



Pemanfaatan Limbah Keramik sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Laston AC-BC¹

The Use of Ceramic Waste as a Substitute for Fine Aggregates in Laston AC-BC Mixture

Desi Widianty^{a,2}, I D M Alit Karyawan^a, Rohani^a, Ratna Yuniarti^a, Fera Fitri Salsabila^a

^a Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit 62 Mataram

ABSTRAK

Agregat buatan terus dikembangkan untuk pemenuhan atas keterbatasan agregat alam. Meningkatnya limbah keramik dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Penelitian dengan memanfaatkan keramik yang sudah tidak dipakai lagi sebagai agregat alternatif diharapkan dapat mengatasi solusi keterbatasan agregat alam sekaligus mengurangi polusi lingkungan. Penelitian ini difokuskan untuk menilai karakteristik volumetrik dan mekanis campuran laston AC-BC dengan mengganti agregat halus alam dengan keramik. Selain itu untuk mengetahui prosentase agregat halus keramik yang memenuhi kinerja campuran laston AC-BC. Bahan berupa limbah keramik, aspal 60/70 dengan KAO 6%, agregat kasar dan halus serta abu batu. Potongan keramik dipecahkan hingga memenuhi standar ukuran butir agregat halus. Variasi 0, 25, 50, 75 dan 100% dari agregat halus keramik digunakan untuk rancangan campuran laston AC-BC. Dari analisis diperoleh agregat halus keramik dapat menggantikan agregat halus alam sampai prosentase maksimum 55,45%. Semakin banyak agregat halus keramik yang digunakan dapat meningkatkan VMA dan VIM. Sebaliknya rongga yang terisi oleh aspal mengalami penurunan seiring meningkatnya penggunaan prosentase agregat halus keramik. Nilai VIM yang masih memenuhi persyaratan Bina Marga sampai penggunaan 55,45% dan nilai VFB sampai 60,6% agregat halus keramik. Campuran laston AC-BC menggunakan agregat halus keramik dapat menurunkan nilai stabilitas dan flow campuran, walaupun masih memenuhi persyaratan Bina Marga tapi cenderung membuat kemampuan campuran menahan beban semakin berkurang.

Kata kunci: Limbah keramik, agregat halus, Campuran laston AC-BC.

ABSTRACT

The continuous development of artificial aggregates aims to address the limitations of natural aggregates. The increase in ceramic waste can have a negative impact on the environment. It is hoped that research using ceramic waste as an alternative aggregate can overcome the limitations of natural aggregates while reducing environmental pollution. This research focuses on assessing the volumetric and mechanical characteristics of Laston AC-BC mixtures, replacing natural fine aggregate with ceramic waste. Additionally, to determine the percentage of ceramic fine aggregates that meets the performance of the laston AC-BC mixture. Utilizing ceramic waste, 60/70 pen asphalt with 6% KAO, coarse aggregate, fine aggregate, and fly ash, the ceramic pieces are processed to meet standard particle sizes. The laston AC-BC mixture was designed with varying ceramic fine aggregate proportions of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. Results indicate that ceramic fine aggregate effectively replaces natural fine aggregate up to a maximum of 55.45%, impacting VMA and VIM positively. Conversely, the voids filled with asphalt decrease as the percentage of ceramic fine aggregates used increases. The VIM value still meets Bina Marga requirements up to 55.45% use and the VFB value up to 60.6% ceramic fine aggregate. The Laston AC-BC mixture using fine ceramic aggregate can reduce the stability and flow value, although it still meets Bina Marga requirements but potentially reducing load-bearing capacity.

Keywords: Ceramic waste, fine aggregates, Laston AC-BC mixture

¹ Info Artikel: Received: 10 Juni 2023, Accepted: 22 Juni 2024

² Corresponding Author: Desi Widianty, widiantydesi@unram.ac.id

PENDAHULUAN

Kualitas lapis perkerasan yang baik diperlukan untuk memastikan kemampuan mendukung dan mendistribusikan beban kendaraan agar tidak mengalami penurunan awal dalam kinerja layanannya. Banyak faktor yang mempengaruhi mutu perkerasan, diantaranya adalah pemilihan material bahan jalan (Tiza, 2022). Pemeliharaan jalan umumnya dilakukan dengan menambahkan lapisan pada perkerasan yang sudah ada dan membutuhkan material yang cukup banyak jika dilakukan secara terus menerus. Untuk mencegah kerusakan dini dapat dilakukan dengan menggunakan material jalan berkualitas tinggi dan proporsi yang sesuai agar menghasilkan perkerasan jalan yang memiliki daya tahan tinggi dan umur panjang (Wang, 2022).

Sisa material dari produksi alam atau aktivitas manusia dikenal sebagai limbah. Pembangunan perumahan, perkantoran, dan infrastruktur lainnya turut menyumbangkan jumlah limbah yang signifikan, terutama dalam konteks perbaikan, renovasi, dan pembangunan kembali. Banyak material lama yang akan dibuang dan diganti dengan yang baru, salah satu materialnya adalah keramik. Limbah pecahan keramik ini jika dibiarkan dan tidak dimanfaatkan kembali akan berakibat mengotori lingkungan dan hanya dijadikan sebagai bahan timbunan yang tidak produktif. Komposisi keramik umumnya mengandung lempung, kaolin, feldspar, dan kuarsa (Sinuhaji, 2020). Lempung, sebagai komponen utama, memiliki sifat plastisitas yang tinggi (Postill, 2021) dan mampu mempertahankan integritasnya pada suhu tinggi (Chen, 2023). Dengan sifat seperti itu maka keramik bisa digunakan dalam campuran beraspal karena pada proses pencampuran materialnya harus dipanaskan pada suhu tertentu. Feldspar dengan kandungan sodium, potasium, alumina, dan silica memiliki sifat membantu menurunkan titik leleh, sehingga digunakan untuk mematangkan bahan keramik. Kuarsa merupakan mineral yang terdiri dari silikon dioksida (SiO_2) dan merupakan salah satu komponen penting di kerak bumi (Haldar, 2020). Agregat halus alam juga mengandung bahan silika dan alumina seperti pada keramik tersebut (Putra, 2019). Upaya untuk mendapatkan nilai lebih dari limbah keramik itu, maka pada penelitian ini penulis akan memanfaatkan limbah pecahan keramik sebagai agregat halus alternatif dengan memecahkan keramik tersebut hingga memenuhi standar ukuran butir agregat halus.

Menurut Choudhary (2020), limbah yang berasal dari industri, pertanian, kota, pertambangan, konstruksi dan pembongkaran dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi campuran aspal pada proporsi yang optimal.

Kombinasi agregat halus berupa pasir yang dicampur dengan limbah potongan keramik pada aspal beton AC-WC menghasilkan nilai stabilitas Marshall yang optimal (Arliningtyas, 2016). Hal ini dikarenakan kepadatan gradasi agregat yang dihasilkan melalui perpaduan pasir dan keramik yang bersifat menerus. Rancangan penelitian menggunakan 3 variasi agregat halus yaitu 100% pasir, 100% limbah keramik dan campuran 50% pasir 50% limbah keramik. Didapatkan hasil stabilitas terbaik adalah campuran 50% limbah keramik dan 50% pasir dengan nilai sebesar 824.63 kg. Penggunaan limbah keramik 100% sebagai agregat halus dengan nilai stabilitas sebesar 792,38 kg tidak memenuhi standar spesifikasi Bina Marga yang menetapkan nilai minimal sebesar 800 kg. Sedangkan campuran aspal beton dengan 100% pasir menghasilkan nilai stabilitas sebesar 805.97 kg (Arliningtyas, 2016).

Putra (2019) mengganti agregat halus dengan limbah keramik dengan kadar aspal optimum 5,8% pada laston AC-WC. Hasil penelitian dengan rentang variasi penambahan limbah

keramik 25%, 50%, dan 75% didapatkan bahwa penambahan 25% yang memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga. Semakin banyak penambahan limbah keramik sebagai agregat halus akan menaikkan nilai VIM, VMA, dan MQ sebaliknya akan menurunkan nilai VFB, Stabilitas dan Flow. Hal ini dikarenakan nilai penyerapan limbah keramik lebih besar dibandingkan agregat halus alam. Hasil regresi didapatkan kadar optimum penambahan limbah keramik sebesar 16,05% menggunakan kadar aspal 5,8%.

Liana (2022) membuat agregat halus dan filler dengan bahan tambah keramik dan semen untuk pada campuran HRS-WC. Hasil menunjukkan bahwa semakin banyak keramik yang digunakan semakin menurunkan nilai stabilitas, marshal Quotient, VIM dan VMA serta menaikkan nilai flow, density dan VFA. Persentase 25% kadar keramik dapat digunakan sebagai bahan tambah agregat halus dan filler.

Widianty (2020) menganalisis sifat-sifat Marshall pada campuran beton aspal AC-BC menggunakan aspal yang dimodifikasi dengan serbuk serat pelepah batang pisang sebanyak 0,1%. Benda uji campuran dibuat untuk masing-masing variasi kadar aspal 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; dan 7%. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai struktural yang terbaik pada kadar aspal optimum 5,25%.

Menurut Panjaitan (2017), limbah genteng keramik tidak disarankan menjadi pengganti agregat kasar dan abu terbang pada campuran laston lapis pengikat (AC-BC) dengan KAO 6,75%. Penggunaan variasi 0 -100% genteng keramik menggunakan metode Marshall menunjukkan bahwa hanya 0% genteng keramik yang memenuhi syarat spesifikasi.

Kadar optimum limbah beton sisa pengujian sebesar 50% dapat digunakan sebagai pengganti agregat kasar dari berat total agregat kasar pada campuran AC-WC. Semakin tinggi kadar limbah beton maka nilai stabilitas, VIM dan VMA semakin tinggi dan nilai VFB dan flow semakin menurun (Maulana, 2020). Pengaruh karakteristik marshall pada campuran aspal AC-WC mengganti filler dengan *Spent bleaching earth* (SBE) dengan kadar aspal 5%. Dengan uji marshal diperoleh SBE sebesar 25% bisa menggantikan filler abu batu dengan SBE sebesar 25% (Lizar, 2021). Penggantian agregat halus no 8 dengan limbah kaca pada campuran porus aspal dapat diterapkan tidak lebih dari 30% dari total campuran agregat halus no. 8. Perubahan karakteristik Marshall terjadi pada nilai stabilitas, flow, MQ, VITM, VMA dimana terjadinya peningkatan hingga batas optimum, namun menurun setelahnya, sebaiknya nilai VFWA dan kepadatan mengalami penurunan dan mengalami peningkatan setelah mencapai nilai tertentu (Fauziah, 2016).

Penelitian ini melakukan pengujian terhadap karakteristik campuran laston AC-BC dengan material bahan yang terdiri dari aspal murni 60/70 karena berdasarkan hasil uji pendahuluan didapatkan KAO 6%, agregat kasar alam, filler memakai abu batu dan material agregat halus menggunakan kombinasi limbah keramik dan agregat halus alam. Ukuran agregat halus yang diganti adalah semua ukuran agregat yang tertahan saringan no 8, no 16, no 30, no 50, no 100 dan no 200. Proporsi limbah keramik yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Dengan analisis regresi akan ditentukan sejauh mana proporsi penggunaan agregat halus keramik yang dikombinasikan dengan agregat halus alam dapat mempengaruhi kinerja campuran beraspal sehingga menghasilkan proporsi yang tepat dari agregat halus keramik, yang sesuai dengan karakteristik campuran laston AC-BC. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berbeda dari penelitian-penelitian sebelumnya.

METODE PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan limbah keramik dari sisa potongan keramik lantai, aspal jenis pen 60/70, serta agregat kasar, halus, dan filler abu batu yang diperoleh dari PT. Kresna Karya di daerah Pringgabaya. Persiapan agregat halus limbah keramik dimulai dari pemecahan, penghalusan potongan keramik hingga mencapai standar diameter butir agregat halus. Ukuran pecahan keramik yang dijadikan sebagai agregat halus mencakup ukuran yang tertahan pada saringan nomor 4, 8, 16, 30, 50, 100, dan 200.

Pembuatan dan Pengujian benda uji briket Marshall

Dalam pembuatan campuran laston AC-BC digunakan aspal 60/70 dengan KAO sebesar 6%, bahan agregat kasar alam, dan filler abu batu. KAO tersebut didapatkan dari pengujian menggunakan variasi kadar aspal 5 – 7%. Agregat halus terdiri dari dua variasi, yaitu agregat halus limbah keramik (AHK) dan agregat halus alam (AHA). Proporsi variasi agregat halus yang digunakan adalah 100% AHA : 0% AHK, 75% AHA : 25% AHK, 50% AHA : 50% AHK, 25% AHA : 75% AHK, dan 0% AHA : 100% AHK. Pemilihan variasi proporsi ini didasarkan dari hasil penelitian penggunaan limbah keramik sebagai agregat halus pada campuran AC-WC dimana didapatkan campuran terbaik adalah 50% (Arliningtyas, 2016) dan campuran 25% yang memenuhi syarat Bina Marga (Putra, 2019). Gambar benda uji dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Benda uji untuk KAO dan Benda uji dengan variasi agregat halus keramik

Pengujian campuran beraspal melibatkan pengujian sifat volumetrik dan sifat mekanis. Pada pengujian sifat volumetrik campuran beton aspal, dilakukan mendapatkan nilai rongga antara mineral agregat (VMA), rongga dalam campuran (VIM), dan rongga terisi aspal (VFB). *Void in the Mineral Aggregate* (VMA) adalah volume rongga udara yang terdapat dalam campuran beraspal setelah proses pemadatan, dinyatakan dalam persentase. VIM (*Void in Mix*) adalah jumlah rongga dalam campuran atau volume total udara yang terletak di antara partikel agregat yang dilapisi oleh aspal dalam campuran yang telah dipadatkan. VFB (*Void Filled with Bitumen*) adalah ukuran dari jumlah rongga dalam campuran yang diisi oleh aspal, atau persentase rongga VMA yang terisi oleh aspal, tidak termasuk yang diserap oleh agregat.

Untuk pengujian sifat mekanis, meliputi nilai stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*. Stabilitas campuran perkerasan menjadi parameter penilaian kemampuan campuran untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, yang diukur dalam satuan kilogram. *Flow*, adalah besarnya penurunan vertikal pada benda uji yang diukur dalam milimeter.

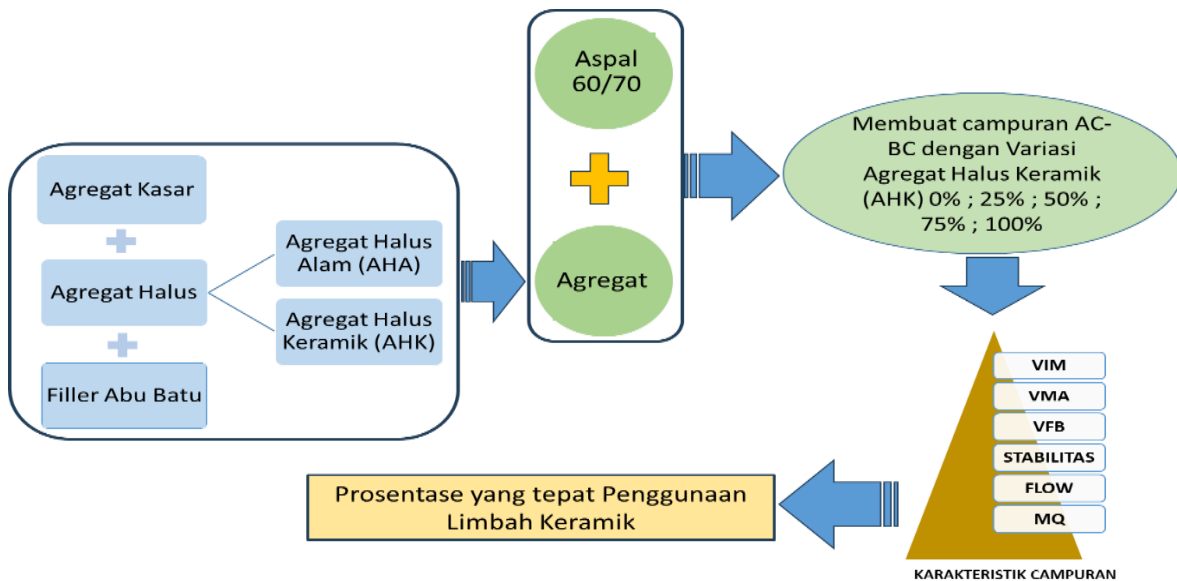
Analisis Data dan Pembahasan

Setelah mendapatkan hasil pengujian sifat volumetrik dan sifat mekanis campuran, langkah selanjutnya melibatkan proses pengolahan dan analisis data. Proses analisis data dilakukan dengan menggunakan metode statistik, yaitu analisis regresi.

Regresi Linear Sederhana merupakan suatu metode statistik yang digunakan untuk menguji sejauh mana keterkaitan sebab-akibat antara variabel penyebab (X) dan variabel akibat (Y). Dalam analisis regresi, terdapat dua jenis variabel: 1) Variabel bebas, merupakan faktor yang diukur dan mempengaruhi hubungan antara fenomena yang diamati atau diobservasi. 2) Variabel tak bebas, yang keberadaannya dipengaruhi oleh variabel bebas. Kekuatan hubungan diukur dengan tingkat kekuatan yang dapat dikategorikan sebagai sangat kuat, kuat, sedang, rendah, atau sangat rendah. Ukuran kekuatan hubungan antara dua variabel diukur dengan menggunakan koefisien korelasi (Sugiyono, 2006).

Variabel dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas yaitu variasi proporsi agregat halus alam dan agregat halus keramik. Sedangkan variabel tidak bebas meliputi VIM, VMA, VFB, stabilitas, pelelehan, dan Marshall Quotient.

Analisis regresi bertujuan untuk menentukan sejauh mana proporsi penggunaan agregat halus keramik yang dikombinasikan dengan agregat halus alam dapat mempengaruhi kinerja campuran beraspal. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan informasi tentang pengaruh variabel bebas terhadap variabel tidak bebas, sesuai persyaratan spesifikasi Campuran Beraspal AC-BC dari Bina Marga. Langkah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Langkah Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemeriksaan Material Bahan Campuran Aspal

Pemeriksaan material bahan campuran aspal AC-BC merupakan langkah penting untuk memahami karakteristik sifat fisik dari bahan material tersebut dan memastikan bahwa material telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga. Hal ini bertujuan

untuk menghasilkan campuran aspal yang optimal. Hasil pemeriksaan aspal dan agregat dapat ditemukan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1 Hasil pemeriksaan aspal 60/70 dan agregat

Jenis Pemeriksaan	Syarat	Hasil Pemeriksaan ***)			
Aspal		*)			
Penetrasi (0,1 mm)	60-70	65,80			
Daktilitas (cm)	> 100	136,00			
Titik nyala (°C)	min 232	> 285			
Titik lembek (°C)	48 - 58	51,00			
Berat jenis	min 1,0	1,033			
Kehilangan berat (% berat)	maks 0,8	0,21			
Agregat	**) Agregat kasar	Agregat halus alam	Agregat halus keramik	Filler abu batu	
Berat jenis bulk	≥ 2,50	2,68	2,65	2,12	2,57
Berat jenis semu	≥ 2,50	2,78	2,81	2,46	2,63
Berat jenis efektif	≥ 2,50	2,73	2,73	2,29	2,60
Penyerapan terhadap air (%)	≤ 3,00	1,30	2,14	6,51	0,86
Keausan dengan alat <i>impact</i> (%)	≤ 30,00	16,69	-	-	-
Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	≥ 95,00	100,00	-	-	-

Sumber : *) *Spesifikasi Umum 2018 revisi 2*

**) *SNI 8198 : 2015*

***) *Hasil pemeriksaan (2023)*

Hasil Analisis Volumetrik dan Mekanis Beton Aspal AC-BC dengan Variasi Agregat Halus Keramik

Benda uji campuran beton aspal AC-BC direncanakan menggunakan bahan aspal ber-KAO sebesar 6%, filler abu batu, agregat kasar alam, dan agregat halus yang merupakan kombinasi dari bahan alam dan bahan keramik. Variasi persentase penggantian agregat halus alam (AHA) dan agregat halus keramik (AHK) mencakup 100% AHA : 0% AHK, 75% AHA : 25% AHK, 50% AHA : 50% AHK, 25% AHA : 75% AHK, dan 0% AHA : 100% AHK. Pemeriksaan volumetrik campuran aspal berupa VIM, VMA, dan VFB, sedangkan pemeriksaan mekanis berupa stabilitas, flow, dan *Marshall Quotient* (MQ) dengan menggunakan *Marshall Standard*.

Hasil pemeriksaan volumetrik dan mekanis campuran laston AC-BC disajikan dalam **Tabel 2**. Berdasarkan data tersebut, selanjutnya dilakukan penyusunan grafik untuk menampilkan hubungan antara variasi persentase penggantian agregat halus alam (AHA) dan agregat halus keramik (AHK) dengan nilai volumetrik seperti VMA, VIM, dan VFB, serta nilai mekanis seperti stabilitas, flow, dan MQ menggunakan *Marshall Standard*.

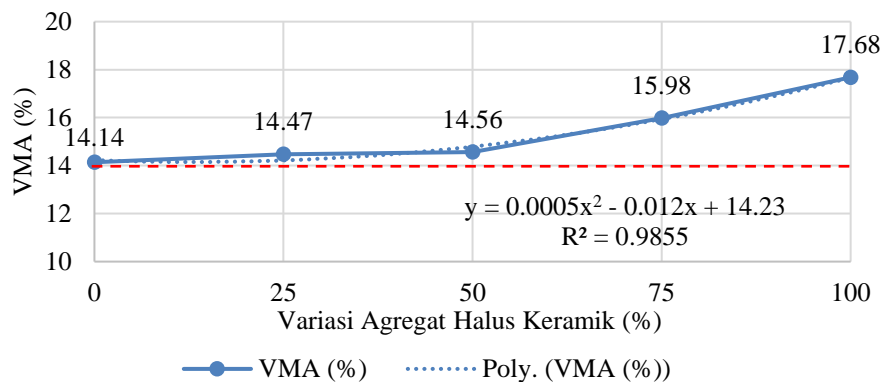
Tabel 2 Nilai Volumetrik dan Mekanis Campuran Laston AC-BC berdasarkan Variasi Agregat Halus

Variasi Agregat Halus (%)	Nilai Volumetrik			Nilai Mekanis		
	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
100 AHA : 0 AHK	14,14	3,04	78,51	2286,98	3,12	732,22
75 AHA : 25 AHK	14,47	3,39	76,56	2206,53	2,62	841,12
50 AHA : 50 AHK	14,56	4,44	69,51	2163,54	2,57	840,75
25 AHA : 75 AHK	15,98	6,91	56,79	2015,95	2,53	796,82
0 AHA : 100 AHK	17,68	9,60	45,76	1684,40	2,38	707,73
Syarat	Min. 14	3 - 5	min. 65	min 800	2 - 4	min 250

VMA (*Void in the mineral aggregate*)

Dari **Tabel 2** digambarkan dalam bentuk grafik hubungan antara variasi agregat halus keramik dengan nilai VMA (rongga antar agregat).

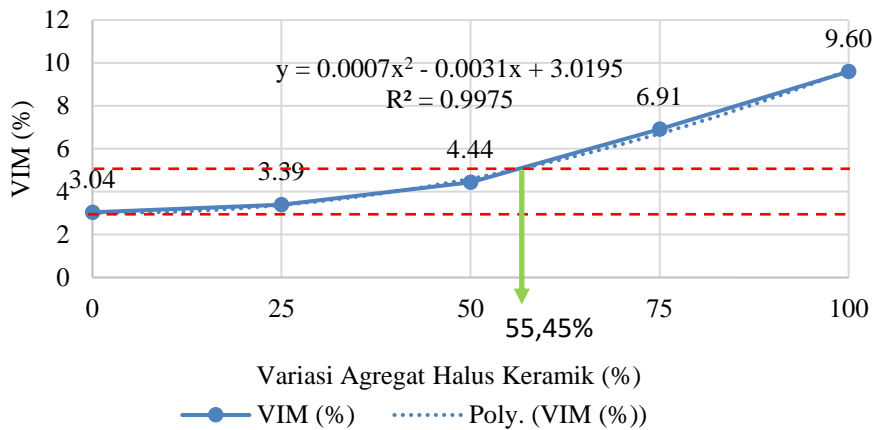
Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin banyak tambahan agregat halus keramik maka nilai rongga antar agregat (VMA) akan semakin naik. Semakin banyak agregat halus keramik yang digunakan dalam suatu campuran maka aspal yang mengisi rongga menjadi lebih sedikit karena aspal juga terserap oleh agregat halus keramik yang memiliki daya penyerapan yang lebih besar dari pada agregat halus alam. Akibatnya rongga antar agregat (VMA) menjadi bertambah tinggi. Nilai VMA yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi penambahan agregat halus keramik mulai dari 0 - 100% sebesar 14,14 – 17,68%. Semua variasi penambahan agregat halus keramik menghasilkan nilai VMA yang memenuhi persyaratan campuran laston AC-BC yaitu minimum 14%. Persamaan regresi yang didapat adalah $y = 0,0005x^2 - 0,012x + 14,23$, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9855 yang berarti bahwa 98,55% variasi penggunaan agregat halus keramik berpengaruh terhadap nilai VMA. Dari nilai korelasi (r) sebesar 0,9927 ($0,9 - 1$) menunjukkan variasi agregat halus keramik berpengaruh sangat kuat terhadap nilai VMA. Dikarenakan nilai VMA mengalami peningkatan sejalan dengan bertambahnya penambahan agregat halus keramik, maka terjadi korelasi positif.



Gambar 3 Hubungan antara Variasi Agregat Halus Keramik dengan nilai VMA

VIM (*Void in Mix*)

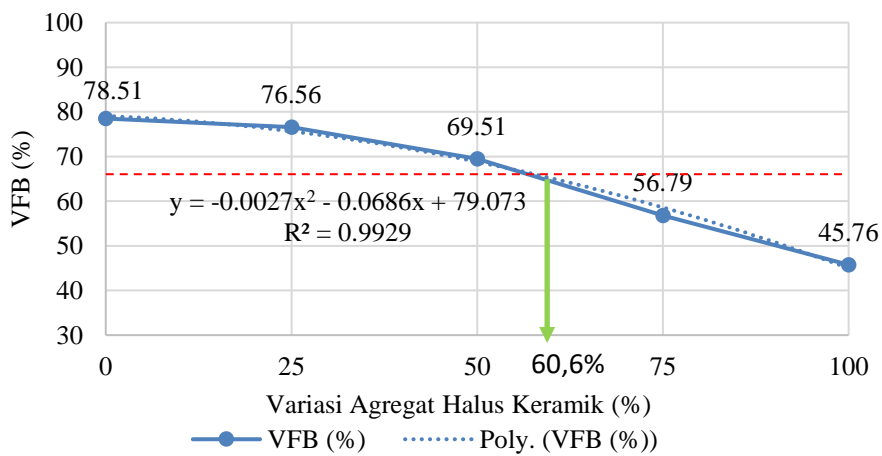
Pada campuran laston AC-BC, Bina Marga memberikan syarat nilai VIM antara 3 – 5%. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar memberikan tempat bagi agregat untuk bergerak/bergeser saat ada tambahan beban lalu lintas. Hasil pemeriksaan terhadap benda uji campuran didapatkan semakin banyak penambahan agregat halus keramik maka nilai rongga dalam campuran (VIM) semakin besar, karena volume agregat halus menjadi bertambah besar setelah agregat halus alam diganti dengan agregat halus keramik. Nilai VIM untuk berbagai variasi pemakaian agregat halus keramik mulai dari 3,04 – 9,60%. Berdasarkan syarat VIM antara 3 – 5% diperoleh variasi 0, 25 dan 50% yang memenuhi persyaratan. Sedangkan 75 dan 100% tidak memenuhi persyaratan dengan nilai lebih dari 5%. VIM yang besar ($> 5\%$), dapat membuat kepadatan campuran berkurang sehingga tidak mampu menahan beban, dapat menyebabkan kekuatan campuran akan berkurang sehingga rentan terjadi rusak retak ataupun kerusakan lain.



Gambar 4 Hubungan antara Variasi Agregat Halus Keramik dengan VIM

Berdasarkan persamaan regresi $y = 0,0007x^2 - 0,0031x + 3,0195$ yang disajikan pada **Gambar 4** didapatkan bahwa nilai VIM mengalami kenaikan, sampai syarat VIM yang diijinkan yaitu maksimum penambahan 55,45% agregat halus keramik sehingga antara variasi agregat halus dan VIM berkorelasi (r) positif sebesar 0,9987. Pengaruh variasi agregat halus sangat kuat terhadap nilai VIM memiliki nilai korelasi (r) antara 0,9 – 1. Koefisien determinasi (R^2) diperoleh sebesar 0,9975, artinya 99,75% variasi agregat halus mempengaruhi nilai VIM.

Rongga terisi Aspal (VFB)

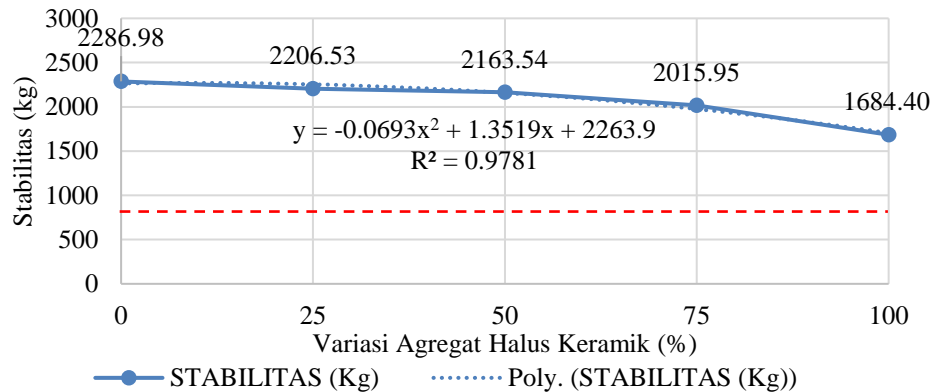


Gambar 5 Hubungan antara Variasi Agregat Halus Keramik dengan VFB

Berdasarkan **Gambar 5** dan persamaan regresi $y = -0,0027x^2 - 0,0686x + 79,073$, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak penggunaan agregat halus keramik (AHK), nilai VFB atau rongga yang terisi aspal cenderung semakin kecil. Hal ini terjadi karena tidak semua aspal dapat mengisi rongga dalam campuran, sebagian aspal juga terserap oleh agregat halus keramik. Analisis dari **Gambar 5** menunjukkan bahwa penggantian hingga 60,6% variasi agregat halus keramik memenuhi syarat campuran laston AC-BC. Namun, penggantian lebih dari 60,6% tidak memenuhi persyaratan nilai VFB yang minimal 65%. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9929 mengindikasikan bahwa sebanyak 99,29% kadar aspal memiliki pengaruh terhadap nilai VFB. Selain itu, nilai korelasi sebesar -0,9964 menunjukkan korelasi negatif yang sangat kuat (antara 0,9 hingga 1), menandakan adanya hubungan yang signifikan antara kadar aspal dan nilai VFB.

Stabilitas

Dari **Tabel 2** dan **Gambar 6**, dapat dilihat hubungan antara variasi agregat halus keramik dengan nilai stabilitas. Campuran dengan proporsi agregat halus keramik yang meningkat dari 0% hingga 100% menghasilkan nilai stabilitas berkisar antara 2286,98 hingga 1684,40 kg. Seluruh nilai tersebut memenuhi persyaratan spesifikasi untuk beton aspal AC-BC, yang ditetapkan di atas 800 kg.



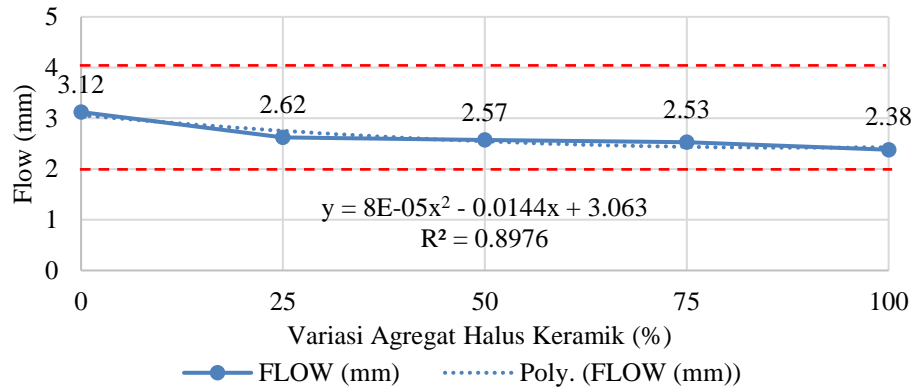
Gambar 6 Hubungan Antara Variasi Agregat Halus Keramik dengan Stabilitas

Penambahan variasi agregat halus keramik dalam campuran laston AC-BC ternyata mengakibatkan penurunan nilai stabilitas. Hal ini disebabkan oleh peningkatan volume campuran laston seiring dengan peningkatan persentase agregat halus keramik, di mana sebagian aspal terserap ke dalam agregat halus keramik sehingga fungsi aspal sebagai pengikat menjadi berkurang. Akibatnya, stabilitas campuran mengalami penurunan. Keawetan suatu campuran dapat diukur dari nilai stabilitasnya, dan peningkatan penggunaan agregat halus keramik berimplikasi pada penurunan kemampuan campuran laston dalam menahan beban maksimum. Nilai koefisien determinasi (R^2) dari persamaan regresi sebesar 0,9781 menunjukkan bahwa sebanyak 97,81% variasi agregat halus keramik mempengaruhi nilai stabilitas. Persentase tersebut mengindikasikan hubungan yang sangat kuat dan berkorelasi negatif, dengan nilai korelasi sebesar -0,989. Dengan kata lain, peningkatan proporsi agregat halus keramik berhubungan secara signifikan dengan penurunan nilai stabilitas campuran laston.

Flow (pelelehan)

Hubungan antara variasi agregat halus keramik dengan nilai *flow* dapat dijelaskan dengan persamaan regresi $y = 0,00008x^2 - 0,0144x + 3,0632$, di mana x merupakan proporsi variasi agregat halus keramik, dan y adalah nilai *flow*. Nilai R^2 sebesar 0,8976 mengindikasikan bahwa model regresi cukup baik dalam menjelaskan variasi dalam data, sementara nilai r sebesar -0,9474 menunjukkan adanya hubungan negatif yang kuat antara proporsi agregat halus keramik dan nilai *flow*. Dari **Gambar 7** yang disajikan menunjukkan nilai *flow* mengalami penurunan seiring bertambahnya variasi agregat halus keramik yang digunakan. Nilai *flow* mencerminkan besarnya deformasi dalam milimeter dari campuran laston hingga mencapai titik beban maksimum selama pengujian stabilitas. Semakin rendah nilai *flow*, semakin tahan deformasi campuran terhadap beban, namun nilai yang terlalu rendah juga dapat mempengaruhi kelenturan campuran aspal, sehingga penerapan konstruksi menjadi

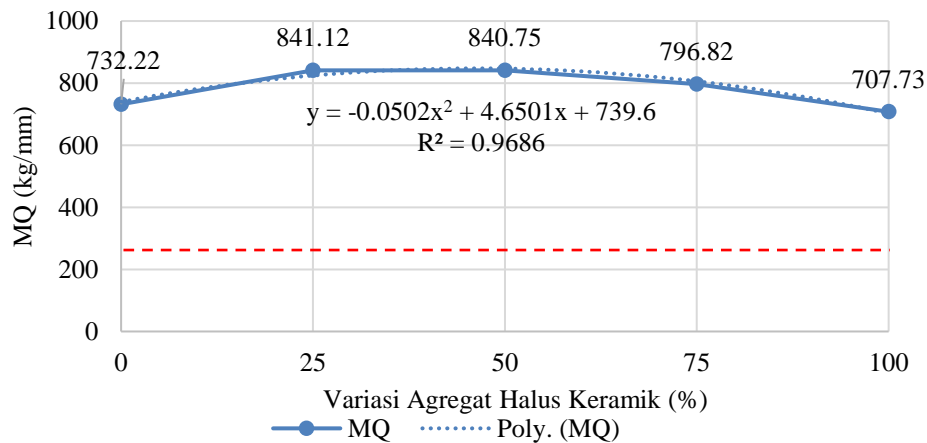
lebih sulit. Berdasarkan persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga, nilai *flow* yang dapat diterima berkisar antara 3,12 hingga 2,38%.



Gambar 7 Hubungan antara Agregat Halus Keramik dengan *Flow*

Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient (MQ) mencerminkan tingkat kekakuan suatu campuran. Semakin tinggi nilai MQ, maka tingkat kekakuan campuran semakin tinggi. Bina Marga menetapkan persyaratan minimal untuk nilai MQ sebesar 250 kg/mm. Dari pemeriksaan campuran didapatkan hubungan yang sangat kuat antara variasi agregat halus keramik dengan nilai MQ yaitu sebesar 0,9842 (0,9 – 1, kategori sangat kuat) berkorelasi negatif dan besar pengaruhnya adalah sebesar 96,86%. Dengan menggunakan persamaan regresi $y = -0,0502x^2 + 4,6501x + 739,82$ maka didapatkan nilai optimum MQ yaitu dicapai pada variasi agregat halus keramik 46,32%. Setelah itu nilai MQ menurun kembali.



Gambar 8 Hubungan antara Agregat Halus Keramik dengan *MQ*

Penentuan Persentase Maksimum Agregat Halus Keramik

Persentase maksimum agregat halus keramik yang dapat dipakai dalam campuran laston AC-BC dilakukan dengan cara merekapitulasi nilai volumetrik dan mekanis pada **Tabel 3** sehingga diperoleh persentase agregat halus keramik yang bisa menggantikan agregat halus alam sampai prosentase maksimum 55,45%. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian (Arliningtyas, 2016) terlihat perbedaan nilai persentase limbah keramik yang terbaik adalah 50% dilihat dari nilai stabilitas tertinggi yang dihasilkan pada campuran AC-WC. Sedangkan penelitian (Putra, 2019) didapatkan penambahan maksimum 25% limbah keramik pada

campuran laston AC-WC pada KAO 5,8%. Berarti persentase penggunaan limbah keramik untuk campuran AC-BC bisa lebih banyak dibandingkan dengan campuran AC-WC.

Tabel 3 Penentuan Persentase Maksimum Agregat Halus Keramik

Parameter	Persentase variasi agregat halus keramik				
VMA					
VIM				55,45%	
VFB				60,6%	
Stabilitas					
Flow					
MQ					
	0	25	50	55,45%	75 100

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dilakukan analisis terhadap penggunaan limbah keramik sebagai agregat halus ditinjau dari nilai karakteristik campuran laston AC-BC, dengan hasil sebagai berikut :

1. Semakin banyak agregat halus keramik yang digunakan dapat meningkatkan rongga antar agregat dan rongga dalam campuran laston AC-BC.
2. Rongga yang terisi oleh aspal mengalami penurunan seiring meningkatnya prosentase agregat halus keramik yang dipakai.
3. Nilai VIM yang masih memenuhi persyaratan Bina Marga sampai penggunaan 55,45% dan nilai VFB sampai 60,6% agregat halus keramik.
4. Campuran laston AC-BC yang menggunakan agregat halus keramik dapat menurunkan nilai stabilitas dan flow campuran, walaupun masih memenuhi persyaratan Bina Marga tapi nilai tersebut cenderung membuat kemampuan campuran menahan beban semakin rendah berkurang.
5. Agregat halus keramik bisa menggantikan agregat halus alam sampai persentase maksimum 55,45%.

DAFTAR PUSTAKA

Arliningtyas, S., & Nadia. (2016). Analisa kelayakan limbah keramik sebagai pengganti agregat halus untuk campuran aspal beton ditinjau dari nilai stabilitas Marshall. *Jurnal Konstruksia*, 8(1), 47-59. doi:<https://doi.org/10.24853/jk.8.1.47-59>

Badan Standardisasi Nasional. (2015). *Spesifikasi campuran beraspal panas bergradasi menerus (Laston)*. Jakarta.

Chen, G., Li, G., Liu, M., Ge, W., Wu, G., & Zhan, C. (2023). The firing temperatures of burnt clay from the Chinese neolithic cultural relics and its paleoenvironmental imprints. *Heliyon*, 9(10), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20628>

Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 1-19.

- Fauziah, M., & Wijayati, F. S. (2016). Pengaruh kadar limbah kaca sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik campuran aspal porus. *Teknisia*, XXI(2), 261-273. <https://journal.uui.ac.id/teknisia/article/view/7374>
- Haldar, S. K. (2020). *Introduction to Mineralogy and Petrology* (2nd ed.). Elsevier. (pp. 103-104).
- Hartomo, A. J. (1994). *Mengenal Keramik Modern*. Yogyakarta: Yogyakarta Andi Offset.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Liana, U. W., Yatnikasari, S., & Asnan, M. N. (2022). Karakteristik Marshall keramik sebagai agregat halus dan filler pada campuran Hot Roller Sheet (HRS). *Rang Teknik Journal*, 5(1), 104-109. <https://doi.org/10.31869/rtj.v5i1.2832>
- Lizar, Pribadi, J. A., & Kurniawan, W. (2021). Karakteristik campuran aspal AC-WC menggunakan filler spent bleaching earth sebagai filler pengganti abu batu. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 3(2), 80-89. <http://dx.doi.org/10.47600/jtst.v3i2.285>
- Maulana, A., Amaliah, M., & Utami, R. (2020). Pemanfaatan limbah beton sisa pengujian sebagai substitusi agregat pada campuran AC-WC. *Potensi*, 22(1), 87-95. <https://doi.org/10.35313/potensi.v22i1.1678>
- Panjaitan, K. D., & Ing, T. L. (2017). Penggunaan genteng keramik sebagai pengganti agregat kasar dan abu terbang sebagai pengisi pada Laston AC-BC. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 95-113. <https://doi.org/10.28932/jts.v13i2.1439>
- Postill, H., Helm, P. R., Dixon, N., & Glendinning, S. (2021). Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model. *Engineering Geology*, 280, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105912>
- Putra, K. H., & Wahdana, J. (2019). Studi eksperimental penambahan limbah keramik sebagai agregat halus pada campuran Laston (AC-WC) terhadap karakteristik uji Marshall. *Paduraksa*, 8(2), 147-155. <https://doi.org/10.22225/pd.8.2.1396.147-155>
- Sinuhaji, P., Nasution, N. H., & Amelia, R. (2020). Particle size influence of raw material grains on the characteristics of traditional ceramics. *AIP Conference Proceedings*, 2221, 110017. <https://doi.org/10.1063/5.0003228>
- Sugiyono. (2006). *Statistik untuk Penelitian*. Bandung: CV. Alfabeta.
- Sukirman, S. (2016). *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Tiza, MT., Jirgba, K., Sani, H. A., & Sesugh, T. (2022). Effect of thermal variances on flexible pavements. *J Sustain Const Mater Technol*, 7(3), 221–230. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1136848>
- Wang, L., Wei, J., Wu, W., Zhang, X., & Xu, X. (2022). Technical development and long-term performance observations of long-life asphalt pavement: A case study of Shandong Province. *Journal of Road Engineering*, 2(4), 369–389. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.001>
- Widianty, D., Yuniarti, R., Akmaluddin, Prabowo, A., & Rawiana, S. (2020). Analisis karakteristik Marshall pada beton aspal lapis pengikat (Asphalt Concrete-Binder Course) menggunakan aspal modifikasi serbuk serat pelepah batang pisang. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 6(1), 86-95. [doi:https://doi.org/10.29303/jstl.v6i1.119](https://doi.org/10.29303/jstl.v6i1.119)