

PENGARUH PENGGUNAAN ZEOLITE ALAM SEBAGAI PENGGANTI MINERAL *FILLER* PADA CAMPURAN LAPIS FONDASI AGREGAT KELAS A

Richard Marcelenus Pasapan
Universitas Gadjah Mada
richardmarcelenuspasapan@mail.ugm.ac.id

Latif Budi Suparma
Universitas Gadjah Mada
lbsuparma@ugm.ac.id

Suprpto Siswosukarto
Universitas Gadjah Mada
suprpto.siswosukarto@ugm.ac.id

Abstract

Premature damage to road pavement can be caused by several factors, including the use of materials that do not meet specifications and uneven density in the base layer. To overcome this problem, innovative solutions are needed. The use of natural zeolite powder as a substitute for filler in road structural layers is an interesting innovation in the construction industry. This study aims to evaluate the effect of natural zeolite powder on the mechanical and technical properties of Grade A Aggregate Base Course. Through an experimental approach, standard mixtures of Grade A Aggregate Base Course were compared with mixtures using varying levels of natural zeolite powder, ranging from 0% to 100%. The testing procedures carried out follow the Indonesian National Standard procedures and include examining the characteristics of the materials used and testing the density of the mixture. This study shows that increasing the zeolite powder content leads to a decrease in the maximum dry density value, while the Optimum Moisture Content value increased.

Keywords: road pavement; Zeolite; base course; Optimum Moisture Content; maximum dry density

Abstrak

Kerusakan prematur pada perkerasan jalan dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk penggunaan bahan yang tidak memenuhi spesifikasi dan kepadatan yang tidak merata pada lapisan dasar. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan solusi inovatif. Penggunaan bubuk zeolite alam sebagai pengganti *filler* pada lapisan struktur jalan merupakan salah satu inovasi yang menarik dalam industri konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh bubuk zeolite alam terhadap sifat-sifat mekanik dan teknis Lapis Fondasi Agregat Kelas A. Melalui pendekatan eksperimental, campuran standar Lapis Fondasi Agregat Kelas A dibandingkan dengan campuran menggunakan variasi kadar bubuk zeolite alam, mulai dari 0% hingga 100%. Prosedur pengujian yang dilakukan mengikuti prosedur Standar Nasional Indonesia serta meliputi pemeriksaan karakteristik material yang digunakan dan pengujian kepadatan campuran. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa peningkatan kadar bubuk zeolite mengakibatkan penurunan nilai kepadatan kering maksimum, sementara nilai Kadar Air Optimum mengalami peningkatan.

Kata-kata kunci: perkerasan jalan; Zeolite; lapis fondasi; Kadar Air Optimum; kepadatan kering maksimum

PENDAHULUAN

Jalan dapat berupa jalur darat yang dilapisi dengan material tertentu seperti aspal, beton, atau batu, yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas (Pattipeilohy et al., 2019). Struktur perkerasan jalan umumnya membutuhkan beberapa lapisan material karena kekakuan strukturnya sendiri tidak mencukupi untuk menyalurkan beban yang ditimbulkan oleh roda kendaraan ke seluruh area perkerasan atau lapisan di bawahnya. Perkerasan jalan lentur biasanya terdiri atas tiga lapisan utama, yang masing-masing memiliki fungsi khusus dalam konstruksi jalan. Lapisan-lapisan ini mencakup lapis beraspal atau lapis permukaan, lapis fondasi, dan lapis fondasi bawah (Juniarti et al., 2021).

Menurut Abdurrahman (2019), salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur jalan adalah ketidakseragaman kepadatan lapis fondasi. Ketidakseragaman ini dapat menyebabkan berbagai masalah struktural, termasuk deformasi permukaan jalan, retak, dan kegagalan fungsi. Kerusakan jalan juga disebabkan oleh penggunaan material konstruksi yang tidak sesuai dengan standar. Oleh karena itu, diperlukan material konstruksi yang memenuhi spesifikasi dan cukup tersedia, untuk memastikan kualitas dan kecukupan material saat digunakan pada proyek konstruksi. Penggunaan *filler* pada lapisan fondasi bertujuan untuk meningkatkan kepadatan, kekakuan, dan daya dukung, serta mengisi ruang pori. Inovasi dalam memilih bahan pengganti, terutama *filler*, dapat membantu meningkatkan karakteristik lapisan fondasi agregat dengan cara yang efisien, mengingat beberapa bahan konvensional semakin sulit ditemukan atau ketersediaannya berkurang di alam. Pilihan material pengganti yang lebih mudah didapat dapat membantu dalam kelancaran pelaksanaan proyek dan pengendalian biaya konstruksi (Chasanah dan Sukmo, 2023).

Zeolite adalah suatu jenis mineral alam yang memiliki struktur berpori dan dapat menyerap serta bertukar ion dengan lingkungan sekitarnya. Zeolite terbentuk dari reaksi alami antara lava vulkanik dan air laut yang menghasilkan struktur kristal dengan lubang-lubang mikroskopis yang teratur. Struktur pori-pori zeolite memungkinkan untuk menangkap dan melepaskan molekul air serta ion-ion lainnya (Kapaca et al., 2021). Selain manfaatnya dalam aplikasi, seperti penyaringan air, pemurnian udara, dan industri kimia, zeolite juga berperan dalam meningkatkan stabilitas tanah di sekitarnya. Zeolite dapat membantu mengurangi pergeseran dan pengendapan tanah dengan cara menyerap kelembaban serta mengikat partikel tanah secara lebih kokoh (Parapaga et al., 2018).

Perancangan Lapis Fondasi Agregat Kelas A

Perancangan lapis fondasi kelas A adalah komponen kunci untuk memastikan kekuatan, ketahanan, serta keselamatan jalan. Fondasi yang kokoh berperan dalam mengurangi potensi-potensi kerusakan jalan, penurunan permukaan, serta risiko kecelakaan. Perancangan lapis fondasi agregat kelas A melibatkan tahap-tahap yang matang dan terukur, untuk memastikan kualitas dan keandalan struktur jalan. Lapisan fondasi juga harus mampu mengatasi perubahan iklim dan mengurangi efek deformasi yang mungkin terjadi akibat pembebanan dan pemadatan, sehingga persyaratan CBR yang wajib dipenuhi menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 adalah 90%. Penggunaan bahan lapis fondasi dapat membawa manfaat efisiensi biaya karena dapat menghasilkan lapisan fondasi yang lebih tipis dan apabila nilai CBR makin baik, dimungkinkan tebal lapisan permukaan berkurang.

Pemadatan Campuran Lapis Fondasi Agregat Kelas A

Pemadatan campuran lapis fondasi kelas A adalah tahapan krusial dalam proses konstruksi jalan, yang bertujuan untuk memastikan keamanan dan kualitas struktur jalan yang dibangun. Lapis fondasi kelas A menjadi bagian integral struktur jalan yang harus memenuhi standar dan spesifikasi tertentu. Proses pemadatan ini memainkan peran penting dalam memastikan kekokohan dan daya tahan lapis fondasi terhadap beban lalu lintas dan lingkungan sekitar. Sifat agregat dan derajat pemadatannya merupakan dua faktor penting yang mem-

punyai pengaruh signifikan terhadap desain lapisan dasar jalan (Kaya et al., 2013). Menurut Goli et al. (2022), pemadatan pada agregat dapat meningkatkan kepadatan suatu lapisan dan kekuatan materialnya. Hal tersebut juga dapat mengurangi pori-pori yang terdapat dalam bahan atau struktur lapisan, sehingga pemadatan dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan material tersebut.

Faktor-Faktor Penentu Kepadatan Campuran Lapis Fondasi Agregat Kelas A

Jenis Material

Salah satu faktor utama yang memengaruhi kepadatan suatu benda adalah jenis material. Kepadatan adalah besaran fisika yang mengukur banyaknya massa yang dimiliki oleh suatu benda per satuan volume yang dimilikinya. Setiap jenis material memiliki karakteristik kepadatan yang berbeda-beda, dan hal ini dipengaruhi oleh struktur internal, komposisi kimia, dan kondisi fisik material tersebut.

Berat Volume

Berat volume suatu material menggambarkan berat material per volume tertentu. Semakin besar berat volume material, semakin tinggi pula kepadatannya. Kepadatan yang tinggi ini mengindikasikan bahwa material tersebut memiliki partikel yang rapat dan padat dalam suatu volume tertentu. Material dengan kepadatan tinggi memiliki daya dukung yang kuat terhadap beban eksternal. Sebaliknya, berat volume material tersebut kecil menunjukkan bahwa kepadatannya rendah, karena partikel-partikelnya tidak terlalu rapat dalam volume tersebut. Material dengan kepadatan rendah cenderung memiliki daya dukung yang lebih rendah terhadap beban eksternal. Kepadatan material dapat diukur melalui berat volume keringnya (γ_d).

Kadar Air

Kadar air merupakan faktor krusial yang memiliki pengaruh signifikan terhadap berbagai properti fisik dan properti mekanik material, termasuk kepadatan. Kepadatan adalah parameter yang menggambarkan rapatnya suatu material, diukur sebagai massa per unit volume. Peran kadar air dalam menentukan kepadatan suatu bahan sangat penting dan kompleks. Ketika material jenuh dengan air, massa material secara keseluruhan meningkat, sehingga kepadatannya menurun. Sebaliknya, jika material kering atau memiliki kadar air yang rendah, massa material per unit volume menjadi lebih besar, yang menghasilkan kepadatan yang lebih tinggi.

Kadar air dalam material dapat memengaruhi kepadatan secara langsung. Kadar Air Optimum merujuk pada tingkat kelembaban atau kandungan air yang memungkinkan campuran atau bahan tertentu mencapai kepadatan maksimum atau kekompakan optimal selama proses pemadatan. Kadar air ini diukur sebagai persentase berat total campuran atau bahan. Pada Kadar Air Optimum, campuran menunjukkan sifat mekanis yang optimal, seperti stabilitas dan kekuatan yang sesuai dengan tujuan konstruksi yang diinginkan. Kadar Air Optimum dapat ditentukan melalui pengujian kepadatan, dengan mengikuti prosedur uji kepa-

datan berat sesuai dengan SNI 1743:2008. Menurut SNI 03:6380:2000, kadar air yang digunakan dalam pencampuran bahan lapis fondasi seharusnya sama atau sedikit di bawah Kadar Air Optimum yang telah ditentukan. Sesuai dengan standar SNI 1743:2008, pemadatan harus dilakukan ketika kadar air bahan berada antara 3% di bawah Kadar Air Optimum dan 1% di atas Kadar Air Optimum. Kadar Air Optimum adalah nilai yang ditetapkan oleh kepadatan kering maksimum. Oleh karena itu, kadar air adalah faktor yang perlu dipertimbangkan dengan baik dalam menentukan atau memahami kepadatan suatu bahan atau material. Kadar air yang tepat atau ideal dapat berbeda bergantung pada jenis bahan atau material yang dipertimbangkan, dan kepadatan akhir suatu bahan dapat dipengaruhi secara signifikan oleh kadar air yang ada.

Energi Pemadatan

Usaha pemadatan merujuk pada tindakan atau upaya untuk meningkatkan kepadatan suatu bahan, terutama tanah atau agregat. Proses pemadatan dilakukan untuk mengurangi jumlah rongga udara dalam bahan, sehingga partikel-partikelnya lebih rapat dan padat. Pemadatan dapat dilakukan menggunakan berbagai peralatan, seperti *roller*, alat pemadat tangan (*hand tampers*), atau mesin pemadat lainnya, seperti *plate compactor* atau *vibratory roller*. Metode pemadatan harus dipastikan bahwa kepadatan yang dihasilkan mencapai standar yang ditetapkan dalam spesifikasi teknis proyek, sehingga dapat menjamin kualitas, kekuatan, dan keamanan struktur yang dibangun. Karena itu, usaha pemadatan merupakan langkah krusial dalam proses konstruksi, yang memastikan kualitas material dan kinerja struktural yang optimal. Teknik pemadatan yang tepat dapat meningkatkan daya dukung dan stabilitas material konstruksi, serta memastikan keberhasilan proyek konstruksi secara keseluruhan.

Menurut Ale et al. (2022), usaha pemadatan yang tinggi berpengaruh pada stabilitas suatu material, dengan pemadatan yang dilakukan berulang dan energi pemadatan menunjukkan korelasi positif yang cukup kuat dengan kekuatan material yang diteliti, dengan nilai koefisien korelasi antara 0,63 hingga 0,99. Faktor-faktor yang memengaruhi usaha pemadatan pada lapis fondasi adalah karakteristik material, kepadatan target, kondisi tanah asli, teknik pemadatan, ketebalan lapisan, kondisi cuaca, frekuensi dan durasi pemadatan, kecepatan pemadatan, dan perbedaan tekanan.

Pemanfaatan Zeolite pada Perkerasan Jalan

Berbagai penelitian telah dilakukan dalam pemanfaatan material zeolite pada perkerasan jalan. Norouznejad et al. (2021), menyelidiki dampak zeolite pada sifat-sifat pemadatan dan California Bearing Ratio (CBR) pasir yang dicampur dengan semen. Untuk tujuan ini, pertama-tama, pasir, semen (2%, 4%, 6%, dan 8% berat kering pasir), dan zeolite (0%, 30%, 60%, dan 90% terhadap kandungan semen, sebagai bahan pengganti) dicampur. Anugrah et al. (2022) melakukan penelitian tentang pengaruh zeolite sebagai *filler* terhadap campuran beton aspal AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*). Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan zeolite terhadap nilai Marshall pada lapis beton aspal AC-WC. Al-Hadidy et al. (2023), melakukan penelitian tentang kinerja mekanik dan analisis

statistika *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan zeolite alam dan sintetis sebagai fungsi upaya pemadatan. Penelitian ini bertujuan sebagai evaluasi laboratorium WMA termasuk zeolite sintetis (SZ) dan zeolite alam (NZ). Sifat Marshall, rasio kekuatan tarik, kekuatan tarik tak langsung pada temperatur 25 °C dan pada temperatur 60 °C, modulus elastis pada temperatur 25 °C, dan kompliansi regangan pada temperatur 40 °C semuanya diperiksa.

METODOLOGI PENELITIAN

Persiapan Bahan

Tahap awal penelitian ini adalah persiapan material yang digunakan. Material agregat berasal dari PT Surya Karya Setiabudi, berupa batuan andesit dari *quarry* di Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Bubuk zeolite alam yang digunakan sebagai pengganti mineral *filler* berasal dari perusahaan zeolite di Klaten, dengan *quarry* di Tegalrejo, Gendangsari, Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

Pengujian karakteristik bahan, termasuk agregat kasar dan agregat halus, pada penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa bahan-bahan tersebut memenuhi persyaratan yang tertera dalam Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 (Direktorat Jenderal Bina Marga 2018). Pengujian yang dilakukan adalah:

- a. Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar SNI 1969:2016.
- b. Pengujian keausan agregat kasar SNI 2417:2018.
- c. Pengujian butir pecah pada agregat kasar SNI 7619:2012.
- d. Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus SNI 1970:2016.
- e. Pengujian batas cair SNI 1967:2008.
- f. Pengujian indeks plastisitas SNI 03:1966:2008.
- g. Pengujian persentase gumpalan lempung dan butir pecah SNI 4141:2015.
- h. Pengujian berat jenis *filler* SNI 1970:2008.
- i. Pengujian X-Ray Diffraction

Perancangan Benda Uji dan Komposisi Campuran

Perancangan benda uji harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan dan dibuat menggunakan bahan yang memenuhi standar kekuatan yang relevan. Material agregat yang telah memenuhi persyaratan digunakan untuk merancang gradasi campuran benda. Tabel 1 menunjukkan gradasi agregat yang digunakan.

Selanjutnya, pembuatan benda uji kepadatan ringan mengikuti standar SNI 1742:2008 dan pembuatan benda uji kepadatan berat mengikuti standar SNI 1743:2008. Metode pengujian kepadatan ringan dan kepadatan berat memiliki empat pilihan metode uji, yaitu cara A, cara B, cara C, dan cara D. Pada penelitian ini digunakan cara D, karena gradasi material yang digunakan mengharuskan adanya ukuran butir yang lebih besar daripada 4,0 mm.

Bubuk zeolite selanjutnya digunakan untuk mengganti mineral *filler* dengan berbagai proporsi, yakni 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Variasi yang digunakan adalah Variasi 1 (100% debu batu dan 0% bubuk zeolite), Variasi 2 (75% debu batu dan 25% bubuk zeolite),

Variasi 3 (50% debu batu dan 50% bubuk zeolite), Variasi 4 (25% debu batu dan 75% bubuk zeolite), dan Variasi 5 (0% debu batu dan 100% bubuk zeolite).

Tabel 1 Gradasi Agregat Lapis Fondasi Agregat Kelas A

Ukuran ayakan		Persen Berat Lolos (%)
ASTM	mm	
2"	50,00	-
1½"	37,50	100
1"	25,00	79–85
¾"	19,00	-
½"	12,50	-
⅜"	9,50	44–58
No. 4	4,75	29–44
No. 8	2,36	-
No.10	2,00	17–30
No. 16	1,18	-
No. 40	0,425	7–17
No. 200	0,075	2–8

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Campuran

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik dan sifat fisik material yang digunakan, bahan agregat telah memenuhi semua persyaratan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dan dapat digunakan secara efektif dalam konstruksi perkerasan jalan, terutama untuk Lapis Fondasi Agregat Kelas A. Semua persyaratan yang telah terpenuhi serta hasil pengujian dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Campuran

Sifat-Sifat	Spesifikasi	Sampel	Keterangan
Abrasi Agregat Kasar / SNI 2417:2008	0–40%	23,52	Memenuhi
Butiran pecah, tertahan ayakan NO. 4 / SNI 7619:2012	95/90	99/96	Memenuhi
Batas Cair / SNI 1967:2008	0–25	0	Memenuhi
Indeks Plastisitas / SNI 1966:2008	0-6	0	Memenuhi
Hasil Kali Indeks Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No. 200	maks.25	0	Memenuhi
Gumpalan Lempung dan Butiran-butiran Mudah Pecah / SNI 1744:2012	0–5 %	0,45% dan 4,68%	Memenuhi
Perbandingan Persen Lolos Ayakan No. 200 dan No. 40	maks. 2/3	2/3	Memenuhi

Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

Material zeolite alam yang digunakan sebagai pengganti mineral *filler* telah diuji menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) untuk menganalisis kandungan mineral yang terdapat pada bubuk zeolite alam yang digunakan. Tabel 3 menunjukkan diagram hasil uji X-Ray Diffraction bubuk zeolite alam tersebut.

Tabel 3 Hasil Uji X-Ray Diffraction

No	Nama Senyawa	Komposisi
1	Potassium 5-azdotetrazolate	31,50%
2	Mordenite	19,40%
3	Cristobalite	17,90%
4	Rubidium Manganese Silicon Oxide	13,50%
5	Clinoptilolite-Na	7,20%
6	Tridymite	5,80%
7	Zeolite-L	4,80%

Berdasarkan komposisi senyawa yang terdapat pada zeolite alam (Tabel 3), senyawa yang dominan dalam mendukung penelitian ini adalah Clinoptilolite-Na. Senyawa ini mempunyai struktur kristal tiga dimensi yang mengandung kerangka silika dan alumina yang dihubungkan oleh oksigen memberikan Clinoptilolite-Na dengan sifat adsorpsi yang baik (Sáez et al., 2021). Penggunaannya dalam teknologi memungkinkannya berperan sebagai bahan pengisi pada tanah untuk meningkatkan stabilitas, permeabilitas, dan retensi air.

Hasil dan Pembahasan Pengujian Kepadatan Berat dan Kepadatan Ringan

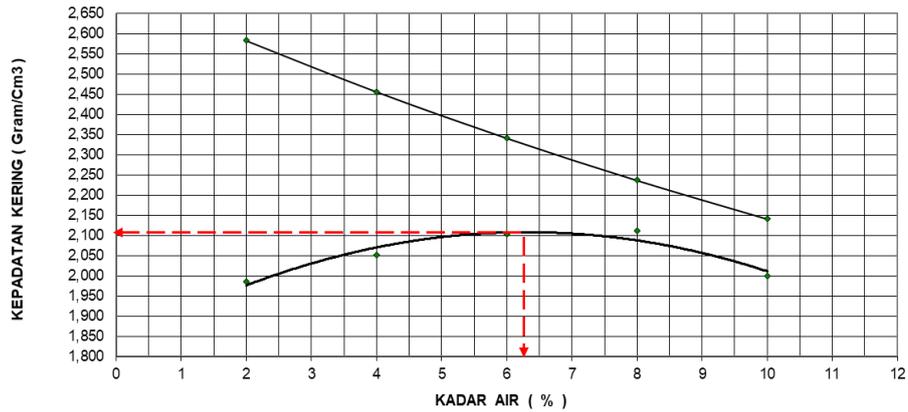
Hasil Pengujian

Sebelum melakukan pengujian kepadatan berat (Modified Proctor) dan kepadatan ringan (Standard Proctor), dilakukan *trial* dan *error* untuk menentukan persentase penambahan air yang optimal untuk setiap variasi benda uji. Menurut standar SNI 1742:2008 dan SNI 1743:2008, penambahan kadar air untuk uji pemadatan berkisar antara (1-3)%. Rentang persentase penambahan air sebesar 2% dipilih pada penelitian ini karena sifat penyerapan air yang tinggi pada bubuk zeolite alam. Grafik hubungan antara kepadatan kering dan kadar air berbentuk parabola digunakan untuk menentukan Kadar Air Optimum. Persentase air yang digunakan untuk setiap variasi sampel dapat dilihat pada Tabel 4.

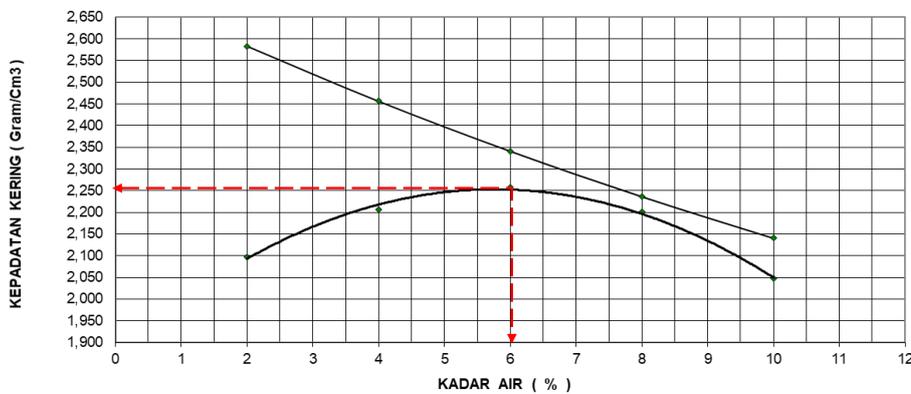
Tabel 4 Jumlah Persentase Penambahan Kadar Air pada Tiap Variasi Campuran

Variasi Campuran	<i>Standar Proctor Test</i>		<i>Modified Proctor Test</i>	
	Jumlah Air (%)	Jumlah Air (MI)	Jumlah Air (%)	Jumlah Air (MI)
1	2; 4; 6; 8; 10	120;240;360;480;600	2; 4; 6; 8; 10	120;240;360;480;600
2	4; 6; 8; 10; 12	240;360;480;600;720	4; 6; 8; 10; 12	240;360;480;600;720
3	6; 8; 10; 12; 14	360;480;600;720;840	4; 6; 8; 10; 12	240;360;480;600;720
4	6; 8; 10; 12; 15	360;480;600;720;840	4; 6; 8; 10; 12	240;360;480;600;720
5	6; 8; 10; 12; 16	360;480;600;720;840	4; 6; 8; 10; 12	240;360;480;600;720

Kadar Air Optimum (*Optimum Moisture Content*) merupakan kadar air yang diperlukan oleh suatu material agregat untuk mencapai kepadatan maksimum dan menghasilkan densitas kering yang paling besar. Hasil percobaan menunjukkan bahwa untuk variasi tanpa penambahan bubuk zeolite alam, menggunakan metode Standard Proctor dan Modified Proctor, Kepadatan Kering Maksimum (*Maximum Dry Density*) yang tercapai adalah 2,111 g/cm³ dan 2,255 g/cm³. Kadar Air Optimum yang diperoleh adalah 6,3% dan 6,0%, sebagaimana terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Hasil ini cukup mendekati hasil penelitian sebelumnya (Widarto et al., 2023), yang menggunakan material lapis fondasi agregat dan metode yang serupa.

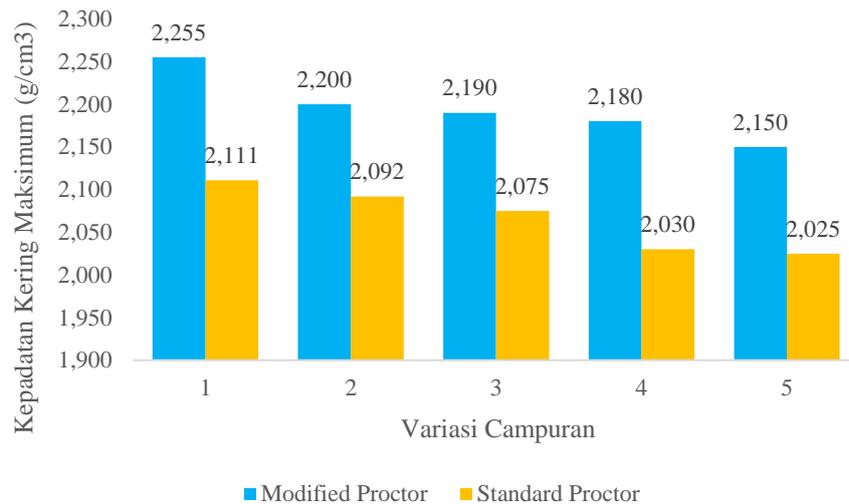


Gambar 2 Kadar Air Optimum Variasi tanpa Zeolite Metode Standard Proctor

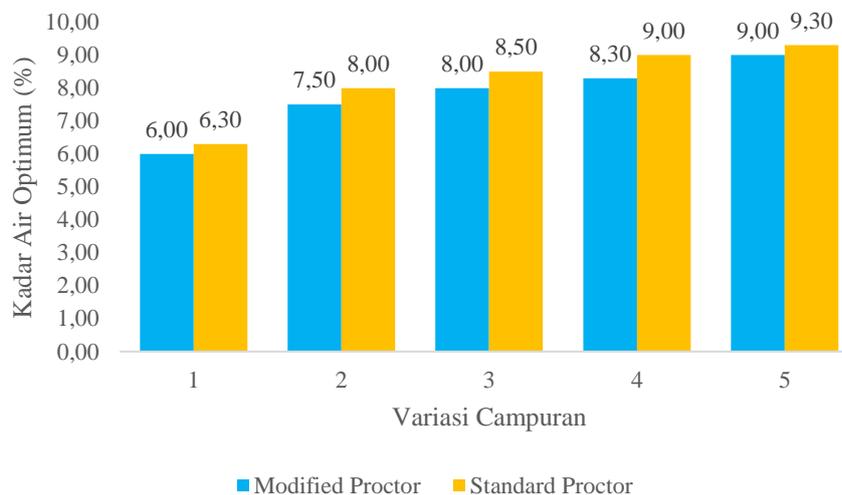


Gambar 3 Kadar Air Optimum Variasi tanpa Zeolite Metode Modified Proctor

Kadar Air Optimum dan kepadatan kering maksimum di setiap variasi campuran dengan persentase penambah zeolite sebesar 25%, 50%, 75% dan 100% pada metode Standard Proctor dan Modified Proctor disajikan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Berdasarkan hasil rekapitulasi nilai Kadar Air Optimum, baik dengan metode Standard Proctor maupun Modified Proctor, terlihat bahwa semakin besar penambahan bubuk zeolite alam, semakin besar pula nilai Kadar Air Optimumnya. Hal ini disebabkan oleh sifat karakteristik zeolite yang memungkinkannya menyerap air lebih banyak daripada agregat batu andesit yang digunakan. Dengan demikian, semakin besar jumlah bubuk zeolite yang ditambahkan dalam campuran, semakin besar pula jumlah air yang diperlukan untuk mencapai densitas kering maksimum yang diinginkan. Dari hasil nilai kepadatan kering maksimum, teramati bahwa dengan penambahan bubuk zeolite alam, nilai kepadatan maksimum cenderung menurun. Penurunan ini dapat dijelaskan oleh dua faktor utama. Pertama, berat jenis zeolite, yang relatif kecil dan ringan dibandingkan dengan agregat batu andesit, dapat mengurangi densitas campuran secara keseluruhan. Kedua, kemampuan zeolite untuk menyerap air secara signifikan dapat menyebabkan penggantian sebagian volume agregat dengan air yang diserap, sehingga mengurangi kepadatan campuran (Norouznejad et al., 2021).



Gambar 4 Nilai Kepadatan Kering Maksimum pada Tiap Variasi Campuran



Gambar 5 Kadar Air Optimum pada Tiap Variasi Campuran

Pembahasan

Nilai Kadar Air Optimum dari uji kepadatan, dengan Modified Proctor dan Standard Proctor menunjukkan perbedaan yang bermakna. Pada uji Standard Proctor, nilai Kadar Air Optimum cenderung lebih besar dibandingkan dengan nilai Kadar Air Optimum pada uji Modified Proctor. Penyebab utama perbedaan ini terletak pada karakteristik masing-masing metode uji kepadatan. Dalam konteks uji kepadatan ringan (Standard Proctor), tanah yang digunakan memiliki rongga yang lebih besar. Karena rongga-rongga ini lebih besar, dibutuhkan lebih banyak air untuk mengisi rongga-rongga tersebut sehingga campuran dapat mencapai kepadatan maksimum atau densitas maksimum. Proses ini penting karena mengoptimalkan kompaksi butiran tanah dalam keadaan lebih ringan atau longgar. Di sisi lain, terlihat pula perbedaan pada nilai kepadatan kering maksimum di kedua metode uji. Pada uji

Standard Proctor, nilai kepadatan kering maksimum cenderung lebih rendah daripada pada uji Modified Proctor. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam energi pemadatan yang digunakan serta jumlah *tamping* yang dilakukan selama proses uji. Pada uji kepadatan ringan, energi pemadatan yang digunakan cenderung lebih rendah dan jumlah *tamping* lebih sedikit. Akibatnya, butiran tanah tidak terkompaksi dengan kuat seperti pada uji kepadatan berat.

Sebaliknya, pada uji kepadatan berat digunakan energi pemadatan yang lebih tinggi dan jumlah *tamping* yang lebih intensif. Proses ini menghasilkan kompaksi butiran tanah yang lebih padat dan rapat, sehingga dapat mencapai kepadatan kering maksimum yang lebih tinggi (Agustina dan Yatul, 2019). Perbedaan karakteristik antara Modified Proctor dan Standard Proctor memengaruhi hasil uji kepadatan, termasuk nilai Kadar Air Optimum dan kepadatan kering maksimum. Pemahaman mendalam tentang perbedaan ini penting untuk menginterpretasikan hasil uji dengan akurat dan memastikan bahwa campuran material mencapai spesifikasi teknis yang diinginkan dalam proyek konstruksi.

Berdasarkan hasil pengujian X-Ray Diffraction pada bubuk zeolite alam, ditemukan bahwa kandungan mineralnya meliputi mordenite, cristobalite, clinoptilolite, dan tridymite. Kehadiran mineral-mineral ini menunjukkan bahwa zeolite memiliki sifat-sifat thermal dan adsorpsi yang signifikan. Struktur kristal zeolite yang unik memungkinkannya untuk menyerap dan menyimpan molekul gas atau cairan dalam pori-porinya. Salah satu keunggulan utama zeolite adalah sifat adsorpsinya yang unik, yang membuatnya sangat bermanfaat dalam berbagai aplikasi, terutama dalam pengolahan air, untuk menghilangkan senyawa-senyawa tertentu yang terlarut dalam air, seperti logam berat atau senyawa organik (Atikah, 2017).

Sifat zeolite yang memungkinkannya menyerap air dengan baik memiliki pengaruh signifikan pada hasil pengujian kepadatan. Saat zeolite ditambahkan ke dalam campuran, kemampuannya untuk menyerap air secara efisien menyebabkan peningkatan nilai Kadar Air Optimum. Hal ini berarti bahwa untuk mencapai kepadatan maksimum pada variasi campuran dengan penambahan zeolite, diperlukan kadar air yang lebih tinggi daripada varian campuran tanpa zeolite. Selain itu, berat jenis bubuk zeolite yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan berat jenis abu batu andesit juga berpengaruh pada nilai kepadatan kering maksimum. Dengan kata lain, semakin besar penambahan bubuk zeolite dalam campuran, semakin rendah nilai kepadatan kering maksimumnya. Hal ini disebabkan oleh sifat fisik zeolite yang ringan, sehingga penambahan zeolite mengurangi kerapatan butir campuran, yang pada gilirannya menghasilkan nilai kepadatan kering maksimum yang lebih rendah. Perubahan nilai kepadatan dan Kadar Air Optimum ini perlu dipertimbangkan secara seksama dalam penggunaan zeolite sebagai pengganti bahan pengisi dalam campuran lapis fondasi agregat. Meskipun zeolite memiliki kemampuan adsorpsi yang baik dan manfaat lainnya dalam aplikasi teknologi lingkungan dan industri, pengaruhnya terhadap sifat-sifat mekanik dan fisis campuran tanah harus diperhitungkan agar dapat mengoptimalkan penggunaannya dalam berbagai aplikasi teknik sipil dan konstruksi.

KESIMPULAN

Bubuk zeolite alam memiliki kandungan mineral berupa mordenite, cristobalite, clinoptilolite, dan tridymite. Beberapa mineral tersebut memiliki sifat thermal dan adsorpsi, yang memengaruhi struktur kristal zeolite untuk menyerap dan menyimpan molekul gas atau cairan dalam pori-porinya. Sifat adsorpsi zeolite membuatnya bermanfaat dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam pengolahan air untuk menghilangkan senyawa-senyawa tertentu, pengolahan gas untuk pemurnian, dan sebagai katalis dalam reaksi kimia

Hasil pengujian menggunakan dua metode pemadatan menunjukkan bahwa penambahan zeolite ke campuran meningkatkan nilai Kadar Air Optimum. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa zeolite yang ada di alam memiliki kapasitas untuk menyerap air lebih banyak daripada debu batu. Karakteristik dan sifat fisik yang diukur memenuhi standar yang diperlukan untuk aplikasi dalam lapis fondasi agregat kelas A. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa zeolite dapat memberikan nilai tambah pada campuran dan menjadi pengganti material *filler* yang layak.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman. 2019. *Penelitian terhadap Penyebab Kerusakan Jalan Lingkungan Pemukiman di Kota Banjarmasin*. Al Ulum J. Sains dan Teknol, 4 (2): 62–68.
- Agustina, D.H. dan Yatul, Y. 2019. *Pengaruh Energi Pemadatan Terhadap Nilai Kepadatan Tanah*. Sigma Teknika, 2 (2): 202–206.
- Al-Hadidy, A.I., Alzebaree, R., Abdal, J.A., dan Niş, A. 2023. *Mechanical Performance dan Statistical Analysis of Natural dan Synthetic Zeolite-Warm Mix Asphalt as A Function of Compaction Efforts*. Journal of Building Engineering. 75 (6): 106985.
- Ale, T.O., Olofinyo, O.O., Odebode, O.S., dan Esan, D.S. 2022. *Effect of Compaction At Different Energy Levels on the Geotechnical Properties of Stabilized Soils*. Malaysian Journal of Geosciences, 6: 29–35.
- Anugrah, D.I., Rahmat, dan Zufrimar. 2022. *Pengaruh Zeolit sebagai Filler terhadap Campuran Lapisan Aspal Beton AC-WC (Asphalt Concrete Wearing Course)*. Kumpulan Executive Summary Tugas Akhir Wisudawan Teknik Sipil Ke-77, 1: 1–2.
- Atikah, W.S. 2017. *Potensi Zeolit Alam Gunung Kidul Teraktivasi Sebagai Media Adsorben Pewarna Tekstil*. Jurnal Arena Tekstil, 32: 17-24.
- Chasanah, F. dan Sukmo, T.A. 2023. *Pengaruh Bubuk Talk sebagai Bahan Filler Pengganti pada Campuran AC-WC*. Asian Journal of Innovation dan Entrepreneurship (AJIE), 7 (3): 82–90.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2018. *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta.
- Goli, A., Hooshangi, H., dan Kazemi, M. 2022. *Investigating the Effect of Compaction Level dan Aggregate Grading of Stone Materials in Base Layer on Bitumen Penetration Rate*. Civil Engineering Infrastructures Journal, 55 (2), 395–405.

- Juniarti, M., Widodo, S., dan Akhmadali, D. 2021. *Perencanaan Perkerasan Jalan dengan Metode Bina Marga 2002 dan Metode Bina Marga 2011: Studi Kasus Jl. Drs. Moh. Hatta, Sungai Rengas Kec. Sungai Kakap, Kab. Kubu Raya*. Jurnal Elektronik Laut, Sipil, Tambang (JeLAST), 8 (2): 1–8.
- Kapaca, E., Jiang, J., Cho, J., Jordá, J.L., Díaz-Cabañas, M.J., Zou, X., Corma, A., dan Willhammar, T. 2021. *Synthesis dan Structure of a $22 \times 12 \times 12$ Extra-Large Pore Zeolite ITQ-56 Determined by 3D Electron Diffraction*. Journal of the American Chemical Society, 143 (23): 8713–8719.
- Kaya, Z., Cetin, A., Cetin, B., Aydilek, A. 2013. *Effects of Compaction Method dan Aggregate Properties on Mechanical Behavior of Granular Base Layer*. Teknik Dergi, 24 (3): 6463–6470.
- Norouznejad, G., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S.M., Afzalirad, M., dan Afzalirad, M. 2021. *Influence of Zeolite on the Compaction Characteristics dan Shear Strength Parameters of Cemented Sand*. Sains Malaysiana, 50 (11): 3181–3191.
- Parapaga, R.T., Sarajar, A.N., dan Legrans, R.R.I. 2018. *Pengaruh Penambahan Zeolite terhadap Kuat Geser pada Tanah Berlempung*. Jurnal Sipil Statik, 6 (7): 501–509.
- Pattipeilohy, J., Sapulette, W., dan Lewaherilla, N.M.Y. 2019. *Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur pada Ruas Jalan Desa Waisarisa–Kaibobu*. Manumata: Jurnal Ilmu Teknik, 5 (2): 56–64.
- Sáez, P., Rodríguez, A., Gómez, J.M., Paramio, C., Fraile, C., dan Díez, E. 2021. *H-Clinoptilolite as an Efficient dan Low-Cost Adsorbent for Batch dan Continuous Gallium Removal from Aqueous Solutions*. Journal of Sustainable Metallurgy, 7: 1699–1716.
- Widarto, R., Suparma, L.B., dan Siswosukarto, S. 2023. *Base Course Stabilization Performance Using Fly Ash-Based Geopolymers dan Their Effect on Water Quality Standards*. U KARST (Kadiri University Civil Engineering Research), 7 (1): 1–16.