



Pengaruh Penggunaan Zeolit Sebagai Filler Pada Campuran
Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) Terhadap Karakteristik Marshall
Menggunakan Material Tenga, Minahasa Selatan

Monica P. V. Sengkey^{#a}, Lucia G. J. Lalamentik^{#b}, Mecky R. E. Manoppo^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^amonicavpsengkey@gmail.com, ^blucia.lalamentik@unsrat.ac.id, ^cmeckymanoppo@yahoo.com

Abstrak

Penggunaan filler dalam campuran *Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC)* berperan penting untuk meningkatkan stabilitas dan kekuatan struktural lapisan perkerasan. Selama ini, material seperti semen dan abu batu banyak digunakan sebagai filler konvensional. Namun, keterbatasan ketersediaan dan harga yang semakin tinggi mendorong perlunya inovasi pemanfaatan material alternatif yang lebih ekonomis dan melimpah, seperti zeolit alam. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh zeolit sebagai filler terhadap karakteristik Marshall campuran AC-BC menggunakan agregat batu sungai dari Tenga, Minahasa Selatan. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian Marshall terhadap campuran AC-BC dengan kadar zeolit sebagai filler sebesar 1%, 2%, dan 3% terhadap agregat halus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan zeolit meningkatkan nilai stabilitas campuran. Nilai stabilitas tertinggi tercapai pada kadar zeolit 2% sebesar 1601,18 kg. Pada kadar tersebut, semua parameter karakteristik *Marshall* seperti *flow*, *VIM*, *VMA*, *VFB*, dan kepadatan berada dalam batas yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Sementara pada kadar 3%, terjadi penurunan stabilitas dan *flow* melebihi batas spesifikasi, yang mengindikasikan penggunaan zeolit berlebih dapat menurunkan performa campuran. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa zeolit alam dapat digunakan sebagai filler alternatif dalam campuran AC-BC, dengan kadar optimal sebesar 2%. Penggunaan zeolit terbukti meningkatkan kinerja campuran aspal dari segi stabilitas dan efisiensi struktur. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan uji ketahanan jangka panjang (durabilitas) serta kajian ekonomi terhadap pemanfaatan zeolit lokal sebagai material perkerasan jalan berkelanjutan.

Kata kunci: zeolit, filler, AC-BC, Marshall, perkerasan jalan

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Dalam campuran AC-BC, filler berperan untuk mengisi ruang kosong dalam campuran dan meningkatkan kekuatan serta stabilitas campuran. Material yang sering digunakan sebagai filler pada campuran lapis aspal beton adalah semen, kapur dan abu batu. Dikarenakan sudah banyak digunakan, maka persediaannya semakin mahal. Untuk itu, diperlukan inovasi baru menggunakan bahan alternatif lainnya sebagai filler. Salah satu bahan alternatif yang digunakan sebagai filler adalah zeolit.

Zeolit merupakan suatu kelompok mineral yang terbentuk dari abu vulkanik yang telah mengendap jutaan tahun silam. Zeolit mempunyai struktur berongga biasanya diisi oleh air serta kation yang dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan dengan cadangan zeolit alam terbesar di dunia dan tersebar hampir di setiap daerah (Distamben Jabar, 2002 dan Sugih, 2008) dengan jumlah deposit alam sekitar 400 juta ton (Saleh, 2018).

Pada penelitian ini, agregat kasar dan agregat halus yang digunakan berasal dari Tenga,

Minahasa Selatan, yaitu Batu Sungai. Sungai di daerah tersebut memiliki deposit agregat alam dan batu sungai yang terbentuk secara alami, dan deposit ini tersebar sepanjang aliran sungai dan telah dimanfaatkan secara lokal untuk konstruksi perkerasan jalan yaitu untuk pembuatan “Jalan Sentra Produksi Desa-desa pada Program Pengembangan Kecamatan (PPK) tahun 1998 – 2007 dan Program Nasional Pemberdayaan Masyarakat Mandiri Perdesaan (PNPM) tahun 2007 – 2014 dengan Konstruksi Telford & Perkerasan Sirtu”. Secara geografis dan teknis, sungai tersebut memiliki panjang sekitar 4 km, dengan lebar bervariasi antara 10 – 12 meter, juga kedalaman material permukaan pada bagian dasar sungai yang berkisar antara 0 - 50 cm. Data tersebut dilakukan dengan pengukuran langsung di lapangan. Berdasarkan data lapangan dan catatan historis dari pihak pengelola atau pelaksana sebelumnya, telah dilakukan penggalian dengan menggunakan alat berat berupa ekskavator dan diperoleh informasi bahwa material batu masih terus ditemukan hingga kedalaman 10 meter dari permukaan dasar sungai. Dengan dimensi tersebut, estimasi volume agregat yang tersedia mencapai 440.000 m³. Untuk zeolit yang digunakan, diperoleh dari salah satu toko perlengkapan akuarium di Manado, dalam bentuk batuan alami. Dimana zeolit tersebut berasal dari Bandung, Jawa Barat. Untuk deposit zeolit di Indonesia, tercatat endapan zeolit di 20 lokasi dengan jumlah sumberdaya 447.490.160 ton, seperti di Provinsi Jawa Barat mempunyai sumberdaya 185.595.160 ton, Provinsi Lampung sumberdayanya 43.800.000 ton, Provinsi Nusa Tenggara Timur sumber dayanya 6.115.000 ton, Provinsi Sulawesi Barat sumberdayanya 26.400.000 ton, Provinsi Sulawesi Selatan sumber dayanya 169.880.000 ton dan Provinsi Sumatera Utara sumberdayanya 16.200.000 ton. (Kusdarto, 2008) Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian, laboratorium dan penilaian kesesuaian terhadap standar yang berlaku, untuk memastikan bahwa material yang akan digunakan dapat memberikan kinerja yang optimal dalam perkerasan jalan. Penelitian ini diharapkan mampu membuktikan bahwa penggunaan zeolit sebagai filler dalam campuran AC-BC menggunakan batu sungai dapat meningkatkan kekuatan dan stabilitas suatu campuran aspal.

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana pengaruh penggunaan zeolit sebagai filler pada campuran *Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)* terhadap karakteristik marshall menggunakan material Tenga, Minahasa Selatan?

1.3. Tujuan Penelitian

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh penggunaan zeolit sebagai bahan tambah pada campuran *Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)* terhadap karakteristik marshall menggunakan material Tenga, Minahasa Selatan.

1.4. Manfaat Penelitian

1. Dapat memberikan informasi mengenai penggunaan filler zeolit pada campuran AC-BC.
2. Dapat membuka peluang untuk memanfaatkan material lokal seperti zeolit, yang dapat mengurangi ketergantungan pada material impor.

1.5. Batasan Masalah

1. Standar Spesifikasi campuran *Asphalt Concrete-Binder Course (AC- BC)* dan persyaratan agregat mengacu pada Bina Marga 2018 Revisi 2.
2. Penelitian dilakukan di Laboratorium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.
3. Metode yang digunakan adalah studi penelitian penambahan zeolit terhadap karakteristik marshall pada campuran aspal.
4. Tempat pengambilan agregat terletak di Tenga, Kec. Tenga, Kab. Minahasa Selatan, Sulawesi Utara.
5. Agregat yang digunakan yaitu: Agregat kasar, Agregat medium, dan Agregat halus.
6. Filler yang digunakan dalam penelitian ini merupakan zeolit alam lolos saringan #200 (SNI ASTM C136: 2012).
7. Kadar Zeolit yang digunakan 1%, 2%, dan 3% dari berat total agregat halus.

8. Aspal yang digunakan yaitu, aspal pertamina Pen 60/70.

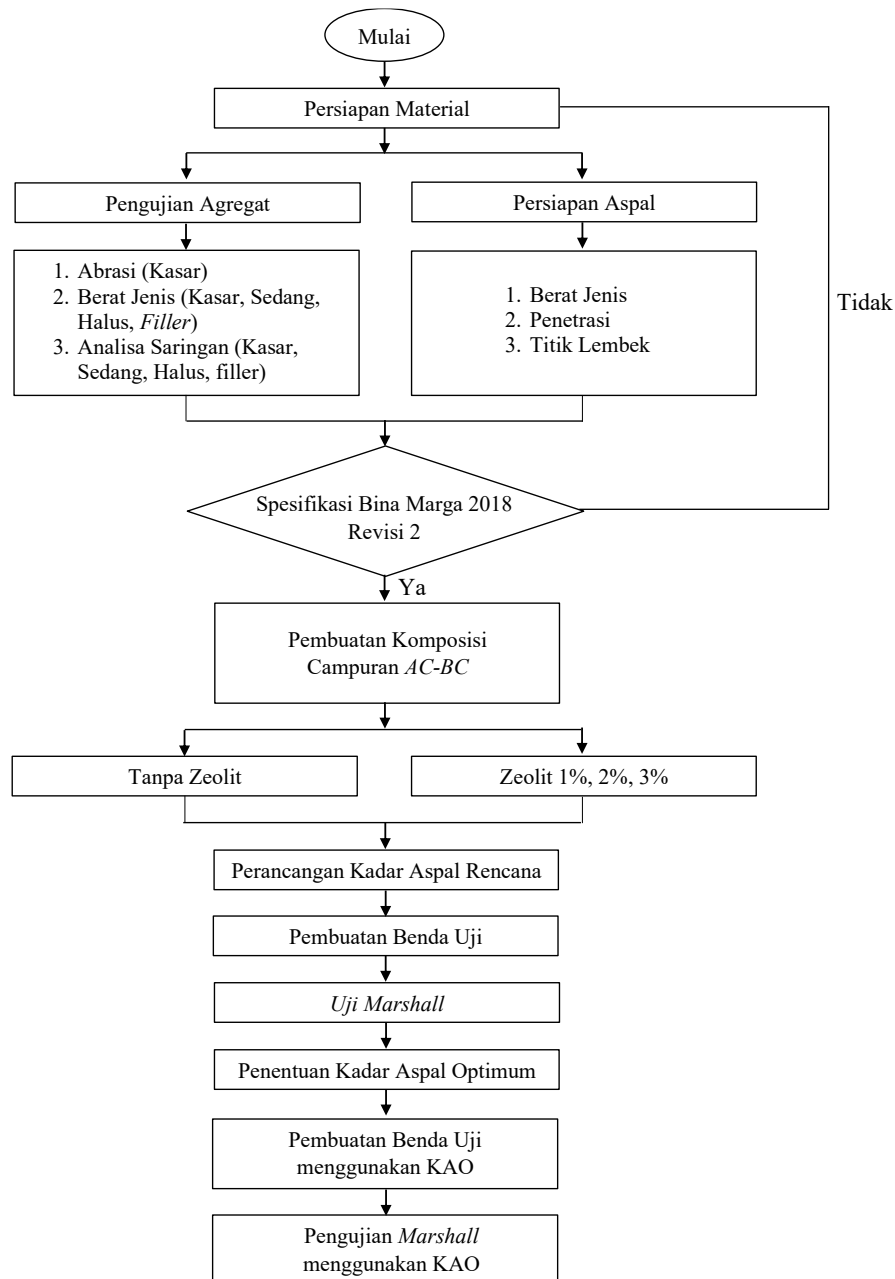
2. Metode Penelitian

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboraturium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi dan tempat pengambilan material di Tenga, Minahasa Selatan, Sulawesi Utara. Waktu pelaksanaan penelitian yang direncanakan, berjalan kurang lebih tiga bulan terhitung sejak bulan Maret 2025 sampai dengan bulan Mei 2025.

2.2 Alur Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan menurut alur yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemeriksaan Material

Pemeriksaan hasil dari Analisa seluruh agregat yakni agregat kasar, agregat sedang dan halus agar dapat digunakan dalam pembuatan benda uji. Agregat yang dipakai berasal dari Batu Kali Tenga, Minahasa Selatan dan dilakukan pengujian berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2) dan Standar Nasional Indonesia (SNI).

3.2. Pemeriksaan Aspal

Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal Pertamina penetrasi 60/70 yang tersedia di Laboratorium Perkerasan Jalan Universitas Sam Ratulangi. Untuk hasil pemeriksaan karakteristik aspal dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Aspal Pen 60/70

Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Persyaratan
Penetrasi (mm)	67,28	60-70
Titik Lembek (°C)	48,5	≥ 48
Berat Jenis (gr/cc)	1,0325	≥ 1,0

3.3. Hasil Pengujian Marshall

a. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal tanpa Filler Zeolit (Variasi 1)

Tabel 2. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal tanpa Filler Zeolit

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	FF / Kadar Aspal Efektif	Kepadatan (gr/cc)
3,8	815,42	3,68	27,259	24,067	11,962	4,537	2,173
4,8	831,39	3,73	26,135	20,650	22,062	2,681	2,230
5,8	1241,35	3,59	20,985	12,664	39,662	1,891	2,410
6,8	1448,83	3,57	18,786	7,660	59,347	1,453	2,504
7,8	1440,48	3,72	17,011	2,953	82,640	1,175	2,586

Berdasarkan tabel di atas, Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas menunjukkan nilai stabilitas terendah yaitu pada 815,42 kg dengan kadar aspal 3,8% sedangkan, nilai stabilitas tertinggi yaitu pada 1448,83 kg dengan kadar aspal 6,8%. Hal ini menunjukkan bahwa kadar aspal yang terlalu tinggi tidak selalu menghasilkan peningkatan performa.

Nilai *Flow* (Nilai Kelelehan) campuran aspal tidak stabil, Untuk nilai kelelehan terendah pada 3,57 mm kadar aspal 5,8%. Sedangkan untuk nilai kelelehan tertinggi berada pada 3,72mm kadar aspal 7,8%. Dapat dilihat bahwa nilai kelelehan ini dipengaruhi oleh komposisi campuran sehingga mendapatkan hasil yang tidak stabil.stabil.

Pengaruh nilai nilai VMA menunjukkan tren menurun seiring bertambahnya kadar aspal, yang berarti volume rongga antar agregat semakin kecil karena lebih banyak terisi aspal. Nilai VMA tertinggi terjadi pada kadar aspal 3,8% yaitu 27,259%, dan terus menurun hingga nilai terendah pada kadar aspal 7,8% sebesar 17,011%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pada kadar aspal tinggi, campuran menjadi lebih padat karena rongga antar agregat semakin sedikit yang belum terisi aspal.

Nilai VIM menurun seiring peningkatan kadar aspal, hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak aspal yang digunakan, semakin sedikit rongga udara yang tersisa dalam campuran. Nilai VIM tertinggi tercatat pada kadar aspal 3,8% sebesar 6,249%, sedangkan nilai terendah pada kadar aspal 7,8% sebesar 2,671%. Dari seluruh kadar yang diuji, hanya kadar aspal 7,8% yang hampir berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga (3–5%), sementara kadar lainnya menunjukkan nilai VIM terlalu tinggi dan berisiko terhadap masuknya air atau oksidasi.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga, Nilai VFB memiliki batas minimum 65% dan kadar aspal yang memenuhi spesifikasi tersebut berada pada kadar aspal 7,8% dengan nilai yang dimiliki 82,640%. Selain dari kadar aspal 7,8%, campuran kadar aspal lainnya tidak memenuhi Spesifikasi Bina Marga.

Hubungan antara kadar aspal dan FF (kadar aspal efektif) menunjukkan tren menurun: semakin tinggi kadar aspal, semakin kecil nilai FF. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kadar aspal 3,8%, nilai FF adalah 4,537; 4,8% sebesar 3,198; 5,8% sebesar 2,071; 6,8% sebesar 1,497; dan 7,8% turun menjadi 1,175. Artinya, hanya pada kadar aspal 7,8% nilai FF mendekati batas spesifikasi Bina Marga (0,6–1,2), sedangkan pada kadar lebih rendah, aspal belum bekerja secara efisien dalam mengisi rongga agregat.

Berdasarkan Tabel, Kadar Aspal dengan Kepadatan menunjukkan nilai kepadatan terendah berada pada kadar aspal 3,8% dengan nilai kepadatan 2,173gr/cc dan nilai tertinggi berada pada kadar aspal 7,8% dengan nilai kepadatan 2,586gr/cc.

b. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 1% (Variasi 2)

Tabel 3. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 1%

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	FF / Kadar Aspal Efektif	Kepadatan (gr/cc)
3,85	676,82	3,24	15,443	11,575	25,211	4,794	2,531
4,85	887,27	3,34	15,614	9,182	41,251	2,878	2,553
5,85	978,88	3,65	17,119	8,223	51,969	2,043	2,534
6,85	1296,61	3,81	16,463	4,841	70,664	1,577	2,581
7,85	1302,26	3,65	17,754	3,641	79,513	1,278	2,569

Berdasarkan tabel di atas, nilai stabilitas mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan variasi tanpa filler zeolit. Stabilitas terendah tercatat sebesar 676,82 kg pada kadar aspal 3,85%, dan meningkat secara konsisten hingga mencapai 1774,15 kg pada kadar aspal 7,85%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit mampu memperbaiki kekuatan struktur campuran dalam menahan beban.

Berdasarkan tabel di atas, nilai *flow* menunjukkan bahwa campuran memiliki keseimbangan antara kekakuan dan kelenturan. Nilai *flow* terendah tercatat sebesar 2,57 mm pada kadar aspal 3,85%, dan meningkat secara bertahap hingga 3,83 mm pada kadar 7,85%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal meningkatkan kelenturan campuran, namun tidak melebihi batas yang ditetapkan.

Nilai VMA menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya kadar aspal. VMA tertinggi tercatat sebesar 18,793% pada kadar aspal 3,85%, dan menurun menjadi 15,443% pada kadar 7,85%. Penurunan ini menunjukkan bahwa volume rongga antar butiran agregat yang tersedia untuk diisi oleh aspal semakin sedikit, karena bertambahnya kadar aspal telah mengisi sebagian besar ruang tersebut. Meskipun terjadi penurunan, seluruh nilai VMA masih berada dalam batas wajar untuk campuran AC-BC, yang menandakan bahwa struktur campuran tetap memiliki keseimbangan antara kepadatan agregat dan ruang kosong yang diperlukan untuk menampung aspal agar campuran tetap stabil dan fleksibel.

Nilai VIM menunjukkan tren penurunan seiring bertambahnya kadar aspal, yang merupakan indikasi bahwa rongga udara dalam campuran semakin berkurang karena terisi oleh aspal. Nilai tertinggi sebesar 4,968% terjadi pada kadar aspal 3,85%, dan menurun menjadi 2,968% pada kadar aspal 7,85%. Berdasarkan spesifikasi Bina Marga, nilai VIM yang disarankan adalah antara 3% hingga 5%, dan dari hasil tersebut, hanya kadar aspal 6,85% dan 7,85% yang memenuhi kriteria.

Nilai VFB menunjukkan peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya kadar aspal, yang mencerminkan semakin banyaknya rongga antar agregat (VMA) yang berhasil diisi oleh aspal. VFB terendah tercatat sebesar 67,33% pada kadar aspal 3,85%, dan meningkat hingga 83,51% pada kadar 7,85%. Peningkatan ini menandakan bahwa campuran menjadi semakin padat dan terikat kuat antar partikel agregat.

Hubungan antara kadar aspal dan nilai FF menunjukkan tren penurunan yang jelas. Nilai FF tertinggi adalah 4,794 pada kadar aspal 3,85% dan terus menurun hingga 1,278 pada kadar aspal 7,85%. Penurunan ini menunjukkan bahwa semakin banyak kadar aspal yang digunakan, semakin sedikit kebutuhan aspal efektif karena sebagian besar rongga telah terisi sempurna oleh aspal. Namun demikian, meskipun terjadi penurunan yang positif, nilai FF masih belum sepenuhnya memenuhi standar spesifikasi Bina Marga, karena hanya kadar aspal tertinggi (7,85%) yang mendekati batas atas yang diperbolehkan.

Nilai kepadatan campuran meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal, menunjukkan bahwa aspal berhasil mengisi rongga-rongga antar agregat dengan lebih efektif. Kepadatan terendah tercatat sebesar 2,531 gr/cc pada kadar aspal 3,85% dan terus meningkat hingga mencapai 2,569 gr/cc pada kadar aspal 7,85%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar aspal, semakin padat campuran yang terbentuk, karena rongga udara semakin sedikit dan struktur agregat semakin kompak.

c. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 2% (Variasi 3)

Tabel 4. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 2%

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	FF / Kadar Aspal Efektif	Kepadatan (gr/cc)
3,9	907,20	3,99	16,997	13,044	23,391	4,613	2,490
4,9	1208,71	3,79	16,910	10,414	38,460	2,810	2,519
5,9	1170,25	3,45	18,441	9,519	48,382	2,009	2,499
6,9	1502,25	3,66	17,704	6,079	65,770	1,555	2,548
7,9	1450,73	3,65	18,150	3,923	78,461	1,264	2,562

Nilai stabilitas terendah sebesar 1130,29 kg terjadi pada kadar aspal 3,9%, dan terus meningkat hingga mencapai 1852,63 kg pada kadar aspal 7,9%. Peningkatan ini mencerminkan bahwa kadar zeolit 2% memberikan pengaruh yang sangat baik terhadap kemampuan campuran dalam menahan beban. Seluruh nilai stabilitas pada variasi ini tidak hanya memenuhi, tetapi juga jauh melampaui batas minimum spesifikasi.

Nilai *flow* terendah adalah 3,14 mm pada kadar aspal 3,9%, dan tertinggi sebesar 4,04 mm pada kadar 7,9%. Meskipun nilai tertinggi sedikit melebihi batas atas spesifikasi (4 mm), namun secara umum campuran masih memiliki fleksibilitas yang cukup baik. Hal ini mengindikasikan bahwa zeolit 2% membantu menghasilkan campuran yang tidak hanya kuat, tetapi juga cukup lentur untuk mengakomodasi beban lalu lintas tanpa mudah retak atau pecah.

Pada variasi 3, tren nilai VMA relatif stabil meskipun kadar aspal meningkat. VMA tertinggi sebesar 18,962% terjadi pada kadar aspal 3,9%, dan menurun sedikit menjadi 16,442% pada kadar 7,9%. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit 2% tidak menyebabkan penyusutan rongga antar agregat secara berlebihan, dan justru membantu mempertahankan struktur internal campuran yang baik.

Penambahan zeolit 2% juga menunjukkan pola penurunan nilai VIM yang serupa dengan variasi sebelumnya. VIM tertinggi sebesar 5,147% diperoleh pada kadar aspal 3,9%, dan terendah sebesar 3,147% pada kadar aspal 7,9%. Nilai ini menandakan bahwa hampir seluruh kadar aspal yang diuji berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga, dengan performa terbaik berada di kisaran kadar 6,9% hingga 7,9%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit 2% membantu menciptakan campuran yang lebih rapat namun tetap memiliki rongga udara yang sesuai untuk menjaga fleksibilitas dan ketahanan terhadap keretakan akibat perubahan suhu dan beban lalu lintas.

Pada tabel di atas, tren VFB juga mengalami kenaikan signifikan, menunjukkan bahwa kombinasi kadar aspal dan zeolit 2% sangat efektif dalam mengisi rongga antar agregat. Nilai terendah berada pada 65,06% pada kadar aspal 3,9%, dan meningkat hingga 83,40% pada kadar 7,9%. Seluruh rentang nilai tersebut berada dalam batas ideal spesifikasi.

Nilai kepadatan juga mengalami peningkatan secara bertahap dari 2,490 gr/cc pada kadar aspal 3,9% menjadi 2,562 gr/cc pada kadar 7,9%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit sebesar 2% tidak menghambat pemadatan, bahkan membantu menciptakan campuran yang lebih

stabil dan padat. Nilai kepadatan yang meningkat konsisten ini menjadi indikator bahwa zeolit 2% mampu mendukung proses pengisian rongga secara optimal oleh aspal tanpa mengganggu keseimbangan struktur campuran.

d. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 3% (Variasi 4)

Tabel 5. Hasil Pengujian Marshall Campuran Aspal Filler Zeolit 3%

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	FF / Kadar Aspal Efektif	Kepadatan (gr/cc)
3,9	907,20	3,99	16,997	13,044	23,391	4,613	2,490
4,9	1208,71	3,79	16,910	10,414	38,460	2,810	2,519
5,9	1170,25	3,45	18,441	9,519	48,382	2,009	2,499
6,9	1502,25	3,66	17,704	6,079	65,770	1,555	2,548
7,9	1450,73	3,65	18,150	3,923	78,461	1,264	2,562

Stabilitas terendah tercatat sebesar 1182,47 kg pada kadar aspal 3,91%, dan tertinggi mencapai 1854,59 kg pada kadar 7,91%. Meskipun nilainya sedikit lebih tinggi dari variasi 3 pada titik maksimum, namun perbedaan tersebut tidak signifikan. Penambahan zeolit 3% tetap memberikan penguatan terhadap stabilitas campuran, namun mulai menunjukkan tanda-tanda kelebihan filler yang dapat berdampak pada fleksibilitas dan risiko deformasi.

Penambahan zeolit sebesar 3% menghasilkan nilai *flow* tertinggi dibandingkan variasi lainnya. *Flow* terendah tercatat sebesar 2,73 mm pada kadar aspal 3,91%, dan meningkat hingga 4,50 mm pada kadar 7,91%, yang melebihi batas maksimum spesifikasi Bina Marga. Meskipun peningkatan *flow* mencerminkan kelenturan campuran, nilai yang terlalu tinggi dapat menandakan potensi deformasi plastis yang berlebihan, terutama di bawah beban lalu lintas berat.

Nilai VMA cenderung lebih tinggi dibanding variasi lainnya pada kadar aspal rendah, namun mengalami penurunan signifikan pada kadar tinggi. VMA awal tercatat sebesar 20,021% pada kadar aspal 3,91%, dan menurun menjadi 17,118% pada kadar 7,91%. Nilai VMA yang tinggi pada kadar rendah menunjukkan bahwa struktur agregat masih memiliki banyak rongga yang belum terisi, namun dengan bertambahnya kadar aspal, rongga tersebut tertutup secara efektif.

Nilai VIM juga menurun seiring meningkatnya kadar aspal, namun cenderung lebih rendah dibanding variasi lainnya. Nilai tertinggi tercatat sebesar 5,781% pada kadar aspal 3,91%, dan nilai terendah sebesar 2,953% pada kadar 7,91%. Hanya kadar aspal 6,91% dan 7,91% yang mendekati atau berada dalam kisaran ideal spesifikasi. Nilai VIM yang terlalu rendah menunjukkan bahwa campuran menjadi sangat padat dan hampir tidak memiliki rongga udara, yang dapat berdampak negatif karena mengurangi ruang ekspansi bagi aspal saat terjadi pemuaian.

Nilai VFB menunjukkan peningkatan dari 61,59% pada kadar aspal 3,91% menjadi 74,97% pada kadar 7,91%. Meskipun terdapat peningkatan yang cukup besar, nilai awal berada di bawah batas minimum spesifikasi Bina Marga (65%), yang mengindikasikan bahwa pada kadar aspal rendah, pengisian rongga oleh aspal belum maksimal. Namun, pada kadar aspal tinggi, nilai VFB sudah masuk dalam rentang standar.

Tabel di atas menunjukkan kecenderungan penurunan nilai FF dengan meningkatnya kadar aspal. FF tertinggi tercatat sebesar 4,552 pada kadar aspal 3,91% dan turun menjadi 1,259 pada kadar 7,91%. Penurunan ini menandakan bahwa zeolit 3% tetap mampu memperbaiki efisiensi distribusi aspal dalam campuran. Meski demikian, seperti pada variasi sebelumnya, hanya kadar aspal tertinggi yang mendekati atau memenuhi batas atas spesifikasi. Nilai FF yang tinggi pada kadar aspal rendah menunjukkan bahwa campuran masih terlalu porous dan belum efisien, sehingga memerlukan kadar aspal lebih tinggi untuk mendapatkan hasil yang memenuhi standar.

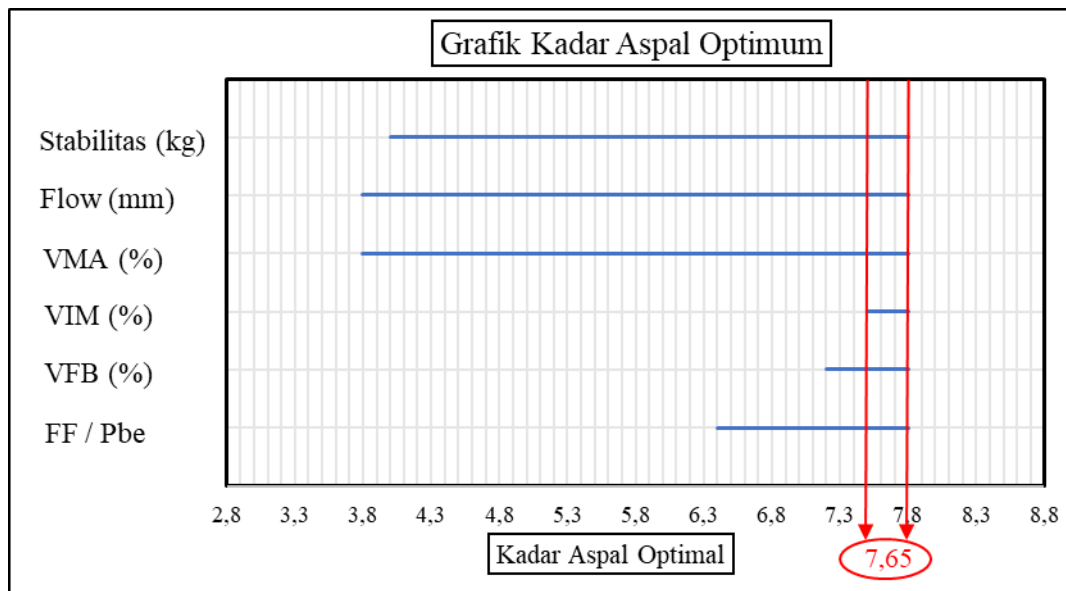
Nilai kepadatan juga menunjukkan tren peningkatan seiring naiknya kadar aspal. Nilai kepadatan terendah tercatat sebesar 2,462 gr/cc pada kadar aspal 4,91%, kemudian meningkat menjadi 2,555 gr/cc pada kadar aspal 7,91%. Meskipun peningkatannya tergolong stabil, nilai awal yang lebih rendah dibanding variasi sebelumnya menunjukkan bahwa pada kadar aspal rendah, zeolit 3% belum memberikan kontribusi optimal dalam proses pemadatan. Namun pada

kadar tinggi, efek zeolit mulai tampak dengan kepadatan yang memenuhi kriteria campuran padat dan stabil.

3.4 Hasil Kadar Aspal Optimum

a. Hasil Kadar Aspal Optimum tanpa Filler Zeolit (Variasi 1)

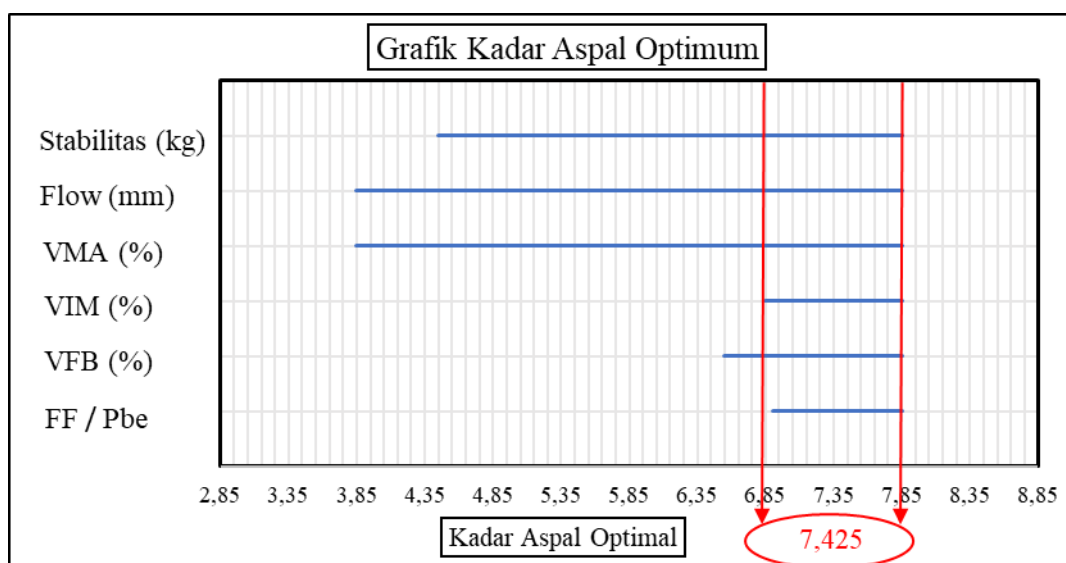
Melalui pengujian yang sudah dilakukan dan berdasarkan pada spesifikasi-spesifikasi yang ada maka didapatkan hasil dalam bentuk grafik dibawah ini. Pada grafik dapat dilihat bahwa variasi kadar aspal berada pada 7,65%.



Gambar 2. Grafik Kadar Aspal Optimum tanpa Filler Zeolit

b. Hasil Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 1% (Variasi 2)

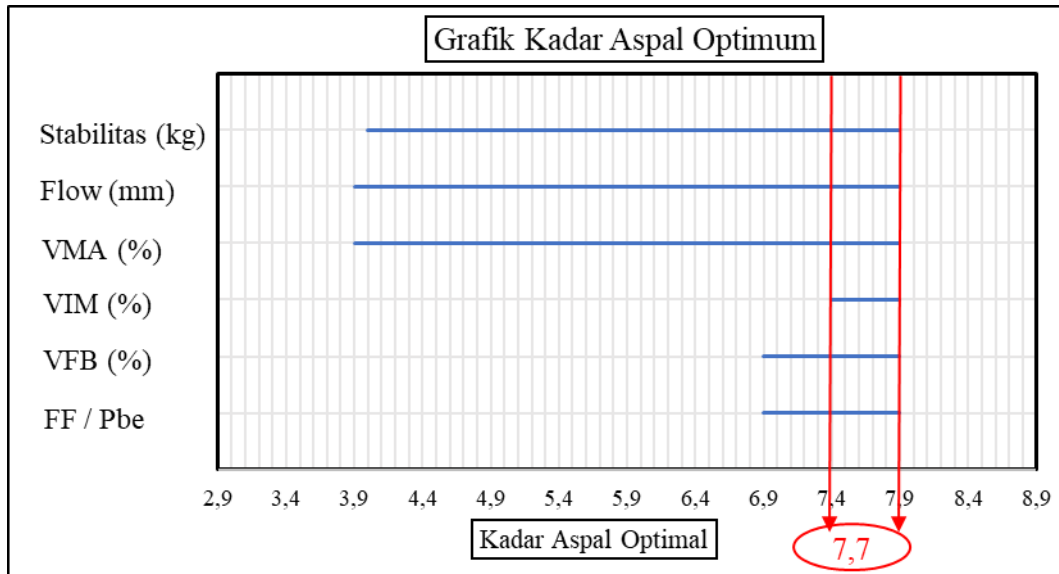
Pada grafik Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 1% dapat dilihat bahwa kadar aspal berada pada 7,425%.



Gambar 3. Grafik Kadar Aspal Optimum tanpa Filler Zeolit 1%

c. Hasil Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 2% (Variasi 3)

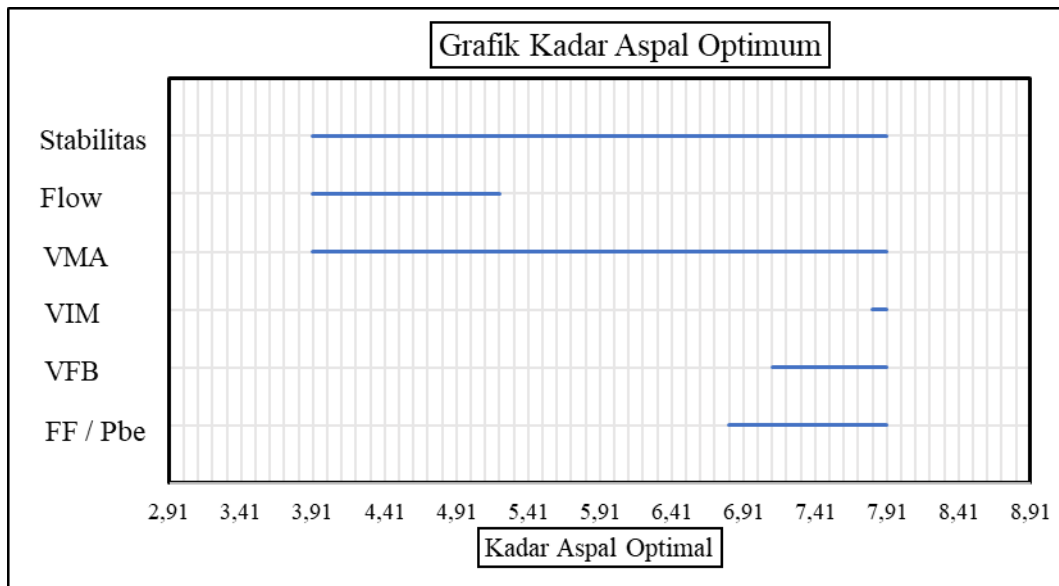
Pada grafik Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 2% dapat dilihat bahwa kadar aspal berada pada 7,7%.



Gambar 4. Grafik Kadar Aspal Optimum tanpa Filler Zeolit 2%

d. Hasil Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 3% (Variasi 4)

Pada grada grafik Kadar Aspal Optimum Filler Zeolit 3% dapat dilihat bahwa kadar aspal optimum tidak mendapatkan hasil dikarenakan *flow* tidak memenuhi spesifikasi.



Gambar 5. Grafik Kadar Aspal Optimum tanpa Filler Zeolit 3%

Dilakukan perhitungan interpolasi linier antara Kadar Zeolit 2% dan Kadar Zeolit 3% untuk menghitung batas maksimal kadar zeolit yang masih bisa digunakan.

Tabel 6. Tabel Perhitungan Interpolasi linier antara zeolit 2% dan 3%

Kadar Aspal	Stabilitas	Flow	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	FF / Kadar Aspal Efektif	Kepadatan (gr/cc)
	Hasil	Hasil	Hasil	Hasil	Hasil	Hasil	Hasil
2	1452,945	3,689	18,435	4,794	73,998	1,314	2,548
2,38	1601,182	3,996	18,653	4,833	74,110	1,298	2,554
3	1843,043	4,499	19,008	4,898	74,293	1,274	2,564

3.5 Hasil Uji Marshall dengan KAO

a. Hasil Uji Marshall dengan KAO tanpa Filler Zeolit (Variasi 1)

Dari hasil analisis karakteristik marshall pada variasi 1, didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 7,65% untuk hasil dari uji marshall menggunakan KAO dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 7. Hasil Uji Marshall dengan KAO Tanpa Filler Zeolit

No	Parameter Marshall	Spesifikasi		Hasil	Keterangan
		Batas Bawah	Batas Atas		
1.	Stabilitas, kg	800	-	1397,76	Memenuhi
2.	Flow, mm	2	4	3,804	Memenuhi
3.	Rongga dalam agregat (VMA), %	14	-	17,055	Memenuhi
4.	Rongga dalam campuran (VIM), %	3	5	3,411	Memenuhi
5.	Rongga yang terisi aspal (VFB), %	65	-	79,998	Memenuhi
6.	FF/ Kadar Aspal Efektif	0,6	1,2	1,210	Tidak Memenuhi
7.	Kepadatan gr/cc	-	-	2,581	Memenuhi

b. Hasil Uji Marshall dengan KAO Filler Zeolit 1% (Variasi 2)

Dari hasil analisis karakteristik marshall pada variasi 2, didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 7,425% untuk hasil dari uji marshall menggunakan KAO dapat dilihat pada tabel di bawah ini..

Tabel 8. Hasil Uji Marshall dengan KAO Filler Zeolit 1%

No	Parameter Marshall	Spesifikasi		Hasil	Keterangan
		Batas Bawah	Batas Atas		
1.	Stabilitas, kg	800	-	1312,74	Memenuhi
2.	Flow, mm	2	4	3,64	Memenuhi
3.	Rongga dalam agregat (VMA), %	14	-	17,58	Memenuhi
4.	Rongga dalam campuran (VIM), %	3	5	4,58	Memenuhi
5.	Rongga yang terisi aspal (VFB), %	65	-	73,95	Memenuhi
6.	FF/ Kadar Aspal Efektif	0,6	1,2	1,39	Tidak Memenuhi
7.	Kepadatan gr/cc	-	-	2,56	Memenuhi

c. Hasil Uji Marshall dengan KAO Filler Zeolit 2% (Variasi 3)

Dari hasil analisis karakteristik marshall pada variasi 3, didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 7,67% untuk hasil dari uji marshall menggunakan KAO dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 9. Hasil Uji Marshall dengan KAO Filler Zeolit 2%

No	Parameter Marshall	Spesifikasi		Hasil	Keterangan
		Batas Bawah	Batas Atas		
1.	Stabilitas, kg	800	-	1452,95	Memenuhi
2.	Flow, mm	2	4	3,69	Memenuhi
3.	Rongga dalam agregat (VMA), %	14	-	18,44	Memenuhi
4.	Rongga dalam campuran (VIM), %	3	5	4,79	Memenuhi
5.	Rongga yang terisi aspal (VFB), %	65	-	74,00	Memenuhi
6.	FF/ Kadar Aspal Efektif	0,6	1,2	1,31	Tidak Memenuhi
7.	Kepadatan gr/cc	-	-	2,55	Memenuhi

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian terhadap pengaruh penambahan zeolit sebagai filler dalam campuran aspal beton (AC-BC), dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan zeolit sebagai filler memberikan dampak positif terhadap stabilitas campuran, di mana terjadi peningkatan kemampuan campuran dalam menahan beban. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit dapat memperkuat struktur campuran aspal.
2. Jika dibandingkan antara campuran tanpa filler zeolit dan campuran yang menggunakan zeolit, terdapat peningkatan stabilitas yang cukup signifikan pada campuran yang ditambahkan filler zeolit, menunjukkan bahwa zeolit mampu meningkatkan daya dukung campuran terhadap beban lalu lintas. Nilai flow pada campuran juga mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar zeolit. Namun, pada campuran dengan filler zeolit sebanyak 3% (Variasi 4), nilai flow yang diperoleh melebihi batas spesifikasi yang telah ditetapkan, sehingga dianggap kurang memenuhi syarat kelayakan dalam hal kelenturan campuran.
3. Pada *Void in Mineral Aggregate (VMA)*, campuran tanpa filler zeolit menunjukkan nilai yang mendekati batas bawah spesifikasi. Penambahan filler zeolit sebanyak 1% dan 2% memberikan peningkatan VMA, namun belum signifikan. Peningkatan yang lebih terlihat terjadi pada campuran dengan filler zeolit 3%, yang menunjukkan adanya perbaikan struktur pori agregat.
4. Untuk *Void in Mix (VIM)*, campuran tanpa filler zeolit pada kadar aspal tertinggi menunjukkan nilai yang hampir menyentuh batas bawah spesifikasi. Sementara itu, campuran dengan zeolit 1% memiliki dua titik kadar aspal yang berada dalam rentang spesifikasi. Campuran dengan zeolit 2% menunjukkan peningkatan nilai VIM hingga berada di tengah-tengah rentang spesifikasi, sedangkan campuran dengan zeolit 3% memiliki nilai VIM yang sangat dekat dengan batas bawah spesifikasi.
5. Dari segi *Void Filled with Bitumen (VFB)*, terjadi penurunan nilai pada campuran dengan penambahan filler zeolit 1%, 2%, dan 3%, jika dibandingkan dengan campuran tanpa filler zeolit. Penurunan ini mengindikasikan bahwa persentase pori yang terisi aspal cenderung berkurang seiring bertambahnya kadar zeolit.
6. Pada parameter *Effective Asphalt Content* (Kadar Aspal Efektif), hasil yang diperoleh dari seluruh variasi campuran menunjukkan nilai yang relatif sama, baik pada campuran dengan maupun tanpa zeolit.

Secara keseluruhan, penggunaan zeolit sebagai filler dalam campuran AC-BC dapat meningkatkan stabilitas dan struktur campuran, meskipun perlu perhatian pada parameter VIM dan VFB agar tetap berada dalam batas spesifikasi yang ditetapkan. Penggunaan zeolit pada kadar yang tepat (sekitar 1–2%) direkomendasikan untuk menghasilkan campuran yang seimbang antara kekuatan, kekedapan, dan fleksibilitas.

Referensi

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fu'ana, Ana. 2019. Analisis Perbaikan Perkerasan Pada Ruas Jalan Kedungcino-Bandengan Kecamatan Jepara Dengan. 1-3.
- Mulyadi, I. 2018. Pengaruh Bahan Tambah Terhadap Sifat Campuran Aspal Beton. *Jurnal Teknik Sipil* 12(2), 123-130.
- Putra, A. S. 2020. Studi Eksperimental Penambahan Zeolit Pada Campuran AC- BC. *Jurnal Material Dan Teknik* 15(3), 45-50.
- Sari, D. P. 2021. Peran Zeolit Dalam Meningkatkan Kualitas Aspal Beton. *Jurnal Inovasi Material* 10(1), 77-85.
- Suprpto Siswosukarto, Richard Marcelenus Pasapan Latif Budi Suparma. 2024. Pengaruh Penggunaan Zeolite Alam Sebagai Pengganti Mineral Filler Pada Campuran Lapis Fondasi Agregat Kelas A. *Jurnal Hpji* 17-30.
- Tanjung, Fadhil Saputra. 2021. Evaluasi Tingkat Kerusakan Jalan Sebagai Dasar Penentuan. 4-9.
- Tambunan, H.F. & Pitriani, F. (2023). Penggunaan Zeolit sebagai Filler pada Laston AC-BC. *Jurnal Fondasi Teknik Sipil*, 9(2), 67–75.
- Salsa, B., Langit, D.S.W.G., & Hari, M.F.W. (2022). Pengaruh Penambahan Zeolit terhadap Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC). *Renovasi: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 1–9.
- Tambunan, H.F., & Pitriani, F. (2023). Penggunaan Zeolit sebagai Filler pada Laston AC-BC. *Jurnal Fondasi Teknik Sipil*, 9(2), 67–75
- Nofrianto, H., Wahab, W., Syofian, N., & Wardi, S. (2021). Kajian Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Panas Aspal Agregat (AC-BC) Dengan Pengujian Marshall. *Menara Ilmu: Jurnal Penelitian dan Kajian Ilmiah*, 15(1).
- Kusdarto. (2008). POTENSI ZEOLIT DI INDONESIA. *Journal of Indonesia Zeolites*.
- Saleh, A. (2018, April). Pengaruh Penggunaan Zeolit Alam Sebagai Filler Pada Campuran AC-BC ditinjau dari Nilai VITM. *Jurnal Teknik Sipil Siklus*, 4, 37.