

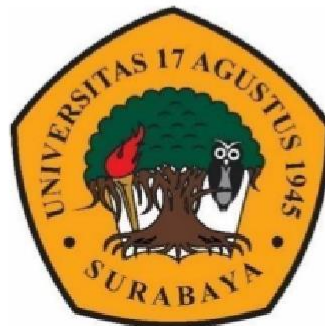
1776049120911_untuk turnitin ta.pdf

By Turnitin

57

TUGAS AKHIR

PEMANFAATAN LIMBAH ABU KAIN KATUN SEBAGAI FILLER PADA CAMPURAN ASPAL PORUS DENGAN METODE MARSHALL



Disusun Oleh :

DICKY DWI FIRMANSYAH

1432200046

66

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS 17 AGUSTUS 1945 SURABAYA
2026**

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

96

Kerusakan pada jalan di Indonesia banyak dipengaruhi oleh faktor iklim tropis dengan intensitas curah hujan yang sangat tinggi. Air hujan yang tidak segera mengalir ke saluran drainase akan membentuk genangan di permukaan jalan. Genangan air ini mempercepat proses oksidasi dan stripping pada aspal, serta memperburuk deformasi plastis pada lapisan perkerasan. Akibatnya, umur rencana jalan yang seharusnya 10–20 tahun sering kali tidak tercapai. Selain itu, genangan air berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan lalu lintas seperti aquaplaning yang menyebabkan kendaraan kehilangan kendali (Muhamad Gunawan Perdana, 2023).

Perkerasan pada jalan di Indonesia terdiri dari perkerasan kaku, perkerasan lentur, dan perkerasan komposit. Beton digunakan pada perkerasan kaku, sedangkan aspal berfungsi sebagai pengikat pada perkerasan lentur. Dengan semakin meningkatnya volume kendaraan, tuntutan terhadap kualitas perkerasan jalan juga semakin tinggi, terutama dari aspek kenyamanan, keamanan, dan keberlanjutan lingkungan. Salah satu inovasi yang mulai banyak digunakan yaitu aspal porus, adalah campuran beraspal yang memiliki rongga udara cukup besar sehingga memungkinkan air hujan meresap ke dalam lapisan dan mengurangi genangan di permukaan jalan (Sultani, 2022).

Aspal porus memiliki keunggulan dalam meningkatkan keselamatan lalu lintas, mengurangi kebisingan, serta menjaga permukaan jalan tetap kering. Dengan porositas tinggi, air hujan dapat meresap ke dalam lapisan dan dialirkan ke saluran drainase. Namun demikian, aspal porus juga memiliki kelemahan, antara lain kecenderungan terjadinya *draindown* (keluarnya aspal dari campuran saat pencampuran dan pemadatan), serta rendahnya ketahanan terhadap kerusakan mekanis seperti ravelling (Wu. M., Zhao, Q, 2022).

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, banyak penelitian yang memanfaatkan penambahan serat (*fiber*) ke dalam campuran aspal. Serat berfungsi untuk menahan aspal agar tidak keluar dari campuran, meningkatkan stabilitas, serta memperbaiki sifat-sifat mekanisnya. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa serat dari berbagai sumber, baik alami maupun sintesis, mampu memperbaiki sifat teknis pada aspal porus (Shafaatian, 2020).

Di sisi lain, Indonesia menghadapi permasalahan lingkungan akibat meningkatnya limbah tekstil, khususnya kain katun yang berasal dari industri garmen, konveksi, maupun rumah tangga. Limbah ini biasanya hanya dibuang atau dibakar sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan. Padahal, kain katun masih memiliki kandungan serat alami maupun *sintetis* yang cukup kuat dan fleksibel, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material tambahan dalam konstruksi jalan. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan 0,3% serat tekstil daur ulang pada campuran *Stone Mastic Asphalt* mampu mengurangi *draindown* sekaligus mempertahankan stabilitas *Marshall*. Hal ini membuktikan bahwa serat tekstil daur ulang dapat berfungsi sebagai pengikat tambahan yang efektif dalam campuran beraspal (Zhang 2022).

Perkembangan teknologi aspal porus terus mengalami peningkatan seiring dengan tuntutan terhadap sistem perkerasan jalan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Aspal porus menjadi solusi efektif dalam mengatasi genangan air di permukaan jalan sekaligus meningkatkan keselamatan pengguna jalan. Selain itu, lapisan aspal porus juga memiliki kemampuan mereduksi kebisingan lalu lintas serta menjaga suhu permukaan jalan agar tidak terlalu tinggi pada siang hari, yang berkontribusi terhadap pengurangan efek pulau panas di area perkotaan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan aspal porus dengan kadar rongga udara sekitar 18–22% mampu meningkatkan daya serap air hingga 80% dibanding aspal konvensional, serta menurunkan tingkat kebisingan hingga 4–5 dB pada kecepatan kendaraan 60 km/jam. Hasil ini memperkuat potensi aspal porus sebagai inovasi material perkerasan jalan berperforma tinggi di negara beriklim tropis seperti Indonesia (Zhou, 2023).

Selain dari segi mekanis dan hidrologis, penelitian terkini menyoroti potensi penerapan aspal porus di wilayah tropis dengan karakteristik tanah yang bervariasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi agregat lokal dengan aspal porus bergradasi terbuka mampu meningkatkan permeabilitas tinggi (0,18–0,26 cm/s) dan nilai stabilitas yang masih sesuai dengan ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2, menjadikannya layak digunakan pada jalan lingkungan dan kawasan permukiman. Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan formulasi desain yang tepat, aspal porus tidak hanya berfungsi sebagai lapisan drainase, tetapi juga sebagai solusi berkelanjutan untuk infrastruktur jalan di Indonesia (Kusumawardani, 2024).

Selain itu, meneliti penggunaan serat *lignin* dan *basalt* pada *Porous Friction Course* (PFC). Hasil penelitian menunjukkan peningkatan ketahanan

campuran terhadap kelembaban serta deformasi permanen. Hal ini memperkuat bukti bahwa penambahan serat, termasuk limbah tekstil, dapat mengatasi kelemahan dari aspal porus (Wu. M., Zhao, J 2022).

Diperkirakan di Indonesia menghasilkan sekitar ± 167 juta ton pada limbah tekstil per tahunnya, dan sebagian besar masih berakhir di tempat penampungan akhir (TPA) atau dibakar jika tidak ditangani secara sirkular. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (KLHK) melaporkan bahwa limbah tekstil menyumbang 2,6% dari total sampah nasional pada tahun 2022, atau sekitar 751 ribu ton per tahun. Proyeksi dari Bappenas menunjukkan tren yang mengkhawatirkan: diprediksi pada 2030, volume limbah tekstil bisa mencapai $\pm 3,9$ juta ton per tahunnya.

Penelitian nasional terbaru, menunjukkan potensi besar limbah *non-konvensional* sebagai bahan tambahan aspal. Pemanfaatan limbah spons sandal EVA sebagai bahan tambah dalam memodifikasi karakteristik campuran aspal. Hasilnya menunjukkan bahwa limbah EVA dapat meningkatkan stabilitas *Marshall*, memperbaiki kelekatan aspal-agregat, serta menurunkan nilai *flow* berlebih tanpa menurunkan *fleksibilitas* campuran. Studi ini menegaskan bahwa penggunaan limbah polimer dan tekstil sebagai bahan *aditif* pada aspal dapat mendukung konsep jalan berkelanjutan di Indonesia (Rizkiardi & Nurani, 2025).

Penelitian dalam kajiannya menyebutkan bahwa meskipun penelitian penggunaan serat sudah banyak dilakukan, pemanfaatan limbah tekstil, khususnya kain katun, masih sangat terbatas. Padahal, penerapan limbah tekstil ini memiliki potensi besar untuk memperbaiki sifat campuran aspal porus sekaligus mengurangi pencemaran lingkungan. Penelitian, juga menegaskan bahwa aplikasi *waste fiber* dalam campuran beraspal masih jarang dieksplorasi, terutama untuk aplikasi pada lapisan berpori. Dengan demikian, limbah kain katun sebagai salah satu bentuk *waste fiber* menjadi kandidat potensial yang layak diteliti lebih lanjut (Shafaatian & Salvo 2020).

Kain katun berbasis serat alami seperti katun memiliki kandungan utama berupa selulosa ($\pm 88-96\%$), hemiselulosa ($\pm 20\%$), serta lignin dalam jumlah kecil. Kandungan selulosa ini memberikan sifat kekuatan tarik, fleksibilitas, serta adhesi yang baik dengan pengikat aspal (Rachman & Sari, 2023). Berdasarkan penelitian Nanokristal Selulosa dari Katun Pasca konsumen, serat katun pasca konsumsi masih mengandung selulosa kristalin yang stabil. Setelah melalui proses pembakaran, serat katun dapat menghasilkan abu dengan kandungan *silika*, *kalsium oksida*, dan *magnesium oksida* yang

berpotensi meningkatkan interaksi kimia dengan aspal. *Mineral-mineral* tersebut berfungsi sebagai pengikat tambahan sehingga dapat meningkatkan stabilitas *Marshall* dan memperbaiki ketahanan campuran terhadap kerusakan mekanis. Kain katun berbasis serat alami memiliki kandungan utama berupa *selulosa* (60–80%), disertai *hemiselulosa* ($\pm 20\%$) dan *lignin* (5–20%). Kandungan selulosa ini memberikan sifat kekuatan tarik, *fleksibilitas*, serta adhesi yang baik dengan pengikat aspal. Oleh karena itu, kain katun berpotensi meningkatkan daya ikat aspal terhadap agregat dalam campuran aspal porus (Noviarti Rachman, 2020).

Selain itu, kain tekstil juga banyak mengandung serat sintetis seperti *polyester* (PET), *poliamida* (*nylon*) dan katun. *Polyester* memiliki stabilitas termal yang baik, tahan terhadap kelembaban, serta mampu meningkatkan ketahanan aus pada material komposit. *Nylon*, di sisi lain, memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, sehingga mampu memperbaiki ketahanan deformasi permanen. Karakteristik ini menjadikan kain katun berbasis *sintetis* sebagai kandidat penguat aspal porus yang rentan terhadap *ravelling*. (Shafaatian, 2020) penelitian laboratorium terbaru menunjukkan bahwa limbah tekstil *polyester* memiliki komposisi kimia dominan berupa karbon (C) $\pm 83\%$, oksigen (O) $\pm 12\%$, serta unsur minor lain seperti *sulfur* (S), *silikon* (Si), dan *zinc* (Zn) (Fe). Dominasi karbon membuat *polyester* bersifat *hidrofobik* dan stabil pada suhu tinggi, sehingga dapat berfungsi sebagai bahan penguat pada campuran aspal untuk meningkatkan ketahanan terhadap (Zhang, 2022).

Hasil *uji termal* (TGA) juga menunjukkan bahwa serat *polyester* mampu bertahan hingga suhu $\pm 400^\circ\text{C}$ sebelum terdegradasi, sedangkan katun mulai mengalami degradasi pada suhu $\pm 250^\circ\text{C}$. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jenis serat pada kain katun akan memengaruhi kinerja campuran aspal, khususnya saat proses pencampuran di suhu tinggi (Wu. M., Zhao, J, 2022).

Di Indonesia sendiri, sebagian besar penelitian modifikasi aspal masih berfokus pada serat alami seperti sabut kelapa atau serat bambu, serta mineral seperti serat baja. Belum banyak penelitian yang secara khusus meneliti pemanfaatan limbah kain katun pada campuran aspal porus penetrasi 60/70. Hal ini menjadi celah penelitian yang perlu diisi untuk memberikan inovasi dalam bidang teknik perkerasan jalan. Penelitian, menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah tekstil atau serat kain katun sebagai bahan tambahan pada campuran aspal porus dapat meningkatkan kohesi antarpartikel agregat serta memperkuat daya ikat antara aspal dan agregat. Serat kain yang memiliki sifat fleksibel dan tahan terhadap tarikan berperan sebagai penguat mikro yang

mampu mengurangi *deformasi plastis* pada lapisan perkerasan. Hasil pengujian *Marshall Stability* menunjukkan adanya peningkatan stabilitas hingga 12–18% dibanding¹⁴³ campuran tanpa serat, serta nilai *Flow* yang tetap berada dalam rentang standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pemanfaatan limbah kain katun pada aspal porus juga sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan (SDGs). Melalui inovasi ini, dua permasalahan besar dapat diatasi sekaligus, yaitu peningkatan kualitas infrastruktur jalan dan pengurangan pencemaran lingkungan akibat limbah tekstil. Dari sisi teknis, penambahan limbah kain perca diharapkan mampu meningkatkan distribusi aspal dalam campuran, memperbaiki *permeabilitas*, serta meningkatkan karakteristik Marshall. Hal ini penting mengingat sifat mekanis campuran beraspal sangat menentukan umur rencana jalan (Zhang, 2022).

Dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah kain katun dapat mengurangi volume sampah tekstil yang berakhir di TPA maupun yang dib²⁷r, sehingga menekan emisi karbon. Jika penelitian ini berhasil, hasilnya dapat menjadi referensi bagi industri jalan dan pemerintah dalam mengembangkan teknologi jalan ramah lingkungan berbasis limbah tekstil (Sultani, 2022).

⁶⁸ Dalam pelaksanaan penelitian ini, digunakan dua acuan utama: Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2 (2018) sebagai referensi nasional untuk desain campuran, pengujian Marshall, dan penetapan kadar aspal optimum, serta (AAPA 2004) sebagai pedoman khusus untuk *porous asphalt* menyediakan standar desain drainase, *draindown*, dan durabilitas yang relevan secara internasional (Angkoso & Fauziah, 2023).

Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, penelitian ini disusun untuk menganalisis dan mengevaluasi peluang pemanfaatan l¹⁵ah abu hasil pembakaran kain katun sebagai material pengisi (*filler*) dalam campuran aspal porus deng³ klasifikasi penetrasi 60/70. Bahan limbah yang digunakan pada penelitian diperoleh dari salah satu rumah produksi yang berlokasi di Jl. Kundi, Desa Kepuhkiriman, Kecamatan Waru, Kota Sidoarjo. Melalui kajian ini, diharapkan dapat¹⁰⁸eroleh alternatif pemanfaatan limbah tekstil, khususnya kain katun, yang selama ini belum tertangani secara optimal, sehi¹⁶⁵ keberadaannya tidak lagi menjadi permasalahan lingkungan. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam mendukung upaya pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan sekaligus meningkatkan nilai guna limbah tekstil kain katun dalam bidang konstruksi perkerasan jalan.

104

1.2 Rumusan Masalah

Menurut latar belakang yang sudah disebutkan diatas, maka perumusan masalah untuk tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pemanfaatan limbah abu kain katun terhadap nilai *permeabilitas* atau kemampuan aspal porus dalam mengalirkan air?
2. Bagaimana karakteristik marshall menggunakan limbah abu kain katun pada campuran aspal porus?
3. Berapa persentase Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran aspal porus dengan menggunakan limbah kain katun?

99

1.3 Tujuan Penelitian

Menurut rumusan masalah diatas, oleh karena itu tujuan tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh yang ditimbulkan akibat penambahan limbah abu kain katun terhadap nilai *permeabilitas* campuran aspal porus, khususnya dalam kemampuan mengalirkan air melalui lapisan.
2. Mengetahui karakteristik Marshall (*stability, flow, VIM, VMA, VFB*) dalam campuran aspal porus dengan penggunaan tambahan limbah abu kain katun.
3. Mengetahui persentase (KAO) Kadar Aspal Optimum dalam campuran aspal porus dengan variasi penambahan limbah abu kain katun.

6

1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga penelitian agar masih tetap merujuk pada topik, maka harus dilakukan beberapa batasan sehingga penelitian dapat dilakukan secara efektif dan tidak keluar pada topik pembahasan, pembatasan tersebut meliputi hal-hal berikut ini:

1. Jenis aspal yaitu aspal porus dengan komposisi agregat bergradasi terbuka dengan porositas tinggi.
2. Penelitian aspal porus difokuskan untuk diterapkan pada jalan dengan an lalu lintas yang ringan, seperti parkir, bahu jalan, dan jalur sepeda.
3. Aspal yang digunakan yaitu Aspal Penetrasi 60/70 sesuai spesifikasi Bina Marga (2018).
4. Pengujian karakteristik campuran hanya difokuskan pada *Permeabilitas* (kemampuan meloloskan air), Karakteristik Marshall (*stability, flow, VIM, VMA, VFB*), Penentuan KAO berdasarkan hasil pengujian Marshall dan syarat spesifikasi.

5. Penelitian tidak membahas aspek durabilitas jangka panjang (keawetan terhadap suhu, siklus basah–kering).
6. Penelitian ini tidak membahas pengaruh faktor eksternal seperti suhu lingkungan, beban lalu lintas, maupun kondisi cuaca terhadap performa campuran aspal
7. Variasi *filler* yaitu: 0%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, dan 1%
8. Penelitian tidak membahas pengaruh metode pembakaran yang berbeda terhadap kualitas dan karakteristik abu kain katun yang dihasilkan.
9. *Filler* yang digunakan terbatas pada kain tekstil jenis katun yang dihasilkan dari proses pembakaran menjadi abu, dihaluskan dengan cara ditumbuk dan proses pengayakan sehingga lolos saringan no. 200 (sesuai standar *filler*)
10. Limbah kain katun didapatkan di rumah produksi Jl. Kundi, Desa Kepuhkiriman, Kecamatan Waru, Kota Sidoarjo.
11. Penelitian ini hanya membahas pengaruh limbah abu kain katun terhadap karakteristik aspal porus menggunakan jenis aspal penetrasi 60/70.
12. Acuan yang digunakan yaitu Bina Marga revisi 2 tahun 2018 dan juga *Australian Asphalt Pavement Association* tahun 2004.
13. Peneliti tidak membahas mengenai tentang anggaran biaya dalam penelitian aspal porus dengan pemanfaatan limbah kain katun.
14. Penelitian aspal porus ini dilakukan di laboratorium bahan jalan pada bidang Transportasi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.

88

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun beberapa manfaat pada penelitian agar bisa menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya, meliputi :

52

1.5.1 Manfaat bagi Mahasiswa

1. Memberikan pengalaman praktis dalam melakukan pengujian material perkerasan jalan, khususnya pada campuran aspal porus dengan penambahan limbah kain katun.
2. Melatih kemampuan analisis data laboratorium untuk menarik kesimpulan ilmiah berdasarkan hasil uji permeabilitas, karakteristik *Marshall*, serta penentuan KAO.
3. Menambah wawasan tentang pemanfaatan limbah tekstil sehingga mahasiswa memiliki pemahaman tentang inovasi material ramah lingkungan dalam bidang teknik sipil.

52

1.5.2 Manfaat bagi Instansi

1. Memberikan informasi teknis mengenai pemanfaatan limbah abu kain katun sebagai bahan tambahan dalam campuran aspal porus yang dapat dijadikan alternatif dalam perencanaan perkerasan jalan.
2. Menjadi bahan pertimbangan bagi instansi terkait (seperti dinas pekerjaan umum atau kontraktor) dalam mengembangkan inovasi material pada perkerasan jalan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.²⁴
3. Menyediakan data hasil pengujian laboratorium (Permeabilitas, Karakteristik Marshall, dan Kadar Aspal Optimum) yang dapat digunakan sebagai referensi awal dalam penerapan di lapangan.

1.5.3 Manfaat bagi Institusi Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

1. Memberikan kontribusi berupa penelitian terapan yang dapat menjadi referensi dalam pengembangan ilmu di bidang perkerasan jalan.
2. Menambah koleksi karya ilmiah di perpustakaan universitas, khususnya terkait pemanfaatan limbah kain katun dalam bidang transportasi tentang aspal porus.
3. Mendukung visi Universitas dalam menghasilkan penelitian yang relevan dengan isu lingkungan, keberlanjutan, dan pengelolaan limbah industri tekstil.

1.5.4 Manfaat bagi Penelitian Selanjutnya

1. Menjadi dasar acuan untuk penelitian lanjutan mengenai pemanfaatan limbah tekstil atau serat lain dalam campuran aspal, baik pada aspal porus maupun jenis perkerasan lainnya.
2. Memberikan data awal mengenai pengaruh penambahan kain katun terhadap Permeabilitas, Karakteristik *Marshall*, dan Kadar Aspal Optimum.
3. Menjadi pijakan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut seperti uji ketahanan jangka panjang, analisis siklus hidup (*life cycle assessment*), ataupun aspek ekonomi penggunaan limbah kain katun pada material jalan.

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam sebuah penelitian, telaah terhadap literatur yang relevan menjadi langkah penting untuk membangun landasan teori sekaligus menentukan arah metodologi yang tepat. Analisis atas hasil-hasil penelitian sebelumnya berfungsi sebagai pijakan dalam memahami metode, temuan, serta keterbatasan studi yang telah ada. Dengan demikian, dapat diidentifikasi ruang penelitian yang belum banyak dieksplorasi dan berpotensi memberikan kontribusi baru. Pada penelitian ini, yang menitikberatkan pada pemanfaatan limbah abu kain katun sebagai filler pada campuran aspal porus dengan metode marshall, kajian literatur berperan untuk menilai sejauh mana material limbah kain katun yang telah diuji sebagai filler pada teknologi perkerasan jalan. Melalui penelusuran tersebut, penulis dapat menyusun pendekatan yang lebih tepat sekaligus menilai potensi inovasi penggunaan limbah abu kain katun, terutama dalam meningkatkan fungsi drainase serta daya ikat aspal pada lapisan perkerasan terbuka. Berikut ini disajikan beberapa penelitian terdahulu yang menjadi acuan:

1. Pengaruh Pemanfaatan Limbah PET plastik sebagai Substitusi Agregat pada Aspal Berpori (Muhammad Dony Maulana, 2024).

Hasil penelitian:

- Penelitian ini mengevaluasi pemanfaatan limbah plastik PET sebagai pengganti agregat pada campuran aspal berpori.
- Uji Marshall, Cantabro loss, dan permeabilitas dilakukan untuk menilai kinerja campuran.
- Hasil menunjukkan bahwa substitusi PET 10–30% meningkatkan stabilitas dan flow.
- Namun, ada kadar PET 20–30%, nilai rongga udara dan permeabilitas tidak memenuhi standar AAPA.

2. *Evaluation of Marshall stability in porous asphalt mixtures incorporating oyster shell ash as a filler substitute and high-density polyethylene* (Hafnidar A. Rani, 2023).

Hasil penelitian:

- Abu cangkang tiram (*Oyster Shell Ash/OSA*) diuji sebagai substitusi

- filler, dipadukan dengan *Portland Cement* (PC) dan tambahan polimer
- Variasi kadar HDPE (4%–6%) dan kombinasi filler (OSA + PC) diuji dengan met²⁶: Marshall.
 - Kombinasi 50% OSA + 50% PC dengan 4–6% HDPE menghasilkan peningkatan *stabilitas Marshall* yang signifikan.
 - Pemanfaatan abu cangkang tiram dapat mengurangi ketergantungan pada filler konvensional, serta meningkatkan sifat mekanis aspal porus.

54

3. *Analysis of the behavior of porous asphalt pavement utilizing rubber and plastic waste as additives* (Hery Awan Susanto, 2023).

Hasil penelitian:

- Mengkaji kombinasi limbah ban (*crumb rubber*) dan plastik sebagai bahan tambahan pada aspal porus.
- Variasi komposisi *crumb rubber* 2–4% dan plastik 3–5% digunakan untuk melihat pengaruhnya terhadap karakteristik *Marshall* dan drainase.
- Nilai stabilitas meningkat hingga 18% dibanding campuran konvensional, sementara flow tetap dalam batas wajar (2,8–4,0 mm).
- VIM sedikit menurun dengan penambahan bahan limbah, namun masih memenuhi syarat 18–25%.

4. *Studi Eksperimental Campuran Aspal Porus dengan Limbah Plastik PP menggunakan Asbuton Modifikasi* (Jamallul Iksan, 2023).

Hasil penelitian:

- Penelitian ini menggunakan limbah plastik *polypropylene* (PP) yang dipadukan dengan asbuton modifikasi. Variasi kadar aspal 5%–7% diuji dengan metode Marshall.
- Kadar aspal optimum diperoleh pada 6–6,5%.
- Pada kondisi ini, stabilitas mencapai 1415–1611 kg dengan nilai *Marshall Quotient* yang memenuhi standar.
- Limbah plastik PP terbukti mampu meningkatkan kinerja campuran sekaligus mendukung pengelolaan limbah plastik.

5. Analisis (KAO) pada Aspal Porus menggunakan Aspal PG-76 dan Serat Selulosa (Muhammad Gunawan Perdana, Pratikso, dan Rachmat Mudiyo, 2023).

Hasil penelitian:

- Penelitian ini menentukan (KAO) alam campuran aspal porus yang dimodifikasi menggunakan serat selulosa sebagai bahan tambahan. Serat selulosa membantu meningkatkan daya ikat aspal terhadap agregat dan mengurangi ¹⁹ *drain-down*.
 - Pengujian dilakukan menggunakan metode *Marshall* dengan variasi ¹²⁵ *aspal* 4,5%–6,5%.
 - Hasil pengujian menunjukkan ¹⁸ *adar aspal optimum* berada pada 5,8% dengan *nilai stabilitas* 920,7 kg dan *flow* 3,4 mm.
 - Nilai porositas (VIM) yang dihasilkan sebesar 19,6%, masih dalam kisaran standar 18–25%.
- ¹⁹
6. Analisis karakteristik campuran aspal porus dengan pemanfaatan limbah plastik PET sebagai material tambahan (Muhammad Isfan Arif, 2023).
Hasil penelitian:
 - PET digunakan sebagai bahan tambah dalam aspal porus, diuji dengan *Marshall*, *CL*, dan AFD.
 - Hasil penelitian menghasilkan penambahan PET bisa meningkatkan stabilitas, kepadatan, *Marshall Quotient*, dan VFA.
 - Kadar optimum berada di bawah 5%, dengan hasil terbaik pada variasi rendah.
 - Hal ini membuktikan bahwa PET efektif meningkatkan performa campuran, selama digunakan dalam jumlah terbatas.
 7. Pengaruh Penambahan pada Limbah Botol PET plastik sebagai Substitusi Aspal Porus Pen 60/70 (Zukisa, 2023).
Hasil ¹¹⁴ penelitian:
 - PET digunakan sebagai bahan substitusi dalam campuran *aspal penetrasi 60/70* dengan variasi 0%, 1%, 3%, dan 5%.
 - Hasil uji *Marshall* menunjukkan bahwa kadar PET 1% memberikan hasil paling baik.
 - Pada kondisi tersebut, stabilitas tercatat sebesar 1004,65 kg dengan *Marshall Quotient* sebesar 374,26 kg/mm.
 - Seluruh hasil memenuhi standar AAPA, sehingga PET dalam kadar ⁴¹ kecil efektif meningkatkan kinerja campuran.
 8. Penggunaan Serbuk Tegel Sebagai Substitusi *Filler* pada Perkerasan Aspal Porus (Erdin Mamata, 2022).
Hasil penelitian:

- Limbah tegel yang digiling menjadi serbuk digunakan sebagai *filler* substitusi pada aspal porus.
- Pengujian dilakukan dengan metode *Marshall* dan uji *Cantabro Loss* untuk menilai ketahanan aus.
- Hasil terbaik diperoleh pada penggunaan filler serbuk tegel sebesar 50%.
- Pada komposisi ini, keausan mencapai nilai terkecil 2,562%, sekaligus stabilitas campuran meningkat.
- Semua hasil memenuhi standar REAM (2008), sehingga serbuk tegel dinilai layak sebagai material alternatif.

46

9. *Study Characteristics of Porous Asphalt Using Aggregates from Karangasem with 60/70 Penetration Bitumen* (I Gusti Agung Ananda Putra, 2022).

Hasil penelitian:

63

- Menggunakan agregat dari Karangasem, Bali dengan aspal penetrasi 60/70 untuk menganalisis karakteristik campuran aspal porus.
- Kadar aspal divariasikan antara 4,5% hingga 6,5% untuk menentukan kondisi optimum.
- Nilai VIM sebesar 20,13% masih memenuhi standar 18–25%, menunjukkan campuran memiliki porositas baik.
- Campuran ini dinilai ekonomis dan layak untuk aplikasi jalan lingkungan dan jalan dengan curah hujan tinggi.

10. Pengaruh Limbah Batu Bata Klinker dan Abu Batu Bata sebagai Agregat Kasar dan *Filler* pada Aspal Porus (Sapitri, 2022).

Hasil penelitian:

- Penelitian ini menggunakan batu bata klinker dan abu batu bata sebagai material substitusi agregat kasar sekaligus filler pada campuran aspal porus.
- Uji *Marshall* dilakukan untuk menganalisis parameter *stability*, *flow*, VIM, dan *Marshall Quotient*.
- Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah batu bata dapat meningkatkan performa pada campuran aspal porus dibandingkan dengan campuran konvensional.
- Diperoleh kadar optimum sesuai variasi *filler* dan agregat yang digunakan, menunjukkan bahwa limbah batu bata dapat diolah menjadi material konstruksi ramah lingkungan.

53

14

- 45
11. Pengaruh Penggunaan Limbah Sabut Kelapa sebagai *Filler* terhadap Kinerja Karakteristik *Marshall* pada Campuran Aspal Porus (Sri Gusty, 2022).

Hasil penelitian:

- 45 Penelitian ini menerapkan variasi penggunaan filler yang berasal dari sabut kelapa dengan persentase sebesar 0%, 40%, dan 50% ke dalam campuran aspal porus, sementara kadar aspal yang digunakan dibuat konstan pada nilai 6% untuk setiap variasi campuran, sehingga pengaruh filler dapat diamati secara lebih terfokus.
- Uji *Marshall* mengacu pada SNI dan spesifikasi REAM (2008).
- Hasil terbaik diperoleh pada variasi filler 40%, dengan stabilitas mencapai 824,60 kg (dibandingkan 574,53 kg pada 0%).
- Nilai *Void in Mix* (VIM) pada campuran dengan variasi filler 40% dan 50% masing-masing sebesar 20,06% dan 19,88% telah memenuhi rentang persyaratan yang ditetapkan, yaitu antara 18% hingga 25%, sedangkan campuran dengan variasi filler 0% tidak memenuhi kriteria tersebut.
- *Flow* dan *Marshall Quotient* yang dihasilkan pada variasi filler 40% dan 50% juga berada dalam batas standar yang dipersyaratkan, sehingga kedua variasi tersebut dinilai memiliki kinerja struktural yang lebih baik dibandingkan campuran tanpa penambahan filler sabut kelapa.

- 100
12. Pengaruh Substitusi Styrofoam pada Campuran Aspal Porus dan Serbuk Arang Tempurung Kelapa sebagai *Filler* (Tamalkhani Syammaun, 2020).

Hasil penelitian:

- Penelitian ini mengombinasikan styrofoam sebagai substitusi agregat dengan filler serbuk arang tempurung kelapa.
- Variasi kadar aspal 4,5%–6% diuji dengan metode AAPA.
- Hasil penelitian menunjukkan kadar aspal optimum pada 5,58%.
- Namun, semakin tinggi substitusi styrofoam dan arang kelapa, nilai VIM menurun dan tidak memenuhi standar (18–25%).
- Parameter AFD menurun sesuai spesifikasi ($\leq 0,3\%$), sedangkan nilai permeabilitas campuran tetap berada dalam rentang yang diizinkan, yaitu antara 0,1 hingga 0,5 cm/detik, yang menandakan bahwa kemampuan campuran dalam meloloskan air masih terjaga dengan baik tanpa mengorbankan stabilitas strukturalnya.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	M.Dony Maulana (2024)	Pengaruh Pemanfaatan Limbah PET plastik sebagai Substitusi Agregat pada Aspal Berpori	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Substitusi PET 10–30% meningkatkan stabilitas dan <i>flow</i> . PET 20–30% menyebabkan prongga udara dan permeabilitas tidak sesuai AAPA. Performa optimum PET 10%
2.	Hafnidar A. Rani (2023)	<i>Evaluation of Marshall stability in porous asphalt mixtures incorporating as a substitute</i>	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Kombinasi 50% OSA+ 50% PC menghasilkan stabilitas lebih tinggi dibanding filler tunggal. Dengan tambahan HDPE 4–6%, stabilitas meningkat signifikan, <i>flow</i> tetap dalam standar, dan MQ naik. Hasil pengujian memenuhi persyaratan standar atau spesifikasi AAPA. Menunjukkan adanya potensi pengurangan pada penggunaan <i>filler</i> semen konvensional.
3.	Hery Awan Susanto (2023)	<i>Analysis the behavior of porous asphalt pavement utilizing rubber and plastic waste as additives</i>	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Variasi komposisi <i>crumb rubber</i> 2–4% dan plastik 3–5% digunakan untuk melihat pengaruhnya terhadap karakteristik <i>Marshall</i> dan <i>drainase</i> . Nilai stabilitas meningkat hingga 18% dibanding campuran konvensional, sementara <i>flow</i> tetap dalam batas (2,8–4,0 mm). VIM sedikit menurun dengan penambahan bahan limbah memenuhi syarat VIM yaitu 18–25%.

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

28

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
4.	Jamallul Iksan (2023)	Studi Eksperimental Campuran Aspal Porus dengan Limbah Plastik PP menggunakan Asbuton Modifikasi	Metode Pengujian Marshall	Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa nilai <i>Kadar Aspal Optimum</i> (KAO) berada pada rentang 6–6,5%. Stabilitas 1415–1611 kg, angka ini menunjukkan performa yang sangat baik karena berada jauh di atas batas minimum yang dipersyaratkan dalam spesifikasi AAPA 2004. (MQ) memenuhi standar AAPA 2004. Limbah plastik PP berkontribusi pada peningkatan stabilitas.
5.	Muhammad Gunawan Perdana, Pratikso, dan Rachmat Mudiyo (2023)	Analisis (KAO) pada Aspal Porus menggunakan Aspal PG-76 dan Serat Selulosa	Metode Pengujian Marshall	Penelitian ini bertujuan menentukan kadar aspal optimum pada campuran aspal porus dengan penambahan serat selulosa sebagai bahan pengikat. Pengujian dilakukan menggunakan metode Marshall dengan variasi kadar aspal 4,5%–6,5%. Hasil pengujian menunjukkan kadar aspal optimum berada pada rentang 5,8% dengan nilai stabilitas sebesar 920,7 kg dan 4 mm. Nilai porositas () yang dihasilkan 19,6%, masih kisaran standar Aapa 2004 18–25%. Kombinasi aspal PG-76 dan serat selulosa bisa meningkatkan stabilitas pada campuran aspal porus.

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

28

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
6.	Muhammad Isfan Arif (2023)	Analisis karakteristik campuran aspal porus dengan pemanfaatan limbah PET plastik sebagai material tambahan	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Penambahan material PET ke dalam campuran aspal terbukti memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan nilai stabilitas serta kepadatan campuran. MQ dan VFA meningkat dibanding campuran normal. Berdasarkan dari hasil pengujian, kinerja optimum campuran dicapai pada kadar PET di bawah 5%. Hal ini membuktikan bahwa PET efektif meningkatkan campuran.
7.	Alisa (2023)	Pengaruh Penambahan Limbah Botol Plastik PET sebagai Substitusi Aspal Porus Pen 60/70	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Hasil uji <i>Marshall</i> menunjukkan bahwa kadar PET 1% memberikan hasil paling baik. Pada kadar tersebut, nilai stabilitas mencapai 1004,65 kg, yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran tanpa penambahan PET. <i>Flow</i> tetap dalam batas standar 3–4 mm. <i>Marshall Quotient</i> sebesar 374,26 kg/mm, memenuhi standar spesifikasi yaitu AAPA. Penambahan PET >3% bisa menurunkan kinerja. Secara keseluruhan, seluruh hasil pengujian. <i>Marshall</i> yang diperoleh masih berada pada persyaratan AAPA tahun 2004.

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

28

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
8.	Erdin 41 nata (2022)	Penggunaan Serbuk Tegel Sebagai Substitusi Filler pada Perkerasan Aspal Porus	Metode Pengujian Marshall	Limbah tegel yang digiling menjadi serbuk digunakan sebagai <i>filler</i> substitusi pada aspal porus. Pengujian dilakukan dengan metode <i>Marshall</i> dan uji <i>CL</i> . Serbuk tegel 50% memberikan hasil optimum. Nilai keausan terkecil tercatat yaitu 2,562%, menunjukkan ketahanan aus yang tinggi. Stabilitas pada campuran meningkat dengan substitusi serbuk tegel. Parameter <i>Marshall</i> sesuai pada persyaratan REAM tahun 2008.
9.	I Gusti Agung Ananda Putra (2022)	Study Characteristics of Porous Asphalt Using Aggregates from Karangasem with 60/70 Penetration Bitumen	Metode Pengujian Marshall	Menggunakan agregat lokal 63 i Karangasem, Bali, dengan aspal penetrasi 60/70 untuk menganalisis karakteristik campuran aspal porus. Kadar aspal divariasikan antara 4,5% hingga 6,5% untuk menentukan bahwa kondisi optimum. Hasil 15 penelitian menunjukkan kadar aspal optimum pada 5,5%, dengan stabilitas 805,33 kg dan flow 3,1 mm. Nilai VIM sebesar 20,13% masih memenuhi standar VIM sebesar yaitu 18–25%, menunjukkan campuran memiliki porositas baik sesuai standar yaitu <i>Australian Asphalt Pavement Association</i> tahun (AAPA) 2004.

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

28

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
10.	Sapitri (2022)	Pengaruh Limbah Batu Bata Klinker dan Abu Batu Bata sebagai Agregat Kasar dan Filler pada Aspal Porus	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Penggunaan batu bata klinker untuk agregat kasar dan abu batu bata sebagai <i>filler</i> mampu meningkatkan stabilitas <i>Marshall</i> dibandingkan campuran normal. Nilai <i>flow</i> tetap dalam batas standar yaitu 2–4 mm.
11.	S45 Gusty (2022)	Pengaruh Penggunaan Limbah Sabut Kelapa sebagai <i>Filler</i> terhadap Kinerja Karakteristik <i>Marshall</i> pada Campuran Aspal Porus	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	19 Penelitian ini menggunakan variasi filler sabut kelapa sebesar 0%, 40%, dan 50% pada aspal porus dengan kadar aspal tetap 6%. Uji <i>Marshall</i> mengacu pada SNI dan spesifikasi REAM (2008). <i>Filler</i> 40% memberikan stabilitas tertinggi 824,60 kg (dibanding 574,53 kg tanpa filler). VIM 40% (20,06%) & 50% (19,88%) sesuai standar 18–25%, sementara 0% tidak.
12.	Tamalkhani S1ammaun (2020)	Pengaruh Substitusi Styrofoam pada Campuran Aspal Porus dan Serbuk Arang Tempurung Kelapa sebagai <i>Filler</i>	Metode Pengujian <i>Marshall</i>	Penelitian ini menunjukkan kombinasi styrofoam sebagai substitusi agregat dengan filler serbuk arang tempurung kelapa. Variasi kadar aspal 4,5%–6% diuji dengan metode 1 APA. Hasil KAO 5,58%. Semakin besar styrofoam dan serbuk arang kelapa, nilai VIM menurun dan tidak memenuhi standar 18–25%. Parameter <i>Asphalt Flow Down</i> (AFD) menurun sesuai spesifikasi yaitu ($\leq 0,3\%$).

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

2.2 Aspal

Aspal merupakan material utama yang sering dimanfaatkan dalam pembangunan lapisan perkerasan jalan karena berfungsi sebagai perekat antarbutir agregat pada campuran. Kehadiran aspal pada konstruksi jalan berperan menyatukan seluruh material penyusun sehingga terbentuk lapisan yang kuat, lentur, serta mampu menahan beban kendaraan. Secara visual, aspal umumnya berwarna hitam pekat hingga cokelat gelap, tergantung dari jenis dan sumbernya. Salah satu ciri khas penting dari material ini adalah sifat viskoelastis, yakni kemampuan menunjukkan perilaku elastis sekaligus plastis pada waktu yang bersamaan. Karakteristik tersebut memungkinkan aspal menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan, terutama terhadap suhu maupun tekanan. Pada kondisi panas, aspal akan melunak sehingga mudah diproses dan diterapkan pada permukaan jalan. Sebaliknya, saat suhu rendah, aspal mengeras dan membantu menjaga kestabilan perkerasan. Kepekaan terhadap perubahan temperatur inilah yang membuat aspal sangat krusial dalam desain perkerasan jalan, terutama pada wilayah dengan variasi iklim ekstrem serta lalu lintas padat. Fleksibilitas inilah yang menjadikan aspal tetap dipilih sebagai material utama pada pekerjaan konstruksi jalan raya (Israil,2024). Berdasarkan asalnya, dikategorikan tiga kelompok utama, yaitu:

1. Berdasarkan Sumber/Asal:
 - Aspal Alam: Berasal langsung dari alam, contohnya aspal buton (*Asbuton*) dari Sulawesi Tenggara.
 - Aspal Buatan: Aspal berbasis minyak bumi hasil penyulingan industri, seperti aspal keras penetrasi 60/70.
2. Berdasarkan Bentuk dan Konsistensi:
 - Aspal Keras (*Bitumen Padat*): Tingkat kekerasan tinggi, umum untuk campuran hotmix jalan raya.
 - Aspal Cair (*Cutback Asphalt*): Campuran aspal keras dengan pelarut minyak, digunakan untuk pelapisan dingin.
 - Aspal Emulsi: Aspal keras yang didistribusikan ke dalam air dengan bantuan bahan pengemulsi, lebih ramah lingkungan dan mudah digunakan.
3. Berdasarkan Metode/Suhu Aplikasi:
 - *Hot Mix Asphalt* (HMA): Campuran agregat dan aspal panas, standar konstruksi jalan raya.
 - *Warm Mix Asphalt* (WMA): Diproduksi pada suhu lebih rendah dari HMA, lebih hemat energi.
 - *Cold Mix Asphalt* (CMA): Aspal dingin, cocok untuk perbaikan jalan cepat atau tambalan.

4. Berdasarkan Fungsionalitas/Campuran Khusus:
 - Aspal Modifikasi (*Polimer*): Aspal yang dicampur bahan polimer/karet untuk meningkatkan elastisitas dan ketahanan.
 - *Porous Asphalt*: Aspal berpori yang dirancang khusus untuk drainase air agar tidak terjadi genangan.
 - *Recycled Asphalt Pavement* (RAP): Aspal lama yang diproses ulang untuk digunakan kembali.
5. Berdasarkan Lapisan Perkerasan:
 - AC-WC (*Asphalt Concrete-Wearing Course*): Lapisan aus permukaan teratas, bertekstur halus.
 - AC-BC (*Asphalt Concrete-Binder Course*): Lapisan pengikat di bawah lapisan aus.
 - AC-Base (*Asphalt Concrete-Base Course*): Lapisan pondasi atas campuran aspal

6

2.2.1 Jenis Aspal

(Sukirman, 2016) mengatakan Aspal dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama berdasarkan asalnya, yaitu aspal yang terbentuk secara alami dan aspal hasil pengolahan minyak bumi. Aspal alam merupakan material yang tersedia langsung di lingkungan dan umumnya dapat dimanfaatkan dengan pengolahan minimal. Aspal minyak dihasilkan dari sisa (residu) yang proses penyulingan minyak bumi.

1. Aspal Penetrasi (Pen)

Ini adalah jenis aspal keras konvensional yang sering digunakan untuk jalan raya umum. Penetrasi mengukur tingkat konsistensi aspal yang diperoleh dari uji penetrasi jarum pada suhu tertentu.

- Aspal Pen 60/70: Tipe ini menjadi yang paling dominan digunakan di Indonesia, khususnya untuk pekerjaan konstruksi jalan yang memiliki lalu lintas sedang hingga berat.
- Aspal Pen 85/100: Lebih lunak dibandingkan Pen 60/70, sering digunakan untuk area dengan suhu lingkungan lebih dingin atau jalan dengan lalu lintas ringan.
- Aspal Pen 10/20 & 20/30: Aspal keras yang digunakan untuk aplikasi khusus atau perkerasan yang membutuhkan ketahanan tinggi terhadap deformasi.

2. Aspal Performance Grade (PG) - Aspal Modifikasi

Aspal PG adalah jenis aspal yang kinerjanya diukur berdasarkan dari suhu lingkungan dan beban lalu lintas. Aspal ini biasanya dimodifikasi dengan polimer untuk meningkatkan daya tahan, terutama pada jalan tol, landasan pacu bandara, atau jalan dengan beban kendaraan berat.

- PG 70-22 (atau PG 70): Jenis aspal modifikasi yang memiliki ketahanan suhu tinggi yang lebih baik daripada aspal Penetrasi 60/70. Banyak digunakan di jalan tol Indonesia.
 - PG 76-22 (atau PG 76): Aspal modifikasi polimer yang memiliki performa lebih tinggi lagi, cocok untuk lalu lintas sangat berat.
 - PG 64: Sering digunakan untuk standar suhu yang lebih moderat.
3. Aspal 158 (Cutback Asphalt)
- Aspal keras yang dicairkan menggunakan bahan pelarut seperti bensin atau minyak tanah (kerozin).
- *Rapid curing* (RC): Aspal cair jenis RC merupakan aspal yang menggunakan bensin sebagai bahan pelarut, sehingga memiliki tingkat penguapan paling cepat dibandingkan jenis lainnya.
 - *Medium curing* (MC): Aspal cair tipe MC dibuat dengan menggunakan (kerosene) minyak tanah sebagai bahan pelarut, sehingga memiliki kecepatan penguapan sedang.
 - *Slow curing* (SC): Aspal cair jenis SC menggunakan solar (minyak diesel) sebagai bahan pelarut dan memiliki laju penguapan yang paling lambat di antara ketiga jenis aspal cair tersebut.
4. Aspal Modifikasi Polimer (*Polymer Modified Bitumen* - PMB): Aspal konvensional yang ditambahkan bahan polimer untuk meningkatkan sifat viskoelastik, meningkatkan ketahanan terhadap alur (rutting), dan kelelahan jalan.

2.2.2 Fungsi Aspal

Aspal adalah material utama dalam konstruksi perkerasan jalan yang bertujuan sebagai bahan pengikat agregat, sehingga campuran tetap menyatu ketika menerima beban lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Selain itu, aspal juga berperan memberikan kedap air pada lapisan perkerasan sehingga dapat mencegah infiltrasi air ke dalam struktur jalan yang dapat menyebabkan kerusakan lebih cepat (Rahardjo & Kurniawan, 2020).

Dalam penggunaannya, aspal berfungsi meningkatkan stabilitas campuran, menambah fleksibilitas perkerasan, serta memperpanjang umur layan jalan. Aspal yang baik harus mampu menahan deformasi pada suhu tinggi dan tetap lentur pada suhu rendah (Lee, 2021).

Menurut ketentuan Bina Marga tahun 2018 Revisi 2, aspal keras yang digunakan pada perkerasan jalan harus memenuhi syarat tertentu, seperti nilai penetrasi, titik lembek, titik nyala, serta berat jenis, agar kinerja campuran tetap optimal. Dengan demikian, pemilihan aspal yang sesuai tidak hanya menentukan kualitas perkerasan, tetapi juga memengaruhi keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan (Wang, 2022).

2.2.3 Aspal Penetrasi 60/70

Aspal pen 60/70 merupakan jenis aspal keras yang paling banyak digunakan di Indonesia karena memiliki tingkat kekerasan dan elastisitas yang sesuai dengan kondisi iklim tropis. Nilai penetrasi 60-70 menunjukkan bahwa aspal ini memiliki konsistensi sedang, sehingga mampu menahan deformasi plastis akibat suhu tinggi, sekaligus tetap cukup lentur untuk mengurangi retak akibat perubahan temperatur (Siregar & Widodo, 2023).

Dalam konstruksi jalan, aspal penetrasi 60/70 dipakai baik pada lapisan *aus* (*surface course*) maupun pada lapisan pondasi beraspal (*base course*). Kelebihan dari jenis aspal ini adalah kemampuannya menjaga ikatan antar-agregat tetap stabil, sekaligus memberikan daya tahan yang baik terhadap beban lalu lintas harian (Putri & Santoso, 2022).

Berdasarkan SNI 06-2456 tahun 1991 tentang Metode Uji Penetrasi Aspal dan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) Revisi 2, aspal penetrasi 60/70 wajib memenuhi beberapa parameter, di antaranya: meliputi nilai penetrasi, titik lembek, titik nyala dan titik bakar, berat jenis, serta persentase kehilangan berat akibat pemanasan. Persyaratan ini ditetapkan untuk menjamin agar aspal yang digunakan dalam campuran perkerasan memiliki mutu yang konsisten serta layak diterapkan pada jalan dengan volume lalu lintas menengah hingga tinggi (Prasetyo & Andini, 2021).

2.2.4 Penerapan Aspal Porus

Aspal porus memiliki banyak keunggulan dari sisi keberlanjutan lingkungan dan keselamatan lalu lintas, teknologi ini tetap memiliki keterbatasan, khususnya pada aspek kekuatan menahan beban dan kestabilan struktural. Penerapan tidak dapat dilakukan secara merata pada seluruh ruas jalan, terutama dilalui angkutan berbeban berat. Beberapa contoh antara lain:

1. Jalur pejalan kaki, sepeda, dan bahu jalan

Aspal porus sangat sesuai digunakan pada jalur khusus pejalan kaki, sepeda, serta bahu jalan, sebab volume lalu lintas di area tersebut relatif rendah sehingga tidak memberikan tekanan berlebihan pada lapisan perkerasan. Struktur berpori yang dimilikinya memungkinkan air hujan meresap langsung ke lapisan tanah di bawahnya, sehingga genangan air dapat dihindari. Selain itu, kemampuan meredam kebisingan juga menjadikannya pilihan tepat untuk kawasan perumahan atau lingkungan kampus yang membutuhkan suasana lebih tenang.

2. Area parkir dan pusat perkotaan

Pada kawasan parkir maupun wilayah perkotaan yang padat aktivitas, penggunaan aspal porus berfungsi mengurangi beban sistem drainase perkotaan. Hal ini mendukung konsep *sustainable urban drainage system* (SUDS) dengan memfasilitasi infiltrasi air ke tanah sekaligus membantu menurunkan suhu permukaan, karena panas tidak terperangkap di lapisan aspal. Kota Surabaya telah mulai mengimplementasikan konsep ini pada area parkir ramah lingkungan maupun jalan di kompleks perumahan.

3. Kawasan resapan dan konservasi air

Aspal porus juga banyak diterapkan pada wilayah yang difungsikan sebagai area resapan. Teknologi ¹⁴⁵ berkontribusi terhadap peningkatan cadangan air tanah karena air hujan yang jatuh ke permukaan tidak langsung dialirkan ke saluran, melainkan difiltrasi secara alami menuju tanah dasar. Penerapan ini menjadi salah satu strategi dalam upaya pengelolaan air hujan secara lokal (*local stormwater management*) sekaligus solusi untuk mengurangi penurunan muka air tanah di kawasan perkotaan.

4. Jalan lingkungan dan perumahan

Pada kawasan pemukiman, aspal porus dapat memberikan kenyamanan lebih karena mampu menekan genangan, mengurangi kebisingan, serta menciptakan permukaan jalan yang tidak licin saat hujan. Hal ini membuatnya cocok untuk jalan perumahan, kampus, maupun jalan dengan lalu lintas ringan.

5. Bandara (*area apron* atau parkir pesawat)

Aspal porus juga diterapkan pada fasilitas bandar udara, terutama di area parkir pesawat serta jalur yang dilalui oleh kendaraan operasional bandara. Fungsinya adalah mengurangi potensi genangan air yang bisa mengganggu aktivitas operasional penerbangan maupun pergerakan kendaraan ¹⁵ anan darat, sekaligus menjaga kualitas permukaan.

6. Jalan raya ¹³⁷ erah dengan intensitas curah hujan tinggi

Pada daerah beriklim tropis seperti Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi, aspal porus efektif untuk mencegah terjadinya genangan dan mengurangi risiko aquaplaning. Lapisan ini membantu meloloskan air hujan dengan cepat melalui rongga.

7. Jalan tol

Pada jalan tol, khususnya jalur cepat (*fast lane*), aspal porus digunakan untuk meningkatkan keselamatan saat hujan. Permukaan berpori mengurangi percikan air kendaraan (*water spray*) sehingga jarak pandang pengemudi tetap terjaga. Selain itu, efek peredam suara dari aspal porus juga memberikan kenyamanan lebih bagi pengguna tol.

95

2.3 Aspal Porus

Aspal porus merupakan salah satu dari jenis campuran beraspal yang disusun dengan karakteristik berongga-rongga (*void*) tinggi, sehingga memungkinkan agar air hujan meresap ke dalam lapisan perkerasan (Putra & Nugroho, 2021). Lapisan ini banyak diaplikasikan pada jalan dengan curah hujan tinggi atau jalan raya yang menuntut keamanan tinggi dari risiko genangan air. Konsep dasar dari aspal porus adalah meningkatkan *permeabilitas* lapisan permukaan jalan dengan tujuan utama mengurangi potensi *aquaplaning*, memperbaiki kualitas drainase, serta meningkatkan kenyamanan pengguna jalan (Wijaya, 2022).

2.3.1 Spesifikasi Aspal Porus

Menurut (Eza Marizka, 2021) dalam penelitiannya dijelaskan bahwa aspal merupakan material hidrokarbon yang pada suhu ruang umumnya berada dalam kondisi padat hingga semi-lunak. Sifat termoplastik aspal menyebabkan material ini akan mencair ketika dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu kemudian mudian kembali mengeras seiring dengan penurunan suhu. Pakerasan lentur umumnya terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan permukaan, lapisan pondasi, dan lapisan pondasi bawah. Lapis permukaan aspal terletak di atas lapisan pondasi dan pada lapisan pondasi bawah granular yang disebar di atas tanah dasar. Susunan lapisan itu berfungsi untuk menampung beban lalu lintas (Fauziah, 2024)

Menurut (Sembung, 2020) menggabungkan aspal dengan sedikit pasir untuk menciptakan volume pori yang besar dikenal sebagai aspal berpori. Air diantisipasi untuk diserap oleh ruang pori yang besar. Karakteristik perkerasan dalam mengalirkan air melalui rongga-rongga pada kapiler secara vertikal dan horizontal atau dengan menggunakan saluran samping dan lapisan pada perkerasan sebagai sistem drainase yang baik.

Sedangkan Menurut (Marizka Eza, 2021) aspal berpori dibuat dengan mencampur 115 aspal dengan sedikit pasir untuk menghasilkan volume pori yang 4 sar. Ruang pori yang besar diharapkan dapat menyerap air. Karena dapat menggunakan saluran samping dan lapisan perkerasan sebagai sistem drainase atau pori-pori udara kapiler untuk me 115 irkan air ke dalam perkerasan baik secara vertikal maupun horizontal, perkerasan aspal berpori merupakan teknik perkerasan yang sangat unik. 80

Tabel 2. 2 Ketentuan Perencanaan Pada Aspal Porus

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Uji Cantabro Loss (CL)	(%)	≤ 35
2	Uji Asphalt Flow Down (AFD)	(%)	≤ 0.3
3	Uji Kekakuan	(Kg/mm)	≤ 400
4	Uji Stabilitas	(Kg)	≥ 500
5	Uji Void In Mixture (VIM)	(%)	18-25
6	Total Jumlah Tumbukan Perbidang Briket (50 kali per sisi)		100 kali

(Sumber: Bina Marga revisi 2, 2018)

2.3.2 Fungsi Aspal Porus

Aspal porus memiliki beberapa fungsi utama, antara lain:

1. Mengurangi genangan air: Rongga pada lapisan aspal porus berfungsi sebagai jalur resapan air sehingga permukaan jalan tetap kering dan aman (Santoso, 2020).
2. Meningkatkan keselamatan lalu lintas: Dengan berkurangnya air di permukaan jalan, risiko selip (*skid*) dan *aquaplaning* dapat diminimalisasi (Chen, 2021).
3. Mengurangi kebisingan: Struktur berongga pada aspal porus dapat menyerap suara gesekan ban, sehingga tingkat kebisingan lalu lintas berkurang (Susanto, 2023).
4. Mendukung sistem drainase: Aspal porus berperan sebagai lapisan tambahan yang membantu mempercepat aliran air menuju saluran drainase di bawah perkerasan (Rahman, 2022).
5. Meningkatkan kenyamanan berkendara: Kondisi jalan yang bebas genangan dan lebih senyap dapat memberikan pengalaman berkendara yang lebih baik (Hidayat, 2020).

2.3.3 Komposisi Struktur 151 aspal Porus

Aspal porus merupakan salah satu bentuk inovasi pada teknologi perkerasan jalan yang memiliki susunan material dan struktur khusus dalam menunjang sistem drainase permukaan. Berbeda dengan campuran aspal konvensional yang cenderung padat dan kedap air, aspal porus menggunakan susunan agregat dengan gradasi terbuka sehingga terbentuk rongga di antara butirannya. Kehadiran rongga inilah yang memungkinkan air hujan mengalir menembus lapisan permukaan menuju bagian bawah perkerasan tanpa menimbulkan genangan (Suryatama, 2023).

Secara umum, material penyusun campuran aspal porus terdiri dari tiga komponen utama, yaitu agregat kasar, aspal sebagai material pengikat, serta *filler* yang dipakai dalam jumlah sangat minim atau bahkan dapat dihilangkan sama sekali. Agregat yang dipilih umumnya berukuran besar dan memiliki ketahanan aus yang baik karena berfungsi menahan beban lalu lintas serta menjaga kekakuan struktur perkerasan. Di sisi lain, penggunaan agregat halus sengaja dibatasi agar tidak menutup celah antar-butiran, sehingga keberadaan rongga udara (*air voids*) tetap 15%–25%.

Bahan pengikat utama yang dipakai adalah aspal keras aspal penetrasi 60/70, yang berfungsi melapisi agregat agar masih tetap menyatu serta tidak terlepas akibat beban lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Beberapa studi menunjukkan bahwa aspal penetrasi 60/70 memiliki karakteristik stabilitas dan kekakuan yang baik, sehingga mampu meningkatkan daya tahan campuran terhadap deformasi plastis serta memberikan performa lebih optimal pada kondisi suhu tinggi (Rahmawati & Putra, 2022).

Dari segi desain gradasi, campuran aspal porus menerapkan sistem gradasi terbuka (*open-graded*), di mana proporsi agregat berukuran sedang hingga halus dikurangi agar terbentuk jalur aliran air di antara agregat kasar. Salah satu acuan teknis yang banyak dipakai adalah panduan dari *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA), yang memberikan ketentuan mengenai tingkat porositas serta parameter campuran untuk menjaga efisiensi drainase dan kestabilan struktur.

Secara umum, struktur perkerasan yang menggunakan aspal porus terdiri atas beberapa lapisan, yaitu:

1. Lapisan pada permukaan merupakan lapisan utama yang menggunakan campuran aspal porus, berfungsi sebagai media drainase sekaligus permukaan jalan.

2. Lapisan pada pondasi atas biasanya berupa campuran granular atau campuran aspal *konvensional* yang berperan sebagai penopang struktural.
3. Lapisan pada pondasi bawah dan tanah dasar yang harus memiliki kemampuan infiltrasi yang baik dan daya dukung memadai, sehingga air yang diserap tidak menimbulkan genangan yang dapat merusak struktur dari bawah.

Karena kinerja aspal porus sangat bergantung pada besarnya rongga udara dalam campuran, pengendalian kadar aspal menjadi faktor yang sangat penting. Jika kadar aspal terlalu tinggi, pori-pori dapat tertutup sehingga menurunkan kemampuan drainase. Sebaliknya, apabila kadar aspal terlalu rendah, ikatan antar-agregat menjadi lemah dan berisiko lepas. Keseimbangan antara stabilitas *struktural* dan porositas campuran merupakan aspek utama yang harus dipertimbangkan dalam perancangan aspal porus (Suryatama, 2023).

2.3.4 Keunggulan Aspal Porus

Aspal porus memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya alternatif material perkerasan yang inovatif dan aplikatif pada wilayah dengan intensitas curah hujan tinggi maupun jalan dengan lalu lintas padat. Beberapa kelebihan tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Drainase yang efektif

Struktur aspal porus yang memiliki rongga udara 18–25% sehingga air hujan dapat segera mengalir ke lapisan bawah tanpa menimbulkan genangan di permukaan jalan. Hal ini sangat berbeda dengan perkerasan konvensional yang cenderung kedap air dan berpotensi menyebabkan genangan. Dengan demikian, aspal porus dapat meningkatkan efektivitas sistem drainase permukaan, terutama pada ruas jalan perkotaan maupun jalan tol (Rahardjo & Kurniawan, 2020).

2. Keselamatan berkendara lebih tinggi

Permukaan jalan yang cepat kering akibat kemampuan drainase yang baik dapat mengurangi risiko tergelincir (*skid*) atau *aquaplaning* yang kerap terjadi pada jalan dengan genangan air. Hal ini secara langsung meningkatkan tingkat keselamatan pengguna jalan, terutama pada kondisi lalu lintas berkecepatan tinggi seperti di jalan tol maupun area operasional bandara, di mana kestabilan dan kendali kendaraan menjadi aspek yang sangat krusial. (Lee, 2021).

3. Mengurangi kebisingan

Porositas pada aspal porus tidak hanya berfungsi sebagai saluran air, tetapi juga dapat mereduksi kebisingan dari gesekan ban kendaraan dengan permukaan jalan. Dengan demikian, tingkat polusi suara lalu lintas dapat ditekan, yang sangat bermanfaat pada kawasan perkotaan padat penduduk atau jalan lingkungan (Putri & Santoso, 2022).

4. Ramah lingkungan

Kemampuan aspal porus dalam menyerap air hujan juga membantu mengurangi limpasan permukaan (*runoff*). Dengan demikian, volume air yang masuk ke sistem drainase perkotaan dapat berkurang, sehingga risiko banjir dapat ditekan. Selain itu, sifat perkerasan yang lebih sejuk karena adanya rongga juga dapat mendukung pengurangan efek *urban heat island* (Wang, 2021).

5. Kenyamanan berkendara

Jalan dengan lapisan aspal porus tidak hanya lebih aman, tetapi juga lebih nyaman digunakan. Permukaan yang tidak tergenang, tingkat kebisingan yang lebih rendah, serta gesekan ban yang stabil meningkatkan kualitas perjalanan, baik bagi pengendara maupun penumpang (Yusuf & Hakim, 2023).

6. Estetika dan nilai tambah jalan

Beberapa penelitian juga menyebutkan bahwa aspal porus dapat menjaga kebersihan permukaan jalan karena genangan dan lumpur tidak bertahan lama di atasnya. Hal ini memberikan nilai tambah dari sisi estetika serta mempermudah pemeliharaan rutin jalan (Wijaya, 2022).

2.3.5 Kelemahan Aspal Porus

Di balik berbagai keunggulannya, aspal porus tetap memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dipertimbangkan sebelum diaplikasikan. Kelemahan-kelemahan tersebut antara lain:

1. Kekuatan struktural lebih rendah

Kandungan rongga udara yang relatif tinggi di dalam campuran aspal porus menyebabkan ikatan antar agregat dan antara agregat dengan bahan pengikat menjadi tidak sekuat pada campuran aspal padat. Kondisi ini berdampak pada menurunnya kemampuan struktural perkerasan dalam menahan beban berulang, khususnya beban lalu lintas yang besar dan intens. Oleh karena itu, jenis perkerasan ini dinilai

kurang sesuai apabila diterapkan pada ruas jalan dengan volume dan beban lalu lintas berat, seperti jalur distribusi kendaraan angkutan barang, kawasan industri, maupun area pelabuhan yang menerima tekanan beban kendaraan secara terus-menerus (Chen, 2020).

2. Biaya konstruksi lebih mahal

Produksi dan pemasangan aspal porus memerlukan bahan berkualitas tinggi, gradasi agregat khusus, serta pengendalian kadar aspal yang lebih ketat. Selain itu, proses pemadatan harus dilakukan dengan teknik yang tepat agar rongga tidak tertutup. Semua hal ini membuat biaya konstruksi lebih tinggi dibanding perkerasan konvensional (Prasetyo & Andini, 2021).

3. Perawatan lebih sulit

Rongga udara yang menjadi keunggulan utama aspal porus justru juga menjadi titik lemah. Rongga tersebut mudah tersumbat oleh debu, tanah, atau material halus lainnya, sehingga kemampuan drainase menurun seiring waktu. Oleh sebab itu, diperlukan pemeliharaan berkala seperti penyedotan (*vacuuming*) untuk mengembalikan fungsinya (Huang, 2022).

4. Umur layanan relatif lebih pendek

Dibandingkan dengan perkerasan padat, lapisan aspal porus cenderung lebih cepat mengalami kerusakan seperti *raveling* (terlepasnya butiran agregat) jika tidak dirawat dengan baik. Umur layanan efektifnya bisa lebih singkat, sehingga memerlukan perencanaan siklus perawatan yang lebih intensif (Siregar & Widodo, 2023).

5. Tidak cocok untuk semua jenis jalan

Penerapan aspal porus umumnya terbatas pada ruas jalan dengan volume lalu lintas menengah, jalan tol, jalan lingkungan, hingga area bandara seperti apron atau parkir pesawat. Pada jalan dengan volume kendaraan berat, lapisan ini kurang karena keterbatasan struktur (Rahman, 2022).

6. Ketergantungan pada kondisi tanah dasar

Kinerja sistem drainase pada perkerasan aspal porus sangat bergantung pada kemampuan lapisan di bawah perkerasan dalam menyerap dan meneruskan air yang masuk melalui pori-pori permukaan. Apabila tanah dasar atau lapisan pondasi tidak memiliki kapasitas infiltrasi yang cukup (Putra & Nugroho, 2021).

2.4 Bahan Penyusun Aspal Porus

Dalam campuran aspal porus, agregat kasar berperan dominan karena jumlahnya yang sangat besar, bahkan mencapai lebih dari tiga perempat total campuran. Kehadirannya tidak hanya memberikan kekuatan struktural pada lapisan, tetapi juga berfungsi membentuk pori-pori yang memungkinkan air mengalir menembus perkerasan. Dengan demikian, syarat agregat kasar yang baik adalah memiliki ketahanan abrasi yang tinggi, bentuk tajam atau bersudut, serta tekstur permukaan yang cukup kasar sehingga mampu berikatan kuat dengan aspal pengikat (Siregar & Hakim, 2021).

166

2.4.1 Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan komponen terbesar pada campuran aspal porus, dengan proporsi mencapai 80% atau lebih dari total berat campuran. Fungsi utama agregat kasar adalah membentuk kerangka yang kokoh yang berfungsi menciptakan rongga antar-butiran sebagai jalur aliran air. Sifat agregat kasar yang digunakan ini memiliki ketahanan aus tinggi, bentuk butiran yang bersudut, dan tekstur permukaan kasar agar dapat meningkatkan ikatan dengan aspal (Rahmawati, 2020).

3

2.4.2 Agregat Halus

Agregat halus dalam campuran material aspal porus digunakan dalam persentasenya lebih rendah dibandingkan dengan agregat kasar. Keberadaan agregat halus tidak ditujukan sebagai komposisi utama pembentuk struktur, melainkan berfungsi untuk mengisi sebagian ruang kosong di antara butiran agregat kasar sehingga susunan campuran menjadi lebih rapat dan memiliki kestabilan yang memadai. Meskipun demikian, jumlah dan gradasi agregat halus harus dikontrol secara ketat agar tidak menyebabkan tertutupnya pori-pori yang berperan penting dalam proses aliran dan peresapan air. (Putri & Santoso, 2022).

2.5 Limbah Abu Kain Katun

Kain katun yang berasal dari limbah industri tekstil memiliki peluang besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai material tambahan dalam perkerasan jalan. Kandungan serat pada limbah ini mampu berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) dalam campuran aspal, sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan ketahanan deformasi. Selain memberikan nilai tambah secara teknis, pemanfaatan limbah kain katun juga dapat mengurangi volume sampah tekstil yang terus meningkat di lingkungan (Yusuf & Hakim, 2023).

2.6 Metode Marshall

Pengujian Marshall digunakan untuk mengevaluasi kualitas campuran aspal dengan menentukan kadar aspal yang paling sesuai. Melalui uji ini diperoleh data stabilitas, nilai *flow*, serta *Marshall Quotient* yang mencerminkan kekakuan campuran. Hasil pengujian dijadikan acuan untuk menetapkan kadar aspal optimum, sehingga lapisan perkerasan yang dihasilkan memiliki keseimbangan antara kekuatan struktural dan daya tahan terhadap lalu lintas (Chen, 2020).

Parameter utama yang diperoleh dari pengujian *Marshall* meliputi:

1. Stabilitas *Marshall* menunjukkan kemampuan campuran menahan beban.
2. *Flow* mengukur deformasi plastis akibat beban.
3. *Marshall Quotient* (MQ) hasil perbandingan stabilitas dan *flow* yang representasikan kekakuan campuran.
4. (KAO) kadar aspal optimum merupakan sebagai kadar pengikat yang menghasilkan kombinasi terbaik antara stabilitas dan durabilitas (Siregar & Widodo, 2023).

Metode ini banyak digunakan karena sederhana, praktis, dan mampu memberikan gambaran performa campuran aspal sebelum diaplikasikan di lapangan.

2.7 Parameter Pengujian Aspal

Pengujian parameter pada campuran beraspal bertujuan untuk mengetahui sifat fisik, mekanis, serta kinerja campuran dalam menahan lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Beberapa parameter utama yang digunakan dalam campuran beraspal antara lain sebagai berikut.

2.7.1 Void In Mix (VIM)

VIM adalah parameter yang menggambarkan persentase ruang kosong (rongga udara) yang dapat pada campuran aspal setelah dilakukan pemadatan. Nilai VIM harus dijaga agar tidak terlalu tinggi maupun terlalu rendah, karena rongga yang terlalu besar dapat menyebabkan kerusakan akibat infiltrasi air, sedangkan rongga terlalu kecil dapat menimbulkan deformasi plastis (Wijaya & Siregar, 2021). Perhitungan VIM sebagai berikut:

$$VIM = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots (2.1)$$

$$G_{mm} = \frac{W_d}{W_d - W_w} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$Gmb = \frac{Wd}{Wssd - Ww} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

- VIM = nilai VIM (%)
 Gmm = nilai berat jenis maksimum teoritis campuran aspal (gr/cc)
 Gmb = nilai berat jenis bulk campuran aspal (gr/cc)
 Wd = nilai berat kering campuran dalam udara (gr)
 Ww = nilai berat campuran didalam air (gr)
 Wssd = nilai berat jenuh kering dipermukaan (gr)

2.7.2 Void In Mineral Agregat (VMA)

VMA menunjukkan besarnya ruang kosong yang berada di antara partikel agregat dalam campuran, termasuk rongga yang nantinya terisi oleh aspal. Nilai VMA yang memadai penting untuk menjamin ikatan antar-agregat dan kestabilan campuran (Chen, 2020). Perhitungan VMA sebagai berikut:

$$VMA = (1 - \frac{Gmb}{Gsb} \times Ps) \times 100 \% \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Gsb = \frac{100}{(\frac{\%fraksi Ag.kasar}{Bj bulk Ag.kasar} + \frac{\%fraksi Ag.kasar}{Bj bulk Ag.halus} + \frac{\%fraksi Ag.kasar}{Bj bulk Filler})} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$Ps = 100\% - Pb \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

- VMA = nilai VMA (%)
 b = kadar aspal terhadap campuran (%)
 g = berat isi sampel (gr)
 VMA = nilai rongga dalam agregat (%)
 Gmb = berat jenis bulk campuran (gr/cc)
 Gsb = berat jenis bulk gabungan agregat kasar halus dan filler (gr/cc)
 Ps = kadar agregat terhadap total pada campuran (%)
 Pb = kadar aspal terhadap total pada campuran (%)

2.7.3 Density (Kepadatan)

Kepadatan adalah nilai yang diperoleh dari perbandingan berat isi pada campuran beraspal dengan keseluruhan volumenya. Parameter ini menentukan kekompakan struktur campuran dan sangat berpengaruh terhadap kekuatan serta daya tahan lapisan perkerasan (Putri & Santoso, 2022). Perhitungan kepadatan (*Density*) sebagai berikut:

$$Ds = \left(\frac{Gmb}{Gmm} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

D_s = nilai *density* / kepadatan (gr/cc) ¹⁸

G_{mb} = berat jenis bulk campuran (gr/cc)

G_{mm} = berat jenis maksimum teoritis campuran (gr/cc)

2.7.4 Marshall Quotient (MQ) ⁵⁹

Marshall Quotient (MQ) merupakan rasio antara stabilitas dan kelelahan dari campuran aspal yang diperoleh melalui uji *Marshall*. Nilai MQ menggambarkan tingkat kekakuan campuran; semakin tinggi nilai MQ, semakin baik kestabilan campuran terhadap beban lalu lintas (Hidayat & Pratama, 2021). Perhitungan MQ, sebagai berikut:

$$MQ = \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

MQ = nilai kekakuan *Marshall* (kg/mm) ⁶

Stabilitas = nilai stabilitas (kg)

Flow = nilai kelelahan (mm)

2.7.5 Cantabro Loss (CL)

Cantabro Loss mengukur ketahanan campuran bitumen aspal terhadap kerusakan berupa pelepasan butiran agregat (*raveling*). Nilai kehilangan berat yang kecil menunjukkan ikatan aspal-agregat lebih baik serta daya tahan terhadap beban lalu lintas lebih tinggi (Zhang, 2021).

Perhitungan CL, sebagai berikut:

$$CL = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

⁷⁸ = persentase sampel kehilangan berat (%)

W_1 = berat awal sampel sebelum abrasi (gr)

W_2 = berat sampel sesudah abrasi (gr)

2.7.6 Asphalt Flow Down (AFD)

AFD digunakan untuk mengevaluasi kestabilan aspal dalam campuran berpori, terutama apakah aspal cenderung mengalir ke bawah saat proses pencampuran atau pemadatan. Nilai AFD yang tinggi menandakan pemakaian aspal tidak efisien dan berpotensi menurunkan kinerja campuran (Liu, 2022). Perhitungan (AFD) sebagai berikut:

$$AFD = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

- 1 FD = nilai AFD (%)
 m1 = berat cetakan dalam nampan (gr)
 m2 = berat bersama campuran dengan aspal sebelum di oven (gr)
 m3 = berat bersama campuran dengan aspal setelah di oven (gr)

2.7.7 Permeability (Permeabilitas)

Permeabilitas (permeability) merupakan kemampuan aspal porus dalam meloloskan air melalui rongga rongga yang terdapat dalam campuran aspal. Uji Permeabilitas ini dilakukan guna mendapatkan nilai kemampyan aspal porus dalam mengalirkan air. Perhitungan (*Permeability*) sebagai berikut:

$$k = \frac{v}{t} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- k = Koefisien Permeabilitas (liter/detik)
 v = Volume air (liter)
 t = Waktu (detik)

2.7.8 Flow (Kelelehan)

Flow merupakan penurunan campuran aspal atau deformasi yang diakibatkan oleh suatu beban hingga mencapai kemampuan maksimal jatuh yang biasanya dalam satuan mm atau 0,01 inch. Pada pencampuran aspal yang mempunyai nilai flow yang besar, memiliki stabilitas kecil, serta kekakuan yang rendah maka cenderung memiliki sifat plastis, Sebaliknya, apabila nilai ⁶⁵w yang diperoleh rendah, sementara nilai stabilitas dan kekakuannya tinggi, maka campuran tersebut cenderung bersifat kaku atau getas. Kondisi ini berpotensi menyebabkan timbulnya retak-retak (cracking) pada lapisan perkerasan akibat ketidakmampuan material dalam menahan tegangan yang terjadi (Putri & Hakim, 2020).

2.7.9 Stability (Stabilitas)

Stabilitas merupakan ketahanan lapisan aspal saat menahan deformasi hingga titik maksimal sebelum mengalami runtuh. Faktor utama yang mempengaruhi stabilitas adalah campuran agregat, juga ada faktor lain yang saling berkaitan yaitu hampir semua parameter yang sudah dijelaskan diatas sangat mempengaruhi nilai stabilitas yang didapatkan. Nilai stabilitas yang terlalu tinggi juga kurang baik karena memiliki sifat getas. Nilai stabilitas bisa didapatkan melalui jarum dial pada alat Marshall dikalikan dengan

kalibrasi alat dengan satuan kilogram. Metode pengujian Marshall untuk menentukan nilai stabilitas dapat mengacu pada SNI 06-2489-1991 (Gunawan & Rukmana, 2022).

2.8 Pengujian pada Agregat

Pengujian pada agregat dilakukan untuk menilai sifat-sifat dasar agregat, yang mencakup pengukuran berat jenis, kemampuan menyerap air, daya lekat terhadap aspal, ketahanan terhadap keausan, distribusi ukuran butiran (gradasi). Seluruh parameter ini penting guna memastikan bahwa agregat memenuhi standar yang dipersyaratkan dalam konstruksi pada perkerasan bahan jalan.

2.8.1 Analisa Saringan Agregat

Analisa saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat, sehingga dapat ditentukan gradasi campuran yang sesuai dengan spesifikasi. Hasil analisa digunakan sebagai dasar dalam menentukan perbandingan agregat kasar, halus, dan filler dalam campuran aspal. Pengujian ini penting untuk memastikan campuran memenuhi kriteria kepadatan dan kestabilan strukturnya (Rahmawati & Putra, 2020).

Uji analisa saringan dilakukan untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran butirannya sehingga dapat diketahui distribusi agregat halus maupun kasar. Proses ini menggunakan rangkaian saringan dengan ukuran tertentu untuk memperoleh hasil gradasi yang sesuai dengan standar yang berlaku. Pada penelitian ini, pemilihan gradasi terbuka (*open graded*) didasarkan pada ketentuan dalam (AAPA) *Australian Asphalt Pavement Association* (2004). Perhitungan analisa saringan agregat sebagai berikut:

$$\text{Persentase Tertahan} = \frac{\text{Berat Kumulatif Tertahan}}{\text{Berat Total Semula}} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\text{Persentase Lolos} = 100 \% - \text{Persentase Tertahan} \dots\dots\dots(2.13)$$

2.8.2 Berat Jenis Agregat

Berat jenis agregat menjadi parameter penting dalam menentukan perbandingan campuran, sedangkan pada parameter penyerapan air sebagai merepresentasikan kapasitas agregat dalam menyerap aspal. Agregat dengan penyerapan tinggi dapat meningkatkan kebutuhan aspal, sehingga memengaruhi biaya dan kualitas campuran. Nilai berat jenis agregat yang ideal menunjukkan material tersebut padat, keras, ketahanan baik pada beban lalu lintas (Huang, 2022).

Menurut SNI 1969 tahun 2016, berat jenis merupakan rasio antara massa suatu material terhadap massa air pada kondisi volume dan temperatur yang sama. Jenis parameter yang dimaksud meliputi berat jenis curah (*bulk specific gravity*), berat jenis jenuh kering permukaan, serta berat jenis semu, serta berat jenis efektif, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam nilai karakteristik agregat.

1. Berat Jenis Curah (S_d) atau (*bulk specific gravity*) didefinisikan sebagai perbandingan antara massa agregat dalam kondisi kering oven dan volume total yang ditempati, termasuk rongga-rongga udara di dalamnya. Parameter ini berperan penting dalam menentukan tingkat kepadatan agregat saat digunakan dalam campuran perkerasan maupun beton. Perhitungan nilai berat jenis curah sebagai berikut:

- Berat jenis *bulk* agregat kasar

$$\frac{A}{(B-C)} \dots\dots\dots (2.14)$$

- Berat jenis *bulk* agregat halus

$$\frac{A}{B-Dt) \dots\dots\dots (2.15)$$

2. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (S_s) adalah perbandingan antara massa agregat setelah pori-porinya terisi penuh oleh air akibat perendaman selama $\pm 15-19$ jam, dengan kondisi permukaan agregat telah dikeringkan, terhadap volume total agregat. Perhitungan nilai berat jenis pada kondisi jenuh kering permukaan sebagai berikut:

- Berat jenis kering agregat kasar

$$\frac{B}{(B-C)} \dots\dots\dots (2.16)$$

- Berat jenis kering agregat halus

$$\frac{B}{(D+B-Dt)} \dots\dots\dots (2.17)$$

3. Berat Jenis Semu (S_a) dihitung berdasarkan perbandingan antara massa satuan volume material yang tidak dapat ditembus air dengan massa air pada volume serta suhu yang sama. Perhitungan ini dilakukan dalam kondisi bebas gelembung udara sehingga hanya mencakup bagian agregat yang padat. Perhitungan nilai berat jenis semu sebagai berikut:

- Berat jenis semu agregat kasar

$$\frac{A}{(D+A-Dt)} \dots\dots\dots (2.18)$$

- Berat jenis semu agregat halus

$$\frac{A}{(A-C)} \dots\dots\dots(2.19)$$

4. Berat Jenis *Efektif* adalah perbandingan massa agregat dalam kondisi kering terhadap volume totalnya, dengan mengabaikan pori-pori kecil yang menyerap aspal. Parameter ini digunakan untuk memperkirakan bagian agregat yang benar-benar berperan dalam campuran, sehingga aspal yang terserap ke dalam rongga-rongga tidak diperhitungkan karena tidak menambah kekuatan struktural pada campuran (SNI 1969:2016). Perhitungan berat jenis efektif, sebagai berikut:

- Penyerapan pada agregat kasar

$$\frac{(B-A)}{A} \times 100 \dots\dots\dots(2.20)$$

- Penyerapan pada agregat halus

$$\frac{(B-A)}{A} \times 100 \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan :

A = berat kering saats oven (gr)

B = berat kering permukaan jenuh / SSD (gr)

7 = berat didalam air (gr)

D = berat pada piknometer + air (gr)

Dt = berat pada piknometer + agregat + air (gr)

2.8.3 Kelekatan Agregat

Kelekatan agregat mengukur kemampuan butiran agregat untuk menahan lapisan aspal pada permukaannya. Agregat dengan daya lekat rendah cenderung mengalami *stripping* atau pelepasan aspal akibat pengaruh air, sehingga dapat menyebabkan kerusakan dini pada perkerasan. (Siregar & Widodo, 2023).

Metode uji kelekatan agregat terhadap aspal digunakan untuk mengetahui kemampuan aspal dalam berikatan dengan agregat pada kondisi kering dan setelah perendaman. Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui sejauh mana lapisan aspal mampu bertahan terhadap risiko stripping atau pengelupasan yang dipicu oleh kelembaban maupun genangan air. Standar pengujian ini mengacu pada SNI 06-2439-1991. Perhitungan persen kelekatan agregat sebagai berikut:

$$\% \text{ Kelekatan} = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

% Kelekatan = nilai *persentase* kelekatan agregat

A = luas permukaan agregat tertutup aspal setelah perendaman (mm²)

As = luas permukaan total sebelum perendaman (mm²)

2.8.4 Keausan Agregat

Uji keausan agregat bertujuan menilai ketahanan butiran agregat terhadap gesekan dan benturan, biasanya menggunakan mesin *Los Angeles Abrasion*. Agregat dengan nilai keausan rendah dianggap tahan lama terhadap beban lalu lintas dan gesekan ban kendaraan. Nilai keausan yang terlalu tinggi menunjukkan agregat mudah hancur sehingga menurunkan kualitas campuran beraspal (Wang, 2021).

Uji aus agregat dilakukan dengan bantuan mesin *Los Angeles* untuk mengevaluasi tingkat ketahanan agregat kasar terhadap benturan, gesekan, dan proses aus selama digunakan. Dalam pengujian ini digunakan standar acuan berupa SNI 2417:2008. Perhitungan persen keausan sebagai berikut:

$$\% \text{ Keausan} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan :

% Keausan = *persentase* keausan agregat

W₁ = berat pada agregat sebelum diuji (gr)

W₂ = berat tertahan pada agregat sesudah diuji (gr)

2.8.5 Sand Equivalent Agregat

Pengujian *Sand Equivalent* (SE) merupakan metode pengujian yang digunakan untuk menentukan tingkat kebersihan agregat halus dari kandungan material halus yang bersifat plastis, seperti lumpur dan lempung. Nilai Sand Equivalent menunjukkan perbandingan antara fraksi pasir bersih terhadap fraksi lumpur yang terdapat dalam agregat halus. Semakin besar nilai Sand Equivalent, maka agregat halus tersebut semakin bersih dan layak digunakan sebagai bahan penyusun campuran beraspal. Perhitungan *sand equivalent* sebagai berikut:

$$SE = \frac{H_p}{H_t} \times 100\% \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan :

SE = Nilai Sand Equivalent (%)

H_p = Tinggi lapisan pasir (mm)

H_t = Tinggi total lapisan pasir dan lumpur (mm)

2.9 Pengujian Aspal

Pengujian penetrasi aspal dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2456:2011. Pengujian ini berfungsi untuk menentukan tingkat kekerasan maupun konsistensi aspal sebagai bahan pengikat, yang merupakan salah satu parameter penting dalam menilai karakteristik fisis aspal. Dalam pelaksanaannya, digunakan jarum logam standar dengan diameter 1 mm yang diberikan beban sebesar 100 gram, kemudian diletakkan secara tegak lurus pada permukaan sampel aspal. Jarum tersebut dibiarkan menekan aspal selama waktu tertentu, yaitu sekitar 5 detik, pada suhu pengujian 25°C yang merepresentasikan kondisi suhu lingkungan normal. Besarnya nilai penetrasi ditentukan berdasarkan kedalaman jarum yang mampu menembus permukaan aspal selama proses pengujian berlangsung pada satuan 0,1 mm (Karim, 2023).

2.9.1 Penetrasi Aspal

Pengujian penetrasi bertujuan untuk mengukur tingkat kekerasan aspal dengan menggunakan jarum standar yang ditekan pada permukaan aspal dalam kondisi tertentu. Nilai penetrasi yang sesuai menunjukkan aspal memiliki ketahanan terhadap beban dan suhu (Prasetyo & Andini, 2021). Pada penelitian ini, jenis aspal yang akan digunakan dalam campuran aspal porous adalah aspal perasi 60/70, dengan spesifikasi mengacu pada ketentuan Aspal Keras Bina Marga Revisi 2 tahun 2018.

2.9.2 Berat Jenis dan Penyerapan Aspal

Berat jenis aspal digunakan dalam perhitungan proporsi campuran. Nilai berat jenis yang akurat penting untuk menentukan kebutuhan volume aspal dalam campuran. Berat jenis digunakan untuk menentukan kualitas aspal berdasarkan rasio massa aspal terhadap massa air pada volume dan suhu tertentu. Metode ini mengacu pada SNI 2441:2011 dan menjadi parameter penting dalam perhitungan proporsi campuran (Putri & Santoso, 2022). Perhitungan berat jenis, sebagai berikut:

$$B_j = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \dots\dots\dots (2.25)$$

Keterangan :

B _j	= berat jenis pada aspal (gr)
A	= berat piknometer dengan menggunakan penutup (gr)
B	= berat piknometer yang berisi air (gr)
C	= berat piknometer yang berisi aspal (gr)
D	= berat piknometer yang berisi aspal dan air (gr)

6

2.9.3 Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Titik nyala merupakan kondisi suhu paling rendah pada saat uap yang dihasilkan oleh aspal mulai dapat menyala secara sesaat ketika terkena sumber api, na 157 nyala tersebut belum berlangsung secara berkelanjutan. Sementara itu, titik bakar (*fire point*) didefinisikan sebagai suhu di mana uap aspal telah mampu mempertahankan 62 roses pembakaran secara terus-menerus tanpa terputus. Pelaksanaan pengujian titik nyala dan titik bakar dilakukan dengan mengacu pada SNI 2433 tahun 2011 (Yusuf & Hakim, 2023).

1

2.9.4 Titik Lembek Aspal

Titik lembek merupakan suhu di mana aspal mulai kehilangan kekakuannya dan melunak. Nilai titik lembek digunakan untuk menilai ketahanan aspal terhadap suhu tinggi di lapangan, Pengujian ini dilakukan berdasarkan SNI 2434:2011, dengan penggunaan bola baja yang dipanaskan hingga kondisi jatuh menyentuh pelat cincin berisi aspal (Hidayat, 2022).

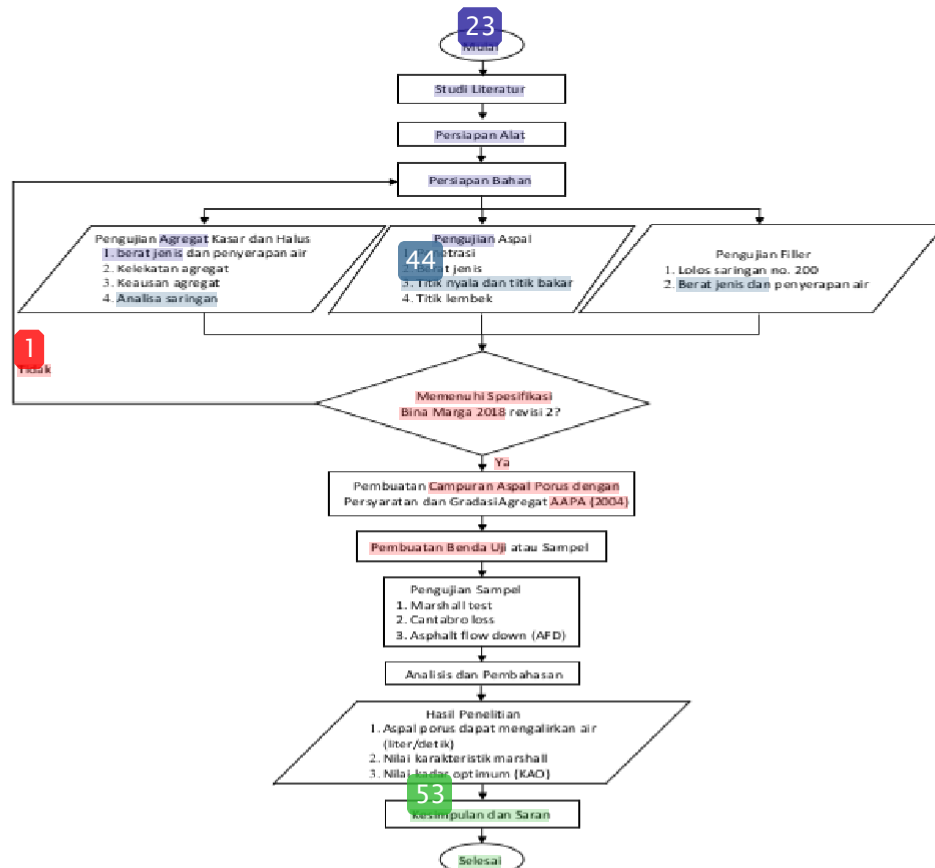
2.9.5 Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas digunakan untuk mengevaluasi daya kohesi aspal yang memengaruhi tingkat fleksibilitas suatu campuran. Karakteristik ini diperlukan agar campuran aspal mampu meneri 14 beban kerja tanpa mengalami kerusakan secara cepat. Pelaksanaan pengujian ini mengacu pada standar SNI 2432:2011, hasil pengujian dinyatakan dalam satuan cm.

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir (Flowchart)

Diagram alir adalah bagan atau gambar visual yang menunjukkan langkah-langkah suatu proses secara berurutan dalam penyusunan tugas akhir, yang berfungsi untuk menjelaskan secara berurutan tahap – tahap penyelesaian laporan tugas akhir ini berjudul "Pemanfaatan Limbah Abu Kain Katun sebagai *Filler* pada Campuran Aspal Porus dengan Metode Marshall" sesuai pada Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) Revisi 2 dan *Australian Asphalt Pavement Association* (2004). Diagram alir ini juga menjelaskan urutan awal dari pelaksanaan pengujian agregat dan aspal.



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian
(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Penjelasan Diagram Alir (*Flowchart*):

1. Mulai
Tahap awal dimulainya suatu rangkaian penelitian.
2. Studi Literatur
Mempelajari referensi dari penelitian sebelumnya yang relevan sebagai dasar dalam penyusunan dan pelaksanaan penelitian.
3. Persiapan Alat
Melakukan persiapan seluruh alat laboratorium yang diperlukan dalam proses pengujian, antara lain uji analisa saringan agregat, berat jenis agregat, keausan agregat, kelekatan agregat, penetrasi aspal, berat jenis aspal, titik nyala dan titik bakar, dan titik lembek.
4. Persiapan Bahan
Menyiapkan seluruh bahan yang diperlukan, antara lain agregat kasar, agregat halus, aspal Penetrasi 60/70, serta *filler* yang berasal dari limbah abu kain katun.
- 4 5. Pengujian Agregat Kasar dan Halus
 - a. Pengujian agregat kasar
 - Uji Analisa saringan ketentuan SNI ASTM C136, tahun (2012)
 - Uji Berat jenis ketentuan SNI 1969, tahun (2016)
 - Uji Keausan ketentuan SNI 2417, tahun (2008)
 - 159 • Kelekatan ketentuan SNI 2439, tahun (2011)
 - b. Pengujian agregat halus
 - Uji Analisa Saringan ketentuan SNI ASTM C136, tahun (2012)
 - Uji Berat Jenis ketentuan SNI 1970, tahun (2008)
6. Pengujian Filler Limbah Abu Kain Katun
 - a. Uji Analisa saringan dengan batas lolos no. 200 (0.075 mm) ketentuan SNI 1970, tahun (2008)
 - b. Uji Berat jenis ketentuan SNI 1970, tahun (2008)
7. Pengujian Aspal Penetrasi 60/70 10
 - a. Uji Penetrasi ketentuan SNI 2432, tahun (2011)
 - b. Uji Berat Jenis ketentuan SNI 2441, tahun (2011)
 - c. Uji Titik Nyala ketentuan SNI 2433, tahun (2011)
 - d. Uji Titik Lembek ketentuan SNI 2434. Tahun (2011)
8. Memenuhi ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2
Tahapan pengambilan keputusan dalam penelitian untuk menentukan apakah hasil pengujian agregat kasar dan halus, pengujian aspal, dan pengujian *filler*, telah sesuai dengan standar mutu yang tercantum pada

ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2. Jika seluruh parameter hasil uji masuk dalam batas toleransi spesifikasi, maka material dinyatakan memenuhi syarat dan dapat digunakan pada tahap selanjutnya. Namun, jika terdapat parameter yang tidak sesuai, maka material dinyatakan tidak memenuhi syarat sehingga perlu dilakukan perbaikan, atau modifikasi lebih lanjut.

9. Pembuatan Campuran Aspal Porus dengan Persyaratan dan Gradasi agregat AAPA (2004)

Jika hasil uji memenuhi persyaratan (stabilitas, *flow*, porositas, permeabilitas sesuai AAPA 2004) campuran dinyatakan layak digunakan. Jika hasil uji tidak memenuhi dilakukan evaluasi ulang, penyesuaian kadar aspal, atau perubahan gradasi agregat, kemudian diuji kembali.

10. Pembuatan Benda Uji atau Sampel

Tahapan ini merupakan proses pembentukan campuran aspal porus menjadi benda uji sesuai ukuran dan standar pengujian.

11. Pengujian Sampel (Benda Uji)

- a. Uji Marshall ketentuan SNI 06 2489, tahun (1991)
- b. Uji *Cantabro Loss* (CL) ketentuan SNI 2417, tahun (2008)
- c. Uji *Asphalt Flow Down* (AFD) ketentuan ASTM D6390, tahun (2011)

12. Analisis dan Pembahasan

Hasil uji laboratorium (*Marshall Test*, *Cantabro Loss*, *Asphalt Flow Down*) dibandingkan dengan standar atau teori yang berlaku, seperti AAPA (2004) untuk gradasi aspal porus dan Bina Marga Revisi 2 (2018).

13. Hasil Penelitian

- a. Aspal Porus dapat Mengalirkan Air (liter/detik)
Pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa campuran aspal porus mampu meloloskan air dengan kecepatan tertentu.
- b. Nilai Karakteristik *Marshall*
Pengujian stabilitas dan *flow Marshall* dilakukan untuk mengetahui kekuatan dan fleksibilitas campuran.
- c. Nilai (KAO)
Berdasarkan variasi pada kadar aspal yang diuji, diperoleh nilai (KAO), yaitu kadar aspal yang menghasilkan kombinasi terbaik antara stabilitas *Marshall*, *flow*, dan porositas sesuai standar.

14. Kesimpulan dan Saran

Merangkum hasil dari penelitian ini dan menyampaikan saran kepada peneliti selanjutnya

15. Selesai

Menandai akhir dari keseluruhan proses penelitian.

3.2 Proses Pengolahan pada Limbah Kain Katun

Proses Pengolahan pada Limbah Kain Katun, sebagai berikut:

1. Limbah Kain Katun diperoleh dari rumah produksi di Jl. Kundi, Desa Kepuhkiriman, Kecamatan Waru, Kota Sidoarjo.
2. Limbah kain tekstil dipisahkan terlebih dahulu antara jenis kain polyester dan kain katun setelah itu kain dibersihkan dengan air, selanjutnya kain katun dijemur selama 1 hari agar kering maksimal dan tidak terdapat kadar air.
3. Jika limbah sudah dipastikan dalam keadaan kering maksimal setelah proses penjemuran, langkah selanjutnya ialah proses pembakaran menjadi abu.
4. Setelah Limbah terbakar dan menjadi arang atau abu, diamkan sampai dingin
5. Proses selanjutnya yaitu tumbuk limbah abu kain katun yang telah menjadi abu agar lebih halus
6. Selanjutnya melakukan proses penyaringan abu kain katun yang telah ditumbuk sehingga menjadi halus, proses penyaringan ini menggunakan saringan no. 200 (0,075 mm), lakukan penyaringan sesuai kebutuhan.



Gambar 3. 2 Proses Pengolahan Kain Katun Menjadi Filler
(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3 Persiapan Alat dan Bahan Pengujian

Tahap pertama dalam pengujian material adalah melakukan persiapan alat dan bahan. Langkah ini penting untuk menjamin kelancaran proses uji serta kesesuaian dengan prosedur. Persiapan meliputi peralatan utama, material yang akan diuji, serta perlengkapan pendukung agar data yang diperoleh akurat sesuai dengan tujuan penelitian.

3.3.1 Alat dan Bahan Uji Analisa Saringan Agregat

Pengujian analisa saringan pada agregat memerlukan alat dan bahan tertentu agar dapat diketahui distribusi ukuran agregat sesuai spesifikasi dan jenis saringan. Alat serta bahan tersebut disajikan pada tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Pengujian Analisa Saringan

No	Gambar	Keterangan
1		1 set saringan (pan; 0,075; 0,15; 0,3; 0,6; 1,18; 2,36; 4,75; 9,5; 12,5; 19; dan 25,4)
2		Mesin Pengguncang Saringan
3		Timbangan berkapasitas 1 kg dengan ketelitian 0.1 gr
4		Oven yang dilengkapi pengatur suhu (110 ± 5) °C

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. 2 Alat dan Bahan Pengujian Analisa Saringan (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
5		Sikat pembersih saringan
6		Nampan agregat
7		Agregat Kasar
8		Kain lap

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.2 Alat dan Bahan Uji Berat Jenis Agregat Halus

Peralatan dan material pada pengujian berat jenis dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara massa dan volume agregat terhadap massa air pada volume yang sama dan suhu tertentu. Daftar alat dan bahan ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 3. 2 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

No	Gambar	Keterangan
1		Saringan No.4 (4,75 mm)

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

2

Tabel 3. 3 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Agregat Halus (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
2		Nampan Agregat
8 3		Kerucut atau (cone) diameter atas (40 ± 3) mm, bawah (75 ± 3) mm, dan batang penumbuk
4		Agregat Halus
5		Piknometer dengan kapasitas 1000 ml
6		Timbangan berkapasitas 1 kg dengan Ketelitian 0.1 gr
7		Oven yang dilengkapi pengatur suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

23

3.3.3 Alat dan Bahan Uji Berat Jenis Agregat Kasar

Peralatan dan material pada pengujian berat jenis serta penyerapan digunakan untuk menentukan perbandingan antara massa dan *volume* agregat dengan massa air pada volume yang sama. Rincian alat dan bahan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3. 4 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar

No	Gambar	Keterangan
1		Timbangan 30 kg + penggantung kawat
2		Agregat kasar
3		Oven suhu max $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$
4		Keranjang kawat kapasitas ± 500 gram
5		Saringan no. 12

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

2

Tabel 3. 5 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
6		Kain Lap
7		Piknometer kapasitas 1000 ml

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.4 Alat dan Bahan Uji Keausan Agregat

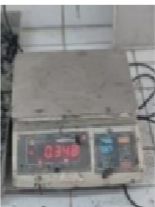
Tujuan uji aus pada agregat adalah menilai ketahanan dalam agregat terhadap pengaruh gesekan dan benturan saat proses pencampuran, pemadatan, maupun penggunaan pada lapisan perkerasan jalan. Pengujian sanya dilakukan dengan metode abrasi menggunakan mesin *Los Angeles*. Alat dan bahan yang akan digunakan tercantum pada tabel berikut:

Tabel 3. 6 Alat dan Bahan Pengujian Keausan Agregat

No	Gambar	Keterangan
1		Agregat kasar
2		Mesin abrasi Los Angeles

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. 7 Alat dan Bahan Pengujian Keausan Agregat (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
3		Saringan no. 12
4		Bola baja
5		Timbangan digital
6		Oven suhu max $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.5 Alat dan Bahan Uji Kelekatan Agregat

Pengujian kelekatan agregat dilakukan untuk menilai kemampuan agregat dalam berinteraksi dan menempel pada aspal. Hal ini penting untuk menjamin stabilitas campuran aspal agar tidak mudah mengalami pelepasan butir akibat lalu lintas maupun faktor lingkungan. Apabila kelekatan agregat terhadap aspal rendah, maka campuran akan lebih rentan mengalami kerusakan dini. Oleh karena itu, pengujian ini menjadi salah satu parameter penting dalam menilai kualitas campuran aspal. ³¹ ini menjadi krusial pada campuran aspal porus dengan porositas tinggi. Alat dan bahan yang akan digunakan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. 8 Alat dan Bahan Pengujian Kelekatan Agregat

No	Gambar	Keterangan
1		Aspal Penetrasi 60/70
2		Agregat lolos ayakan 3/8"
3		Ayakan Saringan 3/8 inci dan No.14
4		Timbangan kapasitas 5000 gram
5		Oven suhu max $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$
6		Nampan agregat

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.6 Alat dan Bahan Uji Penetrasi Aspal

Pengujian penetrasi aspal memerlukan alat dan bahan khusus yang digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan maupun kelunakan aspal pada kondisi suhu tertentu. Alat dan bahan yang dipakai tertera pada tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 9 Alat dan Bahan Pengujian Penetrasi Aspal

No	Gambar	Keterangan
1		Alat pengukur suhu (Termometer)
2		Alat Penetrasi
3		Aspal Penetrasi 60/70
4		Timbangan kapasitas 5000 gram
5		Bak Perendam (<i>Water Bath</i>)

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. 10 Alat dan Bahan Pengujian Penetrasi Aspal (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
6		Gelas beaker

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.7 Alat dan Bahan Uji Berat Jenis dan Penyerapan Aspal

Uji berat jenis pada aspal dilakukan agar mengetahui densitas atau massa jenis dari aspal. Alat dan bahan yang akan digunakan ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3. 11 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Aspal

No	Gambar	Keterangan
1		Piknometer
2		Nampan agregat
3		Aspal Penetrasi 60/70

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

2

Tabel 3. 12 Alat dan Bahan Pengujian Berat Jenis Aspal (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
4		Timbangan kapasitas 5000 gram
5		Bak Perendam (<i>Water Bath</i>)
6		Gelas beaker

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

1

3.3.8 Alat dan Bahan Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Pengujian titik nyala pada aspal dilakukan agar mengetahui batas suhu tertentu ketika material aspal mulai mengalami penguapan dan selanjutnya dapat menyala atau terbakar saat berada dalam kondisi pengujian yang telah ditetapkan. Melalui pengujian ini, dapat diperoleh gambaran mengenai perilaku aspal terhadap peningkatan temperatur, terutama saat aspal dipanaskan selama proses pencampuran maupun pelaksanaan di lapangan. Alat dan bahan uji pada tabel berikut:

Tabel 3. 13 Alat dan Bahan Pengujian Titik Nyala Aspal

No	Gambar	Keterangan
1		Nyala api pengujian

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. 14 Alat dan Bahan Pengujian Titik Nyala Aspal (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
2		Cawan kuningan
3		Aspal Penetrasi 60/70
4		Timbangan kapasitas 5000 gram

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.3.9 Alat dan Bahan Uji Titik Lembek Aspal

Uji titik lembek pada bahan aspal berfungsi agar menentukan temperatur ketika aspal mengalami transisi dari keadaan padat ke kondisi lebih lunak. Uji titik lembek pada aspal berfungsi untuk mengetahui suhu ketika aspal mulai melunak hingga menyentuh pelat dasar di bawah cincin akibat beban bola baja. Peralatan dan bahan yang akan digunakan ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 3. 15 Alat dan Bahan Pengujian Titik Lembek Aspal

No	Gambar	Keterangan
1		Dudukan benda uji, Disertai dengan pengarah bola baja dan plat dasar dengan jarak tertentu

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. 16 Alat dan Bahan Pengujian Titik Lembek Aspal (lanjutan)

No	Gambar	Keterangan
2		Alat pengukur suhu (Termometer)
3		Aspal Penetrasi 60/70
4		Bola baja diameter 9,53 mm
5		Gelas beaker
6		Alat uji titik lembek

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4 Pengujian Agregat

Uji agregat merupakan prosedur laboratorium yang dirancang untuk mengevaluasi sifat-sifat fisik serta mekanis dari material agregat, baik berupa pasir, kerikil, maupun batu pecah, yang dipakai pada pekerjaan perkerasan jalan maupun beton. Pengujian ini sangat penting agar agregat yang digunakan sesuai dengan standar mutu teknis.

Melalui pengujian agregat, dapat diketahui apakah material tersebut memenuhi persyaratan teknis yang telah ditetapkan dalam standar atau spesifikasi yang berlaku. Kesesuaian mutu agregat sangat berpengaruh terhadap kekuatan, keawetan, dan stabilitas struktur yang dihasilkan. Oleh karena itu, pelaksanaan uji agregat menjadi tahap penting dalam proses pengendalian mutu material agar hasil konstruksi yang dicapai dapat berfungsi secara optimal dan memiliki umur layanan yang panjang. Berikut adalah beberapa parameter yang biasanya diuji:

3.4.1 Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

Tahapan pengujian analisa saringan pada agregat kasar mengacu pada standar SNI ASTM C136, tahun 2012 dengan langkah-langkah berikut ini:

1. Menimbang agregat sesuai dengan ukuran nominal maksimum yang telah ditentukan, berdasarkan spesifikasi yang tercantum pada tabel 3.17

Tabel 3. 17 Spesifikasi Analisa Saringan Agregat

Ukuran Nominal Maksimum bukaan saringan		Massa Minimum dari contoh uji	
mm	inci	mm	inci
9,5	3/8	1	2
12,5	1/2	2	4
19,0	3/4	5	11
25,0	1	10	22
37,5	1 1/2	15	33
50,0	2	20	44
63,0	2 1/2	35	77
75,0	3	60	130
90,0	3 1/2	100	220
100,0	4	150	330
125,0	5	300	660

(Sumber : SNI ASTM C136:2012)

2. Mengeringkan agregat didalam oven pada temperatur suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sampai tercapai berat konstan yaitu ketika hasil penimbangan tidak berubah setelah dilakukan tiga kali penimbangan berturut-turut.
3. Menyusun rangkaian saringan secara berurutan mulai dari ukuran terbesar hingga terkecil, yaitu: 1", 3/4", 1/2", 3/8", no 4, no 8, no. 16, no 30, no 50, no 100, no 200, serta pan di bagian paling bawah.
4. Menimbang jumlah agregat kasar yang tertahan pada setiap ukuran saringan setelah proses pengayakan.

5. Menghitung persentase distribusi agregat diukur pada tahap akhir menggunakan bantuan *Microsoft Excel* dan disajikan pada tabel 3.18

Tabel 3. 18 Hasil Uji Analisa Saringan Agregat Kasar

Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar ASTM C136, Tahun 2012					
Ukuran Agregat		4.75 - 14	mm		
Berat Agregat			gram		
Saringan		Berat Tertahan	Berat Kumulatif	% Tertahan	% Lolos
No.	mm	gram	gram		
3/4"	19				
1/2"	12.5				
3/8"	9.5				
#4	4.75				
#8	2.36				
#16	1.18				
#30	0.6				
#50	0.3				
#100	0.15				
#200	0.075				
PAN					
Total					

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Pengujian berat jenis pada agregat kasar dilakukan sesuai dengan ketentuan SNI 1969, 2016. Adapun langkah-langkah adalah sebagai berikut:

1. Menimbang agregat sesuai ukuran nominal maksimum yang ditentukan, mengacu pada spesifikasi yang telah ditetapkan pada tabel 3.19

Tabel 3. 19 Spesifikasi Berat Jenis Agregat Kasar

Ukuran Maksimum		Massa minimum sampel
inci	satuan	Berat
6	150 mm	125 kg
5	125 mm	75 kg
4½	112 mm	50 kg
4	100 mm	40 kg
3½	90 mm	25 kg
3	75 mm	18 kg
2½	63 mm	12 kg
2	50 mm	8 kg
1½	37.5 mm	5 kg
1	25.0 mm	4 kg
¾	19.0 mm	3 kg
½	12.5 mm	2 kg
⅜	9.50 mm	2 kg
3/16	4.75 mm	2 kg

(Sumber : SNI 1969, 2016)

2. Mencuci agregat kasar, lalu sampel dimasukkan ke dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hingga mencapai berat konstan. Selanjutnya, agregat ditimbang menggunakan timbangan digital dengan tingkat ketelitian 0,01 gram.
3. Menimbang agregat yang telah mencapai berat tetap, kemudian merendamnya dalam air bersuhu ruangan selama 15 hingga 19 jam.
4. Mengeringkan agregat setelah proses perendaman dengan cara melapnya menggunakan kain bersih hingga mencapai kondisi kering permukaan jenuh (SSD), kemudian menimbangnya.
5. Pada tahap akhir, mengeringkan kembali agregat yang telah ditimbang dalam oven sampai mencapai berat tetap, lalu melakukan penimbangan ulang. Hasil perhitungan diberikan pada tabel 3.20

Tabel 3. 20 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar SNI 1969, Tahun 2008				
1	No.Order/Contoh	:		
2	Jenis contoh uji	:		
3	Jumlah contoh uji	:		
4	Diterima tanggal	:		
5	Di uji tanggal	:		
6	Temp. Ruangan	:		
Pengujian		Notasi	I	II
Berat benda uji kering oven		A		
Berat benda uji jenuh kering permukaan diudara (SSD)		B		
Berat benda uji didalam air		C		
Perhitungan		Persamaan	I	II
Berat jenis curah (Sd)		$\frac{A}{B - C}$		
Berat jenis jenuh kering permukaan (Ss)		$\frac{B}{B - C}$		
Berat jenis semu (Sa)		$\frac{A}{A - C}$		
Penyerapan (Sw)		$[\frac{B-A}{A}] \times 100$		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.3 Pengujian Keausan Agregat Kasar

Pengujian aus pada agregat kasar dilakukan berdasarkan standar SNI 2417 tahun 2008. Tahapan pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Proses awal pengujian dilakukan dengan cara menimbang agregat sesuai persyaratan yang terdapat pada tabel 3.21

Tabel 3. 21 Gradasi Benda Uji

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)						
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	B	C	D	E	F	G
mm	inci	mm	inci							
75	3,0	63	2 1/2	-	-	-	-	2500±50	-	-
63	2 1/2	50	2,0	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	2,0	37,5	1 1/2	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
37,5	1 1/2	25	1	1250±25	-	-	---	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	1	19	3/4	1250±25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	3/4	12,5	1/2	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
12,5	1/2	9,5	3/8	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,3	1/4	4,75	No.4	-	-	2500±10	2500±10	-	-	-
4,75	No. 4	2,36	No. 8	-	-	-	2500±10	-	-	-
Total				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±10	10000±10	10000±10
Jumlah bola				12	11	8	6	12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	4584±25	3330±20	2500±15	5000±25	5000±25	5000±25

(Sumber : SNI 241, 2008)

- Menimbang agregat, kemudian mencucinya dan mengeringkan dalam oven pada temperatur suhu (110 ± 5) °C hingga mencapai kondisi berat konstan. Setelah itu, peneliti menimbang kembali agregat untuk memperoleh berat tetap.
- Menimbang kembali agregat yang telah memiliki berat tetap sesuai jumlah yang tercantum dalam tabel, lalu memisahnya berdasarkan ukuran. Selanjutnya, agregat dimasukkan bersama bola baja ke dalam mesin abrasi *Los Angeles* sesuai ketentuan, kemudian mesin dioperasikan dengan jumlah putaran sebanyak 500 kali.
- Setelah mesin diputar sebanyak 500 kali, mengeluarkan agregat dari mesin dan menyaringnya menggunakan saringan No.12. Peneliti kemudian mencuci butiran agregat yang tertahan di atas saringan hingga bersih.
- 27 la tahap akhir, mengeringkan kembali agregat hasil penyaringan di dalam oven pada suhu (110 ± 5) °C hingga mencapai berat tetap, lalu menimbang akhir benda uji. Perhitungan disajikan pada tabel 3.22

12
Tabel 3. 22 Hasil Uji Keausan Agregat Kasar

Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles SNI 2417, Tahun 2008			
1	No. Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
Grasi Pemeriksaan		Jumlah Putaran =..... Putaran	
Ukuran Saringan		I	II
Lolos	Tertahan	Berat (a)	Berat (a)
76,2 (3")	63,5 (2 1/2")		
63,5 (2 1/2")	50,8 (2")		
50,8 (2")	36,1 (1 1/2")		
36,1 (1 1/2")	25,4 (1")		
25,4 (1")	19,1 (3/4")		
19,1 (3/4")	12,7 (1/2")		
12,7 (1/2")	9,52 (3/8")		
9,52 (3/8")	6,35 (1/4")		
6,35 (1/4")	4,75 (No.4)		
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)		
Jumlah Berat (a)			
Berat tertahan saringan No.12 sesudah percobaan (b)			

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.4 Pengujian Kelekatan Agregat Kasar

Langkah-langkah uji kelekatan pada agregat terhadap aspal ketentuan SNI 2439, tahun 2011. Adapun tahapan pelaksanaannya sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian.
2. Menimbang 100 gram agregat kasar, lalu memasukkannya ke dalam wadah yang telah tersedia dengan pengaduk.
3. Memanaskan wadah berisi agregat kasar di dalam oven pada suhu $(140 \pm 5) ^\circ\text{C}$ selama 1 jam.
4. Memanaskan aspal pada wadah terpisah hingga mencair.
5. Menambahkan aspal cair sebanyak $5,5 \pm 0,2$ gram ke dalam wadah berisi agregat panas.
6. Mengaduk campuran agregat dan aspal selama 2–3 menit hingga seluruh permukaan agregat terlapisi aspal secara merata.
7. Membiarkan campuran hingga mencapai suhu ruang.
8. Memindahkan campuran agregat berlapis aspal ke dalam gelas beaker berkapasitas 600 ml.

9. Menuangkan air suling ke dalam gelas beaker sebanyak 400 ml.
10. Mendinginkan campur⁹³ dalam kondisi suhu ruang selama 20 menit.
11. Mengambil lapisan aspal yang mengapung di permukaan air tanpa mengganggu posisi agregat di bagian bawah.
12. Melakukan pengamatan dan estimasi terhadap⁷³ persentase permukaan agregat yang masih dilapisi aspal. Perhitungan disajikan pada tabel 3.23

Tabel 3. 23 Hasil Uji Kelekataan Agregat

Penguji ² an Kelekataan Agregat SNI 2439, Tahun 2011			
1	No. Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	PARAMETER	SATUAN	HASIL PENGUJIAN
1	Berat agregat	gram	
2	Berat aspal yang digunakan	gram	
3	Suhu pemanasan agregat	°C	
4	Lama pemanasan	menit	
5	Volume air suling	ml	
6	Waktu perendaman	menit	
7	Persentase luas agregat yang masih tertutup aspal $\frac{\text{Skala pasir}}{\text{Skala lumpur}} \times 100\%$		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.5 Penguji⁹an Analisa Saringan Agregat Halus

Langkah-langkah Penguji⁵⁰an pada analisa sa⁵⁰an berdasarkan SNI ASTM C136, tahun 2012, tahapan pelaksanaannya adalah sebagai berikut:

1. Mengeringkan agregat halus dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, kemudian menimbanginya sebanyak minimal 300 gram hingga mencapai kondisi berat konstan.
2. Menyusun rangkaian saringan⁸⁶ secara berurutan mulai dari ukuran terbesar hingga terkecil, yaitu no 4, no 8, no 16, no 30, no 50, no 100, no 200, dan pan di bagian paling bawah.
3. Memasukkan agregat halus seberat 300 gram ke dalam s⁸aringan saringan, kemudian menggetarkannya dengan mesin penggetar selama 15 menit.
4. Menimbang agregat halus yang tertahan pada setiap saringan setelah proses penggetaran selesai.
5. Pada tahap akhir, menghitung persentase distribusi agregat dengan⁷⁶ menggunakan bantuan per³angkat lunak *Microsoft Excel* pada tahap akhir. Perhitungan disajikan pada tabel 3.24

Tabel 3. 24 Hasil Uji Analisa Saringan Agregat Halus

Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus ASTM C136, Tahun 2012				
Ukuran Agregat		0 - 2.36	mm	
Berat Agregat			gram	
Saringan		Berat Tertahan	Berat Komulatif	% Tertahan % Lolos
No.	mm	gram	gram	
3/4"	19			
1/2"	12.5			
3/8"	9.5			
#4	4.75			
#8	2.36			
#16	1.18			
#30	0.6			
#50	0.3			
#100	0.15			
#200	0.075			
PAN				
Total				

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.6 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Langkah-langkah uji berat jenis pada agregat halus berdasarkan SNI 1970, tahun 2008. Adapun tahapan pelaksanaannya adalah sebagai berikut:

1. Mengeringkan agregat dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hingga mencapai kondisi berat konstan.
2. Mendinginkan agregat hingga suhu pada ruang, lalu merendamnya di dalam air selama ± 24 jam.
3. Membuang air ke rendaman dengan pelan-pelan agar butiran agregat tidak hilang, kemudian memindahkan agregat ke dalam nampan.
4. Mengeringkan agregat dengan cara mengaduk atau membalik-baliknya di udara panas hingga mencapai kondisi kering permukaan jenuh (SSD).
5. Memeriksa kondisi SSD dengan menggunakan kerucut uji. Agregat dimasukkan dan dipadatkan dengan cara menukik sebanyak 25 kali. Jika setelah kerucut diangkat benda uji runtuh namun masih mempertahankan bentuk kerucutnya, maka kondisi SSD dianggap tercapai. Menghentikan proses pengeringan pada kondisi ini. Setelah kondisi SSD tercapai, memasukkan benda uji seberat (500 ± 10) gram ke dalam piknometer.
6. Mengisi piknometer dengan air suling hingga sekitar 90% volumenya, kemudian mengguncang dan memutarnya sampai tidak ada lagi gelembung udara yang muncul.

7. Menimbang piknometer beserta air dan material uji di dalamnya
8. Mengeluarkan benda uji dari piknometer, kemudian mengeringkannya kembali dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hingga mencapai berat tetap, lalu mendinginkannya. Setelah itu, menimbang benda uji yang telah dikeringkan dari oven (Bk).
9. Pada tahap terakhir, menimbang piknometer yang berisi air penuh (B). Perhitungan disajikan pada tabel 3.25

Tabel 3. 25 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus SNI 1970, Tahun 2008						
1	No. Order/Contoh	:				
2	Jenis contoh uji	:				
3	Jumlah contoh uji	:				
4	Diterima tanggal	:				
5	Di uji tanggal	:				
6	Tempat uji	:				
Pengujian			Notasi	I	II	III
Berat benda uji kering oven			A			gram
Berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan			B			gram
Berat piknometer yang berisi air			D			gram
Berat piknometer yang berisi air dan agregat			Dt			gram
Perhitungan			Persamaan	I	II	III
Berat jenis curah (Sd)			$\frac{A}{(D + B - Dt)}$			
Berat jenis jenuh kering permukaan (Ss)			$\frac{B}{(D + B - Dt)}$			
Berat jenis semu (Sa)			$\frac{A}{(D + A - Dt)}$			
Penyerapan (Sw)			$\left[\frac{B-A}{A}\right] \times 100$			

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.4.7 Pengujian Sand Equivalent Agregat Halus

Langkah-langkah uji Sand Equivalent pada agregat berdasarkan ketentuan SNI 03 4428, tahun 1997, tahapan pelaksanaan sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji sebanyak 85 ml, kemudian mengeringkannya di dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hingga mencapai berat konstan. Setelah itu, saya mendinginkan benda uji hingga mencapai suhu ruang.
2. Mengatur posisi tangkai penunjuk beban ke dalam gelas ukur ketika gelas masih dalam kondisi kering, kemudian mencatat skala yang ditunjukkan.

3. Mengisi tabung plastik dengan larutan kerja hingga mencapai tanda skala 5.
4. Memasukkan benda uji yang telah dikeringkan dan lolos saringan No. 4 (4,76 mm) ke dalam bung plastik, kemudian mengetuknya perlahan dan mendingkannya selama 10 menit.
5. Menutup tabung rapat menggunakan karet atau gabus, lalu memiringkannya hingga material hampir mengendap. Selanjutnya, saya mengocok tabung dengan ban alat pengocok.
6. Menambahkan larutan kerja melalui pipa pengalir mulai dari bagian bawah lapisan pasir hingga ke atas. Setelah itu, melakukan penambahan hingga larutan mencapai skala 15, kemudian membiarkannya dalam kondisi diam selama 20 menit.
7. Melakukan pembacaan dan mencatat skala permukaan koloid (lumpur A) dengan ketelitian satu angka di belakang koma setelah waktu tunggu selesai.
8. Melakukan pembacaan skala pasir (B) dengan melihat keping skala pada lapisan pasir. Setelah itu, mendapatkan nilainya dari hasil pembacaan skala pasir dikurangi tinggi bang penunjuk (biasanya 10 skala), kemudian mencatatnya hingga satu angka di belakang koma setelah letakkan beban perlahan di atas permukaan pasir. Perhitungan disajikan pada tabel 3.26

Tabel 3. 26 Hasil Uji Sand Equivalent Agregat Halus

Pengujian Sand Equivalent SNI 4428, Tahun 1997			
1	No.Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	URAIAN	I	II
1	Tera tinggi penunjuk beban ke dalam gelas ukur (gelas dalam keadaan kosong)		
2	Baca skala lumpur (pembacaan skala permukaan lumpur lihat pada dinding gelas ukur)		
3	Masukkan beban, baca skala beban pada tangkai petunjuk		
4	Bacaan skala pasir (3) - (1)		
5	Nilai Sand Equivalent $\frac{\text{Skala pasir}}{\text{Skala lumpur}} \times 100\%$		
6	Rata - rata nilai Sand Equivalent		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.5 Pengujian Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian aspal merupakan rangkaian aktivitas yang dilakukan di laboratorium guna memperoleh gambaran menyeluruh mengenai sifat-sifat aspal yang digunakan sebagai bahan pengikat dalam konstruksi perkerasan jalan. Kegiatan pengujian ini mencakup penilaian terhadap karakteristik fisik, mekanis, dan kimia aspal untuk memastikan kesesuaiannya dengan kebutuhan perencanaan perkerasan. Salah satu fungsi utama dari pengujian 1681 yaitu untuk memastikan bahwa aspal dengan kelas penetrasi 60/70 memenuhi persyaratan mutu yang telah ditetapkan dalam standar teknis yang berlaku. Aspal yang memenuhi standar diharapkan memiliki daya rekat yang baik terhadap agregat, mampu beradaptasi terhadap perubahan suhu lingkungan, serta memiliki ketahanan yang memadai dalam menerima dan menahan beban lalu lintas yang bekerja secara berulang. Beberapa parameter penting yang diuji pada aspal penetrasi 60/70 antara lain:

3.5.1 Pengujian Penetrasi Aspal

Langkah-langkah Pengujian Penetrasi Aspal berdasarkan SNI 2432, tahun 2011, sebagai berikut:

1. Memanaskan sampel aspal hingga mencair, lalu menuang 36 cairan tersebut ke dalam cawan logam. Setelah itu, mendingin 11 pada suhu ruang selama ± 1 jam, kemudian merendamnya dalam air bersuhu 25°C selama 1–1,5 jam sebelum melakukan pengujian.
2. Memasang jarum pada alat penetrometer dan memastikan posisinya tegak lurus. 13
3. Menambahkan pemberat 50 gram di atas jarum sehingga total beban mencapai $100 \pm 0,1$ gram.
4. Menurunkan jarum perlahan hingga menyentuh permukaan aspal, lalu mengatur dial penetrometer pada angka nol.
5. Melepaskan jarum yang telah diberi beban sambil menyalakan stopwatch secara bersamaan, kemudian membiarkan jarum menembus sampel selama $5 \pm 0,1$ detik. Setelah jarum berhenti, membaca nilai penetrasi pada dial penetrometer yang sejajar dengan jarum petunjuk, lalu membulatkan hasil pengukuran ke 0,1 mm terdekat. 53
6. Mengulangi prosedur minimal tiga kali pada sampel yang sama, dengan ketentuan titik penetrasi berjarak lebih 25 dari 1 cm dari dinding wadah penetrasi aspal. Perhitungan disajikan pada tabel 3.27

Tabel 3. 27 Hasil Uji Penetrasi Aspal

Pengujian Penetrasi Aspal SNI 2456, Tahun 2011							
1	No.Order/Contoh	:					
2	Jenis contoh uji	:					
3	Jenis Pekerjaan	:					
4	Diterima tanggal	:					
5	Di uji tanggal	:					
2	Contoh Dipanaskan	Mulai : Pk.	Temperatur Pemanasan : °C				
		Selesai : Pk.					
	Didiamkan pada temperatur ruang	Mulai : Pk.					
		Selesai : Pk.					
	Direndam pada temperatur 25°C	Mulai : Pk.	Temperatur bak perendam : °C				
		Selesai : Pk.					
	Pemeriksaan penetrasi pada 25°C	Mulai : Pk.	Temperatur alat : °C				
		Selesai : Pk.					
Pemeriksaan penetrasi pada 25°C 100 gram, 5 detik		I	II	III	37 Rata-Rata		
1							
2							
3							
4							
5							
Rata-Rata							

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

66

3.5.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Aspal

Langkah 30 langkah Pengujian Berat Jenis Aspal berdasarkan SNI 2441, tahun 2011, sebagai berikut:

1. Mengisi wadah dengan air suling hingga ketinggian air menutupi bagian atas piknometer sekitar 40 mm, kemudian menempatkan wadah tersebut dalam bak perendaman dengan kedalaman minimal 100 mm.
2. Membersihkan dan mengeringkan piknometer, lalu menimbanginya dengan ketelitian 1 mg untuk memperoleh berat awal, setelah itu menutupnya dengan rapat.
3. Mengeluarkan wadah dari bak perendaman, kemudian mengisi piknometer hingga penuh dengan air suling. Setelah itu, memasang kembali tutup tanpa memberikan tekanan berlebih.
4. Mengembalikan piknometer yang sudah terisi air ke dalam wadah perendaman, menekan penutup hingga rapat, dan merendamnya selama sedikitnya 30 menit. Setelah itu, mengangkat piknometer, mengeringkannya menggunakan kain, lalu menimbanginya kembali dengan ketelitian 1 mg.

5. Memasukkan sampel aspal ke dalam piknometer kering sampai mencapai kondisi terisi sebagian. Membiarkan piknometer selama sekitar 40 menit agar suhu sampel mencapai kondisi setimbang, kemudian menimbanginya bersama penutup dengan ketelitian 1 mg.
6. Menambahkan air suling ke dalam piknometer yang berisi sampel hingga hampir penuh, kemudian memasang kembali tutup tanpa tekanan dan membiarkannya hingga seluruh udara yang terperangkap keluar.
7. Mengangkat kembali wadah dari bak, menempatkan piknometer di dalamnya, dan menekan tutup hingga rapat. Setelah itu, mengembalikannya ke bak perendaman dan merendamnya selama minimal 30 menit. Terakhir, mengeluarkan, lalu mengeringkan, dan menimbang piknometer untuk memperoleh hasil akhir. Perhitungan disajikan pada tabel 3.28

Tabel 3. 28 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Aspal

Pengujian Berat Jenis Aspal SNI 2441, Tahun 2011			
1	No. Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jenis Pekerjaan	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
7	Contoh Dipanaskan	Mulai : Pk. Selesai : Pk.	Temperatur Oven : °C
	Didiamkan pada temperatur ruang	Mulai : Pk. Selesai : Pk.	
	Direndam pada temperatur 25°C atau 15,6°C	Mulai : Pk. Selesai : Pk.	Temperatur bak perendam : °C
	Pemeriksaan Berat Jenis	Mulai : Pk. Selesai : Pk.	
12	Pengujian	I	II
	Berat piknometer + aspal (C)		
	Berat piknometer kosong (A)		
	Berat aspal (C-A)		
	Berat piknometer + air (B)		
	Berat piknometer kosong (A)		
	Berat air (B-A)		
	Berat piknometer + aspal + air (D)		
	Berat piknometer + aspal (C)		
	Berat air (B-A)		
	Berat air (B-A)-(D-C)		
	Berat jenis = $\frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$		
	Berat jenis rata-rata		
	Berat isi = berat jenis x W_T		
W_T adalah berat isi pada temperatur pengujian (W_T pada 15,6°C = 999,1 kg/m ³ , W_T pada 25°C = 997,0 kg/m ³)			

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.5.3 Pengujian Daktilitas Aspal

Langkah-langkah pengujian daktilitas aspal berdasarkan SNI 2432, tahun 1991, sebagai berikut:

1. Aspal dipanaskan hingga mencapai kondisi cair dengan suhu yang terkontrol, tanpa melebihi batas pemanasan yang ditetapkan, agar sifat fisik aspal tidak mengalami perubahan.
2. Cetakan daktilitas dibersihkan dan dilapisi dengan bahan pemisah (seperti gliserin) untuk mencegah aspal melekat pada cetakan.
3. Aspal cair dituangkan ke dalam cetakan daktilitas hingga penuh dan diratakan permukaannya, kemudian dibiarkan pada suhu ruang sampai aspal mengeras sempurna.
4. Setelah mengeras, cetakan yang berisi benda uji direndam ke dalam bak air dengan suhu pengujian 25°C selama waktu tertentu untuk memastikan suhu benda uji merata.
5. Benda uji aspal dilepaskan secara hati-hati dari cetakan agar tidak mengalami kerusakan atau deformasi awal.
6. Benda uji kemudian dipasang pada alat uji daktilitas dengan memastikan posisi kedua ujung benda uji terpasang dengan baik dan sejajar.
7. Proses pengujian dilakukan dengan menarik kedua ujung benda uji secara perlahan dan konstan menggunakan mesin daktilitas pada kecepatan penarikan yang telah ditetapkan.
8. Penarikan dilanjutkan hingga benda uji aspal mengalami putus.
9. Panjang regangan maksimum yang tercapai pada saat benda uji putus dicatat sebagai nilai daktilitas aspal.
10. Nilai daktilitas dinyatakan dalam satuan sentimeter (cm) dan digunakan sebagai parameter untuk menilai keuletan serta fleksibilitas aspal. Perhitungan disajikan pada tabel 3.29

Tabel 3. 29 Hasil Uji Daktilitas Aspal

2 Pengujian Daktilitas Aspal SNI 2432, Tahun 1991			
1	No. Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	Parameter	Hasil Pengujian (gram)	
1	Jenis Aspal		
2	Suhu Pengujian (°C)		
3	Panjang Daktilitas (cm)		
4	Keterangan		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.5.4 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Langkah-langkah Pengujian pada Titik Nyala aspal berdasarkan SNI 2432, tahun 2011, sebagai berikut:

1. Cawan uji terlebih dahulu ditempatkan pada sumber panas yang telah disiapkan, dengan memastikan posisi api berada tepat di bagian tengah bawah cawan agar proses pemanasan berlangsung merata dan stabil.
2. Selanjutnya, alat penguji nyala api (*flame applicator*) diatur posisinya sedemikian rupa sehingga sumbu atau poros alat tersebut berada pada jarak kurang lebih 7,5 cm dari pusat cawan uji untuk memperoleh kondisi pengujian yang sesuai.
3. Termometer kemudian dipasang pada posisi yang telah ditentukan, setelah itu sumber pemanas dinyalakan dan suhu dinaikkan secara bertahap dengan kecepatan pemanasan sekitar $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ setiap menit hingga mencapai temperatur $\text{suhu} \pm 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ di bawah perkiraan titik nyala.
4. Setelah suhu tersebut tercapai, laju pemanasan dikurangi menjadi sekitar 5 hingga $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ per menit guna menghindari kenaikan suhu yang terlalu cepat.
5. Untuk menjaga kestabilan nyala api selama pengujian, pelindung angin diletakkan di bagian depan arah api sehingga pengaruh hembusan udara dari lingkungan sekitar dapat diminimalkan.
6. Sumber api kemudian dinyalakan dan intensitas nyala diatur kembali agar proses pemanasan tetap berlangsung secara konstan, dengan mempertahankan kenaikan suhu sebesar $15 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ per menit sampai suhu berada $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ di bawah nilai titik nyala yang diperkirakan.
7. Melanjutkan pemanasan dengan laju $\pm 5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ per menit saat temperatur suhu berada dalam rentang $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ di bawah estimasi titik nyala.
8. Setelah itu, menghidupkan nyala peniti dan mengatur ukurannya sehingga diameter nyala berada antara 2,2 mm sampai 4,8 mm.
9. Nyala api penguji kemudian digerakkan melintasi permukaan cawan uji dari satu sisi ke sisi lainnya dengan durasi sekitar satu detik, sehingga interaksi antara nyala api dan uap yang terbentuk di atas permukaan bahan uji dapat diamati dengan jelas.
10. Seluruh rangkaian pengujian tersebut diulangi setiap kali terjadi kenaikan suhu sebesar $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan proses ini terus dilakukan secara berurutan hingga titik nyala bahan uji berhasil tercapai dan dapat dicatat sebagai hasil pengujian. Perhitungan disajikan pada tabel 3.30

62
Tabel 3. 30 Hasil Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

2 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal SNI 2433, Tahun 2011							
1	No.Order/Contoh	:					
2	Jenis contoh uji	:					
3	Jenis Pekerjaan	:					
4	Diterima tanggal	:					
5	Di uji tanggal	:					
Urutan			Contoh 1	Contoh 2		Temperatur Oven °C	
Contoh di panaskan			mulai	Pk	Pk		
			selesai	Pk	Pk		
Pemanasan dari : 56°C dibawah titik nyala			Pk	Pk	15°C per	Titik nyala perkiraan °C	
Dari 56°C sampai 28°C dibawah titik nyala perkiraan			Pk	Pk	5-6°C per		
Dari 28°C sampai titik nyala			Pk	Pk	2°C per		
					menit		
21	Temp di bawah titik nyala		Pembacaan temperatur (1)			Pembacaan Temperatur (2)	
menit	°C	menit	°C				
1		17					
2		18					
3		19					
4		20					
5		21					
6		22					
7		23					
8		24					
9		25					
10		26					
11		27					
12		28					
13		29					
14		30					
15		31					
16		32					
			Titik nyala		118 °C	°C	
			Titik nyala terkoreksi rata-rata		°C		
			Titik Bakar		°C	°C	
			Titik bakar rata-rata		°C		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

83 3.5.5 Pengujian Titik Lembek Aspal

Langkah-langkah pengujian titik lembek aspal berdasarkan SNI 2432, tahun 2011, sebagai berikut:

1. Menempatkan sampel aspal pada dudukannya, kemudian meletakkan alat pengarah bola di atas sampel tersebut. Selanjutnya, memasukkan rangkaian alat tersebut ke dalam bejana gelas.
2. Menuangkan air suling dingin bersuhu 5 ± 1 °C ke dalam bejana hingga permukaan pada air berada diantara 101,6 mm dan 108 mm.
3. Memasang termometer di antara kedua sampel dengan jarak 12,7 mm dari masing-masing cincin.

- 13
4. Mengatur posisi sehingga jarak antara pelat dasar dengan bagian bawah sampel uji menjadi 25,4 mm. Dengan bantuan penjepit, meletakkan bola baja yang telah didinginkan pada suhu 5 °C tepat di tengah permukaan atas masing-masing sampel, kemudian memasang kembali alat pengarah bola pada posisinya.
 5. Memanaskan bejana secara bertahap dengan laju peningkatan suhu rata-rata 5 °C per menit dari awal hingga akhir pengujian. Pada tiga menit pertama, meyakinkan fluktuasi kenaikan suhu tidak melebihi 0,5 °C. Perhitungan disajikan pada tabel 3.31

Tabel 3. 31 Hasil Uji Titik Lembek Aspal

2 Pengujian Titik Lembek Aspal SNI 2434, Tahun 2011					
1	No. Order/Contoh	:			
2	Jenis contoh uji	:			
3	Jenis Pekerjaan	:			
4	Diterima tanggal	:			
5	Di uji tanggal	:			
Contoh di panaskan		Mulai : Pk	Temperatur Oven :°C		
8 Didiamkan pada temperatur ruang		Selesai : Pk			
Direndam pada temperatur 25°C		Mulai : Pk			
Pemeriksaan titik lembek Dimulai pada temperatur 25°C		Selesai : Pk	Temperatur Lemari es :°C		
No	Suhu yang diamati	waktu (detik)		Titik Lembek (°C)	
	°C	I	II	I	II
1	5				
2	10				
3	15				
4	20				
5	25				
6	30				
7	35				
8	40				
9	45				
10	50				
11	55				
12	60				
13	65				
14	70				

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.6 Pengujian Filler Limba 4 Abu Kain Katun

Pengujian filler merupakan salah satu tahapan penting dalam laboratorium perkerasan jalan yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik dan kimia dari material halus berukuran kurang dari No 200 (0,075 mm).

Filler ditambahkan ke dalam campuran aspal porus untuk meningkatkan daya ikat, stabilitas, serta kepadatan campuran melalui pengisian rongga antar agregat.

Pada penelitian ini digunakan abu hasil pembakaran limbah kain katun sebagai bahan pengisi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan limbah ini diharapkan tidak hanya mengurangi ketergantungan pada filler konvensional, tetapi juga mendukung konsep reuse dalam pengelolaan limbah. Uji laboratorium dilakukan untuk memastikan bahwa abu limbah kain katun memenuhi persyaratan ukuran partikel, komposisi kimia, dan kemampuan daya ikat terhadap aspal. Berdasarkan acuan SNI ASTM C136 tahun 2012, parameter utama yang diuji pada filler antara lain:

3.6.1 Pengujian Analisa Saringan Filler

Langkah-langkah Pengujian Analisa Saringan Filler berdasarkan SNI ASTM C136, tahun 2012 sebagai berikut:

1. Menimbang filler sebanyak 500 gram dalam kondisi kering oven hingga mencapai berat yang benar-benar konstan, sebagai upaya untuk memastikan bahwa material telah bebas dari kandungan air. Setelah berat konstan tercapai, proses penakaran dilakukan sebanyak tiga kali secara berulang guna menjamin konsistensi hasil penimbangan serta memastikan bahwa tidak terjadi perubahan massa yang dapat memengaruhi keakuratan data pengujian. Menyusun saringan dengan urutan dari ukuran terbesar hingga terkecil, yaitu: no 4, no 8, no 16, no 30, no 50, no 100, no 200, dan terakhir pan sebagai tampung.
2. Memasukkan filler sebanyak 500 gram ke dalam saringan, kemudian menggetarkan menggunakan alat penggetar selama 15 menit. Setelah proses pengayakan selesai. Setelah proses pengayakan selesai dilakukan, setiap fraksi material yang masih tertahan pada masing-masing saringan kemudian dikumpulkan dan ditimbang kembali secara teliti untuk mengetahui jumlah berat material yang masih tertahan pada setiap ukuran saringan.
3. Menghitung persentase berat material yang tertahan maupun yang lolos pada setiap ukuran saringan berdasarkan hasil penimbangan yang telah diperoleh sebelumnya. Proses perhitungan ini dilakukan secara sistematis untuk mengetahui distribusi ukuran butiran material filler. Dalam pelaksanaannya, perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel. Perhitungan disajikan pada tabel 3.32

Tabel 3. 32 Hasil Uji Analisa Saringan Filler

Pengujian Analisa Saringan Filler ASTM C136, Tahun 2012				
1	No. Order/Contoh	:		
2	Jenis contoh uji	:		
3	Jumlah contoh uji	:		
4	Diterima tanggal	:		
5	Di uji tanggal	:		
No	Ukuran Saringan	Berat Tertahan (gram)	Berat (%)	Kumulatif (%)
1	No. 4			
2	No. 8			
3	No. 16			
4	No. 30			
5	No. 50			
6	No. 100			
7	No. 200			
8	Pan			
9	TOTAL			

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.6.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Filler

Langkah-langkah Pengujian pada Berat Jenis Filler berdasarkan SNI 03 4145, tahun 1996, adapun tahapan pelaksanaannya sebagai berikut:

1. Menimbang piknometer dalam kondisi kosong dilakukan sebagai langkah awal pengujian, dengan tujuan untuk memperoleh nilai berat awal piknometer yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan pada tahap selanjutnya
2. Memasukkan *filler* yang telah lolos saringan no. 200 ke dalam piknometer hingga mencapai sekitar $\frac{1}{4}$ dari volume total, kemudian nimbangnya kembali.
3. Mengisi piknometer yang sudah berisi filler dengan air suling hingga penuh, menutupnya rapat, setelah itu menimbangnya.
4. Mengosongkan dan membersihkan piknometer dilakukan secara menyeluruh hingga benar-benar bersih, sehingga tidak terdapat sisa filler atau kotoran yang menempel pada dinding bagian dalam piknometer yang dapat mempengaruhi hasil penimbangan.
5. Mengisi piknometer hanya dengan air suling hingga penuh, menutupnya rapat, lalu menimbangnya kembali untuk mendapatkan berat piknometer + air. Perhitungan disajikan pada tabel 3.33

Tabel 3. 33 Hasil Uji Berat Jenis Filler

Pengujian Berat Jenis Filler SNI 4145, Tahun 1996			
1	No.Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	Parameter	Satuan	Hasil Pengujian
1	Berat piknometer kosong (W1)	gram	
2	Berat piknometer + filler (W2)	gram	
3	Berat piknometer + filler + air (W3)	gram	
4	Berat piknometer + air (W4)	gram	
5	Berat jenis filler (pf) $\frac{(W2 - W1)}{(W4 - W1) - (W3 - W2)}$	g/cm ³	

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.7 Rencana Batas Gradasi Agregat

Pembuatan campuran pada aspal porus 150 membutuhkan rancangan gradasi agregat yang tepat agar diperoleh benda uji sesuai dengan spesifikasi teknis 14 diharapkan. Dalam penelitian ini, acuan digunakan adalah (AAPA) dengan menerapkan tipe gradasi *Open Graded Asphalt* (OGA14) yang memiliki ukuran agregat maksimum 14 mm. Gradasi OGA14 dirancang untuk menghasilkan struktur berongga yang dapat meningkatkan permeabilitas, namun tetap memberikan stabilitas yang memadai pada lapisan perkerasan. Batas-batas gradasi agregat untuk tipe OGA14 ditampilkan pada tabel 3.34 sebagai berikut:

Tabel 3. 34 Rencana Batas Gradasi Agregat

Diameter Saringan (mm)	Jenis Campuran	
	OGA10	OGA14
	Persentase Lolos (%)	
19,0	100	100
13,2	100	85-100
9,5	85-100	45-70
6,7	35-70	25-45
4,75	20-45	10-25
2,36	10-20	7-15
1,18	6-14	6-12
0,600	5-10	5-10
0,300	4-8	4-8
0,150	3-7	3-7
0,075	2-5	2-5
Total	100	100
Kadar Aspal Optimum (%)	5,0 – 6,5	4,5 – 6,0

(Sumber : Australian Asphalt Pavement Association, 2004)

Ukuran maksimum agregat yang lebih besar cenderung menghasilkan kadar rongga yang lebih tinggi sehingga mempermudah aliran maupun resapan air. Namun, kondisi ini berbanding terbalik dengan stabilitas campuran, di mana semakin besar ukuran agregat, maka tingkat stabilitas yang diperoleh justru semakin rendah

3.8 Campuran Agregat dan Pembuatan Benda Uji

Proses pencampuran agregat (*bleeding aggregate*) dilakukan setelah seluruh persyaratan agregat terpenuhi. Ususnya hasil uji analisis saringan. Tahapan ini bertujuan untuk menjamin bahwa gundasi dari setiap fraksi agregat telah sesuai persyaratan yang tercantum pada Spesifikasi Bina Marga (2018) Revisi 2.

Pada penelitian ini, pembuatan benda uji mengacu pada standar ASTM D6926-20 (2020) dengan menggunakan cetakan silinder berdiameter 101 mm (4 inci) dan tinggi 63,5 mm (2,5 inci). Campuran aspal yang telah dipanaskan dituangkan ke dalam cetakan, kemudian dipadatkan dengan 75 tumbukan pada masing-masing sisi. Setelah proses pemadatan selesai, benda uji dibiarkan hingga mencapai suhu ruang sebelum dikeluarkan dari cetakan. Untuk menjaga keakuratan hasil, setiap variasi campuran dibuat sekurang-kurangnya tiga benda uji, sesuai dengan ketentuan ASTM D6927 (2015), sehingga potensi kesalahan dapat diminimalkan dan tingkat ketelitian pengujian dapat ditingkatkan.

3.9 Pengujian Benda Uji Aspal Porus

Pengujian terhadap sampel merupakan tahapan akhir dalam penelitian yang bertujuan memperoleh data karakteristik serta menilai apakah benda uji telah memenuhi kriteria yang dipersyaratkan. Dalam studi ini, dilakukan empat jenis pengujian utama, yaitu *Marshall Test*, *Cantabro Loss* (CL), *Asphalt Flow Down* (AFD), serta uji kepadatan (*Density*).

68

3.9.1 Pengujian Marshall

Setelah benda uji selesai diproduksi, tahap berikutnya adalah melakukan pengujian *Marshall*. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan campuran agregat dan aspal terhadap deformasi plastis (*flow*), sekaligus memperoleh parameter-parameter penting seperti (VIM), *Void in* (VMA), (VFWA), *Density*, *stability*, dan *Marshall*. Pengujian dilaksanakan berdasarkan ASTM D6927 dan ketentuan SNI 06 2489, tahun 1991 sebagai berikut:

Tahapan pengujian Marshall, sebagai berikut:

1. Membersihkan permukaan benda uji dilakukan terlebih dahulu dengan tujuan menghilangkan kotoran, debu, maupun partikel lain yang menempel, sehingga benda uji berada dalam kondisi bersih dan siap digunakan sebagai tahap persiapan awal pengujian.
2. Mengukur tinggi benda uji dilakukan pada tiga titik yang berbeda di sekeliling benda uji, kemudian hasil pengukuran tersebut dirata-ratakan untuk memperoleh nilai tinggi rata-rata yang merepresentasikan kondisi tual benda uji.
3. Menimbang benda uji dalam kondisi kering dan mencatat beratnya sebagai berat awal.
4. Merendam sampel dalam air bersuhu ruang selama 20–24 jam hingga mencapai kondisi jenuh.
5. Menimbang benda uji ke dalam air untuk mendapatkan berat isi jenuh.
6. Mengangkat benda uji, mengeringkan permukaannya dengan kain lembap hingga mencapai kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD), lalu menimbang kembali.
7. Merendam benda uji dalam waterbath bersuhu 60 ± 1 °C selama ± 30 menit.
8. Membersihkan batang penuntun dan bagian dalam kepala penekan (*test head*), kemudian melumasi agar dapat bergerak bebas. Jika diperlukan, merendam kepala penekan pada suhu 21–38 °C.
9. Memasang alat pengukur kelelahan (*flow meter*) di atas salah satu batang penuntun setelah proses perendaman selesai.
10. Mengatur kepala penekan hingga menyentuh bagian bawah cincin penguji, lalu mengatur jarum dial pengukur pada posisi nol.
11. Melakukan pembebanan dengan laju konstan 50 mm/menit hingga beban maksimum tercapai, kemudian mencatat nilai flow dari arloji pengukur saat beban berhenti bertambah.
12. Mengeluarkan benda uji dari mesin penguji dilakukan setelah proses pembebanan selesai.
13. Mengulangi seluruh prosedur pengujian dilakukan untuk setiap benda uji yang telah disiapkan sesuai dengan variasi campuran yang direncanakan, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara konsisten. Perhitungan disajikan pada tabel 3.35

6
Tabel 3. 35 Hasil Uji Marshall

Pengujian Marshall Aspal SNI 06-2489, Tahun 1991														
No	Spesifikasi	Berat benda uji				Volume benda uji	G _{mb}	G _{mm}	VMA	VMI	VFB	Stabilitas		
		%hd berat agregat	%hd berat aspal	Kering	SSD							Bacaan pada alat	Kalibrasi proving ring	Setelah dikoreksi
		%	%	gr	gr	cc	gr/cc		%	%	%			kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1														
2														
3														
Rata-rata														
1														
2														
3														
Rata-rata														
1														
2														
3														
Rata-rata														
1														
2														
3														
Rata-rata														
1														
2														
3														
Rata-rata														

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

29

3.9.2 Pengujian Cantabro Loss

1 Pengujian *Cantabro Loss* (CL) dilakukan setelah uji keausan menggunakan mesin *Los Angeles* dengan tujuan untuk mengetahui persentase kehilangan massa (*loss*) pada benda uji akibat abrasi. Prosedur pengujian ini sesuai acuan pada standar ASTM D7064. Adapun pelaksanaannya uji CL, sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji dengan melakukan penimbangan terlebih dahulu sebelum proses pengujian dilaksanakan, sehingga massa awal benda uji dapat diketahui secara akurat dan digunakan sebagai data pembanding pada tahap selanjutnya.
2. Memasukkan sampel ke dalam mesin *Los Angeles* tanpa menambahkan bola baja sebagai media tumbukan.
3. Memutar mesin sebanyak 300 kali sehingga benda uji mengalami gesekan dan benturan di dalam tabung.
4. Mengeluarkan benda uji setelah proses pemutaran selesai, lalu menimbang kembali untuk mengetahui perubahan massa akibat keausan. Perhitungan disajikan pada tabel 3.36

Tabel 3. 36 Hasil Uji *Cantabro Loss*

2 Pengujian Cantabro Loss ASTM D7064, Tahun 2013			
1	No.Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	Parameter	Hasil Pengujian (gram)	
1	Berat Awal (W_1)		
2	Berat Akhir (W_2)		
3	Cantabro Loss $CL = \frac{(W_1 - W_2)}{(W_1)} \times 100\%$		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.9.3 Pengujian *Asphalt Flow Down*

Uji *Asphalt Flow Down* (AFD) berfungsi untuk mengetahui kecenderungan aspal dalam campuran mengalami *drain-down* atau aliran keluar saat terkena panas. Proses ini dilakukan berdasarkan acuan ASTM D6390. Adapun tahapan pengujian AFD sebagai berikut:

1. Melapisi bagian permukaan naman sebagai cetakan menggunakan aluminium foil, kemudian menimbang dan mencatat berat awal cetakan sebagai bagian dari persiapan awal.
2. Menyiapkan campuran aspal hingga homogen, lalu menuangkannya ke dalam cetakan yang telah dilapisi aluminium foil, meratakan permukaannya, kemudian menimbang seluruh cetakan untuk memperoleh berat total.
3. Memasukkan cetakan yang sudah berisi campuran ke dalam oven yang sebelumnya telah diatur pada suhu sekitar ± 160 °C, kemudian melakukan proses pemanasan selama kurang lebih 60 menit.
4. Mengulangi seluruh proses pemanasan pada setiap cetakan yang berisi campuran, dengan menyesuaikan dengan jumlah spesimen yang diperlukan.
5. Mengeluarkan cetakan dari oven setelah pemanasan selesai, menuangkan campuran aspal keluar, kemudian menimbang kembali cetakan yang masih menyisakan lapisan aspal pada aluminium foil untuk mendapatkan berat akhir. Perhitungan disajikan pada tabel 3.37

Tabel 3. 37 Hasil Uji *Asphalt Flow Down*

2 Pengujian Asphalt Flow Down ASTM D6390, Tahun 2011			
1	No.Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	Parameter	Hasil Pengujian (gram)	
1	Berat Awal Cetakan (W1)		
2	Berat Total (W2)		
3	Asphalt Flow Down (AFD) $AFD = \frac{(W2-W3)}{(W2-W1)} \times 100\%$		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.9.4 Pengujian *Density*

Pengujian 160 datan campuran beraspal dilakukan untuk mengetahui berat jenis *bulk* benda uji. Metode 127 mengacu pada SNI 06-2489-1991. Tahapan prosedur pengujian *density* adalah sebagai berikut:

1. Mengeringkan benda uji di dalam oven pada suhu 110 ± 5 °C hingga mencapai berat tetap (kondisi 147 g oven).
2. Merendam benda uji dalam air selama 3–5 menit, atau sesuai waktu yang ditentukan dalam standar acuan.
3. Mengangkat benda uji, kemudian mengeringkan permukaan luarnya dengan 89 lap hingga tampak kering, namun kondisi pori-porinya tetap jenuh SSD (*Saturated Surface Dry*).
4. 111 nimbang benda uji dalam air untuk memperoleh berat terendam. Perhitungan disajikan pada tabel 3.38

Tabel 3. 38 Hasil Uji *Density*

2 Pengujian Density SNI 2489, Tahun 1991			
1	No.Order/Contoh	:	
2	Jenis contoh uji	:	
3	Jumlah contoh uji	:	
4	Diterima tanggal	:	
5	Di uji tanggal	:	
No	Parameter	Hasil Pengujian (gram)	
1	Berat Kering Oven (W1)		
2	Berat SSD (W2)		
3	Berat Terendam (W3)		
4	Berat Jenis Bulk (Gmb) $Gmb = \frac{W1}{(W2-W3)}$		

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.9.5 Pengujian Permeabilitas

Permeabilitas merupakan salah satu sifat penting yang menentukan kemampuan lapisan perkerasan dalam mengalirkan air hujan melalui rongga

udara di dalam campuran. Sifat ini sangat berpengaruh terhadap kinerja fungsional aspal porus sebagai lapisan drainase permukaan jalan. Campuran yang memiliki permeabilitas tinggi mampu mempercepat aliran air keluar dari permukaan, sehingga mengurangi risiko genangan air (ponding) dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan melalui pengurangan *hydroplaning*.

Tingkat permeabilitas yang terlalu tinggi juga dapat menimbulkan permasalahan lain, seperti menurunnya stabilitas campuran dan berkurangnya daya ikat antar agregat. Hal ini terjadi karena semakin besar rongga udara, semakin sedikit kontak antar partikel agregat, sehingga kemampuan campuran menahan beban lalu lintas menjadi berkurang. Sebaliknya, jika permeabilitas terlalu rendah akibat rongga udara yang terlalu sedikit, kemampuan campuran untuk mengalirkan air menjadi tidak efektif dan tujuan utama penggunaan aspal porus menjadi tidak tercapai sesuai dengan standar Bina Marga dan AAPA (*Australian Asphalt Pavement Association*). Adapun tahapan pengujian Permeabilitas adalah sebagai berikut:

1. Memasang spesimen pada permeameter sesuai arah uji (vertikal atau horizontal), serta memastikan porous stone dan gasket terpasang rapat agar tidak terjadi kebocoran.
2. Mengisi reservoir hingga tercapai beda head konstan (h) antara muka air atas dan bawah. Sistem overflow digunakan untuk menjaga head tetap selama pengujian.
3. Membiarkan aliran berlangsung hingga kondisi steady-state tercapai, ditandai dengan laju aliran yang stabil.
4. Mengumpulkan volume air (v) yang keluar selama waktu tertentu (t) menggunakan gelas ukur, aliran $k = v/t$ (m^3/s).
5. Mengukur panjang jalur aliran (L) dan luas penampang spesimen (A), serta mencatat suhu air selama pengujian.
6. Mengulangi pengujian pada minimal tiga ²⁴simen dan melaporkan nilai rata-rata hasil pengukuran. Perhitungan disajikan pada tabel 3.39

Tabel 3. 39 Hasil Uji Permeabilitas

No	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Variasi Kadar Filler	Volume Air (liter)	Tinggi (cm)	Waktu (detik)	Permeabilitas (cm/detik)
1						
2						
3						

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.9.6 Pengujian Kadar Aspal Optimum

KAO adalah salah satu faktor kunci dalam kualitas campuran beraspal, karena berpengaruh langsung terhadap kemampuan lapisan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas. Jika kadar aspal yang terlalu rendah, campuran akan cenderung rapuh dan mudah mengalami retak. Sebaliknya, apabila kadar aspal terlalu tinggi, lapisan perkerasan berpotensi mengalami bleeding akibat kelebihan aspal.

KAO merupakan jumlah aspal yang dibutuhkan dalam campuran untuk memenuhi parameter kepadatan rongga dalam agregat (VMA), rongga terisi aspal (VFA), rongga dalam campuran (VIM), stabilitas, kelelahan (*flow*), serta nilai *Marshall Quotient* (MQ). Tujuan dari penetapan KAO adalah memperoleh kadar aspal efektif yang ideal sehingga campuran memenuhi kriteria teknis sekaligus memiliki kinerja perkerasan yang baik. Adapun tahapan pelaksanaannya sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data pengujian yang mencakup parameter VMA, VFA, VIM, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* pada berbagai variasi kadar aspal sebagai langkah persiapan awal.
2. Membandingkan setiap hasil pengujian dengan spesifikasi teknis yang berlaku untuk jenis lapisan aspal porus, selanjutnya menentukan rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh persyaratan spesifikasi.
3. Menyajikan data dalam bentuk diagram batang (*bar chart*) yang menampilkan hubungan antara parameter *Marshall* dan kadar aspal untuk memudahkan analisis dalam menentukan nilai KAO. Perhitungan disajikan pada tabel 3.40

Tabel 3. 40 Hasil Uji Kadar Aspal Optimum

Persamaan	Hasil (%)
$\left(\frac{KAO \text{ min} + KAO \text{ maks}}{2} \right) + \text{Nilai AFD}$	

(Sumber : Olahan Peneliti, 2026)

3.10 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium bahan jalan bidang Transportasi Teknik Sipil Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya yang berlokasi di Jl. Semolowaru No.45, Menur Pumpungan, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur. Seluruh tahapan kegiatan, mulai dari persiapan material, proses pencampuran, hingga pengujian, dilakukan di laboratorium agar ketelitian dan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Agregat Halus

176

Berdasarkan ketentuan dalam E81a Marga Revisi 2 tahun (2018) agregat halus didefinisikan sebagai material yang lolos ayakan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm). Dalam campuran aspal porus, agregat halus berfungsi mengisi sebagian rongga mikro sehingga dapat membantu meningkatkan stabilitas campuran. Selanjutnya, hasil pengujian meliputi analisis saringan, berat jenis, serta daya serap air untuk agregat halus fraksi 0–5 mm akan diuraikan pada bagian berikut guna mengetahui karakteristik fisik agregat halus berdasarkan hasil pengujian laboratorium.

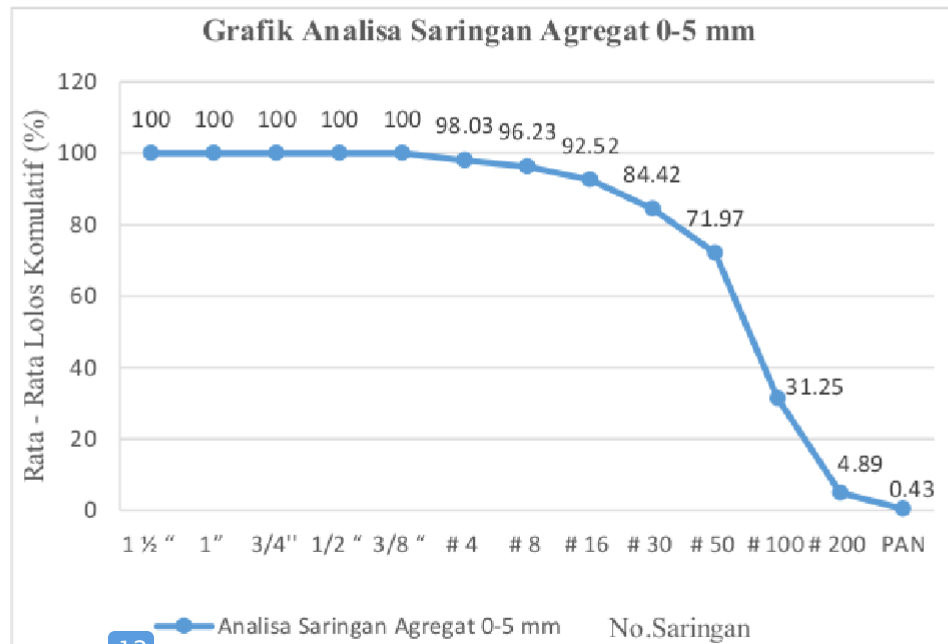
4.1.1 Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Metode pengujian yang diterapkan pada acuan SNI 03 1968, (1990) untuk mengidentifikasi variasi ukuran butir dalam material agregat dengan menggunakan seperangkat ayakan standar ASTM. Setiap fraksi ukuran agregat halus akan tertahan pada ayakan tertentu sesuai dengan diameter partikelnya, sehingga dapat diketahui proporsi berat pada masing-masing ukuran. Tujuan dari pengujian analisa saringan agregat halus adalah untuk mengetahui distribusi ukuran butir pasir atau material halus yang digunakan dalam campuran. Hasilnya dapat di lihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Analisa Saringan Agregat 0-5 mm

Pengujian Analisa Saringan Agregat 0-5 Abu Batu (Berat Saringan Minimal 500 gram) ASTM C136, Tahun 2012															
Berat	gram				Berat	gram				Berat	gram				Rata-Rata
	Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)				
Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	
1.18"					1.18"					1.18"				100	
1"					1"					1"				100	
3/4"					3/4"					3/4"				100	
1/2"					1/2"					1/2"				100	
3/8"	0	0	0	100	3/8"	0	0	0	100	3/8"	0	0	0	100	
# 4	9.7	9.7	1.83	98.17	# 4	10.5	10.5	1.91	98.09	# 4	12.3	12.3	2.16	97.84	
# 8	7.3	17	3.21	96.79	# 8	9.7	20.2	3.67	96.33	# 8	12.9	25.2	4.42	95.58	
# 16	14.5	31.5	5.94	94.06	# 16	25.3	45.5	8.27	91.73	# 16	21.7	46.9	8.23	91.77	
# 30	34.6	66.1	12.47	87.53	# 30	46.7	94.2	17.13	82.87	# 30	50.8	97.7	17.14	82.86	
# 50	64.4	130.5	24.62	75.38	# 50	69.7	163.9	29.80	70.20	# 50	71.4	169.1	29.67	70.33	
# 100	233.5	364	68.68	31.32	# 100	219.3	383.2	69.67	30.33	# 100	217.9	387	67.89	32.11	
# 200	134.2	498.2	94.00	6.00	# 200	145.8	529	96.18	3.82	# 200	155.4	542.4	95.16	4.84	
PAN	28.6	527.8	99.58	0.42	PAN	19.4	548.4	99.71	0.29	PAN	24.2	566.6	99.40	0.60	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 1 Grafik Analisa Saringan Agregat 0-5 mm
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian analisa saringan pada agregat 0-5 mm di laboratorium, fraksi 0-5 mm memiliki rata-rata partikel lolos saringan No.200 sebesar 4.89 %. Fraksi 0-5 telah memenuhi ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 yang menyatakan bahwa persentase partikel yang lolos pada saringan No.200 (0,075 mm) harus <10%.

4.1.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Pengujian pada berat jenis agregat halus dilaksanakan sesuai ketentuan SNI 1970, tahun 2008). Pengujian berat jenis pada agregat halus berfungsi agar mengetahui perbandingan antara massa agregat halus dengan massa air pada volume yang sama serta kemampuan agregat dalam menyerap air. Pelaksanaan pengujian ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa agregat memenuhi kriteria yang tercantum dalam ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018). Parameter yang diuji meliputi berat jenis bulk (bulk specific gravity) yang dihitung menggunakan Persamaan (2.13), berat jenis jenuh kering permukaan atau Saturated Surface Dry (SSD) dengan Persamaan (2.18), berat jenis semu berdasarkan Persamaan (2.19), serta nilai penyerapan air yang ditentukan menggunakan Persamaan (2.21). Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat 0-5 mm

49 Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 0-5 SNI 1970, Tahun 2016					
Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan	S	504.8	403.6	456.1	3 gram
Berat benda uji kering oven	A	500	400	450	gram
Berat piknometer yang berisi air	B	1354.9	927.3	931.2	gram
Berat piknometer dengan benda uji dan air sampai batas permukaan	C	1555.8	1214.3	1222.2	gram
Perhitungan	Persamaan	I	II	III	Rata-Rata
Berat jenis curah (Sd)	$\frac{A}{(B + S - C)}$	1.65	3.43	2.73	2.60
144 Berat jenis jenuh kering permukaan (SSd)	$\frac{S}{(B + S - C)}$	1.66	3.46	2.76	2.63
Berat jenis semu (Sa)	$\frac{A}{(B + A - C)}$	1.67	3.54	2.83	2.68
177 Penyerapan air (Sw)	$\left[\frac{S-A}{A}\right] \times 100\%$	0.96	0.90	1.36	1.07

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

1 Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018 mensyaratkan berat jenis harus > 2,5 dan Penyerapan < 3%. Berdasarkan hasil pengujian 33 laboratorium terhadap agregat halus 0-5, diperoleh hasil sebagai berikut: berat jenis curah (Sd) sebesar 2.60, Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2.63, Berat Jenis Semu (Sa) sebesar 2.68, dan 111yerapan (Sw) sebesar 1.07. Dapat disimpulkan bahwa semua nilai diatas telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018).

Nilai berat jenis bulk gabungan merupakan parameter krusial dalam perencanaan campuran aspal, karena menjadi dasar perhitungan volume rongga-rongga dan penentuan kadar aspal yang akurat. Parameter ini mengintegrasikan karakteristik fisik dari seluruh fraksi agregat, baik kasar maupun halus, guna memperoleh representasi massa jenis rata-rata dari total agregat yang digunakan. Perhitungan berat jenis bulk gabungan ini dilakukan dengan acuan pada standar ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018) untuk menjamin kepadatan dan durabilita 27mpuran. Rincian perhitungan dan nilai berat jenis bulk gabungan agregat yang diperoleh dari hasil pengu 24 berat jenis dan penyerapan air dilaboratorium akan diuraikan pada bagian tabel 4.3, 4.4, 4.5, dan 4.6.

Tabel 4. 3 Hasil Uji BJ Gabungan Agregat Bulk Variasi 0%

BERAT JENIS GABUNGAN AGREGAT BULK					
No	Agregat	Proporsi Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat Gabungan
1	Agregat Halus 0-5	4%	2.60	1.54	
2	Agregat Kasar 5-10	15%	2.95	5.09	
3	Agregat Kasar 10-15	80%	2.95	27.13	
4	Substitusi Filler Kapur	1%	3.43	0.29	
		100		34.05	2.94

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 4 Hasil Uji BJ Gabungan Agregat Bulk Variasi 0.3%

BERAT JENIS GABUNGAN AGREGAT BULK					
No	Agregat	Proporsi Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat Gabungan
1	Agregat Halus 0-5	4%	2.60	1.54	
2	Agregat Kasar 5-10	15%	2.95	5.09	
3	Agregat Kasar 10-15	80%	2.95	27.13	
4	Filler Abu Kain Katun	0.3%	2.62	0.11	
5	Substitusi Filler Kapur	0.7%	3.43	0.20	
		100		34.08	2.93

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 5 Hasil Uji BJ Gabungan Agregat Bulk Variasi 0.5%

BERAT JENIS GABUNGAN AGREGAT BULK					
No	Agregat	Proporsi Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat Gabungan
1	Agregat Halus 0-5	4%	2.60	1.54	
2	Agregat Kasar 5-10	15%	2.95	5.09	
3	Agregat Kasar 10-15	80%	2.95	27.13	
4	Filler Abu Kain Katun	0.5%	2.62	0.19	
5	Substitusi Filler Kapur	0.5%	3.43	0.15	
		100		34.10	2.93

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 6 Hasil Uji BJ Gabungan Agregat Bulk Variasi 0.7%

BERAT JENIS GABUNGAN AGREGAT BULK					
No	Agregat	Proporsi Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat Gabungan
1	Agregat Halus 0-5	4%	2.60	1.54	
2	Agregat Kasar 5-10	15%	2.95	5.09	
3	Agregat Kasar 10-15	80%	2.95	27.13	
4	Filler Abu Kain Katun	0.7%	2.62	0.27	
5	Substitusi Filler Kapur	0.3%	3.43	0.09	
		100		34.11	2.93

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 7 Hasil Uji BJ Gabungan Agregat Bulk Variasi 1%

BERAT JENIS GABUNGAN AGREGAT BULK					
No	Agregat	Proporsi Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat	Bj.Bulk Agregat Gabungan
1	Agregat Halus 0-5	4%	2.60	1.54	
2	Agregat Kasar 5-10	15%	2.95	5.09	
3	Agregat Kasar 10-15	80%	2.95	27.13	
4	Filler Abu Kain Katun	1%	3.43	0.29	
		100		34.05	2.94

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari hasil pada uji laboratorium, diperoleh nilai berat jenis bulk gabungan sebesar 2.94 pada variasi Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun 0% dan Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun 1%. Nilai berat jenis bulk gabungan sebesar 2,93 untuk masing masing variasi Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun 0.3%, Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun 0.5% dan Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun 0.7%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat yang digunakan memiliki karakteristik kepadatan yang tinggi dan telah memenuhi standar kriteria Spesifikasi Bina Marga 2018 (Revisi 2). Penggunaan nilai berat jenis bulk ini menjadi parameter kunci dalam perhitungan volume rongga dalam campuran (VIM) serta penentuan kadar aspal optimum, guna menjamin stabilitas dan durabilitas struktur perkerasan aspal yang direncanakan.

37 4.2 Pengujian Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan bahan berbentuk batuan yang memiliki peranan utama dalam campuran aspal porus, karena fraksi ini sangat menentukan terbentuknya rongga antar butir dalam campuran. Maka, agregat kasar menjadi salah satu komponen yang paling berpengaruh terhadap karakteristik porositas aspal porus. Untuk memastikan kesesuaiannya, diperlukan serangkaian pengujian yang mengacu pada ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018). Uraian mengenai jenis pengujian agregat kasar serta hasil datanya akan disampaikan pada bagian berikut, berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium

36 4.2.1 Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

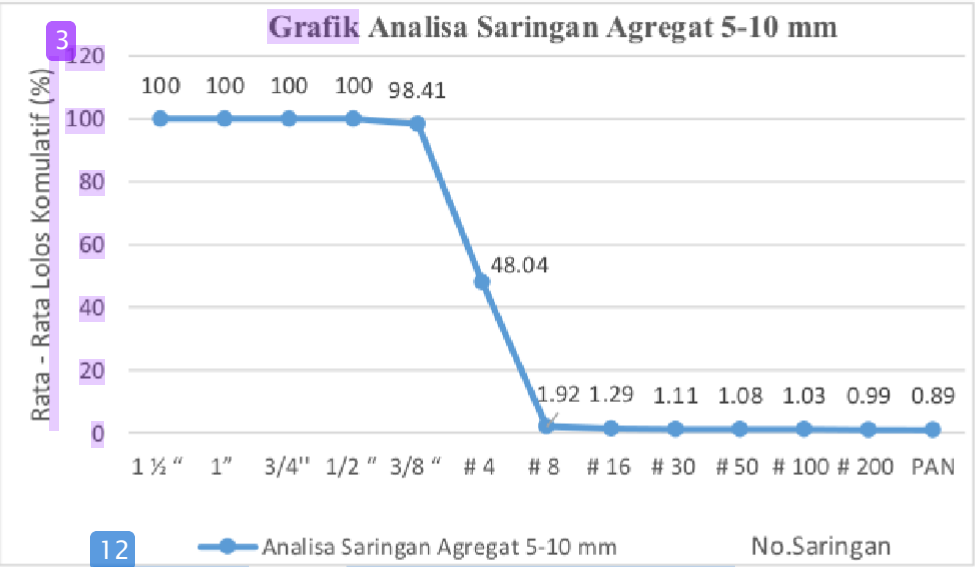
Uji analisa saringan pada agregat kasar yang dilakukan agar memastikan bahwa material yang diuji memenuhi ketentuan dalam ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018), khususnya terkait persentase lolos rata-rata pada ayakan No. 200 yang harus kurang dari 1%. Selain sebagai sarana verifikasi terhadap standar, pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui proporsi agregat kasar yang tertahan pada masing-masing ukuran ayakan sesuai fraksinya. Data tersebut diperlukan agar penentuan gradasi campuran aspal porus dapat dilakukan secara lebih tepat. Dalam penelitian ini digunakan agregat kasar dengan fraksi ukuran 5–10 mm dan 10–15 mm, menyesuaikan dengan persyaratan gradasi campuran aspal porus menurut AAPA (2004) yang menetapkan ukuran maksimum agregat tidak melebihi 15 mm. Hasil pengujian agregat kasar fraksi 5–10 mm disajikan pada Tabel 4.8 dan divisualisasikan dalam gambar Grafik 4.2, sedangkan hasil pengujian fraksi 10–15 mm ditampilkan pada Tabel 4.9 dan digambarkan dalam Grafik 4.3.

6

Tabel 4. 8 Hasil Uji Analisa Saringan Agregat 5-10 mm

Agregat 5-10 (Berat Sampel Minimal 100) 5 a) ASTM C 136, Tahun 2012															
Berat	1300	gram			Berat	1300	gram			Berat	1700	gram			Rata-Rata
	Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)				
Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	
1 1/4 "					1 1/4 "					1 1/4 "					100
1"					1"					1"					100
3/4"					3/4"					3/4"					100
1/2 "	0	0	0	100	1/2 "	0	0	0	100	1/2 "	0	0	0	100	100
3/8 "	21.4	21.4	1.65	98.35	3/8 "	22.4	22.4	1.49	98.51	3/8 "	27.7	27.7	1.63	98.37	98.41
# 4	657.5	678.9	52.22	47.78	# 4	770.1	792.5	52.83	47.17	# 4	836.3	864	50.82	49.18	48.04
# 8	594.9	1273.8	97.98	2.02	# 8	684.6	1477.1	98.47	1.53	# 8	798.1	1662.1	97.77	2.23	1.92
# 16	9.3	1283.1	98.70	1.30	# 16	4.4	1481.5	98.77	1.23	# 16	15.3	1677.4	98.67	1.33	1.29
# 30	2.3	1285.4	98.88	1.12	# 30	2.7	1484.2	98.95	1.05	# 30	3.2	1680.6	98.86	1.14	1.11
# 50	0.5	1285.9	98.92	1.08	# 50	0.4	1484.6	98.97	1.03	# 50	0.4	1681	98.88	1.12	1.08
# 100	0.2	1286.1	98.93	1.07	# 100	0.3	1484.9	98.99	1.01	# 100	1.7	1682.7	98.98	1.02	1.03
# 200	0.7	1286.8	98.98	1.02	# 200	0.4	1485.3	99.02	0.98	# 200	0.7	1683.4	99.02	0.98	0.99
PAN	1.3	1288.1	99.08	0.92	PAN	1.5	1486.8	99.1	0.88	PAN	1.8	1685.2	99.13	0.87	0.89

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 2 Grafik Analisa Saringan Agregat 5-10 mm

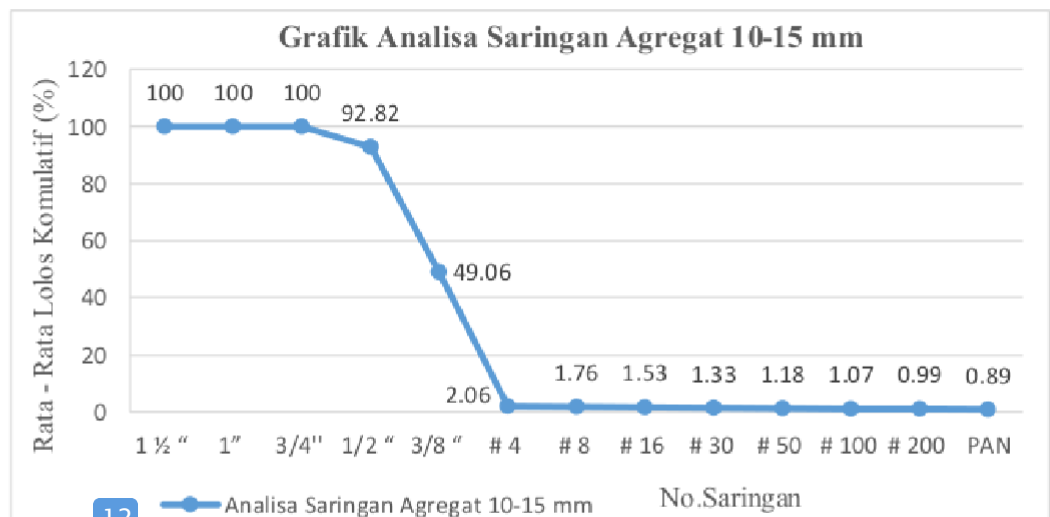
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari hasil pengujian analisa saringan pada agregat 5-10 mm di laboratorium, pada agregat 5-10 memiliki rata-rata partikel lolos saringan No.200 sebesar 0.99%, fraksi tersebut telah memenuhi ketentuan bina marga revisi 2 (2018) yang menyatakan bahwa persentase partikel yang lolos pada saringan No.200 tidak lebih dari 1%.

Tabel 4. 9 Hasil Uji Analisa Saringan Agregat 10-15 mm

Agregat 10-15 (Berat Sampel Minimal 200 gram) ASTM C 136, Tahun 2012														
Berat 2300 gram					Berat 2500 gram					Berat 2700 gram				
Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)				
Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif
1 1/2"					1 1/2"					1 1/2"				
1"					1"					1"				
3/4"	0	0	0	100	3/4"	0	0	0	100	3/4"	0	0	0	100
1/2"	156.9	156.9	6.82	93.18	1/2"	186.4	186.4	7.46	92.54	1/2"	196.1	196.1	7.26	92.74
3/8"	1029.8	1186.7	51.60	48.40	3/8"	1128.1	1314.5	52.58	47.42	3/8"	1117.3	1313.4	48.64	51.36
#4	1090.3	2277	99.00	1.00	#4	1160.2	2474.7	98.99	1.01	#4	1274.1	2587.5	95.83	4.17
#8	0.3	2277.3	99.01	0.99	#8	0.6	2475.3	99.01	0.99	#8	22.9	2610.4	96.68	3.32
#16	0.1	2277.4	99.02	0.98	#16	0.3	2475.6	99.02	0.98	#16	18.6	2629	97.37	2.63
#30	0.2	2277.6	99.03	0.97	#30	0.2	2475.8	99.03	0.97	#30	15.7	2644.7	97.95	2.05
#50	0.5	2278.1	99.05	0.95	#50	0.3	2476.1	99.04	0.96	#50	11.6	2656.3	98.38	1.62
#100	0.2	2278.3	99.06	0.94	#100	0.1	2476.2	99.05	0.95	#100	8.1	2664.4	98.68	1.32
#200	0.4	2278.7	99.07	0.93	#200	0.3	2476.5	99.06	0.94	#200	5.6	2670	98.89	1.11
PAN	0.7	2279.4	99.10	0.90	PAN	0.3	2476.8	99.07	0.93	PAN	6.9	2676.9	99.14	0.86

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 3 Grafik Analisa Saringan Agregat 10-15 mm
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari hasil pengujian analisa saringan pada agregat 10-15 mm di laboratorium, agregat 10-15 memiliki rata-rata partikel lolos saringan No.200 sebesar 0.99%, fraksi tersebut telah memenuhi ketentuan bina marga revisi 2 (2018) yang menyatakan bahwa persentase partikel yang lolos pada saringan No.200 tidak lebih dari 1%

4.2.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Uji berat jenis pada agregat kasar dilaksanakan sesuai ketentuan SNI 1969:2008. Tujuan dilakukannya pengujian berat jenis pada agregat kasar adalah untuk memastikan bahwa agregat memenuhi kriteria yang disetujui dalam ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis curah (bulk specific gravity) yang dihitung menggunakan Persamaan (2.16), berat jenis kondisi jenuh kering permukaan atau Saturated Surface Dry (SSD) dengan Persamaan (2.18), berat jenis semu berdasarkan Persamaan (2.19), serta nilai penyerapan air yang dihitung menggunakan Persamaan (2.21). Selanjutnya, hasil pengujian berat jenis dan daya serap air pada agregat kasar dalam bentuk tabel. Hasil pada fraksi 5–10 mm disajikan pada Tabel 4.10, sedangkan hasil pengujian fraksi 10–15 mm ditampilkan pada Tabel 4.11

Tabel 4. 10 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat 5-10 mm

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 5-10 SNI 1969, Tahun 2016					
Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kering oven	A	1700	1500	1300	gr/cm ³
Berat benda uji jenuh kering permukaan (SSD)	B	1724	1516.8	1313.5	gr/cm ³
Berat benda uji dalam air	C	1407.8	1208.6	1036.4	gr/cm ³
Perhitungan	Persamaan	I	II	III	Rata-Rata
Berat jenis curah (S _d)	$\frac{A}{B - C}$	5.38	4.87	4.69	4.98
Berat jenis jenuh kering permukaan (S _s)	$\frac{B}{B - C}$	5.45	4.92	4.74	5.04
Berat jenis semu (S _a)	$\frac{A}{A - C}$	5.82	5.15	4.93	5.30
Penyerapan (S _w)	$\left[\frac{B-A}{A}\right] \times 100\%$	1.41	1.12	1.04	1.19

(Sumber : Hasil Olahan Penelitian, 2026)

Menurut ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2 mensyaratkan berat jenis harus > 2,5 dan Penyerapan < 3%. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium terhadap agregat kasar fraksi 5-10 diperoleh hasil sebagai

berikut : berat jenis curah (Sd) sebesar 4.98, Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 5.04, Berat Jenis Semu (Sa) sebesar 5.30 dan Penyerapan (Sw) sebesar 1.19. Dapat disimpulkan bahwa semua nilai diatas telah memenuhi persyaratan Bina Marga (2018) revisi 2.

Tabel 4. 11 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat 10-15 mm

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat K 10-15 SNI 1969, Tahun 2016					
Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kering oven	A	2700	2500	2300	gr/cm ³
Berat benda uji jenuh kering permukaan diudara (SSD)	B	2731.8	2528.1	2323.4	gr/cm ³
Berat benda uji dalam air	C	2268.8	2025.3	1989.4	gr/cm ³
Perhitungan	Persamaan	I	II	III	Rata-Rata
Berat jenis curah (Sd)	$\frac{A}{B-C}$	5.83	4.97	6.89	5.90
Berat jenis jenuh kering permukaan (Ss)	$\frac{B}{B-C}$	5.90	5.03	6.96	5.96
Berat jenis semu (Sa)	$\frac{A}{A-C}$	6.26	5.27	7.41	6.31
Penyerapan (Sw)	$\left[\frac{B-A}{A}\right] \times 100\%$	1.18	1.12	1.02	1.11

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Menurut ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2 mensyaratkan berat jenis harus > 2,5 dan Penyerapan < 3%. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium terhadap agregat kasar fraksi 5-10 diperoleh hasil sebagai berikut : berat jenis curah (Sd) sebesar 4.98, Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 5.04, Berat Jenis Semu (Sa) sebesar 5.30 dan Penyerapan (Sw) sebesar 1.19. Dapat disimpulkan bahwa semua nilai diatas telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018).

4.2.3 Pengujian Keausan Agregat Kasar

Uji aus pada agregat kasar yang dilakukan untuk mengetahui besarnya berat agregat yang berkurang akibat proses abrasi selama pengujian. Pengikisan tersebut terjadi karena tumbukan dan gesekan agregat di dalam mesin Los Angeles. Dalam pelaksanaannya, alat Los Angeles dijalankan sejumlah 500 putaran dengan memasukkan 12 buah bola baja sebagai media abrasi. Tata cara pengujian ini mengikuti ketentuan SNI 2417:2008, makin kecil nilai keausan, maka semakin baik kualitas agregat. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.12 dan 4.13 berikut

29

Tabel 4. 12 Gradasi Uji Keausan Agregat Kasar

Ukuran Saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)						
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	B	C	D	E	F	G
mm	inci	mm	inci							
75	3	63	2 1/2					2500±50		
63	2 1/2	50	2					2500±50		
50	2,0	38	1 1/2					5000±50	5000±50	
37,5	1 1/2	25	1	1250±25					5000±25	5000±25
25	1	19	3/4	1250±25						5000±25
19	3/4	13	1/2	1250±10	2500±10					
12,5	1/2	9,5	3/8	1250±10	2500±10					
9,5	3/8	6,3	1/4			2500±10				
6,3	1/4	4,8	No.4			2500±10	2500±10			
4,75	No.4	2,4	No.8				2500±10			
Total				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±10	10000±10	10000±10
Jumlah Bola				12	11	8	6	12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	4584±25	3330±20	2500±15	5000±25	5000±25	5000±25

(Sumber : SNI 2417:2008)

36

Tabel 4. 13 Hasil Uji Keausan Agregat Kasar

Penguji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar SNI 1969, Tahun 2016			
Gradasi Pemeriksaan		Jumlah Putaran = 500 Putaran	
Ukuran Saringan		I	II
Lolos	Tertahan	Berat (a)	Berat (a)
76,2 (3")	63,5 (2 1/2")		
63,5 (2 1/2")	50,8 (2")		
50,8 (2")	36,1 (1 1/2")		
36,1 (1 1/2")	25,4 (1")		
25,4 (1")	19,1 (3/4")		
19,1 (3/4")	12,7 (1/2")		
12,7 (1/2")	9,52 (3/8")	2500	2500
9,52 (3/8")	6,35 (64')	2500	2500
6,35 (1/4")	4,75 (No.4)		
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)		
Jumlah Berat (a)		5000	5000
Berat tertahan saringan No.12 sesudah percobaan (b)		3212.2	3181.1
Keausan : $((a-b)/a) \times 100\%$		35.756	36.378
Rata-Rata		36.067	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

149

Berdasarkan tabel hasil pengujian keausan agregat kasar di 16 s, diperoleh nilai rata-rata keausan sebesar 36.051%, nilai tersebut sudah sesuai dengan ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018) yang mensyaratkan nilai keausan <40%.

4.3 Pengujian Substitusi Filler Kapur

Filler atau abu terbang bertujuan untuk bahan pengisi pada campuran aspal yang bertujuan menutup rongga-rongga kecil sehingga stabilitas campuran dapat meningkat. Pada campuran aspal porus, penggunaan filler sebenarnya tidak selalu diperlukan karena tujuan utama aspal porus adalah memperoleh kemampuan drainase yang tinggi. Namun demikian, penambahan filler dalam jumlah terbatas (tidak melebihi 1%) dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan stabilitas campuran. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini digunakan filler kapur dengan kadar sebesar 1%.

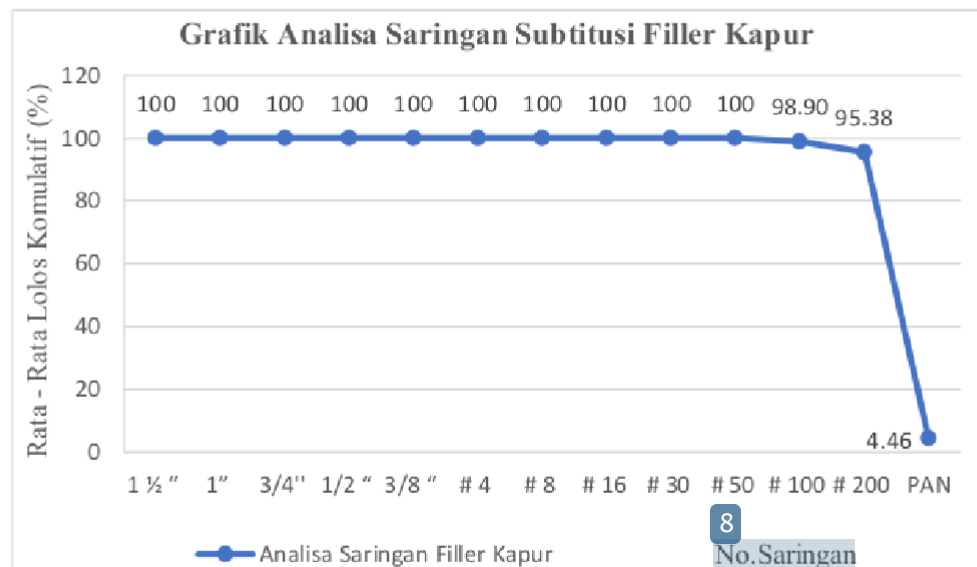
4.3.1 Hasil Uji Analisa Saringan Substitusi Filler Kapur

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga (Revisi 2), bahan tambah berupa filler diwajibkan memiliki lebih dari 75% butiran yang lolos ayakan No. 200. Oleh karena itu, diperlukan pengujian analisis saringan terhadap filler dengan mengacu pada prosedur SNI 03-4145-1996. Hasil pengujian analisis saringan untuk substitusi filler kapur disajikan pada Tabel 4.14 dan gambar Grafik 4.4

Tabel 4. 14 Hasil Uji Analisa Saringan Substitusi Filler Kapur

Pengujian Analisa Saringan Substitusi Filler Kapur ASTM C136, Tahun 2012															
Uraian	500	gram			Berat	500	gram			Berat	500	gram			Rata-Rata
	Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)				
Sieve Size (mm)	massa tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	massa tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	massa tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	
1 1/2"					1 1/2"					1 1/2"					100
1"					1"					1"					100
3/4"					3/4"					3/4"					100
1/2"					1/2"					1/2"					100
3/8"					3/8"					3/8"					100
#4					#4					#4					100
#8					#8					#8					100
#16					#16					#16					100
#30					#30					#30					100
#50	0	0	0.00	100	#50	0	0	0.00	100	#50	0	0	0.00	100	100
#100	5.1	5.1	1.02	98.98	#100	5.5	5.5	1.10	98.90	#100	5.9	5.9	1.18	98.82	98.90
#200	17.2	22.3	4.46	95.54	#200	17.3	22.8	4.56	95.44	#200	18.3	24.2	4.84	95.16	95.38
PAN	454.4	476.7	95.34	4.66	PAN	454.6	477.4	95.48	4.52	PAN	454.8	479	95.80	4.20	4.46

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 4 Grafik Analisa Saringan Substitusi Filler Kapur
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan [15] pengujian analisis saringan terhadap material substitusi [78] filler kapur yang dilakukan di laboratorium, diperoleh nilai rata-rata partikel yang lolos saringan No. 200 sebesar 95,38%. Hasil ini menunjukkan bahwa material kapur tersebut [164] memiliki tingkat kehalusan yang sangat tinggi, sehingga sangat efektif dalam mengisi pada rongga antar [6] agregat dan meningkatkan stabilitas pada campuran aspal. Secara teknis, nilai tersebut telah memenuhi persyaratan dalam ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2, yang menetapkan batasan minimum persentase partikel lolos saringan No. 200 sebesar 75%. Dengan demikian, penggunaan filler kapur ini dinyatakan layak secara kualitas untuk digunakan sebagai bahan pengisi guna menjamin kepadatan dan durabilitas struktur perkerasan yang direncanakan.

35

4.3.2 Pengujian Berat Jenis Substitusi Filler Kapur

Uji berat jenis (*specific gravity*) pada material filler kapur dilakukan sebagai langkah krusial untuk memastikan bahwa karakteristik fisis bahan pengisi tersebut sudah memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan dalam ketentuan Bina Marga Revisi 2 (2018). Penentuan nilai berat jenis ini sangat penting dalam perhitungan volume absolut agregat serta penentuan proporsi campuran aspal yang tepat, guna menjamin kepadatan dan stabilitas perkerasan. Hasil [9] pengujian berat jenis dan penyerapan air substitusi filler kapur disajikan pada tabel 4.15 berikut

Tabel 4. 15 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Subtitusi Filler Kapur

P 18 an Berat Jenis dan Penyerapan Air Subtitusi Filler Kapur SNI 4145, Tahun 1996					
Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat Sampel Filler	$W_t = W_3 - W_1$	13.5	12.3	10.4	g
Berat Piknometer Kosong	W_1	110.4	110.4	110.4	g
Berat Piknometer + Filler	W_3	123.9	122.7	120.8	g
Berat Piknometer + Filler + Air	W_4	259.7	258.2	257.5	g
Berat Piknometer + Air	W_2	258.8	249.9	249.8	g
Perhitungan	Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Berat Jenis Filler	$\frac{W_3 - W_1}{(W_3 - W_1) - (W_4 - W_2)}$	3.38	3.07	3.85	3.43

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air Subtitusi Filler Kapur dengan melakukan 3 kali pengujian dengan berat sampel yang berbeda sebagai perbandingan memiliki rata-rata sebesar 3.43 gr/cm³ telah memenuhi pada ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 yang menyatakan bahwa berat jenis Filler minimal 2,5 gr/cm³

4.4 Pengujian Filler Abu Kain Katun

Filler yang berasal dari abu kain katun digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran aspal untuk menutup pori-pori halus sehingga kestabilan campuran dapat meningkat. Pada campuran aspal porus, penggunaan filler tidak bersifat wajib karena tujuan utamanya adalah menghasilkan kemampuan drainase yang tinggi. Meskipun demikian, penambahan filler dalam jumlah kecil, yaitu tidak lebih dari 1%, masih dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan stabilitas campuran. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan filler abu kain katun dengan kadar sebesar 1%.

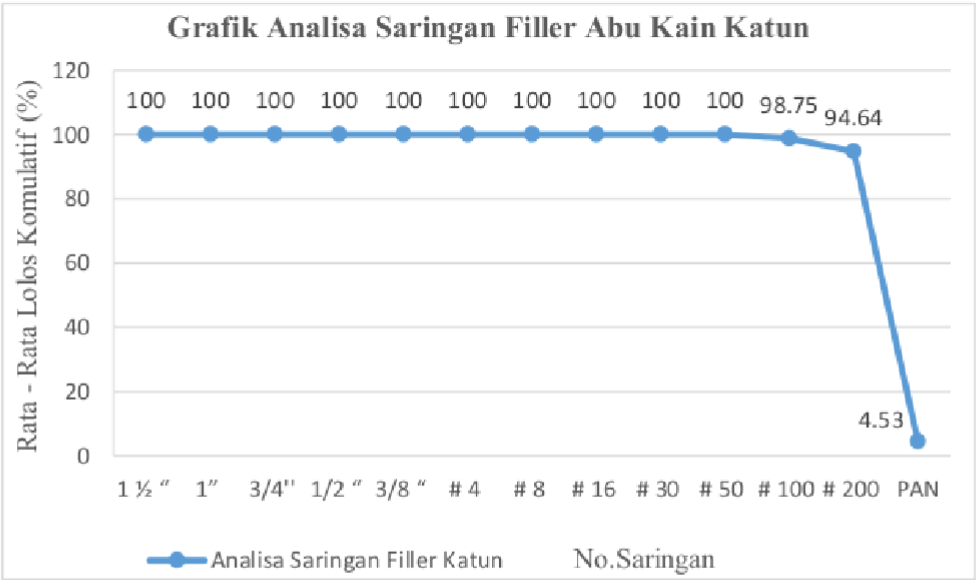
4.4.1 Pengujian Analisa Saringan Filler Abu Kain Katun

Berdasarkan ketentuan dalam Spesifikasi Bina Marga (Revisi 2), bahan tambah berupa filler diwajibkan memiliki persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 lebih dari 75%. Oleh karena itu, filler abu kain katun perlu diuji melalui analisis saringan dengan mengacu pada prosedur SNI 03-4145-1996. Hasil pengujian analisis saringan terhadap filler abu kain katun disajikan pada Tabel 4.16 dan digambarkan grafik pada gambar 4.5 berikut

Tabel 4. 16 Hasil Uji Analisa Saringan Filler Abu Kain Katun

Pengujian Analisa Saringan Filler Abu Kain Katun ASTM C136, Tahun 2012															
Berat	500	gram			Berat	500	gram			Berat	500	gram			Rata-Rata
		Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)					Persentase Kumulatif (%)			
Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	Sieve Size (mm)	Massa Tertahan (gram)	Jumlah Tertahan (gram)	% Tertahan Kumulatif	% Lolos Kumulatif	
1 1/2"					1 1/2"					1 1/2"					100
1"					1"					1"					100
3/4"					3/4"					3/4"					100
1/2"					1/2"					1/2"					100
3/8"					3/8"					3/8"					100
#4					#4					#4					100
#8					#8					#8					100
#16					#16					#16					100
#30					#30					#30					100
#50	0	0	0	100	#50	0	0	0	100	#50	0	0	0	100	100
#100	5.9	5.9	1.18	98.82	#100	6.4	6.4	1.28	98.72	#100	6.5	6.5	1.30	98.70	98.75
#200	19.3	25.2	5.04	94.96	#200	20.5	26.9	5.38	94.62	#200	21.8	28.3	5.66	94.34	94.64
PAN	449.5	474.7	94.94	5.06	PAN	450.8	477.7	95.54	4.46	PAN	451.4	479.7	95.94	4.06	4.53

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 5 Grafik Analisa Saringan Filler Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian analisa saringan Substitusi Filler Kapur di laboratorium, abu kain katun memiliki rata-rata partikel lolos saringan No.200 sebesar 94.64%. Filler tersebut telah memenuhi ketentuan bina marga revisi 2 (2018) yang menyatakan bahwa persentase partikel yang lolos pada saringan No.200 harus >75%.

9

4.4.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Filler Abu Kain Katun

Uji berat jenis pada filler abu kain katun dilakukan untuk memastikan bahwa nilai specific gravity yang diperoleh telah sesuai dengan ketentuan pada Bina Marga Revisi 2 (2018). Selanjutnya, rekapitulasi hasil pengujian berat jenis filler abu kain katun yang dilaksanakan di laboratorium disajikan dalam bentuk tabel 4.17 berikut.

Tabel 4. 17 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Filler Abu Kain Katun

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Filler Abu Kain Katun SNI 4145, Tahun 1996					
Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat Sampel Filler	$W_t = W_3 - W_1$	13.5	12.5	11.5	g
Berat Piknometer Kosong	W_1	110.4	110.4	110.4	g
Berat Piknometer + Filler	W_3	123.9	122.9	121.9	g
Berat Piknometer + Filler + Air	W_4	258.3	257.5	256.8	g
Berat Piknometer + Air	W_2	242.2	249.8	249.8	g
Perhitungan	Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Berat Jenis Filler	$\frac{W_3 - W_1}{(W_3 - W_1) - (W_4 - W_2)}$	2.70	2.60	2.56	2.62

(Sumbar : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air Filler Abu Kain Katun dengan melakukan 3 kali pengujian dengan berat sampel yang berbeda sebagai perbandingan memiliki rata-rata sebesar 2.62 gr/cm³ telah memenuhi pada ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 yang menyatakan bahwa berat jenis Filler minimal 2,5 gr/cm³

4

4.5 Pengujian Aspal Penetrasi 60/70

Aspal Pen 60/70 adalah jenis aspal keras yang ditentukan berdasarkan nilai penetrasinya, yaitu berada pada kisaran nilai 60 sampai 70 (0,1 mm) pada suhu pengujian standar. Pengujian karakteristik aspal pen 60/70 mengacu pada ketentuan Bina Marga (2018) Revisi 2. Data hasil pengujian aspal penetrasi 60/70 yang diperoleh di laboratorium selanjutnya direkap dalam bentuk tabel dan diuraikan sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

49

4.5.1 Pengujian Penetrasi Aspal Penetrasi 60/70

Uji penetrasi pada aspal penetrasi 60/70 dilakukan untuk menentukan tingkat kekerasan aspal agar sesuai dengan ketentuan yang tercantum pada ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2. Pengujian ini menggunakan alat penetrometer untuk mengukur kedalaman penetrasi jarum ke dalam aspal pada kondisi tertentu. Pelaksanaan uji penetrasi mengacu pada prosedur yang ditetapkan dalam SNI 24.6, 2011. Berikut hasil Penetrasi Aspal di laborototium pada tabel 4.18 berikut

Tabel 4. 18 Hasil Uji Penetrasi Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian Penetrasi Aspal SNI 2456, Tahun 2011				
Pemeriksaan penetrasi pada 25°C 100 gram, 5 detik	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Rata - Rata
1	67	70	65	67
2	64	66	64	65
3	65	66	68	66
4	62	63	62	62
5	62	64	63	63
Penetrasi Aspal	65			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Hasil uji Penetrasi Aspal Pen 60/70 dengan melakukan 3 kali pengujian menunjukkan bahwa aspal memiliki penetrasi sebesar 65, ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 tabel 6.3.2.5 (Ketentuan Untuk Aspal Keras) menyatakan bahwa penetrasi pada aspal pen 60/70 ($\geq 54^{\circ}\text{C}$)

4

4.5.2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada aspal penetrasi 60/70 dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa nilai berat jenis yang diperoleh dari hasil pengujian telah memenuhi serta sesuai dengan ketentuan yang dipersyaratkan dalam Bina Marga (2018) Revisi 2 sebagai standar acuan. Proses pengujian ini dilaksanakan dengan menggunakan metode yang mengacu pada SNI 2441, tahun (2011), sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dan ilmiah. Selanjutnya, hasil rekapitulasi dari pengujian berat jenis pada aspal penetrasi 60/70 tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 4.19 berikut.

Tabel 4. 19 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Aspal SNI 2441, Tahun 2011					
	Satuan	Benda Uji I	Benda Uji II	Benda Uji III	
Berat piknometer + aspal (C)	Massa	gram	98	95	97
Berat piknometer kosong (A)	gram	53	53	52	
Berat aspal (C-A)	gram	45	42	44	
Berat piknometer + air (B)	gram	109	111	110	
Berat piknometer kosong (A)	gram	53	53	53	
Berat air (B-A)	gram	56	58	55	
Berat piknometer + aspal + air (D)	gram	116	115	114	
Berat piknometer + aspal (C)	gram	98	95	97	
Berat (D-C)	gram	19	20	21	
Berat air (B-A)-(D-C)	gram	37	38	34	
Berat jenis = $\frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)}$	gram/cm3	1.22	1.11	1.29	
Berat jenis aspal rata-rata	gram/cm3	1.21			
Berat isi = berat jenis x W_t		1202			
W_t adalah berat isi pada temperatur pengujian (W_t pada 15,6°C = 999,1 kg/m ³ , W_t pada 25°C = 997,0 kg/m ³)					

(Sumbar : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian Berat Jenis pada aspal Pen 60/70, diperoleh nilai berat jenis rata-rata sebesar 1,74 gr/cm³, ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 tabel 6.3.2.5 (Ketentuan Untuk Aspal Keras) menyatakan bahwa nilai Berat Jenis pada aspal Pen 60/70 ($\geq 1^\circ\text{C}$)

4.5.3 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian titik nyala dan titik bakar pada aspal penetrasi 60/70 dilakukan untuk memastikan bahwa nilai yang diperoleh telah sesuai ketentuan dalam Bina Marga (2018) revisi 2. Pelaksanaan pengujian ini mengikuti prosedur yang mengacu pada SNI 2433, tahun (2011). Selanjutnya, hasil rekapitulasi uji titik nyala pada aspal penetrasi 60/70 yang dilakukan di laboratorium disajikan dalam bentuk tabel 4.20 berikut.

Tabel 4. 20 Hasil Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Penetrasi 60/70

Penguji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal SNI 1433, Tahun 2011																	
2 Temperatur Di bawah Titik Nyala																	
Pembacaan Temperatur 1						Pembacaan Temperatur 2						Pembacaan Temperatur 3					
Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C	Menit	°C
3	57	19	197	35	266	3	61	19	202	35	270	3	60	19	198	35	269
4	65	20	199	36	270	4	70	20	207	36	275	4	67	20	205	36	272
5	76	21	203	37	276	5	80	21	212	37	281	5	78	21	209	37	278
6	89	22	206	38	282	6	91	22	217	38	287	6	90	22	216	38	285
7	103	23	209	39	287	7	106	23	222	39	293	7	104	23	221	39	292
8	114	24	214	40	300	8	118	24	227	40	299	8	116	24	226	40	299
9	127	25	216	41	307	9	130	25	232	41	305	9	128	25	231	41	306
10	139	26	221	42	315	10	141	26	237	42	311	10	140	26	235	42	313
11	152	27	224	43	322	11	153	27	242	43	318	11	152	27	240	43	320
12	166	28	230	44	330	12	165	28	247	44	325	12	165	28	246	44	328
13	178	29	234	45	334	13	176	29	252	45	332	13	176	29	252	45	333
14	182	30	239	46	340	14	183	30	257	46	338	14	183	30	258	46	339
15	186	31	245	47	346	15	188	31	262	47	344	15	187	31	261	47	345
16	189	32	250	48	351	16	192	32	267	48	349	16	190	32	265	48	350
Titik Nyala Rata-Rata						339											

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Hasil pengujian titik nyala pada aspal penetrasi 60/70 yang dilakukan dengan menggunakan tiga sampel aspal menunjukkan bahwa nilai rata-rata titik nyala yang diperoleh adalah sebesar 339 °C. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa aspal memiliki tingkat ketahanan terhadap suhu tinggi yang baik sebelum terjadi proses penguapan atau penyalan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa nilai titik nyala yang diperoleh telah memenuhi ketentuan yang tercantum dalam Bina Marga (2018) Revisi 2 pada Tabel 6.3.2.5 (Ketentuan untuk Aspal Keras), yang mensyaratkan bahwa nilai titik nyala untuk aspal penetrasi 60/70 harus lebih besar atau sama dengan $\geq 230^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian, aspal yang diuji dinyatakan memenuhi standar yang berlaku.

4.5.4 Pengujian Titik Lembek Aspal Penetrasi 60/70

Uji titik lembek pada aspal pen 60/70 dilakukan untuk menentukan suhu saat aspal mulai melunak, yang ditunjukkan ketika aspal dalam cincin mampu dilewati oleh bola kecil setelah dipanaskan hingga bola tersebut jatuh ke bawah. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kelelehan aspal sesuai dengan kondisi pemanasan tertentu. Prosedur uji titik lembek mengacu pada ketentuan SNI 2434:2011. Berikut hasil Titik Lembek aspal disajikan pada tabel 4.21 berikut

Tabel 4. 21 Hasil Uji Titik Lembek Aspal Penetrasi 60/70

Pengujian Titik Lembek Aspal SNI 2434, Tahun 2011								
No	Suhu yang diamati	waktu (detik)			Titik Lembek (°C)			Rata-Rata
	°C	I	II	III	I	II	III	
1	30	0	0	0	60	62	64	62
2	35	300	300	300				
3	40	780	780	780				
4	45	1320	1320	1320				
5	49	1740	1740	1740				
6	50	1800	1800	1800				

Tabel 4. 22 Resep Briket Aspal Kapur 1% : 0% Abu Kain Katun

Campuran		Filler Kapur 1% Mencari KAO				
Berat Tiap Briket (gram)		1200				
% aspal		4	4.5	5	5.5	6
Berat Aspal (gram)		48	54	60	66	72
% aspal terhadap agregat		96	95.5	32	94.5	94
Berat Agregat (gram)		1152	1146	1140	1134	1128
Fraksi Agregat	%	I	II	III	IV	V
Agregat 0-5	5	58	57	57	57	56
Agregat 5-10	14	161	160	160	159	158
Agregat 10-15	80	922	917	912	907	902
Filler Kapur	1	11.52	11.46	11.40	11.34	11.28
Total		100	1152	1146	1140	1134

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 23 Resep Briket Aspal Kapur 0.7% : 0.3% Abu Kain Katun

Campuran		Filler Abu Kain Katun 0.7% + Kapur 0.3%
Berat Tiap Briket (gram)		1200
Kadar Aspal Optimum (%)		4.8
Berat Aspal (gram)		58
% aspal terhadap agregat		95
Berat Agregat (gram)		1142
Fraksi Agregat	%	I
Agregat 0-5	5	57
Agregat 5-10	14	160
Agregat 10-15	80	914
Filler Abu Kain Katun	0.7	8
Filler Kapur	0.3	3
Total		100

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 24 Resep Briket Aspal Kapur 0.5% : 0.5% Abu Kain Katun

Campuran		Filler Abu Kain Katun 0.5% + Kapur 0.5%
Berat Tiap Briket (gram)		1200
Kadar Aspal Optimum (%)		4.8
Berat Aspal (gram)		58
% aspal terhadap agregat		95
Berat Agregat (gram)		1142
Fraksi Agregat	%	I
Agregat 0-5	5	57
Agregat 5-10	14	160
Agregat 10-15	80	914
Filler Abu Kain Katun	0.5	6
Filler Kapur	0.5	6
Total		100

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 25 Resep Briket Aspal Kapur 0.3% : 0.7% Abu Kain Katun

Campuran		Filler Abu Kain Katun 0.3% + Kapur 0.7%
Berat Tiap Briket (gram)		1200
Kadar Aspal Optimum (%)		4.8
Berat Aspal (gram)		58
% aspal terhadap agregat		95
Berat Agregat (gram)		1142
Fraksi Agregat	%	1
Agregat 0-5	5	57
Agregat 5-10	14	160
Agregat 10-15	80	914
Filler Abu Kain Katun	0.3	3
Filler Kapur	0.7	8
Total		1142

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 26 Resep Briket Aspal Kapur 0% : 1% Abu Kain Katun

Campuran		Filler Abu Kain Katun 0.3% + Kapur 0.7%
Berat Tiap Briket (gram)		1200
Kadar Aspal Optimum (%)		4.8
Berat Aspal (gram)		58
% aspal terhadap agregat		95
Berat Agregat (gram)		1142
Fraksi Agregat	%	1
Agregat 0-5	5	57
Agregat 5-10	14	160
Agregat 10-15	80	914
Filler Abu Kain Katun	0.3	3
Filler Kapur	0.7	8
Total		1142

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel resep briket dia⁵⁵ pada tabel 4.22 dan 4.26 dihasilkan berbagai resep dengan beberapa kadar aspal yaitu 4, 4.5, 5, 5.5, dan 6. Untuk kadar aspal yang akan digunakan¹⁵ yaitu kadar aspal 5 dengan jumlah total berat briket yaitu 1140 gram. Pada tabel 4.23, 4.24, dan tabel 4.25 memiliki total berat briket yang sama yaitu sebesar 1142 gram. ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2 tentang jumlah berat briket aspal sekitar 1000 gram – 1200 gram dan telah memenuhi standar.

4.6.2 Rekapitulasi Pengujian Material

Hasil Uji material disusun agar mengetahui material mana yang telah sesuai ketentuan dan mana yang belum sesuai dengan²⁹ ketentuan yang ditetapkan. Ringkasan keseluruhan dari uji material tersebut ditunjukkan pada tabel 4.27 berikut.

Tabel 4. 27 Rekapitulasi Hasil Uji Material

Rekap Uji Bahan						
Hasil dari uji substitusi pada filler kapur						
No	Uji	Metode	Unit	Ketentuan	Hasil	Deskripsi
1	Analisa pada saringan	SNI ASTM C136 tahun (2012)	%	>75	95.38	Lolos
2	Berat jenis	SNI 1970 tahun (2016)	gr	>2,5	3.43	Lolos
Hasil dari uji filler pada abu kain katun						
No	Uji	Metode	Unit	Ketentuan	Hasil	Deskripsi
1	Analisa pada saringan	SNI ASTM C136 (2012)	%	>75	94.64	Lolos
2	Berat jenis	SNI 1970 tahun (2016)	gr	>2,5	2.62	Lolos
Hasil dari uji pada agregat halus (0-5 mm)						
No	Uji	Metode	Unit	Ketentuan	Hasil	Deskripsi
1	Analisa pada saringan	SNI ASTM C136 tahun (2012)	%	<10	4.89	Lolos
2	Berat jenis kondisi curah (<i>Bulk</i>)	SNI 1970 tahun (2016)	gr	>2,5	2.60	Lolos
3	Berat jenis kondisi (SSD)	SNI 1970 tahun (2016)	gr	>2,5	2.63	Lolos
4	Berat jenis kondisi semu	SNI 1970 tahun (2016)	gr	>2,5	2.68	Lolos
5	Penyerapan pada air	SNI 1970 tahun (2016)	%	<3	1.07	Lolos
Hasil dari uji pada agregat kasar (5-10 mm) dan (10-15 mm)						
No	Uji	Metode	Unit	Ketentuan	Hasil	Deskripsi
1	Analisa pada saringan (10-15)	SNI ASTM C136 tahun (2012)	%	<1	0.99	Lolos
2	Analisa pada saringan (5-10)	SNI ASTM C136 tahun (2012)	%	<1	0.99	Lolos
3	Berat jenis kondisi curah (<i>Bulk</i>)	SNI 1969 tahun (2016)	gr	>2,5	5.90	Lolos
4	Berat jenis kondisi (SSD)	SNI 1969 tahun (2016)	gr	>2,5	5.96	Lolos
5	Berat jenis kondisi semu	SNI 1969 tahun (2016)	gr	>2,5	6.31	Lolos
6	Penyerapan pada air	SNI 1969 tahun (2016)	%	<3	1.11	Lolos
7	Keausan pada agregat	SNI 2417 tahun (2016)	%	<40	36.07	Lolos
Hasil dari uji pada aspal pen 60/70						
No	Uji	Metode	Unit	Ketentuan	Hasil	Deskripsi
1	Penetrasi pada aspal	SNI 2456 tahun (2011)	mm	≥54	65	Lolos
2	Berat jenis pada aspal	SNI 2441 tahun (2011)	gr	≥1	1.21	Lolos
3	Titik nyala pada aspal	SNI 2433 tahun (2011)	°C	≥230	339	Lolos
4	Titik lembek pada aspal	SNI 2432 tahun (2011)	°C	≥54	62	Lolos

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan rekapitulasi uji bahan pada tabel 4.25 dari pengujian substitusi filler kapur, filler abu kain katun, pengujian pada agregat 0 – 5, pengujian pada agregat 5 – 10, pengujian pada agregat 10 – 15, dan pengujian aspal penetrasi 60/70 telah sesuai ketentuan Bina Marga (2018) revisi 2.

Sebelum proses pencampuran agregat + aspal, tentukan dahulu kadar aspal rencana (Pb) untuk memperoleh (KAO). Dalam

variabel variasi variabel (Pb) dengan interval 0,5% pada setiap variasi. Penentuan kadar aspal rencana tersebut dilakukan menggunakan rumus empiris yang didasarkan pada persentase masing-masing fraksi agregat. Hasil perhitungan (Pb) ditunjukkan pada tabel 4.28 dan untuk rumus pb disajikan pada tabel 4.29 berikut

Tabel 4. 28 Penentuan Kadar Aspal Rencana (Pb)

Nomer ayakan		%	
no	satuan (mm)	Keseluruhan Campuran	Tertinggal
$\frac{3}{4}$	19	100	
$\frac{1}{2}$	12.5	94.26	5.74
$\frac{3}{8}$	9.5	59.03	35.23
# 4	4.75	14.27	44.75
# 8	2.36	7.49	6.78
# 16	1.18	7.03	0.46
# 30	0.6	6.44	0.59
# 50	0.3	5.69	0.75
# 100	0.15	3.55	2.14
# 200	0.075	2.13	1.42
		CA	FA
		0.035	0.045
		FF	0.18
		92.51	5.36
		1-2	1
Nilai tetap		1	
Pb		4.86	Nilai pada Pb dibulatkan 5

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 29 Rumus Penentuan Kadar Aspal Rencanaa (Pb)

CA = Agregat Kasar	
CA = 100 - Total Campuran #8	
CA = 100 - 7.49	
CA = 92.51%	
FA = Agregat Halus	
FA = Total Campuran #8 - Total Campuran #200	
FA = 7.49 - 2.13	
FA = 5.36%	
FF = Filler	
FF = 100 - (CA+FA)	
FF = 100 - (92.51-5.36)	
FF = 2.13%	
Pb = Kadar Aspal Rencana	
Pb = 0.035(%CA) + 0.045(%FA) + 0.18(%FF) + Konstanta	
Pb = 0.035(%92.51) + 0.045(%5.36) + 0.18(%2.13) + 1	
Pb = 4.86% dibulatkan menjadi 5%	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Setelah diperoleh kadar aspal optimum rencana sebesar 5%, maka kadar aspal yang digunakan dalam percampuran aspal panas ditentukan dengan dua variasi di bawah Pb dan dua variasi di atas Pb dengan interval 0,5%, sehingga menggunakan substitusi filler kapur sebesar 1%. Dengan demikian, variasi kadar aspal rencana yang digunakan adalah 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6%. Rancangan jumlah briket disajikan pada tabel 4.30 berikut

Tabel 4. 30 Rancangan Jumlah Briket Variasi Kadar Aspal Rencana

PENGUJIAN 7 <i>id In Mixture (VIM)</i>							Total Briket
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Rencana (Pb)					Jumlah Briket	
	4	4.5	5	5.5	6		
Kapur 1%	3	3	3	3	3	15	45
PENGUJIAN 26 <i>TABRO LOSS (CL)</i>							
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Rencana (Pb)					Jumlah Briket	
	4	4.5	5	5.5	6		
Kapur 1%	3	3	3	3	3	15	
PENGUJIAN 26 <i>T FLOW DOWN (AFD)</i>							
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Rencana (Pb)					Jumlah Briket	
	4	4.5	5	5.5	6		
Kapur 1%	3	3	3	3	3	15	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Komposisi campuran aspal porus dalam Job Mix Design (JMD) dengan penggunaan filler kapur sebesar 1% pada setiap variasi kadar aspal rencana, yaitu 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6%, akan dibuat masing-masing tiga sampel benda uji untuk setiap variasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.28. Untuk jumlah sampel benda uji aspal porus disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. 31 Rancangan Jumlah Benda Uji Kondisi KAO

RANCANGAN JUMLAH BENDA UJI KONDISI KAO			
PENGUJIAN MARSHALL			
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Jumlah Briket	Total Briket
1% Kapur	4.8%	3	15
AKK 0.3% : 0.7% Kapur		3	
AKK 0.5% : 0.5% Kapur		3	
AKK 0.7% : 0.3% Kapur		3	
1% Abu Kain Katun		3	
PENGUJIAN CANTABRO LOSS (CL)			
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Jumlah Briket	Total Briket
1% Kapur	4.8%	3	15
AKK 0.3% : 0.7% Kapur		3	
AKK 0.5% : 0.5% Kapur		3	
AKK 0.7% : 0.3% Kapur		3	
1% Abu Kain Katun		3	
PENGUJIAN ASPHALT FLOW DOWN (AFD)			
VARIASI FILLER	Kadar Aspal Optimum (KAO)	Jumlah Briket	Total Briket
1% Kapur	4.8%	3	15
AKK 0.3% : 0.7% Kapur		3	
AKK 0.5% : 0.5% Kapur		3	
AKK 0.7% : 0.3% Kapur		3	
1% Abu Kain Katun		3	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

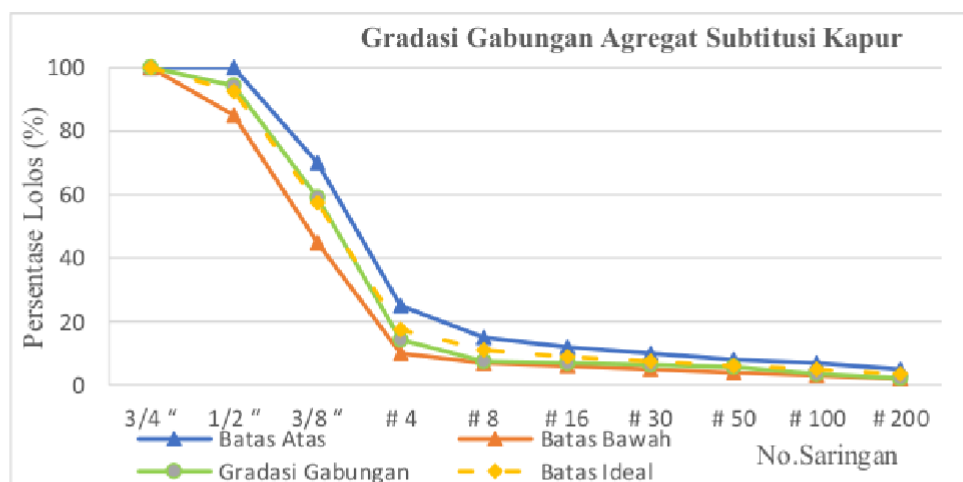
4.6.3 Perencanaan Pengujian Material

Perencanaan dan pelaksanaan pengujian material disusun untuk mengidentifikasi material yang telah memenuhi kriteria serta yang belum sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan. Seluruh hasil pengujian tersebut dirangkum dan disajikan pada tabel 4.32 dan di gambar kan pada gambar 4.6

Tabel 4. 32 Gradasi Agregat Kapur 1% : 0% Filler Abu Kain Katun

Komposisi Gradasi Gabungan Agregat Filler Abu Kain Katun 0% : Kapur 1%										Cek
SIEVE NO		Gradasi Agregat				Kombinasi Agregat	% lolos spesifikasi			
No	mm	0-5.	5-10.	10-15.	Filler Kapur					
3/4 “	19	100	100	100	100	100	100	100	100	Yes
1/2 “	13.2	100	100	92.82	100	94.26	85	92.5	100	Yes
3/8 “	9.5	100	98.41	49.06	100	59.03	45	57.5	70	Yes
# 4	4.75	98.03	48.04	2.06	100	14.27	10	17.5	25	Yes
# 8	2.36	96.23	1.92	1.76	100	7.49	7	11	15	Yes
# 16	1.18	92.52	1.29	1.53	100	7.03	6	9	12	Yes
# 30	0.6	84.42	1.11	1.33	100	6.44	5	7.5	10	Yes
# 50	0.3	71.97	1.08	1.18	100	5.69	4	6	8	Yes
# 100	0.15	31.25	1.03	1.07	98.90	3.55	3	5	7	Yes
# 200	0.075	4.89	0.99	0.99	95.38	2.13	2	3.5	5	Yes
							BB	Ideal	BA	
Perbandingan Campuran dari Persentase Berat Total Agregat		Agregat 0-5				5	%			
		Agregat 5-10				14	%			
		Agregat 10-15				80	%			
		Filler Kapur				1	%			
		Total				100	%			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 6 Grafik Gradasi Subtitusi Filler Kapur 1%

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel 4.32 dan gambar grafik 4.6 diatas komposisi gradasi agregat 94 Filler Abu kain katun lolos persentase spesifikasi dengan nilai diantara batas bawah (bb) dan batas atas (ba) dengan ditunjukan pada grafik garis warna hijau.

Tabel 4. 33 Gradasi Agregat Kapur 0.7% : 0.3% Filler Abu Kain Katun

Komposisi Gradasi Gabungan Agregat Filler Abu Kain Katun 0.3% : Kapur 0.7%											Cek
SIEVE NO		Gradasi Agregat					Kombinasi Agregat % Lolos Spesifikasi				
No	mm	0-5	5-10.	10-15.	Filler AKK	Filler Kapur					
3/4 "	19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	Yes
1/2 "	12.5	100	100	92.82	100	100	94.26	85	92.5	100	Yes
3/8 "	9.5	100	98.41	49.06	100	100	59.03	45	57.5	70	Yes
# 4	4.75	98.03	48.04	2.06	100	100	14.27	10	17.5	25	Yes
# 8	2.36	96.23	1.92	1.76	100	100	7.49	7	11	15	Yes
# 16	1.18	92.52	1.29	1.53	100	100	7.03	6	9	12	Yes
# 30	0.6	84.42	1.11	1.33	100	100	6.44	5	7.5	10	Yes
# 50	0.3	71.97	1.08	1.18	100	100	5.69	4	6	8	Yes
# 100	0.15	31.25	1.03	1.07	98.75	98.90	3.55	3	5	7	Yes
# 200	0.075	4.89	0.99	0.99	94.64	95.38	2.13	2	3.5	5	Yes
								BB	Ideal	BA	
Perbandingan Campuran dari Persentase Berat Total Agregat		Agregat 0-5					5	%			
		Agregat 5-10					14	%			
		Agregat 10-15					80	%			
		Filler Abu Kain Katun					0.3	%			
		Filler Kapur					0.7	%			
		Total					100	%			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 34 Gradasi Agregat Kapur 0.5% : 0.5% Filler Abu Kain Katun

Komposisi Gradasi Gabungan Agregat Filler Abu Kain Katun 0.5% + Kapur 0.5%											Cek
SIEVE NO		Gradasi Agregat					Kombinasi Agregat	% Lolos Spesifikasi			
No	mm	0-5	5-10.	10-15.	Filler AKK	Filler Kapur					
3/4 “	19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	Yes
1/2 “	12.5	100	100	92.82	100	100	94.26	85	92.5	100	Yes
3/8 “	9.5	100	98.41	49.06	100	100	59.03	45	57.5	70	Yes
# 4	4.75	98.03	48.04	2.06	100	100	14.27	10	17.5	25	Yes
# 8	2.36	96.23	1.92	1.76	100	100	7.49	7	11	15	Yes
# 16	1.18	92.52	1.29	1.53	100	100	7.03	6	9	12	Yes
# 30	0.6	84.42	1.11	1.33	100	100	6.44	5	7.5	10	Yes
# 50	0.3	71.97	1.08	1.18	100	100	5.69	4	6	8	Yes
# 100	0.15	31.25	1.03	1.07	98.75	98.90	3.55	3	5	7	Yes
# 200	0.075	4.89	0.99	0.99	94.64	95.38	2.13	2	3.5	5	Yes
								BB	Ideal	BA	
Perbandingan Campuran dari Persentase Berat Total Agregat		Agregat 0-5					5	%			
		Agregat 5-10					14	%			
		Agregat 10-15					80	%			
		Filler Abu Kain Katun					0.5	%			
		Filler Kapur					0.5	%			
		Total					100	%			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. 35 Gradasi Agregat Kapur 0.3% : 0.7% Filler Abu Kain Katun

Komposisi Gradasi Gabungan Agregat Filler Abu Kain Katun 0.7% + Kapur 0.3%											Cek
SIEVE NO		Gradasi Agregat					Kombinasi Agregat	% Lolos Spesifikasi			
No	mm	0-5	5-10.	10-15.	Filler AKK	Filler Kapur					
3/4 "	19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	Yes
1/2 "	12.5	100	100	92.82	100	100	94.26	85	92.5	100	Yes
3/8 "	9.5	100	98.41	49.06	100	100	59.03	45	57.5	70	Yes
# 4	4.75	98.03	48.04	2.06	100	100	14.27	10	17.5	25	Yes
# 8	2.36	96.23	1.92	1.76	100	100	7.49	7	11	15	Yes
# 16	1.18	92.52	1.29	1.53	100	100	7.03	6	9	12	Yes
# 30	0.6	84.42	1.11	1.33	100	100	6.44	5	7.5	10	Yes
# 50	0.3	71.97	1.08	1.18	100	100	5.69	4	6	8	Yes
# 100	0.15	31.25	1.03	1.07	98.75	98.90	3.55	3	5	7	Yes
# 200	0.075	4.89	0.99	0.99	94.64	95.38	2.13	2	3.5	5	Yes
								BB	Ideal	BA	
Perbandingan Campuran dari Persentase Berat Total Agregat		Agregat 0-5					5	%			
		Agregat 5-10					14	%			
		Agregat 10-15					80	%			
		Filler Abu Kain Katun					0.7	%			
		Filler Kapur					0.3	%			
		Total					100	%			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

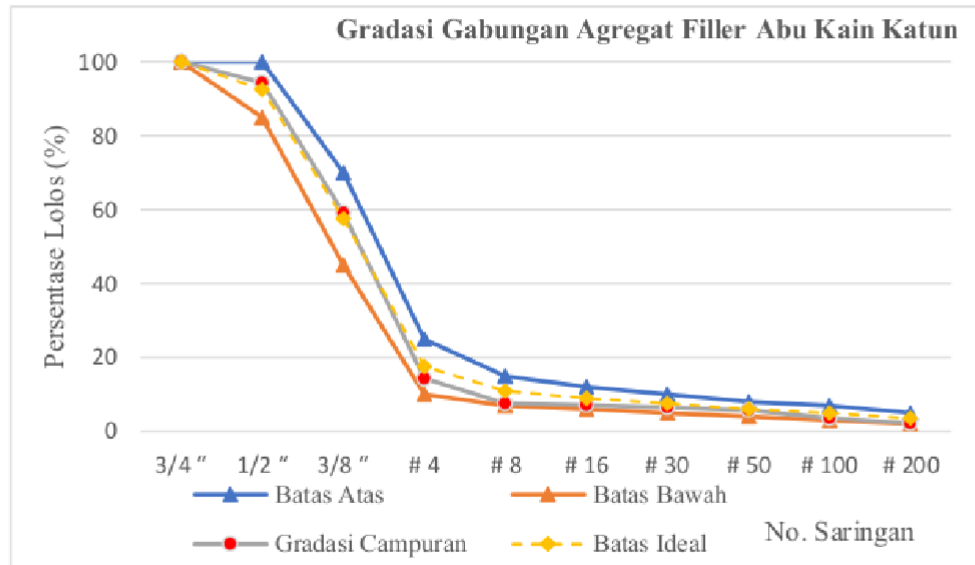
69

Berdasarkan tabel 4.33, 4.34, dan tabel 4.35 diatas gradasi agregat Filler Abu kain katun variasi 0.3%, 0.5%, dan 0.7% lolos persentase spesifikasi dengan nilai diantara batas bawah (bb) dan batas atas (ba).

Tabel 4. 36 Gradasi Agregat Kapur 0% : 1% Filler Abu Kain Katun

Komposisi Gradasi Gabungan Aspal Porus Filler Filler Abu Kain Katun 1% : Kapur 0%											Cek
SIEVE NO		Gradasi Agregat				Kombinasi Agregat	% lolos spesifikasi				
No	mm	0-5.	5-10.	10-15.	Filler AKK						
3/4 “	19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	Yes
1/2 “	12.5	100	100	92.82	100	94.26	85	92.5	100		Yes
3/8 “	9.5	100	98.41	49.06	100	59.03	45	57.5	70		Yes
# 4	4.75	98.03	48.04	2.06	100	14.27	10	17.5	25		Yes
# 8	2.36	96.23	1.92	1.76	100	7.49	7	11	15		Yes
# 16	1.18	92.52	1.29	1.53	100	7.03	6	9	12		Yes
# 30	0.6	84.42	1.11	1.33	100	6.44	5	7.5	10		Yes
# 50	0.3	71.97	1.08	1.18	100	5.69	4	6	8		Yes
# 100	0.15	31.25	1.03	1.07	98.75	3.55	3	5	7		Yes
# 200	0.075	4.89	0.99	0.99	94.64	2.12	2	3.5	5		Yes
							BB	Ideal	BA		
Perbandingan Campuran dari Persentase Berat Total Agregat	Agregat 0-5					5	%				
	Agregat 5-10					14	%				
	Agregat 10-15					80	%				
	Filler Abu Kain Katun					1	%				
	Total					100	%				

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 7 Grafik Gradasi Filler Abu Kain Katun 1%
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel 4.36 dan gambar grafik 4.7 diatas komposisi gradasi agregat 94 Filler Abu kain katun lolos persentase spesifikasi dengan nilai diantara batas bawah (bb) dan batas atas (ba) dengan ditunjukkan pada grafik garis warna abu – abu.

1 4.7 Penentuan pada Kadar Aspal Optimum

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran 14 al porus dalam penelitian ini menggunakan metode (AAPA 2004). Metode ini mensyaratkan tiga parameter utama, yaitu VIM, CL (ketahanan terhadap pelepasan butiran agregat), dan (AFD). Adapun tahapan penentuan KAO dalam campuran aspal porus dengan ketentuan gradasi (AAPA 2004) adalah sebagai berikut::

1. Menentukan kadar aspal pada kondisi VIM sebesar 18% sebagai KAO maksimum.
2. Menentukan kadar aspal pada kondisi CL sebesar 35% sebagai KAO minimum.
3. Menghitung nilai rata-rata antara KAO maksimum dan KAO minimum.
4. Memproyeksikan nilai rata-rata 10 KAO terhadap parameter (AFD).
5. Menjumlahkan nilai rata-rata KAO dengan nilai AFD sehingga didapatkan nilai pada KAO akhir dalam campuran aspal porus sesuai gradasi (AAPA, 2004).

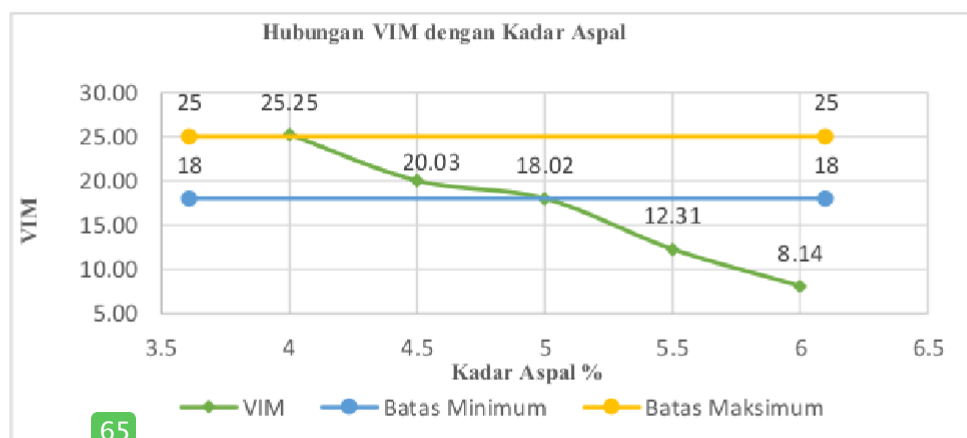
4.7.1 Pengujian *Void In Mixture* untuk Penentuan KAO

Uji (VIM) dilakukan untuk menentukan persentase rongga udara pada benda uji campuran aspal porus pada kondisi (KAO). Besarnya rongga udara dalam campuran ini sangat berpengaruh terhadap kemampuan air untuk mengalir melalui permukaan perkerasan aspal porus. Oleh karena itu, nilai VIM yang diperoleh harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh (AAPA 2004). Hasil uji VIM pada kondisi (KAO) disajikan pada Tabel 4.37 dan Gambar Grafik 4.8.

Tabel 4. 37 Hasil Uji *Void In Mixture* untuk Penentuan KAO

Kode Briket	Kadar Aspal		Massa Benda Uji			Berat Isi (Cimb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (Gmm)	Rongga Terhadap Campuran (VIM)	Keterangan
	% aspal terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kering	SSD	Dalam Air				
	%	%	gr	gr	gr	gr/cc		%	
	a	b	c	d	e	$f = c/(d-e)$	$g = c/(c-e)$	$h = (g-f)g \times 100$	
1	96	4	1052.4	1199.7	668	1.979	2.738	27.70	Tidak Memenuhi
2	96	4	1026.6	1182.2	644	1.907	2.683	28.91	
3	96	4	1085.3	1194.2	625	1.907	2.358	19.13	
Rata-Rata		4				1.931	2.593	25.25	
1	95.5	4.5	1105.6	1174.2	626	2.017	2.305	12.51	Memenuhi
2	95.5	4.5	1046.4	1150.4	643	2.062	2.594	20.50	
3	95.5	4.5	1038.3	1174.3	672	2.067	2.835	27.08	
Rata-Rata		4.5				2.049	2.578	20.03	
1	95	5	1052.4	1176.1	602	1.833	2.337	21.55	Memenuhi
2	95	5	1072.2	1185.5	663	2.052	2.620	21.68	
3	95	5	1140.5	1198.7	661	2.121	2.379	10.82	
Rata-Rata		5				2.002	2.445	18.02	
1	94.5	5.5	1134.5	1194.1	663	2.136	2.406	11.22	Tidak Memenuhi
2	94.5	5.5	1024.5	1082.2	640	2.317	2.664	13.05	
3	94.5	5.5	1022.6	1083.7	601	2.119	2.426	12.66	
Rata-Rata		5.5				2.190	2.499	12.31	
1	94	6	1084.1	1129.7	613	2.098	2.301	8.825	Tidak Memenuhi
2	94	6	1154.3	1198.6	619	1.992	2.156	7.643	
3	94	6	1128.3	1172.9	613	2.015	2.190	7.966	
Rata-Rata		6				2.035	2.216	8.14	
Persyaratan						GMM	2.5	18-25%	

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 8 Grafik Hubungan VIM dengan Kadar Aspal
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel 4.37 dan gambar grafik 4.8 hasil pengujian Void In Mixture (VIM) untuk penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) diatas, diperoleh nilai rata-rata dari setiap kadar aspal, dalam kadar aspal 4%, 4.5%, 5% nilai rata-rata Campuran memenuhi spesifikasi AAPA 2004 yang mensyaratkan Nilai VIM adalah 18%-25%, sedangkan dalam kadar aspal 5.5%, dan 6% Campuran tidak memenuhi spesifikasi AAPA 2004 Hal ini menyatakan bahwa semakin tinggi kadar aspal maka rongga dalam campuran akan semakin tertutup.

Penentuan nilai KAO maksimum diperoleh dari hasil pengujian VIM yang berada pada batas minimum sebesar 18%. Rumus untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO maksimum) disajikan pada persamaan berikut dan ditunjukkan pada Tabel 4.38 berikut

$$KA \text{ maks} + \left(\frac{Bb - V_{maks}}{V_{min} - V_{maks}} \right) \times (KA_{min} - KA_{maks})$$

$$4.5 + \left(\frac{18 - 20.03}{18.02 - 20.03} \right) \times (5 - 4.5) = \text{nilai (KAO) maksimum } 5.00$$

Keterangan :

KA maksimum : kadar aspal pada kondisi nilai (VIM) yang lebih besar atau sama dengan batas adalah $\geq 18\%$

KA minimum : kadar aspal pada kondisi nilai (VIM) yang lebih kecil atau sama dengan batas adalah $\leq 18\%$

V maksimum : nilai (VIM) pada ka maksimum

V minimum : nilai (VIM) pada ka minimum

Bb : batas nilai VIM minimum yang diizinkan 18%

Tabel 4. 38 Penentuan (KAO) maksimum pada VIM

KAO min 18%	$KA_{max} + \left(\frac{Bb - V_{max}}{V_{min} - V_{max}} \right) \times (KA_{min} - KA_{max})$	5.00
-------------	---	------

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

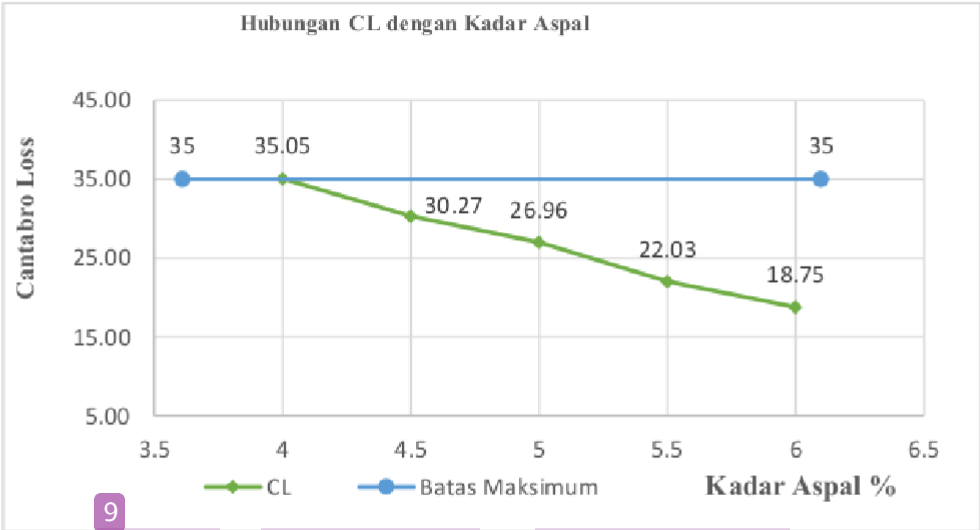
4.7.2 Pengujian Cantabro Loss untuk Penentuan KAO

Pengujian *Cantabro Loss* (CL) dilakukan setelah nilai (KAO) diperoleh, dengan tujuan menentukan besarnya massa briket aspal porus yang hilang akibat proses pengujian pada berbagai variasi kadar limas yang telah ditetapkan. Rekapitulasi hasil pengujian CL pada kondisi KAO disajikan dalam tabel berikut. Sementara itu, hasil pengujian dalam kondisi KAO ditampilkan pada Tabel 4.39 dan analisisnya divisualisasikan melalui gambar Grafik 4.9 berikut

Tabel 4. 39 Hasil Uji *Cantabro Loss* untuk Penentuan KAO

No	Kode Benda Uji	Variasi Filler (Kapur)	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2004	Keterangan
				<i>W1</i>	<i>W2</i>	<i>W1-W2</i>	$\frac{W1 - W2}{W1} \times 100\%$			
1	101 Kadar Aspal : 4%	1%	Kering	1013.2	630.2	383	37.80	35.05	Maks.35%	Tidak Memenuhi
	Kadar Aspal : 4%			1019.1	640.4	378.7	37.16			
	136 Kadar Aspal : 4%			1014.2	708.1	306.1	30.18			
2	Kadar Aspal : 4.5%	1%	Kering	1093.8	766.4	327.4	29.93	30.27	Maks.35%	Memenuhi
	Kadar Aspal : 4.5%			1122.5	841.2	281.3	25.06			
	Kadar Aspal : 4.5%			1134.5	728.1	406.4	35.82			
3	Kadar Aspal : 5%	1%	Kering	1105.8	750.8	355	32.10	26.96	Maks.35%	Memenuhi
	Kadar Aspal : 5%			1112.8	830.2	262.6	23.60			
	148 Kadar Aspal : 5%			1133.8	848.2	285.6	25.19			
4	Kadar Aspal : 5.5%	1%	Kering	1109.9	875.7	234.2	21.10	22.03	Maks.35%	Memenuhi
	Kadar Aspal : 5.5%			1141.7	804.1	337.6	29.57			
	15 Kadar Aspal : 5.5%			1150.8	973.4	177.4	15.42			
5	Kadar Aspal : 6%	1%	Kering	1177.8	982.7	195.1	16.56	18.75	Maks.35%	Memenuhi
	Kadar Aspal : 6%			1197.4	979.2	218.2	18.22			
	44 Kadar Aspal : 6%			1181.9	928.1	253.8	21.47			

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. 9 Grafik Hubungan CL dengan Kadar Aspal
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel 4.39 dan gambar grafik 4.9 hasil pengujian *Cantabro Loss* (CL) untuk penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) diatas, diperoleh nilai rata-rata dari setiap kadar aspal, dalam 102r aspal 4% nilai rata-rata Campuran tidak memenuhi pada spesifikasi *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA) 2004, sedangkan dalam kadar aspal 4.5%, 5%, 5.5%, dan 6% Campuran memenuhi spesifikasi AAPA 2004 yang mensyaratkan nilai CL maks 35%. Hal ini menyatakan bahwa semakin tinggi kadar aspal maka Campuran akan semakin tahan terhadap kerusakan akibat gesekan atau aus karena aspal bersifat sebagai perekat agregat.

Penentuan nilai KAO minimum diperoleh dari nilai uji pada (CL) yang berada pada batas maksimum sebesar 35%. Rumus untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO minimum) disajikan pada persamaan berikut dan ditunjukkan pada Tabel 4.40 berikut

$$KA_{maks} + \left(\frac{Ba - CL_{maks}}{CL_{min} - CL_{maks}} \right) \times (KA_{min} - KA_{maks})$$

$$4 + \left(\frac{35 - 35.05}{30.27 - 35.05} \right) \times (4.5 - 4) = \text{nilai (KAO) maksimum } 4.00$$

Keterangan :

KA maksimum : kadar aspal pada kondisi nilai (CL) yang lebih besar atau sama dengan batas adalah $\geq 35\%$

KA minimum : kadar aspal pada kondisi nilai (CL) yang lebih kecil atau sama dengan batas adalah $\geq 35\%$

V maksimum : nilai (C)L pada *ka* minimum

Ba : batas nilai (CL) minimum yang diizinkan 35%

Tabel 4. 40 Penentuan (KAO) maksimum pada CL

KAO maks. 35%	$KA_{maks} + \left(\frac{Ba - CL_{maks}}{CL_{min} - CL_{maks}} \right) \times (KA_{min} - KA_{maks})$	4.00
---------------	--	------

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

4.7.3 Pengujian *Asphalt Flow Down* untuk Penentuan KAO

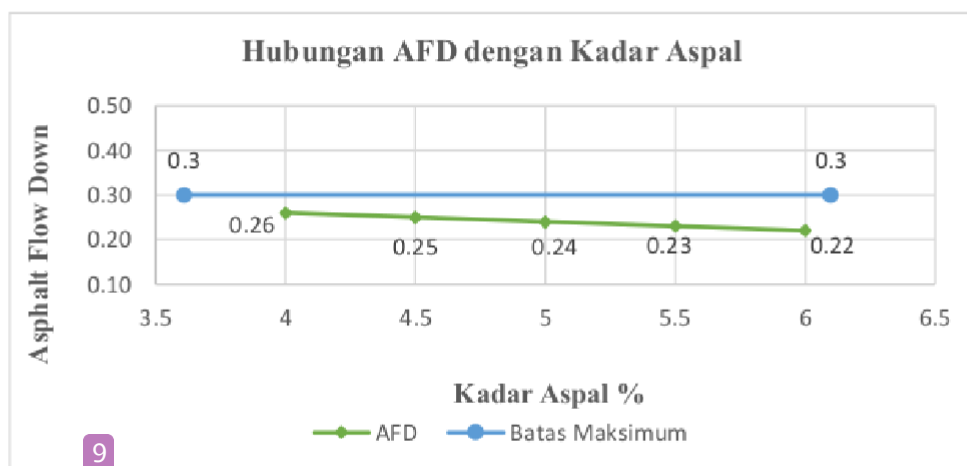
Uji *Asphalt Flow Down* (AFD) dilakukan setelah nilai (KAO) ditentukan, dengan tujuan mengetahui besarnya aspal yang mengalir ke bawah pada berbagai variasi kadar limbah yang telah ditetapkan. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kecenderungan aliran aspal pada campuran dalam kondisi tertentu. Hasil pengujian AFD pada kondisi KAO ditunjukkan pada tabel 4.41 dan hasilnya disajikan dalam Gambar 4.9. berikut

92

Tabel 4. 41 Hasil Uji *Asphalt Flow Down* untuk Penentuan KAO

ASPHALT FLOW DOWN (KADAR ASPAL 4%)								
No	Kadar Aspal	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4%	1%	Berat Nampan Kosong	m1	359	359	359	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1514	1528	1578	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	361.8	362.1	362.4	gr
17 Perhitungan				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Asphalt Flow Down (%)				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.2	0.3	0.3	0.26
No	Kadar Aspal	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.5%	1%	Berat Nampan Kosong	m1	165	165	165	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1297	1328	1312	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	168.5	167.4	167.8	gr
17 Perhitungan				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Asphalt Flow Down (%)				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.3	0.2	0.2	0.25
No	Kadar Aspal	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	5%	1%	Berat Nampan Kosong	m1	167	167	167	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1313	1328	1315	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	170	169.1	170.2	gr
17 Perhitungan				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Asphalt Flow Down (%)				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.3	0.2	0.3	0.24
No	Kadar Aspal	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	5.5%	1%	Berat Nampan Kosong	m1	362	362	362	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1687.9	1656.4	1668.9	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	365.2	365.1	364.8	gr
17 Perhitungan				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Asphalt Flow Down (%)				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.2	0.2	0.2	0.23
No	Kadar Aspal	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	6%	1%	Berat Nampan Kosong	m1	170	170	170	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1304	1311	1309	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	172.2	172.8	172.5	gr
17 Perhitungan				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
Asphalt Flow Down (%)				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.2	0.2	0.2	0.22

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)



9

Gambar 4. 10 Grafik Hubungan AFD dengan Kadar Aspal

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari tabel 4.42 dan gambar grafik 4.10 hasil uji (AFD) untuk penentuan (KAO) diatas, diperoleh nilai rata-rata dari setiap kadar aspal yang ditandai dengan garis berwarna hijau, dalam kadar aspal 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, dan 6% nilai rata-rata campuran sesuai ketentuan (AAPA 2004) yang mensyaratkan nilai AFD harus 0.3% yang ditandai dengan garis yang berwarna biru. Hal ini menyatakan bahwa semakin tinggi kadar aspal maka Campuran akan semakin mengalami perpindahan atau mengalir turun dari agregat saat berada dalam kondisi panas dan diam dalam posisi vertikal.

Penentuan nilai KAO minimum diperoleh dari hasil pengujian Asphalt Flow Down (AFD) yang berada pada batas maksimum sebesar 35%. Rumus untuk menentukan (KAO minimum) disajikan pada persamaan berikut dan ditunjukkan pada Tabel 4.42 berikut

$$\left(\frac{KAO_{min} - KAO_{maks}}{2} \right) \times \text{Nilai AFD}$$

$$\left(\frac{5.00 - 4.00}{2} \right) \times 0.25 = \text{nilai KAO campuran aspal porus 4.8 \%}$$

Keterangan :

KAO minimum : KAO (minimum)

KAO maksimum : KAO (maksimum)

Tabel 4. 42 Penentuan (KAO) maksimum pada AFD

Persamaan	Hasil (%)
$\left(\frac{KAO_{min} + KAO_{maks}}{2} \right) + \text{Nilai AFD}$	4.8

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

4.7.4 Pengujian Marshall pada Kondisi KAO

Uji Marshall digunakan untuk menilai sifat campuran perkerasan aspal dengan bantuan alat tekan *Marshall Test*. Uji ini bertujuan menentukan nilai stabilitas serta *flow* dari campuran aspal yang diuji. Selain itu, uji *Marshall* dilakukan untuk memastikan bahwa karakteristik benda uji aspal telah sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan oleh *Australian Asphalt Pavemen Association* (AAPA) tahun 2004. Prosedur pengujian mengacu pada SNI 06-2489-1991. Hasil pengujian Marshall pada kondisi KAO disajikan pada Tabel 4.43 berikut

Tabel 4. 43 Hasil Uji Marshall pada Kondisi KAO

REKAP PENGUJIAN MARSHALL																		
SUBSTITUSI FILLER KAPUR 1% : 0% FILLER ABU KAIN KATUN																		
Kode Briket	Kadar Aspal		Masa Benda Uji			Isi Benda Uji	Berat Isi (Gmb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (gmm)	Rongga Tahapad Campuran (VBM)	Stabilitas			Pelelehan (Flow)	Hasil Bagi Marshall (MQ)	Keterangan			
	6 mm terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kerap 3	SSD	Dalam Air					Bacan Pada Alat	Klathrasi Proving Ring	Setelah dikoreksi						
%	%	gr	gr	gr	cc	g/cc	%		32.15	kg	mm	kg/mm						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	n	o	p						
1	95	4.8	1024.5	1152.8	668	484.8	2.11	2.87	26.5	67	21.54	808	2.0	404	Tidak Memenuhi			
2	95	4.8	1037.6	1138.9	672	466.9	2.22	2.84	21.7	68	21.86	820	2.0	410				
3	95	4.8	1027.6	1138.9	671	467.9	2.20	2.88	23.8	69	22.18	832	2.0	416				
Rata-Rata		4.8						2.18	2.9			820	2.0	410				
SUBSTITUSI FILLER KAPUR 0.3% : 0.7% FILLER ABU KAIN KATUN																		
Kode Briket	Kadar Aspal		Masa Benda Uji			Isi Benda Uji	Berat Isi (Gmb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (gmm)	Rongga Tahapad Campuran (VBM)	Stabilitas			Pelelehan (Flow)	Hasil Bagi Marshall (MQ)	Keterangan			
	6 mm terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kerap 3	SSD	Dalam Air					Bacan Pada Alat	Klathrasi Proving Ring	Setelah dikoreksi						
%	%	gr	gr	gr	cc	g/cc	%		32.15	kg	mm	kg/mm						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	n	o	p						
1	95	4.8	1096.6	1212.4	648	564.4	1.94	2.44	20.5	67	21.54	808	2.0	404	Tidak Memenuhi			
2	95	4.8	1123.7	1243.5	673	570.5	1.97	2.49	21.0	62	19.98	747	1.8	427				
3	95	4.8	1130.5	1256.1	669	587.1	1.96	2.45	21.4	65	20.90	784	1.8	448				
Rata-Rata		4.8						1.95	2.46	21.0			780	1.8	426			
SUBSTITUSI FILLER KAPUR 0.5% : 0.5% FILLER ABU KAIN KATUN																		
Kode Briket	Kadar Aspal		Masa Benda Uji			Isi Benda Uji	Berat Isi (Gmb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (gmm)	Rongga Tahapad Campuran (VBM)	Stabilitas			Pelelehan (Flow)	Hasil Bagi Marshall (MQ)	Keterangan			
	6 mm terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kerap 3	SSD	Dalam Air					Bacan Pada Alat	Klathrasi Proving Ring	Setelah dikoreksi						
%	%	gr	gr	gr	cc	g/cc	%		32.15	kg	mm	kg/mm						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	n	o	p						
1	95	4.8	1097.1	1205.1	660	545.1	2.01	2.51	19.8	67	21.54	808	2.0	404	Tidak Memenuhi			
2	95	4.8	1049.8	1192.6	606	586.6	1.79	2.37	24.3	64	20.98	772	1.5	514				
3	95	4.8	1043.5	1160.1	627	533.1	1.96	2.51	21.9	66	21.22	796	1.5	530				
Rata-Rata		4.8						1.92	2.46	22.0			792	1.7	483			
SUBSTITUSI FILLER KAPUR 0.7% : 0.3% FILLER ABU KAIN KATUN																		
Kode Briket	Kadar Aspal		Masa Benda Uji			Isi Benda Uji	Berat Isi (Gmb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (gmm)	Rongga Tahapad Campuran (VBM)	Stabilitas			Pelelehan (Flow)	Hasil Bagi Marshall (MQ)	Keterangan			
	6 mm terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kerap 3	SSD	Dalam Air					Bacan Pada Alat	Klathrasi Proving Ring	Setelah dikoreksi						
%	%	gr	gr	gr	cc	g/cc	%		32.15	kg	mm	kg/mm						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	n	o	p						
1	95	4.8	1103.2	1243.8	642	603.8	1.86	2.39	23.6	62	19.98	747	1.8	427	Tidak Memenuhi			
2	95	4.8	1131.1	1241.9	656	585.9	1.96	2.38	18.9	64	20.98	772	1.8	441				
3	95	4.8	1137.1	1236.7	663	573.7	1.98	2.40	17.4	61	19.61	735	1.8	420				
Rata-Rata		4.8						1.91	2.39	20.0			752	1.8	429			
SUBSTITUSI FILLER KAPUR 0% : 1% FILLER ABU KAIN KATUN																		
Kode Briket	Kadar Aspal		Masa Benda Uji			Isi Benda Uji	Berat Isi (Gmb)	Berat Jenis Maksimum Teoritis (gmm)	Rongga Tahapad Campuran (VBM)	Stabilitas			Pelelehan (Flow)	Hasil Bagi Marshall (MQ)	Keterangan			
	6 mm terhadap agregat	% aspal terhadap campuran	Kerap 3	SSD	Dalam Air					Bacan Pada Alat	Klathrasi Proving Ring	Setelah dikoreksi						
%	%	gr	gr	gr	cc	g/cc	%		32.15	kg	mm	kg/mm						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	n	o	p						
1	95	4.8	1094.5	1152.8	648	504.8	2.05	2.68	23.4	64	20.98	772	2.0	386	Memenuhi			
2	95	4.8	1027.6	1138.9	654	484.9	2.12	2.75	23.0	68	21.86	820	2.0	410				
3	95	4.8	1027.7	1138.9	650	488.9	2.10	2.72	22.7	67	21.54	808	2.0	404				
Rata-Rata		4.8						2.09	2.7	23.0			800	2.0	400			
Persyaratan														18-25%			≥500	≥400

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4.43 menunjukkan hasil uji marshall pada kondisi KAO dengan Substitusi Filler Kapur : Filler Abu Kain Katun (0% : 1%, 0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, 0.7% : 0.3%, dan 49% : 0%) :

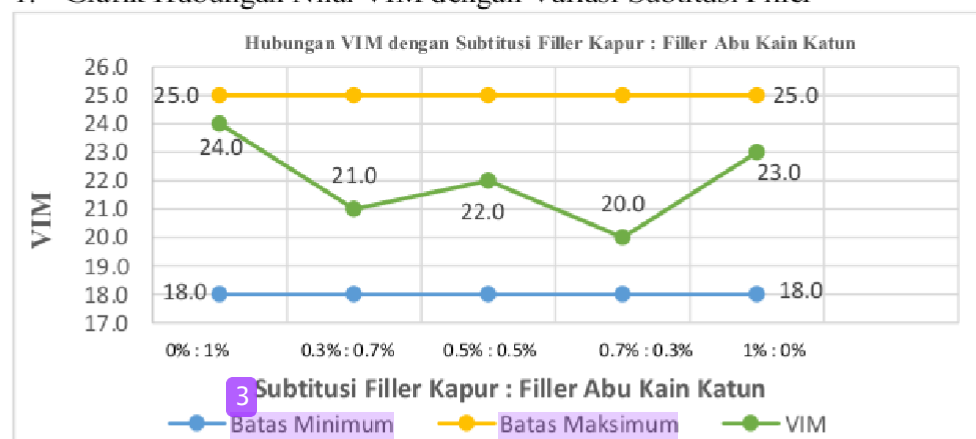
1. Nilai (VIM) atau rongga dalam campuran, Nilai VIM menunjukkan besarnya rongga udara di dalam campuran. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 1% : 0% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 24.0% Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.7% : 0.3% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 21.0%. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.5% : 0.5% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 22.0%. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.3% : 0.7% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 24.0%, dan pada variasi Substitusi Filler Kapur 0% : 1% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 23.0%, campuran aspal porus ini sudah berada di dalam rentang ideal (18–25%). Artinya, pori-pori dalam campuran cukup besar untuk membuat air dapat mengalir menembus lapisan.
2. Nilai stabilitas merupakan nilai kekuatan pada campuran. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 1% : 0% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 820 kg. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.7% : 0.3% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 780 kg. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.5% : 0.5% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 800 kg. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.3% : 0.7% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 808 kg, dan pada variasi Substitusi Filler Kapur 0% : 1% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 820 kg. Nilai stabilitas telah melampaui persyaratan yaitu nilai > 500 kg. Hal ini menandakan gradasi agregat dan ikatan aspal porus mampu menahan beban lalu lintas.
3. Nilai Pelelehan (Flow) menggambarkan seberapa besar deformasi (kelelehan) campuran saat menerima beban. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 1% : 0% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 2.0 mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.7% : 0.3% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 1.8 mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.5% : 0.5% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 1.7 mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.3% : 0.7% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 1.9 mm, dan pada variasi Substitusi Filler Kapur 0% : 1% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 2.0 mm, campuran berada dalam batas yang disyaratkan (2–6 mm). Hal Ini menunjukkan bahwa campuran cukup lentur untuk menyesuaikan diri terhadap tekanan tanpa langsung retak.

4. Nilai Marshall Quotient (MQ) menunjukkan perbandingan antara kekuatan campuran (stabilitas) terhadap besarnya perubahan bentuk (Flow) yang terjadi ketika diberi beban. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 1% : 0% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 410 kg/mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.7% : 0.3% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 426 kg/mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.5% : 0.5% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 487 kg/mm. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0.3% : 0.7% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 424 kg/mm, pada campuran ini memenuhi persyaratan nilai MQ. Pada variasi Substitusi Filler Kapur 0% : 1% Filler Abu Kain Katun dengan nilai sebesar 400 kg/mm memenuhi persyaratan MQ sebesar ≤ 400 kg/mm.

Dari hasil rekap diatas dihasilkan variasi 1% filler abu kain katun memiliki nilai seimbang dari semua parameter pengujian dan merupakan variasi yang lebih baik dibandingkan dari variasi filler yang lainnya

Grafik Hubungan nilai pengujian dengan substitusi filler kapur : filler abu kain katun meliputi:

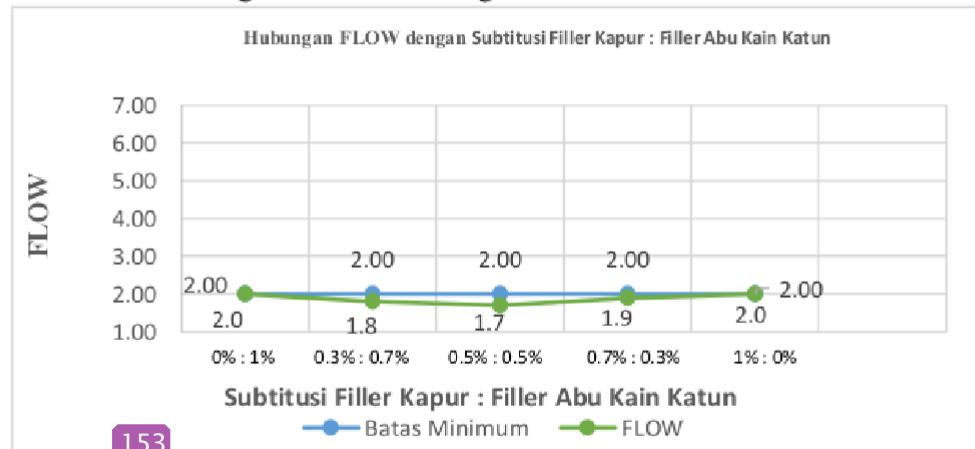
1. Grafik Hubungan Nilai VIM dengan Variasi Substitusi Filler



Gambar 4. 11 Grafik Hubungan VIM Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Gambar Grafik 4.11 di atas menunjukkan hubungan antara nilai VIM atau rongga dalam campuran. dengan variasi substitusi filler yang digunakan yaitu abu kain katun : kapur (0% : 1%, 0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, 0.7% : 0.3% dan 1% : 0%). Secara keseluruhan nilai VIM dengan variasi filler abu katun : substitusi filler kapur masih sesuai dengan ketentuan *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA 2004) untuk campuran aspal porus 18% - 25%.

2. Grafik Hubungan Nilai Flow dengan Variasi Subtitusi Filler



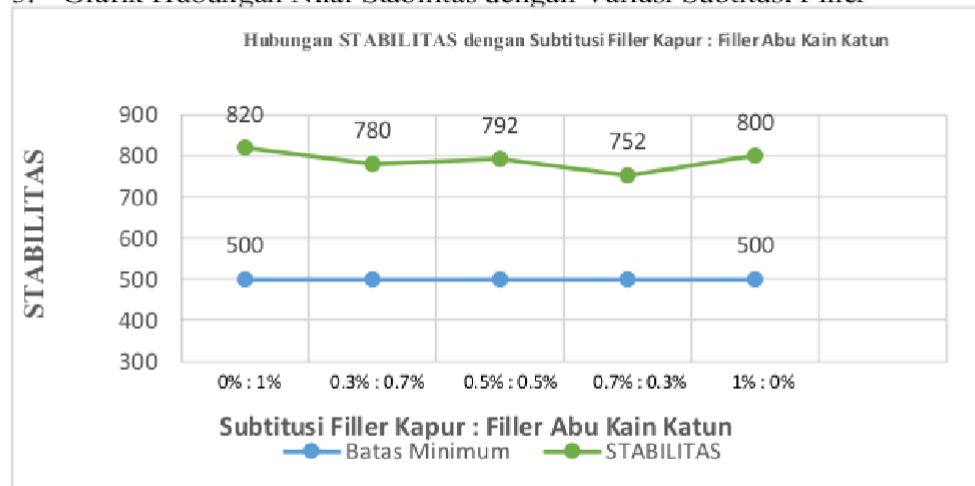
153

Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Flow Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

105

Gambar Grafik 4.12 di atas menunjukkan hubungan antara nilai Flow atau besarnya deformasi (perubahan bentuk) horizontal yang dialami campuran aspal saat diberi beban hingga rusak. dengan variasi subtitusi filler yang digunakan yaitu abu kain katun: kapur (0% : 1%, 0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, 0.7% : 0.3%, dan 1% : 0%). Pada subtitusi (1% : 0% dan 0% : 1%) campuran memenuhi rentang batas 2-6 mm tetapi pada subtitusi (0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, dan 0.7% : 0.3%) campuran berada di bawah rentang batas 2-6 mm.

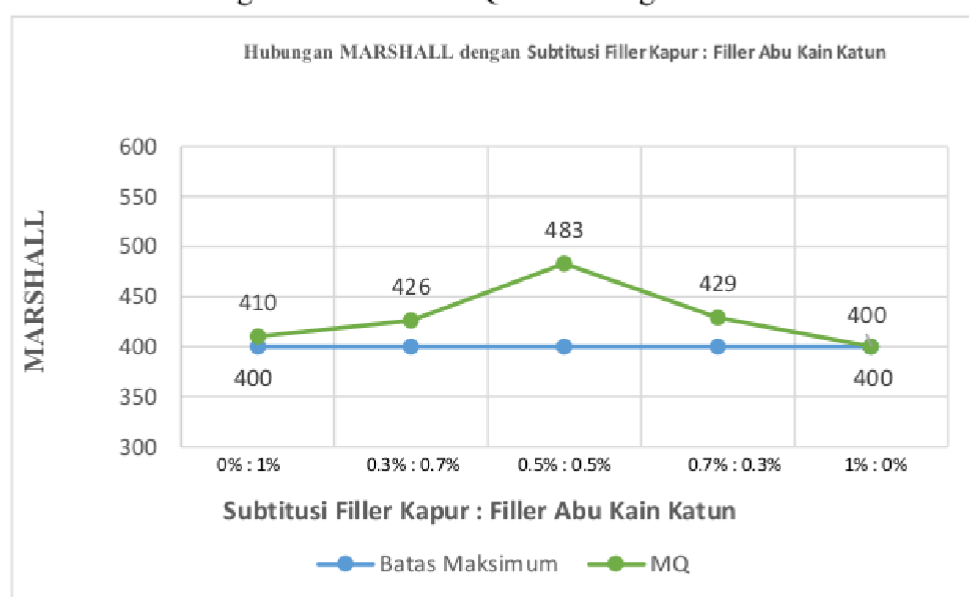
3. Grafik Hubungan Nilai Stabilitas dengan Variasi Subtitusi Filler



Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Stabilitas Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Grafik 4.13 di atas menunjukkan garis yang berwarna hijau tentang hubungan antara nilai Stabilitas atau kemampuan campuran untuk tetap mempertahankan bentuk dan kinerjanya meskipun terkena perubahan suhu, beban lalu lintas, dan kelembapan dengan variasi substitusi filler yang digunakan yaitu filler abu kain katun : substitusi filler kapur (0% : 1%, 0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, 0.7% : 0.3%, dan 1% : 0%). Secara keseluruhan nilai stabilitas 113 an variasi substitusi filler kapur masih sesuai dengan ketentuan Autralian Asphalt Pavement Association (AAPA 2004) untuk campuran aspal porus ≥ 500 kg dengan nilai 820 kg, 780 kg, 792 kg, 752 kg, dan 800 kg.

4. Grafik Hubungan Nilai Marshall Quotient dengan Variasi Substitusi Filler



Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Marshall Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Gambar Grafik 4.14 di atas menunjukkan hubungan antara nilai Marshall Quotient (MQ) atau perbandingan antara stabilitas (kemampuan campuran untuk menahan beban) dan kelelahan/Flow (deformasi plastis yang terjadi saat diuji). dengan variasi kadar filler yang digunakan yaitu filler abu kain katun : substitusi filler kapur (0% : 1%, 0.3% : 0.7%, 0.5% : 0.5%, dan 0.7% : 0.3%) campuran tidak memenuhi syarat nilai $MQ \leq 400$ kg/mm. Nilai campuran variasi 1% : 0% berada pada batas nilai $MQ \leq 400$ kg/mm yang berarti memenuhi persyaratan Marshall Quotient.

4.7.5 Pengujian *Cantabro Loss* pada Kondisi KAO

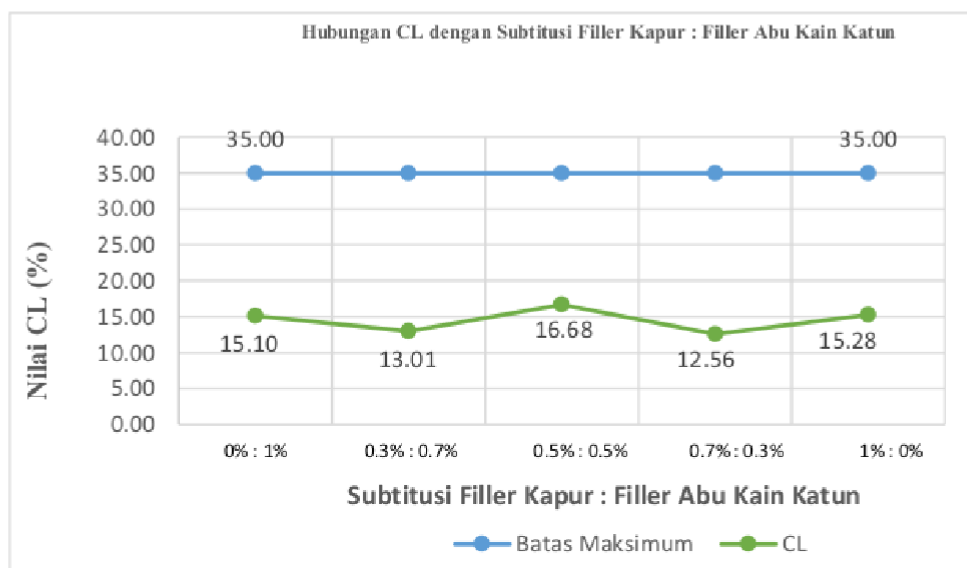
Tahap berikutnya yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pelaksanaan pengujian *Cantabro Loss* (CL) terhadap masing-masing variasi campuran aspal pada kondisi KAO. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data yang lebih komprehensif mengenai karakteristik campuran aspal, khususnya dalam hal ketahanan terhadap kehilangan butiran akibat gaya mekanis. *Cantabro Loss* merupakan parameter penting dalam evaluasi campuran beraspal, terutama untuk jenis campuran bergradasi terbuka seperti aspal porus, karena berkaitan langsung dengan daya ikat antar agregat dan durabilitas campuran di lapangan. Hasil pengujian *Cantabro Loss* (CL) pada kondisi KAO disajikan pada tabel 4.44 berikut

Tabel 4. 44 Hasil Uji *Cantabro Loss* pada Kondisi KAO

Kadar Aspal Optimum	Filler	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2003	Keterangan
			$W1$	$W2$	$W1-W2$	$\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$			
KAO 4.8%	AKK : KAPUR (0% : 0.1%)	Kering	1012.4	867.9	144.5	14.27	15.10	Maks.35%	Memenuhi
			1049.3	882.2	167.1	15.92			
			1030.9	875.1	155.8	15.11			
Kadar Aspal Optimum	Filler	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2004	Keterangan
			$W1$	$W2$	$W1-W2$	$\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$			
KAO 4.8%	AKK : KAPUR (0.3% : 0.7%)	Kering	1025.2	899.3	125.9	12.28	13.01	Maks.35%	Memenuhi
			1055.1	910.3	144.8	13.72			
			1040.2	904.8	135.4	13.01			
Kadar Aspal Optimum	Filler	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2004	Keterangan
			$W1$	$W2$	$W1-W2$	$\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$			
KAO 4.8%	AKK : KAPUR (0.5% : 0.5%)	Kering	1131.2	1007.9	123.3	10.90	16.68	Maks.35%	Memenuhi
			1031.1	797.6	233.5	22.65			
			1081.2	902.8	178.4	16.50			
Kadar Aspal Optimum	Filler	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2004	Keterangan
			$W1$	$W2$	$W1-W2$	$\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$			
KAO 4.8%	AKK : KAPUR (0.7% : 0.3%)	Kering	1085.2	919.3	165.9	15.29	12.56	Maks.35%	Memenuhi
			1054.6	951.1	103.5	9.81			
			1069.9	935.2	134.7	12.59			
Kadar Aspal Optimum	Filler	Kondisi Benda Uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Kehilangan Berat (gram)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Rata-Rata	Spesifikasi AAPA 2004	Keterangan
			$W1$	$W2$	$W1-W2$	$\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$			
KAO 4.8%	AKK : KAPUR (1% : 0%)	Kering	1001.4	867.9	133.5	13.33	15.28	Maks.35%	Memenuhi
			1065.3	882.2	183.1	17.19			
			1033.4	875.1	158.3	15.32			

Sumber : Hasil Olahan Peneliti, (2026)

Dari hasil pengujian (CL) pada (KAO) sebesar 4,8%, diperoleh bahwa seluruh variasi filler memenuhi batas maksimum kehilangan berat sebesar 35% sesuai spesifikasi AAPA 2004. Nilai Cantabro Loss rata-rata untuk campuran dengan substitusi filler kapur dan Filler Abu Kain Katun 1% adalah 15.10% dan 15.28%, sedangkan pada variasi filler Filler Abu Kain Katun diperoleh nilai berturut-turut sebesar 13,01% (0.3%:0.7%), 16,68% (0.5%:0.5%), dan 12,56% (0.7%:0.3%).



Gambar 4. 15 Grafik Hubungan CL Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari gambar grafik 4.15 terlihat bahwa variasi 0,7% : 0,3% memberikan nilai CL paling rendah, yaitu sekitar 12,56%. Hasil dengan nilai yang lebih rendah menunjukkan bahwa campuran dengan proporsi tersebut memiliki ketahanan terbaik terhadap kehilangan material. Sebaliknya, variasi 0,5% : 0,5% menghasilkan nilai CL tertinggi, yaitu 16,68%. Secara keseluruhan campuran memenuhi batas maksimum yang disyaratkan yaitu 35%

4.7.6 Pengujian *Asphalt Flow Down* pada Kondisi KAO

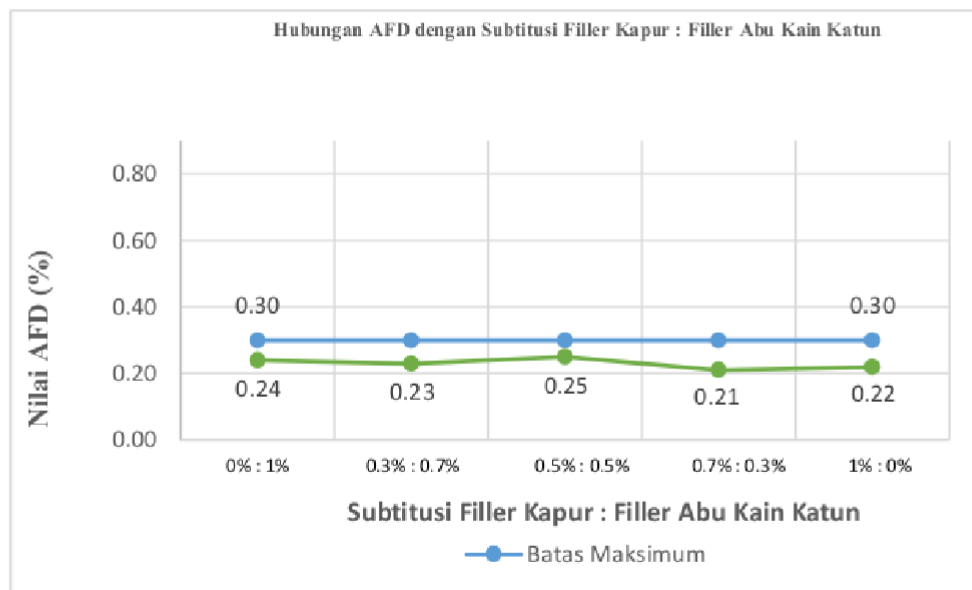
Uji *Asphalt Flow Down* bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan vertikal campuran aspal, khususnya pada campuran aspal yang menggunakan aditif atau bahan tambahan seperti aspal modifikasi. Pengujian ini membantu menentukan sejauh mana aspal dapat mengalami perpindahan atau mengalir turun dari agregat saat berada dalam kondisi panas 135°C dalam posisi vertikal Hasil Uji AFD kondisi KAO disajikan dalam tabel 4.45 berikut

Tabel 4. 45 Hasil Uji *Asphalt Flow Down* pada Kondisi KAO

No	KAO	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.8%	AKK : KAPUR (0% : 1%)	Berat Nampan Kosong	m1	154.3	154.3	154.3	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1296.3	1295.4	1294.6	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	156.2	157.8	157.1	gr
17 Perhitungan Asphalt Flow Down (%)				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.2	0.3	0.2	0.24
No	KAO	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.8%	AKK : KAPUR (0.3% : 0.7%)	Berat Nampan Kosong	m1	344.2	344.2	344.2	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1486.4	1485.1	1487.2	gr
3			Berat Nampan + Aspal Tertinggal	m3	347.1	347.1	346.2	gr
17 Perhitungan Asphalt Flow Down (%)				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.3	0.3	0.2	0.23
No	KAO	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.8%	AKK : KAPUR (0.5% : 0.5%)	Berat Nampan Kosong	m1	157.6	157.6	157.6	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1295.3	1285.1	1296.1	gr
3			Berat Aspal Tertinggal	m3	161.2	159.8	160.2	gr
17 Perhitungan Asphalt Flow Down (%)				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.3	0.2	0.2	0.25
No	KAO	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.8%	AKK : KAPUR (0.7% : 0.3%)	Berat Nampan Kosong	m1	157.6	157.6	157.6	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1295.3	1285.1	1296.1	gr
3			Berat Aspal Tertinggal	m3	159.8	159.8	160.2	gr
17 Perhitungan Asphalt Flow Down (%)				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.2	0.2	0.2	0.21
No	KAO	Filler	Keterangan	Notasi	I	II	III	Satuan
1	4.8%	AKK : KAPUR (1% : 0%)	Berat Nampan Kosong	m1	346.7	346.7	346.7	gr
2			Berat Nampan + Campuran Aspal	m2	1485.9	1486.4	1487.8	gr
3			Berat Aspal Tertinggal	m3	349.6	349.1	348.9	gr
17 Perhitungan Asphalt Flow Down (%)				Rumus	I	II	III	Rata-Rata
				$\frac{m3 - m1}{m2 - m1} \times 100$	0.3	0.2	0.2	0.22

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026) 14

Pada tabel 4.45 diatas uji (AFD) dilakukan pada campuran beraspal porus dengan kadar aspal optimum 4,8% untuk beberapa variasi filler, yaitu substitusi filler kapur dan filler abu kain katun 0% dan 1%, pada filler abu kain katun : substitusi filler kapur (0.3%:0.7%, 0.5%:0.5%, dan 0.7%:0.3%), Pengujian dilakukan tiga kali pengulangan untuk masing-masing variasi, dengan mencatat berat nampan kosong (m1), berat nampan + campuran aspal (m2), dan berat nampan + aspal yang tertinggal (m3). Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan rumus $AFD = (m3 - m1)/(m2 - m1) \times 100$, nilai rata-rata AFD pada seluruh variasi berada pada kisaran 0,2–0,3%. Nilai ini menunjukkan bahwa aliran aspal ke bawah masih dalam batas yang sangat kecil, sehingga campuran tidak mengalami bleeding atau kehilangan aspal berlebih selama proses pemanasan.



Gambar 4. 16 Grafik Hubungan AFD Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Dari gambar grafik 4.16 terlihat bahwa nilai AFD pada seluruh variasi berada dalam rentang yang sangat sempit, Rentang nilai yang sangat dekat ini menunjukkan bahwa perubahan kadar filler tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kecenderungan aspal mengalir ke bawah. Semua komposisi masih berada dalam batas aman, sehingga tidak ada indikasi kecenderungan bleeding atau keluarnya aspal secara berlebihan. Dengan demikian, campuran tetap stabil meskipun proporsi filler abu kain katun dan substitusi filler kapur diubah.

4.7.7 Pengujian Permeabilitas pada Kondisi KAO

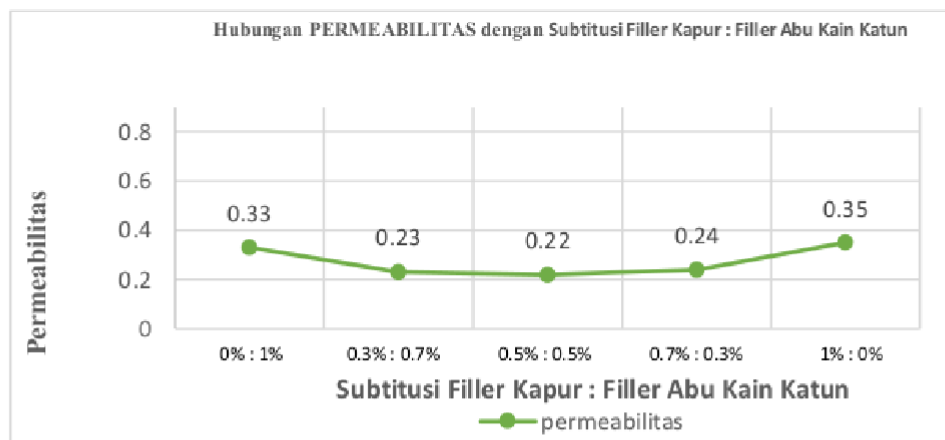
Uji permeabilitas pada kondisi (KAO) dilakukan agar mengetahui kemampuan campuran pada aspal porus dalam meloloskan air melalui struktur rongganya. Pengujian ini dilaksanakan setelah campuran (benda uji) mencapai kondisi stabil pada KAO, sehingga nilai yang diperoleh merepresentasikan performa campuran pada kondisi rencana. Nilai permeabilitas yang dihasilkan digunakan sebagai parameter untuk menilai fungsi drainase campuran, mengingat aspal porus dirancang memiliki rongga udara tinggi agar mampu mengalirkan air secara cepat dan mengurangi potensi gerangan pada permukaan perkerasan. Hasil dari uji permeabilitas pada kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO) disajikan pada Tabel 4.46 berikut

Tabel 4. 46 Hasil Uji Permeabilitas pada Kondisi KAO

No. Benda Uji	Kadar Aspal Optimum	Variasi Kadar Filler	Volume Air liter	Tinggi cm	Waktu detik	Permeabilitas liter/detik	Rata-Rata cm/detik	Memenuhi
1	4.8%	Kapur 1%	1	7.57	12.04	0.32	0.33	Memenuhi
2			1	7.01	11.08	0.34		
3			1	7.29	12.02	0.32		
No. Benda Uji	Kadar Aspal Optimum	Variasi Kadar Filler	Volume Air liter	Tinggi cm	Waktu detik	Permeabilitas cm/detik	Rata-Rata cm/detik	Memenuhi
1	4.8%	0.3% : 0.7% (abu kain katun : kapur)	1	7.44	17.42	0.22	0.22	Memenuhi
2			1	7.06	17.36	0.22		
3			1	7.12	17.39	0.22		
No. Benda Uji	Kadar Aspal Optimum	Variasi Kadar Filler	Volume Air liter	Tinggi cm	Waktu detik	Permeabilitas liter/detik	Rata-Rata cm/detik	Memenuhi
1	4.8%	0.5% : 0.5% (abu kain katun : kapur)	1	7.56	19.82	0.19	0.23	Memenuhi
2			1	7.25	17.36	0.22		
3			1	7.22	14.05	0.27		
No. Benda Uji	Kadar Aspal Optimum	Variasi Kadar Filler	Volume Air liter	Tinggi cm	Waktu detik	Permeabilitas liter/detik	Rata-Rata cm/detik	Memenuhi
1	4.8%	0.7% : 0.3% (abu kain katun : kapur)	1	7.25	17.01	0.22	0.24	Memenuhi
2			1	7.18	14.04	0.27		
3			1	7.29	16.03	0.24		
No. Benda Uji	Kadar Aspal Optimum	Variasi Kadar Filler	Volume Air liter	Tinggi cm	Waktu detik	Permeabilitas liter/detik	Rata-Rata cm/detik	Memenuhi
1	4.8%	Abu Kain Katun 1%	1	7.47	10.01	0.38	0.35	Memenuhi
2			1	7.21	11.04	0.34		
3			1	7.27	12.03	0.32		

(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Pada spesifikasi AAPA 2004 sendiri tidak menyebutkan secara spesifik berapa syarat nilai permeabilitas untuk campuran aspal porus. Maka dari itu nilai permeabilitas hanya dilaporkan seperti pada tabel 4.40 diatas



Gambar 4. 17 Grafik Hubungan Permeabilitas Kapur : Abu Kain Katun
(Sumber : Hasil Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan gambar grafik 4.17 diatas terlihat pengujian yang dilakukan dengan variasi kadar filler abu kain katun : subtitusi filler kapur, hasil yang diperoleh menunjukkan perbedaan pengaruh kedua jenis filler terhadap nilai permeabilitas campuran aspal. Nilai permeabilitas campuran aspal porus menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengalirkan air, dengan nilai yang berkisar antara 0.22 cm/detik hingga 0.35 cm/detik.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Permeabilitas Aspal Porus menggunakan Filler Abu Kain Katun

Berdasarkan hasil dari uji permeabilitas pada campuran aspal porus dengan variasi substitusi filler kapur dan abu kain katun, diperoleh nilai permeabilitas berkisar antara 0,22 cm/detik hingga 0,35 cm/detik. Seluruh variasi telah memenuhi persyaratan menurut *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA) tahun 2004 dan Bina Marga revisi 2 tahun 2018, yaitu berada pada rentang 0,1 – 0,5 cm/detik. Dari seluruh variasi yang diuji, variasi dengan komposisi 0% filler kapur dan 1% filler abu kain katun merupakan yang paling baik, dengan nilai permeabilitas sebesar 0,35 cm/detik. Nilai ini menunjukkan kemampuan drainase paling optimal dalam mengalirkan air serta mengurangi potensi genangan pada permukaan perkerasan. Dengan demikian, variasi tersebut dinilai paling efektif dalam memenuhi fungsi utama aspal porus sebagai lapisan berpori yang memiliki kinerja drainase tinggi.

2. Karakteristik Aspal Porus menggunakan Filler Abu Kain Katun

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik campuran aspal porus yang meliputi parameter Marshall (Void In Mixture, Flow, Stabilitas, Marshall Quotient, Cantabro Loss, dan Asphalt Flow Down), seluruh variasi campuran secara umum telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA) tahun 2004 dan Bina Marga revisi 2 tahun 2018. Namun demikian, variasi dengan komposisi 0% filler kapur dan 1% filler abu kain katun merupakan variasi yang paling baik, karena menunjukkan kinerja paling optimal secara keseluruhan. Dengan nilai VIM sebesar 23%, nilai Flow sebesar 2,014 mm, nilai Stabilitas sebesar 800 kg, nilai Marshall Quotient sebesar 400 kg/mm, nilai Cantabro Loss sebesar 15.28%, dan nilai *Asphalt Flow Down* sebesar 0.22 gram. Dengan demikian, aspal porus dengan variasi substitusi filler kapur 0% : filler abu kain katun 1% dinilai paling memenuhi kriteria teknis sebagai campuran aspal porus yang baik dan bisa diaplikasikan pada jalan raya dengan lalu lintas tinggi.

3. Kadar Aspal Optimum menggunakan Filler Abu Kain Katun

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik campuran aspal porus, parameter *Void in Mixture* (VIM) menunjukkan bahwa kadar aspal 4,5% dan 5% telah memenuhi spesifikasi *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA) tahun 2004 dengan rentang nilai 178 – 25%, sedangkan pada kadar aspal 4% nilai VIM terlalu tinggi dan pada kadar aspal 5,5% serta 6% terlalu rendah akibat meningkatnya kadar aspal yang menyebabkan rongga dalam campuran semakin tertutup. Pengujian *Cantabro Loss* (CL) menunjukkan bahwa kadar aspal 4% tidak memenuhi spesifikasi karena melebihi batas maksimum 35%, sementara kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% telah memenuhi persyaratan dan menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap keausan seiring bertambahnya kadar aspal. Pada pengujian *Asphalt Flow Down* (AFD), seluruh variasi kadar aspal memenuhi batas maksimum <0,3%, yang menunjukkan stabilitas campuran terhadap aliran aspal masih terjaga. Berdasarkan keseluruhan parameter tersebut, diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 4,8% yang berada dalam rentang yang disyaratkan yaitu 4,5% – 6% serta memberikan keseimbangan yang terbaik antara rongga-rongga campuran, ketahanan terhadap keausan, dan stabilitas pada campuran.

5.2 Saran

1. Berdasarkan hasil pengujian yang menunjukkan nilai variasi dengan komposisi 0% filler kapur dan 1% filler abu kain katun merupakan variasi yang paling baik, karena menunjukkan kinerja paling optimal secara keseluruhan. Maka campuran dengan variasi filler abu kain katun 1% direkomendasikan untuk diterapkan pada perkerasan jalan dengan kategori lalu lintas tinggi.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan kajian yang lebih mendalam terkait aspek biaya, sehingga pemanfaatan abu kain katun sebagai filler dapat ditinjau tidak hanya dari sisi teknis, tetapi juga dari segi keekonomian.
3. Penelitian lanjutan dapat dikembangkan dengan melakukan perbandingan terhadap jenis filler alternatif lainnya, khususnya yang berasal dari limbah organik berbeda seperti kain nilon atau polyester, sutra, wol, dan lainnya guna mengetahui karakteristik dan kinerja campuran yang paling optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwidodo, A. I., dkk. (2023). Analisis Kinerja *Modulus Resilien* dan Ketahanan *Fatigue* Campuran AC-WC dengan Asbuton Murni, BNA Blend, dan Aspal Pen 60/70. Teknik Sipil ITB.
- Al Machrus, R. B. F., Rizkiardi, A., Hartatik, N., Ervitasari, S. Y., & Punarta, I. G. A. (2025). Penambahan Limbah Spons Sandal EVA terhadap Karakteristik Aspal Modifikasi PG 70 pada Campuran Aspal.
- Alzahri, S., Firmando, F., Studi, P., Sipil, T., Studi, P., Sipil, T., Asphalt, C., Wearing, C., & Marshall, K. (2024). Media Ilmiah Teknik Sipil , Volume 12 , Nomor 1 , Januari 2024%: 8-20. 12, 8–20.
- ASTM-D6927 Metode Uji Standar untuk Stabilitas Marshall dan Aliran Campuran Aspal. (2015). American Society for Testing and Materials, i, 17. <https://doi.org/10.1520/D6927-15>
- ASTM D6926-20 Praktik Standar untuk Persiapan Spesimen Campuran Aspal Menggunakan Peralatan Marshall. (2020). ASTM International, i, 8. <https://doi.org/10.1520/D6926-20.iTeh>
- Australian Asphalt Pavement Association (AAPA)*. (2004). *Australian Asphalt Pavement Association: Guide to Pavement Technology – Part 4B: Asphalt*.
- Christophe Petit, Anne Millien, Francesco Canestrari, Valter Pannunzio, & Amadeo Virgili. (2012). *Experimental Study on Shear Fatigue Behavior and Stiffness Performance of Warm Mix Asphalt by adding Synthetic Wax*
- Direktorat Jenderal Bina Marga (2020). (n.d.). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2020). Spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan (Revisi 2).
- Elmagarhe, A., (2024). *Laboratory performance evaluation of porous asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate*.
- Gea, D. M., & Iduwin, T. (2022). Penambahan Abu Ampas Tebu Dan Serat Sabut Kelapa Terhadap Aspal Porus. Akselerasi%: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 3(2), 66–73. <https://doi.org/10.37058/aks.v3i2.4594>
- Ghulam, M., Nariswari, W., S, E. A., Gunawan, T., Pengajar, S., Studi, P., Sipil, T., Negeri, P., & Pendahuluan, I. (n.d.). NILAI STABILITAS POROUS ASPHALT MENGGUNAKAN MATERIAL. 33–40.
- Gray, B. E. (1940). *Recent Developments in the Use of Asphalt for (Proceedings, Journal of ASTM International)*

- H Shams, (2025). *Investigating the performance of asphalt pavements (Resilient modulus test, ASTM D7369-11)*
- Hartatik, N., Utami, G. S., & Rohmania, N. (2023). Karakteristik Campuran Aspal (AC-WC) dengan Penambahan Abu Slag Baja sebagai Bahan Pengganti Filler. Teknik Sipil, UPN “Veteran” Jawa Timur.
- Idayani, Royanna Sakura, Z. (2024). (2024). Jurnal Rekayasa Teknik dan Teknologi. 8(1), 18–24.
- I Gusti Agung Ananda Putra. (2022). *Study Characteristics of Porous Asphalt Using Aggregates from Karangasem with 60/70 Penetration Bitumen.*
- Ilyas Ichsan. (n.d.). Penggunaan Abu Bonggol Jagung Sebagai Pengganti Filler Dalam Komposisi Campuran Aspal AC-WC.
- Iriansyah, & Nyoman Suaryana. (2011). -- Kinerja Campuran Beraspal Khusus Sma Dan Porous Asphalt Modifikasi. In Puslitbang Jalan Dan Jembatan.
- Jamallul Iksan. (2023). Studi Eksperimental Campuran Aspal Porus dengan Limbah Plastik PP menggunakan Asbuton Modifikasi.
- Jimmyanto, H., Firda, A., Faritzie, H. Al, & Fuad, I. S. (2024). Studi Literature Riview Perkembangan Penelitian. 2(1), 38–47.
- Muhammad Dony Maulana. (2024). Pengaruh Penggunaan Limbah Plastik PET sebagai Substitusi Agregat pada Campuran Aspal Berpori.
- Muhammad Gunawan Perdana, Pratikso, & Rachmat Mudiyo. (2023). Analisis Kadar Aspal Optimum pada Campuran Aspal Porus Menggunakan Aspal PG-76 dan Serat Selulosa.
- Muhammad Isfan Arif. (2023). Karakteristik Campuran Aspal Porus dengan Limbah Plastik PET sebagai Bahan Tambah.
- Noviarti Rachman, D., & Indah Sari, P. (2020). Analisis Kerusakan Jalan dengan Menggunakan Metode PCI dan Strategi Penanganannya (Studi Kasus Jalan Nasional Srijaya Raya Palembang KM 8+149 s.d KM 9+149).
- Putri, L., & Santoso, A. (2022). Berat Jenis Aspal Berdasarkan SNI 2441:2011.
- Sapitri. (2022). Pengaruh Batu Bata Klinker dan Abu Batu Bata sebagai Agregat Kasar dan *Filler* pada Aspal Porus.
- Shafaatian, Y., & Salvo, M. (2020). *Inkorporasi Aditif dan Serat dalam Campuran Aspal Berpori: Suatu Tinjauan. Materials.*
- SNI 1969:2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. (2008). Badan Standardisasi Nasional, 20.
- SNI 1969:2016 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. (2016). Badan Standardisasi Nasional, 20.

- SNI 1970: 2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. (2008). Badan Standardisasi Nasional, <http://sni.litbang.pu.go.id/index.php?r=/sni/new/sni/detail/id/1957-18>.
- SNI 2432:2011 Cara Uji Penetrasi Aspal. (2011). Badan Standardisasi Nasional, 9–17.
- SNI 2433: 2011 Cara Uji Titik Nyala Dan Titik Bakar Aspal Dengan Alat Cleveland Open Up. (2011). Badan Standardisasi Nasional, 1–18. www.bsn.go.id
- SNI 2434:2011 Cara Uji Titik Lembek Aspal. (2011). Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2439. (2011). Metode uji penyelimutan dan pengelupasan pada campuran agregat-aspal. Badan Standardisasi Nasional, 1–11.
- SNI 2441:2011 Cara uji berat jenis aspal keras. (2011). Badan Standardisasi Nasional.
- SNI ASTM C136:2012. Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar. (2012). Badan Standardisasi Nasional, 1–24.
- Sri Gusty. (2022). Pengaruh Penggunaan Limbah Sabut Kelapa sebagai *Filler* terhadap Kinerja Karakteristik *Marshall* pada Campuran Aspal Porus.
- Sukirman, S. (2016). Beton Aspal Campuran Panas. In Institut Teknologi Nasional.
- Sultani, A. I. (2022). Aplikasi Serat Sintetis, Alami, dan Limbah dalam Campuran Aspal: Tinjauan Berbasis Sitasi. *Polymers*.
- Tamalkhani Syammaun, (2020). Pengaruh Substitusi Styrofoam pada Campuran Aspal Porus dan Serbuk Arang Tempurung Kelapa sebagai *Filler*.
- Ummah, M. S. (2019). Optimalisasi Kinerja Campuran Aspal Porus (Variasi Gradasi Agregat dan Pemanfaatan Limbah Oli). In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Nomor 1).
- Wafa Natasya Nurfaadhilah & Rangga Adiprima Sudisman. (2023). *The Effect of Low Density Polyethylene Asphalt Additives on the Properties of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*.
- Wu, M., & Zhao, J. (2022). Pengaruh Serat terhadap Kinerja Perkerasan Berpori (*Porous Friction Course*). *ACS Omega*.
- Yusuf, R., & Hakim, T. (2023). Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Berdasarkan SNI 2433:2011.
- Zhang, Q. (2022). Inkorporasi Serat Tekstil Daur Ulang ke dalam *Stone Mastic Asphalt*. *Buildings*, 15(8). MDPI.
- Zukisa. (2023). Pengaruh Penambahan Limbah Botol Plastik PET sebagai Substitusi Aspal Porus Pen 60/70.

20%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	repository.umsu.ac.id Internet	459 words — 1%
2	idm.or.id Internet	336 words — 1%
3	repository.untag-sby.ac.id Internet	304 words — 1%
4	docplayer.info Internet	272 words — 1%
5	123dok.com Internet	248 words — 1%
6	dspace.uui.ac.id Internet	244 words — 1%
7	repository.its.ac.id Internet	209 words — 1%
8	repository.unissula.ac.id Internet	199 words — 1%
9	repository.unwira.ac.id Internet	196 words — 1%
10	ejournal.utp.ac.id Internet	174 words — < 1%

repository.ub.ac.id

11	Internet	164 words — < 1%
12	eprints.upj.ac.id Internet	162 words — < 1%
13	eprints.itn.ac.id Internet	144 words — < 1%
14	repository.upstegal.ac.id Internet	144 words — < 1%
15	www.scribd.com Internet	141 words — < 1%
16	eprints.untirta.ac.id Internet	126 words — < 1%
17	repository.uir.ac.id Internet	119 words — < 1%
18	journal.trunojoyo.ac.id Internet	96 words — < 1%
19	pdfcoffee.com Internet	88 words — < 1%
20	es.scribd.com Internet	85 words — < 1%
21	repository.pnj.ac.id Internet	84 words — < 1%
22	rama.unimal.ac.id Internet	80 words — < 1%
23	teras.unimal.ac.id Internet	75 words — < 1%

24	Internet	71 words — < 1%
25	eprints.uty.ac.id Internet	65 words — < 1%
26	sni.litbang.pu.go.id Internet	64 words — < 1%
27	eprints.uny.ac.id Internet	63 words — < 1%
28	pdfslide.net Internet	61 words — < 1%
29	jurnal.polines.ac.id Internet	59 words — < 1%
30	core.ac.uk Internet	55 words — < 1%
31	etheses.uin-malang.ac.id Internet	55 words — < 1%
32	heriyantohelmi.blogspot.com Internet	54 words — < 1%
33	repository.unifa.ac.id Internet	53 words — < 1%
34	Fitriah Fitriah, Anafi Minmahddun, Try Sugiyarto Soeparyanto. "PEMANFAATAN MATERIAL LOKAL UNTUK KONSTRUKSI JALAN DI SULAWESI TENGGARA: UJI KELAYAKAN CAMPURAN BATU PECAH, SIRTU, DAN PASIR DESA LABUNTI, KABUPATEN MUNA, SEBAGAI TIMBUNAN KELAS S", Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil, 2025 Crossref	50 words — < 1%

35	Internet	47 words — < 1%
36	journal.ilmudata.co.id Internet	46 words — < 1%
37	repository.upi.edu Internet	46 words — < 1%
38	repository.ummat.ac.id Internet	44 words — < 1%
39	Audito Bintang, Nurani Hartatik, Laily Endah Fatmawati. "Analisis Campuran Agregat AC-BC dengan Substitusi Limbah Polyethylene Terephthalate dengan Filler Semen", Jurnal Teknik Industri Terintegrasi, 2025 Crossref	42 words — < 1%
40	repository.mercubuana.ac.id Internet	42 words — < 1%
41	St Maryam H, Maryam H, Lambang Basri Said. "ANALISIS FORMULASI PEMANFAATAN MATERIAL DAUR ULANG UNTUK CAMPURAN ASPAL BETON", Open Science Framework, 2020 Publications	41 words — < 1%
42	ejurnal.untag-smd.ac.id Internet	41 words — < 1%
43	ojs.unsulbar.ac.id Internet	40 words — < 1%
44	repositori.umsu.ac.id Internet	39 words — < 1%
45	teknik.wiraraja.ac.id Internet	39 words — < 1%

46	repository.umi.ac.id Internet	38 words — < 1%
47	jurnalteknik.unisla.ac.id Internet	37 words — < 1%
48	Ibnu Munir, Sazuatmo Sazuatmo, Elsa Rati Hariza. "Analisis Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi Sebagai Bahan Pengganti Filler Terhadap Campuran Aspal", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2025 Crossref	36 words — < 1%
49	archive.org Internet	36 words — < 1%
50	eprints.polbeng.ac.id Internet	36 words — < 1%
51	repo.bunghatta.ac.id Internet	36 words — < 1%
52	docobook.com Internet	34 words — < 1%
53	jbkd.ft.unand.ac.id Internet	34 words — < 1%
54	ojs.uma.ac.id Internet	29 words — < 1%
55	etd.umi.ac.id Internet	28 words — < 1%
56	id.scribd.com Internet	28 words — < 1%
57	repository.unibos.ac.id Internet	28 words — < 1%

58	www.slideshare.net Internet	28 words — < 1%
59	eprints.ums.ac.id Internet	27 words — < 1%
60	eprints.undip.ac.id Internet	26 words — < 1%
61	repo.unhi.ac.id Internet	26 words — < 1%
62	repository.usbypkp.ac.id Internet	26 words — < 1%
63	repository.unika.ac.id Internet	25 words — < 1%
64	www.jim.unsyiah.ac.id Internet	25 words — < 1%
65	Muhammad Gunawan Perdana. "VARIASI KEKERASAN AGREGAT TERHADAP KINERJA PADA CAMPURAN ASPAL BERPORI", Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil, 2024 Crossref	24 words — < 1%
66	www.coursehero.com Internet	24 words — < 1%
67	www.researchgate.net Internet	24 words — < 1%
68	M.Taufik Akbar Syaputra, Sazuatmo Sazuatmo, Tri Sefrus. "Pengaruh Penggunaan Filler Abu Limbah Cangkang Kemiri Terhadap Campuran Asphalt Concrete–Wearing Course", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2025 Crossref	23 words — < 1%

69	e-journals.unmul.ac.id Internet	22 words — < 1%
70	ejournal.unira.ac.id Internet	22 words — < 1%
71	vbook.pub Internet	22 words — < 1%
72	www.sipil.ft.unand.ac.id Internet	22 words — < 1%
73	www.taguchi.lppmbinabangsa.id Internet	22 words — < 1%
74	digilib.unila.ac.id Internet	21 words — < 1%
75	ejournal.unib.ac.id Internet	21 words — < 1%
76	Adela Berliana, Shinta Dwi Oktavia, Juny Andry Sulistyo. "Pengaruh Penambahan Limbah Serbuk Kayu Bangkirai dan Pasir Karjon terhadap Karakteristik Marshall Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2026 Crossref	19 words — < 1%
77	Aldila Anugrah Gusti, Tri Sefrus, Edito Dwianto. "Pengaruh Penggunaan Filler Limbah Las Karbit dalam Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (Ac-Wc)", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2025 Crossref	19 words — < 1%
78	digilib.uns.ac.id Internet	19 words — < 1%

79	journal.unwira.ac.id Internet	19 words — < 1%
80	jurnal.ensiklopediaku.org Internet	19 words — < 1%
81	repositori.unud.ac.id Internet	19 words — < 1%
82	text-id.123dok.com Internet	19 words — < 1%
83	Ari Wibowo, Michella Beatrix. "EVALUASI QUANTITY TAKE OFF MENGGUNAKAN AUTODESK REVIT PADA PEKERJAAN STRUKTUR BAJA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG KANTOR PT. TRI KANIGARA GROUP", Racic : Rab Construction Research, 2024 Crossref	17 words — < 1%
84	idr.uin-antasari.ac.id Internet	17 words — < 1%
85	repositori.usu.ac.id Internet	17 words — < 1%
86	repository.usu.ac.id Internet	17 words — < 1%
87	sipil.polimdo.ac.id Internet	17 words — < 1%
88	kmisfip2.menlhk.go.id Internet	16 words — < 1%
89	Susilo Abadi Al-hasan, Sugeng Dwi Hartantyo. "PENGARUH LIMBAH PABRIK GULA MOLASE SEBAGAI BAHAN TAMBAH (ADMIXTURE) KUAT TEKAN BETON K-175 DENGAN MENGGUNAKAN PASIR LOKAL PASIR JOMBANG", UKaRsT, 2020	15 words — < 1%

90	edoc.pub Internet	15 words — < 1%
91	ft-sipil.unila.ac.id Internet	15 words — < 1%
92	lib.unnes.ac.id Internet	15 words — < 1%
93	repository.teknokrat.ac.id Internet	15 words — < 1%
94	repository.uin-suska.ac.id Internet	15 words — < 1%
95	Rahmat Rahmat, Irna Hendriyani, Ryandi Dito Pratama. "Kajian Kuat Lentur Beton pada Perkerasan Kaku Jalan Tol Balikpapan-Samarinda", Media Ilmiah Teknik Sipil, 2017 Crossref	14 words — < 1%
96	Juliet G Metekohy, Christy. Gery. Buyang, Levina Tumalang. "PENGARUH PENGGUNAAN ABU TULANG IKAN CAKALANG PADA PERKERASAN LENTUR", JURNAL SIMETRIK, 2025 Crossref	13 words — < 1%
97	doaj.org Internet	13 words — < 1%
98	idoc.pub Internet	13 words — < 1%
99	ojs.uho.ac.id Internet	13 words — < 1%
100	pdfslide.tips Internet	13 words — < 1%

101	repository.unibos.ac.id Internet	13 words — < 1%
102	Musrifah Tohir. "Pengaruh Terendahnya Aspal Akibat Banjir Pada Rancangan Campuran Asphalt Concrete (AC) Dengan Methode Marshall Test", Kurva S : Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Sipil, 2021 Crossref	12 words — < 1%
103	ejournal.itn.ac.id Internet	12 words — < 1%
104	journals.itb.ac.id Internet	12 words — < 1%
105	repository.unmuha.ac.id:8080 Internet	12 words — < 1%
106	sepriyantismyname.blogspot.com Internet	12 words — < 1%
107	binamarga.pu.go.id Internet	11 words — < 1%
108	dspace.umkt.ac.id Internet	11 words — < 1%
109	eprints.iain-surakarta.ac.id Internet	11 words — < 1%
110	journal.ubb.ac.id Internet	11 words — < 1%
111	qdoc.tips Internet	11 words — < 1%
112	repository.unfari.ac.id Internet	11 words — < 1%

113	repository.unmuha.ac.id Internet	11 words — < 1%
114	repository.utu.ac.id Internet	11 words — < 1%
115	digilib.uinsa.ac.id Internet	10 words — < 1%
116	e-journal.unper.ac.id Internet	10 words — < 1%
117	jurnal.poliupg.ac.id Internet	10 words — < 1%
118	lib.ui.ac.id Internet	10 words — < 1%
119	publication.petra.ac.id Internet	10 words — < 1%
120	repository.bakrie.ac.id Internet	10 words — < 1%
121	repository.ubb.ac.id Internet	10 words — < 1%
122	repository.unja.ac.id Internet	10 words — < 1%
123	sip.upgris.ac.id Internet	10 words — < 1%
124	www.repository.uigm.ac.id Internet	10 words — < 1%
125	www.skanaa.com Internet	10 words — < 1%

126	zombiedoc.com Internet	10 words — < 1%
127	Okma Yendri, Wahyu Septiandi. "KAJIAN KEMAMPUAN CAMPURAN ASPAL-BETON (AC-BC) DENGAN ASBUTON CAIR YANG DIISI DENGAN SERPIHAN HDPE (HIGH DENSITY POLYETHYLENE)", Jurnal Teknik Gradien, 2023 Crossref	9 words — < 1%
128	dewey.petra.ac.id Internet	9 words — < 1%
129	digilib.uinsby.ac.id Internet	9 words — < 1%
130	ejurnal.poliban.ac.id Internet	9 words — < 1%
131	id.123dok.com Internet	9 words — < 1%
132	jpti.journals.id Internet	9 words — < 1%
133	jurnal.itg.ac.id Internet	9 words — < 1%
134	jurnal.umpar.ac.id Internet	9 words — < 1%
135	jurnal.untad.ac.id Internet	9 words — < 1%
136	jurnalmahasiswa.unesa.ac.id Internet	9 words — < 1%
137	library.universitaspertamina.ac.id Internet	9 words — < 1%

138	lpse.lomboktengahkab.go.id Internet	9 words — < 1%
139	matriks.sipil.ft.uns.ac.id Internet	9 words — < 1%
140	muthistory.blogspot.com Internet	9 words — < 1%
141	ojs.fstpt.info Internet	9 words — < 1%
142	riset.unisma.ac.id Internet	9 words — < 1%
143	spektrum.unram.ac.id Internet	9 words — < 1%
144	warungbangunan.blogspot.com Internet	9 words — < 1%
145	Abroor Kissraya Fatardhoo, Andri Dwi Cahyono, Evita Fitriani Hidiyati, Ahmad Lufi Zakaria et al. "Hubungan Antara Rasio Agregat dan Volumetrik dalam Menentukan Kualitas Perkerasan Jalan", Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil, 2024 Crossref	8 words — < 1%
146	Eka Purnamasari, Robiatul Adawiyah, Tezar Aulia Rachman, Fathurrahman Fathurrahman, Febby Eleanor, Tedy Riansyah. "PENGARUH FLY ASH DAN AIR GAMBUT TERHADAP POROSITAS DAN KUAT TEKAN BETON POROUS DI KALIMANTAN SELATAN", Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil, 2023 Crossref	8 words — < 1%
147	Ilham Maulana Syafi, Nurani Hartatik, Aditya Rizkiardi. "Karakteristik Penggunaan Limbah Serbuk Kaca pada Campuran Aspal Laston (AC-BC) Terhadap	8 words — < 1%

148 Isna Zahrotul Nihaya, Sinta Mutmainatun Nurjanah, Juny Andry Sulistyio. "Pengaruh Penggunaan Glass Powder dan Crab Shell Waste pada Campuran Aspal Wearing Course (AC-WC) untuk Perkerasan Jalan", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2026

Crossref

149 Julyus Canser, Tri Serfus, Elly Tri Pujiastuti. "Pengaruh Kinerja Campuran Aspal AC-BC Dengan Penggantian Filler Batu Kapur", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2026

Crossref

150 Siswanto, Markhaban. "Potensi dan Sebaran Sedimen di Kolam Retensi Dari Pelimpah Samping (Studi Kasus Rolak 70)", Universitas Islam Sultan Agung (Indonesia), 2024

ProQuest

151 apjatel.or.id

Internet

152 bahanbangunanlaut.wordpress.com

Internet

153 binus.ac.id

Internet

154 celebrexonline.us.com

Internet

155 e-jurnal.pnl.ac.id

Internet

156 eprints.umm.ac.id

Internet

8 words — < 1%

157 eprints.uns.ac.id

Internet

8 words — < 1%

158 journal.uwks.ac.id

Internet

8 words — < 1%

159 jurnal.abulyatama.ac.id

Internet

8 words — < 1%

160 jurnal.pnl.ac.id

Internet

8 words — < 1%

161 jurnal.umuslim.ac.id

Internet

8 words — < 1%

162 jurnal.univrab.ac.id

Internet

8 words — < 1%

163 jurnal.unsil.ac.id

Internet

8 words — < 1%

164 ojs.unik-kediri.ac.id

Internet

8 words — < 1%

165 pt.scribd.com

Internet

8 words — < 1%

166 repository.um-palembang.ac.id

Internet

8 words — < 1%

167 simk.bpjt.pu.go.id

Internet

8 words — < 1%

168 travel.detik.com

Internet

8 words — < 1%

www.beritadaerah.co.id

169	Internet	8 words — < 1%
170	www.cnbcindonesia.com Internet	8 words — < 1%
171	www.neliti.com Internet	8 words — < 1%
172	fundusze-luksemburg.pl Internet	7 words — < 1%
173	Britney P Siahaya, Vita N Lawalata, Gilian Tetelepta. "Kajian Lama Penyimpanan Terhadap Karakteristik Fisikokimia Frozen Food Sukun (<i>Artocarpus altilis</i>)", Jurnal Agrosilvopasture-Tech, 2023 Crossref	6 words — < 1%
174	Nurokhman Nurokhman, Suryanto Suryanto, Akhmad Rizki Tsany. "STUDI KADAR ASPAL, KEPADATAN DAN TEBAL LAPISAN LASTON AC-BC HASIL COREDRILL PADA RUAS JALAN KSPN BOROBUDUR", CivETech, 2022 Crossref	6 words — < 1%
175	Raymond Ch. Suciawan, Steve Ch. N. Palenewen, Lucia G. J. Lalamentik. "Studi Kinerja Campuran AC-BC Menggunakan LGA Asbuton Dimodifikasi Dengan Aspal Keras", TEKNO, 2024 Crossref	6 words — < 1%
176	Yumin Masri, Vera Th. C. Siahaya, Penina Istia. "PENGARUH PENAMBAHAN ASPAL TERHADAP STABILITAS MARSHALL PADA MATERIAL RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) DI RUAS JALAN JENDERAL SUDIRMAL – RIJALI KOTA AMBON", JURNAL SIMETRIK, 2023 Crossref	6 words — < 1%
177	iptek.its.ac.id Internet	6 words — < 1%

178

Yumin Masri, Vera Th. C. Siahaya, Penina Istia.
"PENGARUH PENAMBAHAN ASPAL TERHADAP
STABILITAS MARSHALL PADA MATERIAL RECLAIMED ASPHALT
PAVEMENT (RAP) DI RUAS JALAN JENDERAL SUDIRMAL –
RIJALI KOTA AMBON", JURNAL SIMETRIK, 2023

Crossref

6 words — < 1%

179

iptek.its.ac.id
Internet

6 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES OFF

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES OFF

EXCLUDE MATCHES OFF