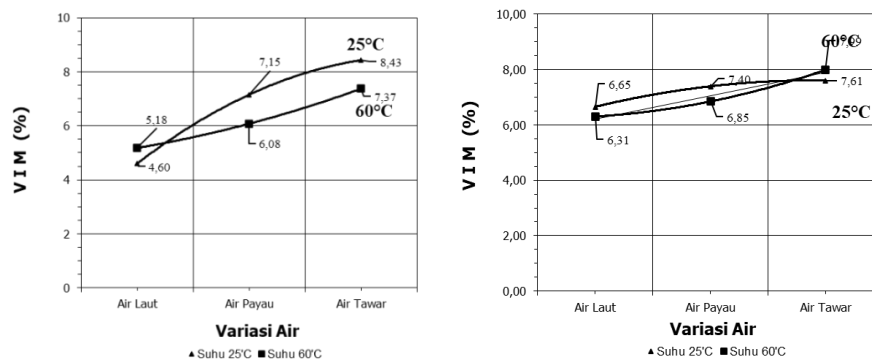
Karakteristik Campuran	Sat.	Variasi Air Waktu Perendaman 30 Menit						Spek.
		Air Laut		Air Payau		Air Tawar		
		25°C	60°C	25°C	60°C	25°C	60°C	
VIM	%	4,60	5,18	7,15	6,08	8,43	7,37	3-5
VMA	%	16,23	16,73	18,47	17,52	19,59	18,66	Min.15
VFA	%	71,47	68,89	61,13	65,17	56,83	60,35	Min.65
Marshall Quotient	kg/mm	650,79	367,58	522,05	373,58	460,15	282,46	-

Tabel 8. Rekapitulasi hasil pengujian *Marshall* dengan berbagai variasi air waktu perendaman 24 jam

Karakteristik Campuran	Sat.	Variasi Air Waktu Perendaman 24 Jam						Spek.
		Air Laut		Air Payau		Air Tawar		
		25	60	25	60	25	60	
VIM	%	5,53	5,49	7,40	5,46	3,61	4,34	3-5
VMA	%	18,03	17,73	18,68	18,20	18,87	19,21	Min.15
VFA	%	62,94	64,26	60,26	62,22	59,53	58,24	Min.65
Marshall Quotient	kg/mm	410,24	297,81	357,93	297,81	304,61	373,55	-

Pembahasan

Analisa Terhadap VIM



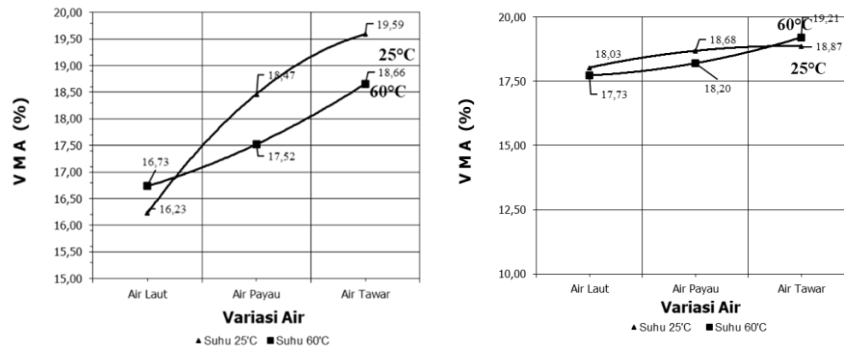
Gambar 7. (a) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VIM pada waktu perendaman 30 menit (b) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VIM pada waktu perendaman 24 jam

Berdasarkan Gambar 7.a bahwa nilai VIM tertinggi dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 8,43%. Nilai VIM terendah dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 4,60%. Semakin tinggi suhu perendaman, nilai VIM cenderung meningkat untuk air payau, dan air tawar, tetapi menurun untuk air laut. Berdasarkan Gambar 7.b bahwa nilai VIM tertinggi dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 7,99%. Nilai VIM terendah dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 6,31%. Pada suhu perendaman 60°C, nilai VIM cenderung lebih rendah dibandingkan suhu 25°C untuk semua jenis air.

Analisa Terhadap VMA

Berdasarkan Gambar 8.a bahwa nilai VMA tertinggi dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 19,59%. Nilai VMA terendah dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 16,23%. Semakin tinggi suhu perendaman, nilai VMA cenderung menurun untuk air laut, dan air tawar, tetapi meningkat untuk air payau. Berdasarkan Gambar 8.b bahwa nilai VMA tertinggi dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 19,21%. Nilai VMA terendah dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 60°C, yaitu

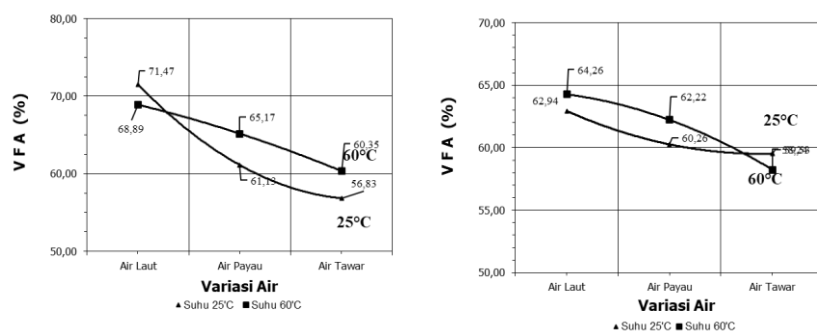
17,73%. Pada suhu perendaman 60°C, nilai VMA cenderung lebih rendah dibandingkan suhu 25°C untuk air laut tetapi lebih tinggi untuk air payau.



Gambar 8. (a) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VMA pada waktu perendaman 30 menit (b) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VMA pada waktu perendaman 24 jam

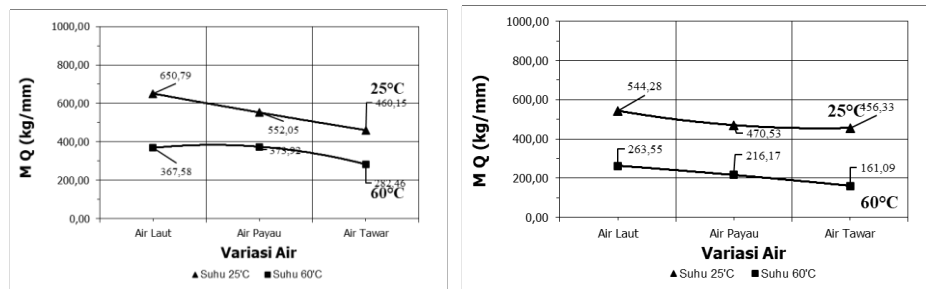
Analisa Terhadap VFA

Berdasarkan Gambar 9.a bahwa nilai VFA tertinggi dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 71,47%. Nilai VFA terendah dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 56,83%. Semakin tinggi suhu perendaman, nilai VFA cenderung menurun untuk air laut, dan air tawar, tetapi meningkat untuk air payau. Berdasarkan Gambar 9.b bahwa nilai VFA tertinggi dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 64,26%. Nilai VFA terendah dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 58,24%. Pada suhu perendaman 60°C, nilai VFA cenderung lebih tinggi dibandingkan suhu 25°C untuk air payau, tetapi lebih rendah untuk dan air tawar.



Gambar 9. (a) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VFA pada waktu perendaman 30 menit (b) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai VFA pada waktu perendaman 24 jam

Analisa Terhadap Marshall Quotient



Gambar 10. (a) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai *Marshall Quotient* pada waktu perendaman 30 menit (b) Grafik hasil pengujian *Marshall* terhadap nilai *Marshall Quotient* pada waktu perendaman 24 jam

Berdasarkan Gambar 10.a bahwa nilai *Marshall Quotient* tertinggi dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 650,79 kg/mm. Semakin tinggi suhu perendaman, nilai *Marshall Quotient* cenderung menurun untuk semua jenis air. Berdasarkan Gambar 10.b bahwa nilai *Marshall Quotient* tertinggi dicapai pada air laut dengan suhu perendaman 25°C, yaitu 544,28 kg/mm. Nilai *Marshall Quotient* terendah dicapai pada air tawar dengan suhu perendaman 60°C, yaitu 161,09 kg/mm. Pada suhu perendaman 60°C, nilai *Marshall Quotient* cenderung lebih tinggi dibandingkan suhu 25°C untuk dan air tawar, tetapi lebih rendah untuk air laut dan air payau.

3. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa perendaman dengan berbagai jenis air (tawar, laut, dan payau) serta variasi suhu (25°C dan 60°C) memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis campuran aspal, yang terlihat dari parameter VIM, VMA, VFA, dan *Marshall Quotient*. Pada suhu perendaman 25°C, air tawar cenderung menghasilkan nilai VIM dan VMA tertinggi, sedangkan air laut memberikan nilai tertinggi untuk VFA dan *Marshall Quotient*. Suhu perendaman yang lebih tinggi (60°C) umumnya menurunkan nilai VIM, VMA, dan *Marshall Quotient* untuk air laut, tetapi meningkatkan nilai-nilai ini untuk air payau. Sebaliknya, nilai VFA cenderung meningkat pada suhu tinggi untuk air payau tetapi menurun untuk air laut dan air tawar. Pola ini menunjukkan bahwa interaksi antara suhu dan jenis air memengaruhi kinerja campuran aspal secara variatif, sehingga perlu dipertimbangkan dalam desain perkerasan yang tahan terhadap kondisi lingkungan tertentu. Keseluruhan hasil ini mengindikasikan bahwa paparan air laut, terutama pada durasi dan suhu tinggi, memiliki dampak yang lebih merusak terhadap struktur campuran aspal dibandingkan dengan air tawar. Hal ini terlihat dari penurunan nilai VIM, VMA, dan *Marshall Quotient* yang signifikan, serta

fluktuasi nilai VFA yang mencerminkan penurunan kapasitas pengisian aspal dalam rongga agregat. Efek degradasi yang lebih cepat pada air laut menunjukkan potensi percepatan kerusakan kualitas perkerasan jalan, khususnya di lingkungan pesisir yang rentan terhadap intrusi air laut dan fluktuasi suhu. Oleh karena itu, desain campuran aspal di kawasan pesisir memerlukan modifikasi khusus untuk meningkatkan ketahanan terhadap kondisi agresif ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Negeri Sriwijaya melalui program pendanaan penelitian PNPB Polsri Tahun 2024.

DAFTAR REFERENSI

- Adly, E. (2021). Pengaruh rendaman air laut pasang surut terhadap campuran lapis aspal beton AC-WC dengan modifikasi *steel slag* ramah lingkungan. *Bulletin of Civil Engineering*, 1(2), 87–92. <https://doi.org/10.18196/bce.v1i2.11060>
- Fahmi, R., Saleh, S. M., & Isya, M. (2017). Pengaruh lama rendaman air laut terhadap durabilitas campuran aspal beton menggunakan aspal Pen 60/70 yang disubstitusi limbah *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA). *Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 6(3), 271–282.
- Feng, B., Wang, H., Li, S., Ji, K., Li, L., & Xiong, R. (2022). The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: A review. *Construction and Building Materials*, 315, 125749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125749>
- George, M. S., Oscar, K. H., & Mecky, M. R. E. (2015). Pengaruh terendamnya perkerasan aspal oleh air laut yang ditinjau terhadap karakteristik Marshall. *Jurnal Sipil Statik*, 3(8), 562–570.
- Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Xue, B., Sun, G., & Li, R. (2020). Study on the adhesion property between asphalt binder and aggregate: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 256, 119474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119474>
- Hamzah, M. O., Kakar, M. R., & Hainin, M. R. (2015). An overview of moisture damage in asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, 73(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v73.4305>
- Juli-Gándara, L., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. Á., & Teijón-López-Zuazo, E. (2020). Effect of sodium chloride on the modulus and fatigue life of bituminous mixtures. *Materials*, 13(9), 2126. <https://doi.org/10.3390/ma13092126>
- Kakar, M. R., Hamzah, M. O., & Valentin, J. (2015). A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. *Journal of Cleaner Production*, 99, 39–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.028>
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 423–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.033>
- Pangemanan, V. C., Kaseke, O. H., & Manoppo, M. R. E. (2015). Pengaruh suhu dan durasi terendamnya perkerasan beraspal panas terhadap stabilitas dan kelelahan (flow). *Sipil Statik*, 3(2), 85–90.

- Park, D., Seo, W.-J., Kim, J., & Vo, H. V. (2017). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixture using liquid anti-stripping agents. *Construction and Building Materials*, 144, 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.214>
- Sistra, M. D., Setyawan, A., & Sarwono, D. (2016). Analisis karakteristik modifikasi aspal penetrasi 60/70 dengan *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA). *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 120–127.
- Soenen, H., Vansteenkiste, S., & De Maeijer, P. K. (2020). Fundamental approaches to predict moisture damage in asphalt mixtures: State-of-the-art review. *Infrastructures*, 5(2), 20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5020020>
- Starck, P., & Löfgren, B. (2007). Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics. *Journal of Materials Science*, 42(2), 676–685. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0316-0>
- Sumiati, S., Mahmuda, M., & Syapawi, A. (2019). Perkerasan aspal beton (AC-BC) limbah plastik HDPE yang tahan terhadap cuaca ekstrem. *Construction and Material Journal*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.32722/cmj.v1i1.1322>
- Wang, F., Qin, X., Pang, W., & Wang, W. (2021). Performance deterioration of asphalt mixture under chloride salt erosion. *Materials*, 14(12), 3339. <https://doi.org/10.3390/ma14123339>
- Wiyono, E., & Susilowati, A. (2020). Variasi jumlah tumbukan pada pemadatan campuran beton aspal menggunakan bahan tambah anti stripping. *Construction and Material Journal*, 2(1), 33–39. <https://doi.org/10.32722/cmj.v2i1.2755>
- Yu, X., Wang, Y., Luo, Y., & Yin, L. (2013). The effects of salt on rheological properties of asphalt after long-term aging. *The Scientific World Journal*, 2013, 921090. <https://doi.org/10.1155/2013/921090>
- Zhang, K., Li, W., & Han, F. (2019). Performance deterioration mechanism and improvement techniques of asphalt mixture in salty and humid environment. *Construction and Building Materials*, 208, 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.061>
- Zhang, K., Luo, Y., Wang, Y., Li, W., & Yu, G. (2019). Material optimization and optimum asphalt content design of asphalt mixture in salty and humid environment. *Construction and Building Materials*, 196, 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.158>