



Analisis Karakteristik Uji Marshall pada Campuran AC-BC Menggunakan Pasir Kuarsa Limbah PDAM sebagai Substitusi Filler

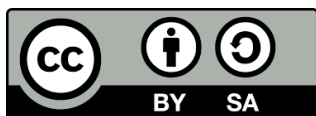
Marthen Luter Tjatjawi*, Sudarno, Reiner Willsen Tampi

Politeknik Negeri Manado, Indonesia

Email : sudarno0165@gmail.com*

Keywords:

AC-BC Mixture; PDAM Waste
Quartz Sand; MQ Grade



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Publikasiku Publisher

Kata Kunci:

Campuran AC-BC; Pasir
Kuarsa Limbah PDAM; Nilai
MQ

Abstract

Using water treatment waste as a construction material offers a potential alternative filler for asphalt pavements. This study evaluated the Marshall characteristics of Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) mixtures incorporating quartz sand waste from a drinking water company (PDAM) as a filler substitute and identified the preferred substitution proportion. Laboratory experiments used aggregates from Quarry Kema, Lansot, North Minahasa Regency, and 60/70 penetration grade asphalt. The waste quartz sand was cleaned, dried, and sieved through a No. 200 sieve. Asphalt contents of 5.0–7.0% were tested to determine the optimum asphalt content. Filler substitution levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% were evaluated using 75 compaction blows per specimen face. The optimum asphalt content was 5.6%. At 25% substitution, stability was 1,322.93 kg, flow was 3.61 mm, Marshall Quotient was 368.31 kg/mm, VIM was 3.90%, VMA was 14.88%, and VFB was 74.53%. The highest stability, 1,420.22 kg, occurred at 50% substitution, whereas 75% and 100% substitution produced VIM values exceeding 5%. These findings indicate that higher substitution proportions do not necessarily improve mixture characteristics. The 25% substitution provided the most favorable parameter combination under laboratory conditions. Durability, moisture susceptibility, permanent deformation, and field performance require further evaluation before broader practical application.

Abstrak

Pemanfaatan limbah pengolahan air sebagai bahan konstruksi berpotensi menyediakan alternatif filler pada perkerasan beraspal. Penelitian ini bertujuan menilai karakteristik Marshall campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) dengan pasir kuarsa limbah Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) sebagai substitusi filler serta menentukan proporsi terbaik berdasarkan parameter mekanis dan volumetrik. Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan agregat dari Quarry Kema, Lansot, Kabupaten Minahasa Utara, dan aspal penetrasi 60/70. Pasir kuarsa dibersihkan, dikeringkan, dan diayak hingga lolos saringan No. 200. Kadar aspal optimum ditentukan menggunakan variasi kadar aspal 5,0–7,0%, kemudian digunakan pada substitusi filler sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, dengan pemadatan 75 tumbukan pada setiap sisi. Hasil menunjukkan kadar aspal optimum sebesar 5,6%. Substitusi 25% menghasilkan stabilitas 1.322,93 kg, flow 3,61 mm, Marshall Quotient 368,31 kg/mm, VIM 3,90%, VMA 14,88%, dan VFB 74,53%. Stabilitas tertinggi ditemukan pada substitusi 50%, sebesar 1.420,22 kg, sedangkan substitusi 75% dan 100% menghasilkan VIM melebihi 5%. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan substitusi tidak selalu menghasilkan keseimbangan karakteristik campuran yang

lebih baik. Substitusi 25% memberikan kombinasi parameter paling sesuai dalam kondisi pengujian dan berpotensi menjadi alternatif filler AC-BC. Pengujian durabilitas, ketahanan terhadap kelembapan, deformasi permanen, serta validasi lapangan diperlukan sebelum penerapan lebih luas untuk memastikan kelayakan dalam kondisi pelayanan.

PENDAHULUAN

Pembangunan sarana dan prasarana transportasi darat di Indonesia mengalami peningkatan yang sangat pesat seiring dengan tingginya pertumbuhan mobilitas masyarakat dan distribusi barang. Jaringan jalan raya sebagai urat nadi perekonomian menuntut mutu konstruksi perkerasan yang andal, memiliki daya dukung tinggi, serta tahan terhadap beban lalu lintas berulang dan perubahan cuaca ekstrem (Neduri et al., 2021). Salah satu jenis perkerasan yang paling banyak diterapkan di Indonesia adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*) dengan menggunakan campuran aspal beton panas (*Hot Mix Asphalt*). (Jaya, 2019) Pada struktur perkerasan jalan, lapisan *Asphalt Concrete - Binder Course* (AC-BC) memegang peranan krusial sebagai lapisan perantara yang terletak di antara lapisan permukaan (*wearing course*) dan lapisan pondasi atas (*base course*). Lapisan *Asphalt Concrete - Binder Course* (AC-BC) memegang peranan struktural yang sangat krusial dalam struktur perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu untuk menyebarkan tegangan akibat beban lalu lintas kendaraan berat ke lapisan base course di bawahnya (Bitumen, 2015; (Niu et al., 2021).

(Ming et al., 2022; Lin et al., 2022) Lapisan AC-BC dirancang khusus untuk memikul beban geser yang tinggi akibat beban roda kendaraan berat serta mereduksi tegangan yang diteruskan ke struktur di bawahnya. Kinerja mekanis campuran AC-BC sangat ditentukan oleh komposisi material penyusunnya, yaitu agregat kasar, agregat halus, aspal sebagai bahan pengikat, serta bahan pengisi (*filler*). Material *filler*, yaitu partikel halus yang lolos ayakan No. 200 (0,075 mm), berfungsi mengisi rongga antara bercak agregat (*voids*), meningkatkan kerapatan campuran, serta membentuk matriks mastik bersama aspal untuk meningkatkan adhesi dan stabilitas perkerasan (Heydari et al., 2021).

Meskipun filler standar seperti abu batu atau semen Portland telah terbukti memenuhi persyaratan teknis, ketersediaannya di alam semakin terbatas dan proses produksinya membutuhkan energi yang sangat besar serta biaya yang relatif mahal. Di sisi lain, proses pengolahan air bersih pada Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) menghasilkan produk sampingan berupa limbah endapan (*sludge*) dan sisa media filtrasi yang didominasi oleh pasir kuarsa. Penumpukan limbah pasir kuarsa di PDAM ini hingga saat ini hanya dibuang begitu saja ke lingkungan atau ditampung pada kolam pengendapan. Seiring berjalannya waktu, volume limbah yang terus meningkat ini berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, penyempitan lahan, serta penurunan kualitas sanitasi di sekitar kawasan pengolahan air. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah pasir kuarsa PDAM sebagai alternatif bahan tambah atau substitusi filler pada campuran aspal menjadi isu strategis untuk menanggulangi permasalahan limbah sekaligus mendukung pembangunan infrastruktur jalan.

Instalasi Pengolahan Air Minum (IPA) pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) menghasilkan limbah padat sisa filtrasi dan sedimentasi. Limbah endapan tersebut umumnya mengandung endapan mineral kuarsa (SiO_2) berskala halus. Pasir kuarsa memiliki struktur

fisik yang keras, bersudut (angular), serta memiliki kestabilan termal dan kimiawi yang baik (Hidayat & Zulkarnain, 2023).

Kandungan utama silika (SiO_2) pada pasir kuarsa memberikan sifat pemicu kerekatan (*adhesion promoter*) yang efektif bila berinteraksi dengan bahan pengikat hidrokarbon seperti aspal. (Putra, 2022) Kadar silika yang tinggi dalam filler pasir kuarsa dapat meningkatkan titik lembek (*softening point*) sistem mastic aspal-filler, sehingga campuran tidak mudah melunak pada suhu operasional jalan yang tinggi (Ramli, 2021).

Pemanfaatan material limbah dan pasir kaya silika sebagai bahan pengisi campuran aspal telah banyak diteliti oleh para ahli untuk membuk-tikan kelayakannya secara teknis. (Jaya, 2019) mengkaji penggunaan pasir alam berbutir halus sebagai substitusi filler pada campuran *Asphalt Concrete - Binder Course* (AC-BC) dan menemukan bahwa variasi persentase material pengisi kaya silika berpengaruh signifikan terhadap parameter volumetrik seperti *Voids in Mineral Aggregate* (VMA) dan *Voids Filled with Asphalt* (VFA) serta mampu mempertahankan nilai stabilitas campuran di atas standar Bina Marga. Sejalan dengan penelitian tersebut, (Akbar et al., 2019) melakukan analisis penggantian filler pada campuran AC-BC dan menyimpulkan bahwa penggunaan bahan pengisi alternatif berpartikel silika dapat meningkatkan ikatan antar agregat sehingga menghasilkan nilai *Marshall Quotient* (MQ) yang optimal untuk menahan deformasi plastis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium (*experimental laboratory research*). Penelitian ini dil-akukan untuk menguji secara langsung pengaruh substitusi limbah pasir kuarsa PDAM sebagai filler (bahan pengisi) terhadap karakteristik mekanis dan volumetrik campuran beraspal *Asphalt Concrete - Binder Course* (AC-BC) melalui pengujian Marshall. Data yang digunakan dalam penelitian ni dibagi menjadi dua kategori utama yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung dari hasil pengujian eksperimen dilaboratorium yang meliputi pengujian sifat fisik (agregat kasar, agregat halus, dan filler), sifat fisik aspal penetrasi 60/70, parameter volumetrik marshall (nilai stabilitas, *flow*, dan *marshall quotien*/MQ). Data sekunder diperoleh dari studi literatur, jurnal penelitian terdahulu, standar pengujian SNI, serta spesifikasi umum bina marga 2018 (revisi 2) divisi 6 perkerasan beraspal (Amirkhani et al., 2023; Li et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material dilakukan untuk mengetahui kelayakan agregat yang digunakan dalam campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC). Material agregat kasar dan halus yang digunakan berasal dari Quarry Kema, Lansot, Kabupaten Minahasa Utara, sedangkan bahan pengikat yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70. Pengujian material meliputi pengujian keausan agregat, berat jenis dan penyerapan, serta analisis gradasi agregat. Pasir kuarsa limbah PDAM terlebih dahulu dibersihkan, dikeringkan dan diayak hingga lolos saringan No. 200 sebelum digunakan sebagai substitusi filler.

Pengujian Keausan Agregat

Hasil pengujian keausan agregat menggunakan mesin *Los Angeles* menunjukkan nilai abrasi sebesar 23,33%. Nilai tersebut berada di bawah batas maksimum 40% yang digunakan dalam penelitian, sehingga agregat yang digunakan memenuhi persyaratan keausan untuk campuran AC-BC.

Table 1. Hasil pengujian keausan agregat

Parameter	Hasil	Persyaratan Keterangan
Abrasi	23,33 %	< 40 % Memenuhi

Nilai abrasi yang relatif rendah menunjukkan bahwa agregat mempunyai ketahanan yang cukup baik terhadap benturan dan gesekan selama proses pencampuran maupun pemadatan. Kondisi tersebut penting karena agregat merupakan kerangka utama campuran yang berperan dalam menahan beban lalu lintas.

Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

(Osuolale et al., 2023) Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan menunjukkan bahwa seluruh fraksi agregat yang digunakan memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam penelitian. Agregat ukuran 19–29 mm memiliki berat jenis bulk sebesar 2,519, berat jenis SSD sebesar 2,534, berat jenis semu sebesar 2,557, dan penyerapan sebesar 0,589%. Agregat ukuran 13–19 mm memiliki berat jenis bulk 2,633, SSD 2,668, berat jenis semu 2,728, dan penyerapan 1,318%. Sementara itu, agregat ukuran 5–13 mm memiliki berat jenis bulk 2,593, SSD 2,632, berat jenis semu 2,699, dan penyerapan 1,504%. Untuk fraksi 0–5 mm diperoleh berat jenis bulk 2,652, SSD 2,711, berat jenis semu 2,818, dan penyerapan 2,217%.

Table 2. Hasil Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

Fraksi Agregat	Bulk	SSD	Semu	Penyerapan (%)
19 – 29 mm	2,519	2,534	2,557	0,589
13 – 19 mm	2,633	2,668	2,728	1,318
5 – 13 mm	2,593	2,632	2,699	1,504
0 – 5 mm	2,652	2,711	2,818	2,217

Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat mempunyai berat jenis yang relatif seragam dan nilai penyerapan yang masih rendah. Nilai penyerapan yang rendah menunjukkan bahwa agregat tidak terlalu banyak menyerap aspal sehingga kebutuhan aspal dalam campuran dapat dikendalikan dengan lebih baik (Camargo-Perez et al., 2024; Zhao et al., 2025).

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Penentuan Kadar Aspal Optimum dilakukan pada campuran AC-BC normal sebelum pasir kuarsa limbah PDAM digunakan sebagai substitusi *filler*. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, dan 7,0%. Parameter yang dianalisis meliputi *density, stability, flow, Marshall Quotient (MQ)*, VIM, VMA, dan VFB.

Table 3. Hasil pengujian Marshall Campuran Normal

Kadar Aspal	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Flow (mm)	Density (g/cm ³)	Stability (kg)	MQ (kg/mm)
5,0	5,17	14,72	65,04	4,61	2,358	1.152,90	250,64
5,5	4,23	14,95	71,74	3,88	2,364	1.202,67	318,16
6,0	3,58	15,45	77,14	3,67	2,363	809,21	218,52
6,5	1,98	15,13	88,35	4,12	2,384	773,64	195,55
7,0	1,81	16,04	89,91	4,00	2,371	799,70	200,19

Berdasarkan hasil tersebut, peningkatan kadar aspal cenderung menurunkan nilai VIM karena bertambahnya volume aspal yang mengisi rongga campuran. Sebaliknya, nilai VFB cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal karena semakin besar bagian rongga agregat yang terisi aspal. Nilai VMA relatif berada di atas batas minimum yang digunakan.

Pada parameter mekanis, nilai stability meningkat dari kadar aspal 5,0% menjadi 5,5%, kemudian mengalami penurunan pada kadar aspal yang lebih tinggi. Nilai *stability* tertinggi diperoleh pada kadar aspal 5,5%, yaitu 1.202,67 kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan aspal sampai kadar tertentu dapat meningkatkan ikatan antara agregat dan aspal, tetapi penggunaan aspal yang semakin tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi lebih lunak sehingga stabilitas menurun.

Nilai *flow* mengalami perubahan dari 4,61 mm pada kadar aspal 5,0% menjadi 3,88 mm pada kadar 5,5%, kemudian meningkat kembali pada kadar aspal yang lebih tinggi. Sementara itu, nilai MQ tertinggi sebesar 318,16 kg/mm diperoleh pada kadar aspal 5,5%. Berdasarkan evaluasi keseluruhan parameter Marshall, penelitian menetapkan KAO sebesar 5,6%, dengan rentang kadar aspal yang memenuhi kriteria berada pada sekitar 5,4–5,8%. Dengan demikian, kadar aspal optimum tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pembuatan benda uji dengan variasi substitusi pasir kuarsa limbah PDAM.

Hasil pengujian Marshall Variasi Pasir Kuarsa Limba PDAM

Setelah diperoleh KAO campuran normal, dilakukan pengujian *Marshall* menggunakan pasir kuarsa limbah PDAM sebagai substitusi *filler*. Variasi substitusi yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari total berat *filler*. Setiap benda uji dipadatkan sebanyak 75 tumbukan pada masing-masing sisi karena campuran direncanakan untuk lalu lintas berat.

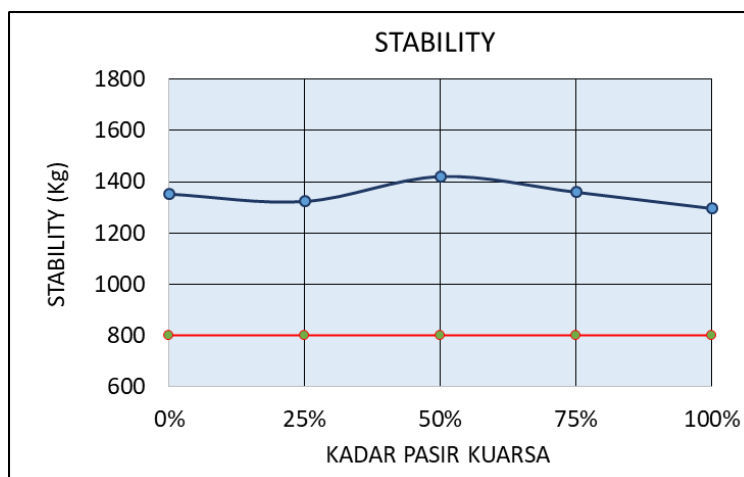
Table 4. Hasil pengujian marshall variasi pasir kuarsa limba PDAM

Substitusi pasir kuarsa	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)
0%	1.351,96	4,34	313,71	5,10	15,94	68,07
25%	1.322,93	3,61	368,31	3,90	14,88	74,53
50%	1.420,22	4,18	339,55	4,98	15,83	69,18
75%	1.359,15	4,40	308,66	5,40	16,21	70,09
100%	1.295,67	4,65	278,51	5,61	16,39	69,25

a) *Stability*

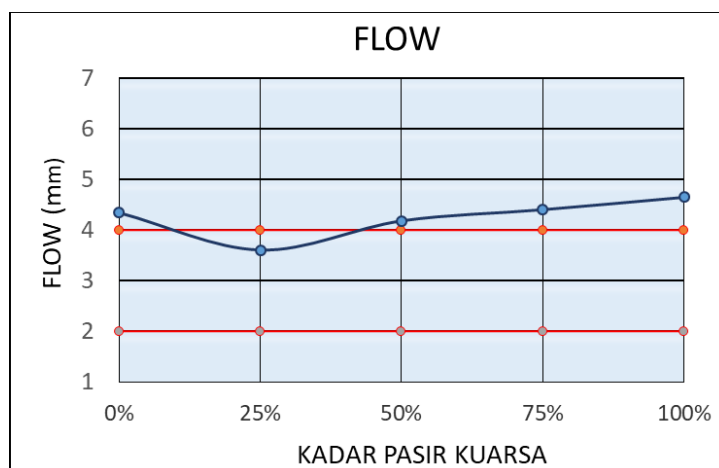
Nilai *stability* pada seluruh variasi substitusi berada pada kisaran 1.295,67–1.420,22 kg. Nilai tertinggi diperoleh pada substitusi 50%, yaitu 1.420,22 kg, sedangkan nilai terendah diperoleh pada substitusi 100%, yaitu 1.295,67 kg. Hasil tersebut menunjukkan

bahwa substitusi pasir kuarsa tidak menyebabkan penurunan stabilitas campuran hingga berada di bawah persyaratan minimum. Peningkatan stabilitas pada substitusi 50% menunjukkan bahwa komposisi *filler* pada tingkat tersebut mampu menghasilkan interaksi agregat dan mastic yang cukup baik. Namun, peningkatan persentase substitusi hingga 100% kembali menurunkan nilai *stability*.



Gambar 1. Grafik *Stability* Variasi pasir kuarsa limbah PDAM Flow

Nilai *flow* berada pada rentang 3,61–4,65 mm. Nilai terendah diperoleh pada substitusi 25%, yaitu 3,61 mm, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi 100%, yaitu 4,65 mm. Perubahan nilai *flow* menunjukkan adanya perubahan deformasi plastis campuran akibat perubahan komposisi *filler*. Pada substitusi 25%, nilai *flow* berada pada kondisi yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya, sehingga campuran menunjukkan deformasi yang lebih terkendali. Sebaliknya, peningkatan *flow* pada substitusi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa campuran mengalami deformasi yang lebih besar ketika menerima pembebanan.

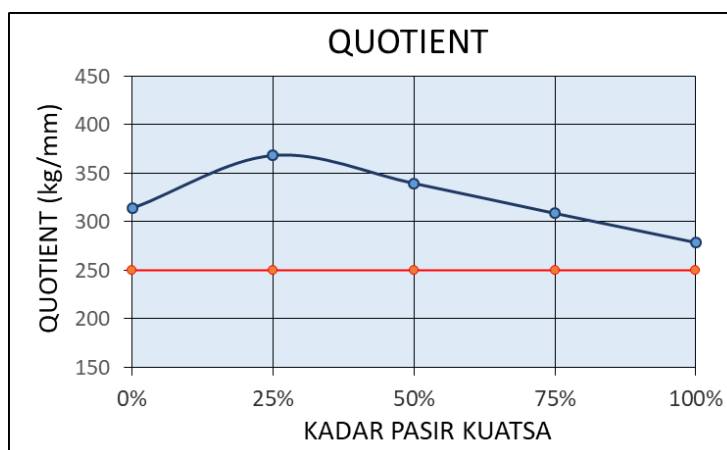


Gambar 2. Grafik *Flow* Variasi pasir kuarsa limbah PDAM

b) *Marshall Quontien (MQ)*

Nilai MQ yang diperoleh berada pada rentang 278,51–368,31 kg/mm. Nilai tertinggi terdapat pada substitusi 25%, yaitu 368,31 kg/mm, sedangkan nilai terendah terdapat pada substitusi 100%, yaitu 28,51 kg/mm. Nilai MQ merupakan perbandingan antara *stability*

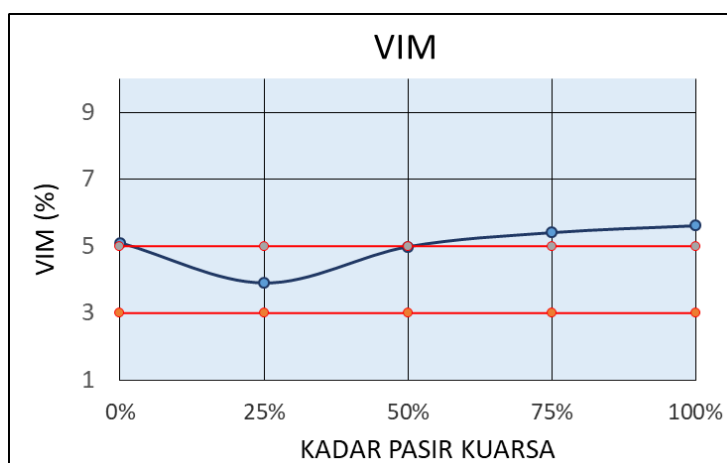
dan flow sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan tingkat kekakuan campuran. Nilai MQ yang lebih tinggi menunjukkan kombinasi antara stabilitas yang tinggi dan *flow* yang relatif rendah. Berdasarkan hasil penelitian, substitusi 25% menghasilkan nilai MQ tertinggi sehingga menunjukkan kombinasi parameter mekanis yang paling baik dibandingkan variasi lainnya.



Gambar 3. Grafik *Quotient* Variasi pasir kuarsa limbah PDAM

c) VIM

Nilai VIM menunjukkan jumlah rongga udara yang terdapat dalam campuran setelah pemadatan. Berdasarkan hasil pengujian, nilai VIM berturut-turut sebesar 5,10%; 3,90%; 4,98%; 5,40%; dan 5,61% untuk substitusi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Substitusi 25% menghasilkan nilai VIM sebesar 3,90%, sedangkan substitusi 50% menghasilkan nilai 4,98%. Kedua variasi tersebut berada dalam rentang persyaratan VIM yang digunakan dalam penelitian. Sementara itu, nilai VIM pada substitusi 0%, 75%, dan 100% berada di atas batas maksimum 5%. Hal ini menunjukkan bahwa proporsi pasir kuarsa yang terlalu tinggi belum menghasilkan susunan partikel yang optimal sehingga rongga udara campuran cenderung meningkat.

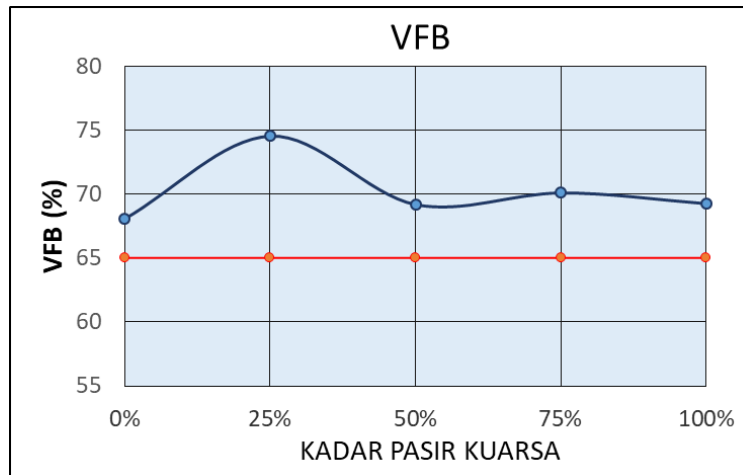


Gambar 4. Grafik VIM Variasi pasir kuarsa limbah PDAM

d) VFB

Nilai VFB pada seluruh variasi berada di atas batas minimum 65%. Nilai VFB berturut-turut adalah 68,07%; 74,53%; 69,18%; 70,09%; dan 69,25%. Nilai tertinggi diperoleh pada

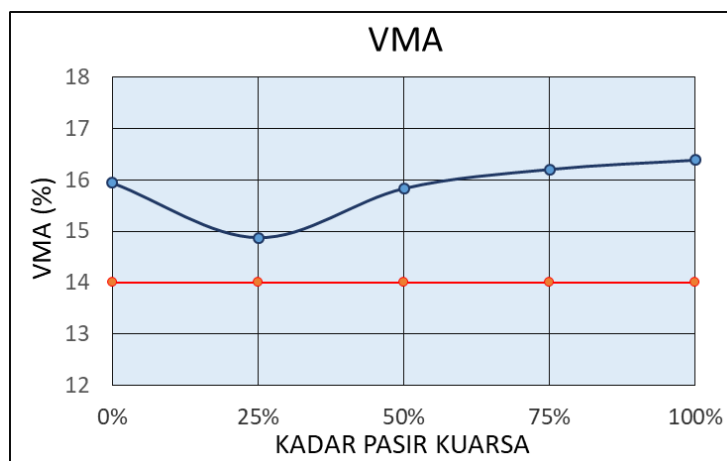
substitusi 25%, yaitu 74,53%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar substitusi tersebut rongga di antara agregat dapat terisi oleh aspal secara lebih efektif. Seluruh variasi menunjukkan nilai VFB yang memenuhi persyaratan, sehingga substitusi pasir kuarsa masih mampu menghasilkan tingkat pengisian rongga oleh aspal yang memadai.



Gambar 5. Grafik VFB Variasi pasir kuarsa limbah PDAM

e) VMA

Nilai VMA yang diperoleh berkisar antara 14,88–16,39%. Nilai terendah terdapat pada substitusi 25%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi 100%. Seluruh variasi memiliki nilai VMA di atas batas minimum 14%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa campuran masih memiliki ruang yang cukup di antara butiran agregat untuk menampung aspal efektif. Perubahan nilai VMA seiring meningkatnya persentase substitusi menunjukkan bahwa perubahan karakteristik filler pasir kuarsa memengaruhi susunan dan volume rongga antarbutir agregat.



Gambar 6. Grafik VMA Variasi pasir kuarsa limbah PDAM

Pengaruh Substitusi Pasir Kuarsa terhadap Karakteristik *Marshall*

Secara keseluruhan, penggunaan pasir kuarsa limbah PDAM sebagai substitusi filler memberikan perubahan terhadap karakteristik mekanis dan volumetrik campuran AC-BC. Nilai *stability* tertinggi diperoleh pada substitusi 50%, sedangkan nilai MQ tertinggi diperoleh pada substitusi 25%. Pada parameter volumetrik, substitusi 25% menghasilkan VIM sebesar

3,90%, VMA sebesar 14,88%, dan VFB sebesar 74,53%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan persentase pasir kuarsa menyebabkan perubahan interaksi antara *filler*, aspal, dan agregat. Pada kadar substitusi tertentu, pasir kuarsa dapat mengisi rongga campuran secara lebih efektif dan membentuk mastic yang menghasilkan karakteristik mekanis dan volumetrik yang lebih sesuai. Namun, peningkatan substitusi hingga 75% dan 100% menyebabkan nilai VIM meningkat sehingga sebagian parameter campuran tidak lagi berada dalam rentang persyaratan yang ditetapkan.

Berdasarkan evaluasi seluruh parameter Marshall, substitusi 25% pasir kuarsa limbah PDAM memberikan kombinasi nilai yang memenuhi kriteria teknis secara paling konsisten. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemanfaatan pasir kuarsa limbah PDAM dapat menjadi alternatif bahan substitusi *filler* pada campuran AC-BC, dengan tetap memperhatikan proporsi penggunaannya (Xu et al., 2025).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pasir kuarsa limbah PDAM berpotensi digunakan sebagai substitusi filler pada campuran *Asphalt Concrete–Binder Course* (AC-BC) dengan memperhatikan proporsi penggunaannya. Pada kadar aspal optimum sebesar 5,6%, substitusi 25% menghasilkan kombinasi karakteristik Marshall paling baik di antara variasi yang diuji, dengan stabilitas sebesar 1.322,93 kg, flow 3,61 mm, Marshall Quotient 368,31 kg/mm, VIM 3,90%, VMA 14,88%, dan VFB 74,53%. Meskipun substitusi 50% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 1.420,22 kg, variasi tersebut tidak memberikan kombinasi parameter sebaik substitusi 25%. Sementara itu, substitusi 75% dan 100% menghasilkan VIM yang melampaui batas maksimum 5% yang digunakan dalam penelitian. Dengan demikian, substitusi 25% merupakan proporsi yang paling direkomendasikan berdasarkan hasil pengujian Marshall dalam penelitian ini, sedangkan kelayakan untuk penerapan di lapangan masih memerlukan pengujian lanjutan.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan interval substitusi yang lebih rapat di sekitar 25% serta menentukan kadar aspal optimum untuk setiap variasi substitusi agar komposisi campuran dapat dioptimalkan secara lebih akurat. Jumlah benda uji dan pengulangan pengujian perlu ditingkatkan serta dilengkapi analisis statistik untuk menilai konsistensi hasil dan perbedaan antarvariasi. Karakterisasi fisik, kimia, dan mineralogi pasir kuarsa limbah PDAM dari beberapa sumber juga diperlukan untuk mengetahui pengaruh variasi material terhadap kinerja campuran. Selain itu, pengujian ketahanan terhadap kelembapan, deformasi permanen, kelelahan, dan penuaan aspal, disertai validasi lapangan serta kajian biaya dan dampak lingkungan, diperlukan untuk menilai kelayakan teknis, ekonomis, dan lingkungan sebelum material ini digunakan secara lebih luas.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Marthen Luter Tjatjawi: konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, pelaksanaan eksperimen, pengumpulan data, analisis data, penyusunan manuskrip, dan revisi manuskrip. Sudarno dan Reiner Willsen Tampi: supervisi penelitian, validasi hasil penelitian, pemberian masukan ilmiah, serta peninjauan dan revisi manuskrip. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa, memperbaiki tata bahasa, dan menyempurnakan struktur penulisan. AI generatif tidak digunakan untuk menghasilkan, memanipulasi, atau menganalisis data penelitian. Seluruh isi manuskrip telah ditinjau dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas keakuratan, integritas, dan isi akhir manuskrip.

REFERENSI

- Akbar, S. J., Wesli, & Widari, L. A. (2019). Penggunaan Abu Batu Karang sebagai Filler dan Pasir Besi sebagai Agregat Halus terhadap Parameter Marshall pada Campuran Aspal AC-BC. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*. <https://doi.org/10.29103/tj.v9i2.253>
- Amirkhani, M. J., Fakhri, M., & Amirkhani, A. (2023). Evaluating the use of different fillers and Kaowax additive in warm mix asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02489>
- Bitumen, S. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*.
- Camargo-Perez, R., Moreno-Navarro, F., Alvarez, A. E., Walubita, L. F., & Fuentes, L. (2024). Influence of recycled rice husk ash filler on the mechanical performance of asphalt mixtures: A mortar scale analysis. *Construction and Building Materials*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134832>
- Heydari, S., Hajimohammadi, A., Haji Seyed Javadi, N., & Khalili, N. (2021). The use of plastic waste in asphalt: A critical review on asphalt mix design and Marshall properties. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125185>
- Hidayat, & Zulkarnain. (2023). *Teknologi Warm Mix Asphalt (WMA)*.
- Jaya. (2019). *Pengkajian Penggunaan Pasir Alam Berbutir Halus sebagai Substitusi Filler pada Campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)*.
- Khan, D., Khan, R., Khan, M. T., Alam, M., & Hassan, T. (2023). Performance of hot-mix asphalt using polymer-modified bitumen and marble dust as a filler. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10, 385–398. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.002>
- Li, F., Zhao, X., & Zhang, X. (2023). Utilizing original and activated coal gangue wastes as alternative mineral fillers in asphalt binder: Perspectives of rheological properties and asphalt-filler interaction ability. *Construction and Building Materials*, 365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130069>
- Li, H., Liang, Y., Yang, Y., Xia, Y., Xie, X., & He, Z. (2025). Characterization and

- performance evaluation of asphalt mastics modified with recycled concrete powder. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141039>
- Lin, J., Guo, Z., Hong, B., Xu, J., Fan, Z., Lu, G., Wang, D., & Oeser, M. (2022). Using recycled waste glass fiber reinforced polymer (GFRP) as filler to improve the performance of asphalt mastics. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130357>
- Ming, N. C., Jaya, R. P., Awang, H., Ing, N. L. S., Hasan, M. R. M., & Al-Saffar, Z. H. (2022). Performance of glass powder as bitumen modifier in hot mix asphalt. *Physics and Chemistry of the Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103263>
- Neduri, P., Sahithi, G., Golla, S. Y., Preethi, S., Ramya, G., & Anuhya, D. (2021). Strength evaluation of glass powder impregnated asphalt mix. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.506>
- Niu, D., Xie, X., Zhang, Z., Niu, Y., & Yang, Z. (2021). Influence of binary waste mixtures on road performance of asphalt and asphalt mixture. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126842>
- Osuolale, O. M., Arinkoola, A. O., & Olawuyi, O. A. (2023). Performance evaluation of bamboo leaf ash and steel slag powder as alternative filler in asphaltic mixes. *Journal of Engineering Research*, 11, 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100117>
- Putra. (2022). *Proses oksidasi dan penuaan aspal*.
- Ramli. (2021). Pengaruh Filler Mineral terhadap Titik Lembek Campuran Aspal Beton. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*.
- Russo, F., Veropalumbo, R., Pontoni, L., Oreto, C., Biancardo, S. A., Viscione, N., Pirozzi, F., & Race, M. (2022). Sustainable asphalt mastics made up recycling waste as filler. *Journal of Environmental Management*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113826>
- Xu, J., Chen, Z., Zou, F., Leng, Z., Fan, Z., Lu, G., & Wang, D. (2025). Recycling solid wastes into asphalt mastics for low-carbon pavements: Performance investigation and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, 530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146851>
- Zhao, G., Hu, K., Du, X., Tao, X., & Chen, D. (2025). An accelerated carbonization approach to prepare wasted concrete powder based artificial aggregates for sustainable asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140114>