

Pemanfaatan Zeolit dengan Aktivasi Fisik sebagai Bahan Pengganti Semen pada Beton Berpori

Utilization of Zeolite with Physical Activation as a Cement Substitute in Pervious Concrete

Ahmad Yudi¹, Andry Yuliyanto^{2*}, Kirtinanda P.³, Chevin Gerhard⁴, Edward Riyadi Irawan⁵

^{1,2,3,4,5}Teknik Sipil - Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan - Institut Teknologi Sumatera, Indonesia
Alamat korespondensi: Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Lampung Selatan, Indonesia
email: andry.yuliyanto@si.itera.ac.id*

Abstract

In recent years, as the population in cities and suburbs has increased significantly, areas that were once covered by soil and able to absorb water have been replaced by sidewalks, roads, and parking lots. Porous Concrete (PC) is a simple and durable solution that mimics the natural hydrological characteristics of soil. The use of cement can be replaced by the zeolite substitution method. Cement weight is used as a factor in concrete mixing. By knowing the weight of cement, we can determine the amount of cement required for the concrete mix, considering the specific gravity of zeolite as a replacement factor. This study aims to obtain compressive strength, porosity, permeability, abrasion loss values of shaft concrete. Physically activated and non-physically activated zeolites affect each test conducted and get significant differences in results seen from ANOVA (Analysis of Variance) analysis. The highest compressive strength value is found in the 15% activated zeolite variation with a value of 10.75 MPa, and the highest porosity and permeability are found in the variation of 20% unactivated zeolite substitution with a value of 12.5%; 0.55 (cm/s), the lowest abrasion value in the cantabro test is obtained in the 15% activated zeolite variation with a value of 30.27% of the value before testing.

Keywords: Porous Concrete; Zeolite; Physical Activation

Abstrak

Beberapa tahun terakhir, populasi di kota dan pinggiran kota telah meningkat secara signifikan, area yang dahulu tertutup oleh tanah dan dapat menyerap air kini tergantikan oleh infrastruktur trotoar, jalan, dan tempat parkir. Beton Poros (PC) merupakan solusi sederhana dan tahan lama yang meniru karakteristik hidrologi alami tanah. Penggunaan semen dapat digantikan dengan metode substitusi zeolit. Berat semen digunakan sebagai faktor dalam pencampuran beton. Dengan mengetahui berat semen, kita dapat menentukan jumlah semen yang dibutuhkan untuk campuran beton, dengan mempertimbangkan berat jenis zeolit sebagai faktor pengganti. Penelitian dilakukan dengan tujuan mendapatkan nilai kuat tekan, porositas, permeabilitas, kehilangan abrasi dari beton poros. Zeolit yang diaktivasi fisik dan tidak diaktivasi fisik berpengaruh terhadap setiap pengujian yang dilakukan dan mendapatkan perbedaan hasil yang signifikan dilihat dari analisis ANOVA (Analysis of Variance). Kekuatan tekan maksimum ditemukan pada variasi zeolit aktivasi 15% pada nilai 10,75 MPa, dan Porositas dan permeabilitas tertinggi terdapat pada variasi substitusi zeolit 20% tidak diaktivasi dengan nilai 12,5%; 0,55(cm/s), nilai abrasi terendah pada pengujian cantabro didapat pada variasi zeolit 15% aktivasi dengan nilai 30,27% dari nilai sebelum pengujian.

Kata kunci: Beton Poros; Zeolit; Aktivasi Fisik

PENDAHULUAN

Sering kali di daerah perkotaan terjadi banjir dikarenakan kurangnya tempat untuk mengalirkan air yang menyebabkan air, beton normal memiliki kekurangan terhadap masalah seperti retak porositas, permeabilitas, dan

kekurangan dalam mengalirkan air, sering kali di daerah perkotaan terjadi banjir dikarenakan kurangnya tempat untuk mengalirkan air sehingga mengganggu siklus alami air (Liu et al., 2023). Beton poros merupakan solusi untuk permasalahan banjir yang sering terjadi

Please cite this article as:

Yudi, A., Yuliyanto, A., Kirtinanda, P., Gerhard, C., & Irawan, E. R. (2024). Pemanfaatan Zeolit dengan Aktivasi Fisik sebagai Bahan Pengganti Semen pada Beton Berpori. *Media Teknik Sipil*, 22(2), 90-97. <https://doi.org/10.22219/jmts.v22i2.34686>

di daerah perkotaan, dengan pori dan nilai permeabilitas yang tinggi dapat membuat air mengalir dengan baik (Faisal et al., 2020). Zeolit merupakan bahan alam yang berbentuk butiran yang lebih ringan dari semen, penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh zeolit dalam substitusi semen pada beton berpori (Iswarya & Beulah, 2021).

Dalam penggunaan zeolit sebagai bahan substitusi semen pada penelitian ini zeolit diaktivasi terlebih dahulu menggunakan aktivasi fisik karena merupakan jenis aktivasi yang dapat memberishkan zat pengotor pada zeolit alam secara lebih baik (Mijailović et al., 2022). Dalam proses aktivasi fisik, zeolit dipanaskan dengan suhu tinggi untuk membersihkan zat pengotor yang terkandung dalam zeolit alam (Matusiak et al., 2023).

Pengujian nilai abrasi pada beton poros merupakan keterbaruan dalam pengujian terhadap beton poros, untuk mendapatkannya dilakukan pengujian cantabro untuk melihat kerusakan dan retak pada beton saat terjadi gesekan (Leon Raj & Chockalingam, 2020). Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk menapai nilai kekuatan tekan yang tinggi, pada beton porous nilai kuat tekan minimum adalah sebesar 10 MPa (Zhang et al., 2021).

Nilai koefisien permeabilitas beton tergantung pada porositas beton. Porositas beton berpori diperlukan untuk mendapatkan nilai penyerapan beton terhadap air yang besar, sehingga beton dapat mengalirkan air, tetapi nilai porositas yang besar membuat nilai kuat tekan pada beton menurun (Ikotun & Ekolu, 2010).

Penelitian terdahulu membandingkan zeolit dalam pengujian kuat tekan permeabilitas atau porositas saja, pada penelitian ini zeolit dibandingkan nilai kehilangan abrasi pada beton dengan sampel campuran yang terkhusus untuk pengujian abrasi (Akkaya & Çağatay, 2021). Penelitian terdahulu menggunakan campuran dari zat aditif untuk menambah nilai kuat tekan dan tidak menggunakan campuran dari zeolit alam (Zhang et al., 2020).

Hasil dari penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk memeriksa fungsi dari zeolit alam yang melimpah sebagai pengganti semen, dan memungkinkan penelitian ini menjadi evaluasi untuk penelitian berikutnya (Milović et al., 2022). Penggunaan zeolit sebagai bahan substitusi semen dapat menjadi referensi dan acuan untuk penelitian

selanjutnya dengan mempertimbangkan aktivasi fisik yang dilakukan dalam penelitian (Serati-Nouri et al., 2020). Komposisi bahan yang digunakan dapat menjadi pedoman dalam pembuatan beton berpori dengan zeolit sebagai pengganti bahan pada semen dengan nilai porositas, permeabilitas, dan kuat tekan pada beton poros (Fynnisa et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian akan dilaksanakan pada Laboratorium Struktur di Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan. Melakukan beberapa studi literatur sebagai pendukung penelitian, terutama yang terkait dengan topik yang dibahas serta persiapan material untuk pembuatan beton, perencanaan campuran, perawatan beton, serta pengujian terhadap beton poros yang dibuat dilakukan pengujian terhadap kuat tekan, porositas, cantabro, dan permeabilitas dengan menggunakan alat yang telah dimodifikasi. Falling water head test merupakan nama pengujian permeabilitas pada penelitian ini dengan cara mengalirkan air diatas permukaan beton dan menghitung kecepatan aliran air yang mengalir.

Penelitian dilakukan dengan variasi yang telah direncanakan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Variasi Penelitian

S	Umur Beton (Hari)	Presentase Zeolit	Jumlah Benda Uji
		0%	3
NA	24	15%	3
		20%	3
		0%	3
Fisika	24	15%	3
		20%	3

Pemeriksaan bahan semen dan zeolite terlihat pada Tabel 2. Kedua bahan ini diperiksa dan dipastikan sudah dalam kondisi optimal sesuai dengan standar yang telah ditetapkan (Elango et al., 2021). Pengujian keausan agregat dilakukan sesuai dengan standar metode pengujian ASTM C 131, dengan keausan agregat maksimum sebesar 45% (Roy et al., 2021).

Pengujian berat jenis semen dan zeolit tersaji pada Tabel 3. Untuk berat jenis zeolit harus lebih kecil nilainya daripada berat jenis semen yang didapat (Martins et al., 2021).

Tabel 1. Properti Agregat Kasar

Keterangan	Nilai	Batas
Bulk Specific Gravity (Berat Jenis Semu)	2,17	2,1-2,5
Kadar Air (%)	0,63%	<0,79%
Berat Volume Gembur	1659,9	>1250
Berat Volume Padar	1739,8	>1250
Keausan Agregat (%)	17,68%	<45%

Tabel 2. Properti Semen dan Zeolit

Keterangan	Nilai	Batas
Berat Jenis Semen	3,153	
Berat Jenis Zeolit Aktivasi	2,163	3,15-3,17
Berat Jenis Semen Zeolit N. Aktivasi	2,2727	

Tabel 4 memperlihatkan proporsi campuran beton untuk pembuatan benda uji yang telah disesuaikan dengan volume cetakan silinder. Dalam penelitian ini, zeolit yang digunakan sudah disubstitusikan dengan semen.

Tabel 4 Kebutuhan Material Benda Uji Silinder

Kebutuhan Material Per 3 Benda Uji Silinder		
Agregat Kasar	31,2	kg
Air	1,755	kg
Semen	7,375	kg
Zeolit	1,205	kg

Tabel 5 menunjukkan kebutuhan material campuran beton untuk *Cantabro Test*. Proporsi material tersebut sudah disesuaikan dengan volume cetakan yang dipakai.

Tabel 5 Kebutuhan Material Cantabro Test

Kebutuhan Material Per 3 Benda 3"15		
Agregat Kasar	6,799977	kg
Air	0,689187	kg
Semen	1,700788	kg
Zeolit	0,205962	kg

Penggunaan zeolit harus melewati tahap aktivasi yang dilakukan kalsinasi terhadap zeolit. Aktivasi zeolit dilakukan untuk menghilangkan zat pengotor yang terkandung didalam zeolit. Untuk proses kalsinasi pada zeolit membutuhkan suhu 300°C dengan waktu pemanasan selama 3 jam untuk mendapatkan hasil yang optimal untuk pemakaian zeolit (Amini et al., 2018).

Berikut merupakan persamaan yang dipakai untuk pengujian kekuatan tekan beton:

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan:

f_c' = kuat tekan silinder beton (MPa atau kg/cm²)

P = beban maksimum sampai beton hancur (kg, N)

A = luas penampang silinder (mm²)

Evaluasi porositas dalam kondisi yang signifikan dapat diterapkan persamaan:

$$n = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \% \quad (2)$$

Keterangan:

n = porositas benda uji

C = berat benda uji jernih air setelah pendidihan (kg)

A = berat kering oven benda uji (kg)

D = berat benda uji dalam air (kg)

Untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas dengan persamaan:

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

Keterangan:

k = koefisien permeabilitas (cm/dtk)

a = luas permukaan alat uji (mm²)

L = tinggi sampel beton (cm)

A = luas permukaan beton (mm²)

T = waktu jatuh air (dtk)

h₁ = tinggi air sebelum pengujian (cm)

h₂ = tinggi air setelah pengujian (cm)

Nilai abrasi yang optimum pada pengujian cantabro maksimal sebesar 7% dari berat awal sebelum pengujian (Elizondo-Martínez et al., 2020). Berikut merupakan

persamaan dari pengujian cantabro yang dipakai pada penelitian ini:

$$\frac{A - B}{A} \times 100 \tag{4}$$

Keterangan:

A = berat awal sampel

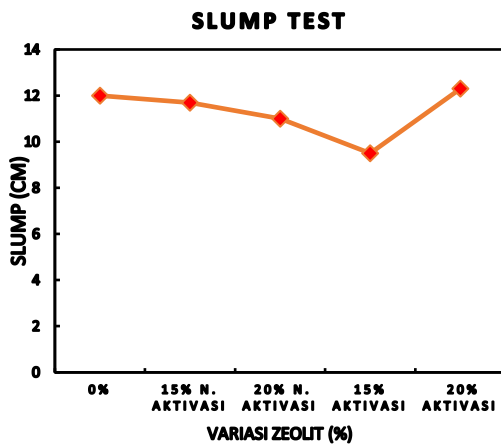
B = berat akhir sampel setelah pengujian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada beton dalam Penelitian ini mencakup pengujian kekuatan tekan beton, porositas beton, koefisien permeabilitas, dan uji cantabro yang dilakukan pada sampel pada umur 24 hari. Untuk pengujian cantabro menggunakan sampel dengan benda uji 5 cm × 10 cm.

Pengujian Slump

Pengujian slump adalah pengujian awal yang dilakukan terhadap beton segar yang baru saja melewati tahap pencampuran (Cox et al., 2017). Berikut ialah hasil slump test yang didapatkan:

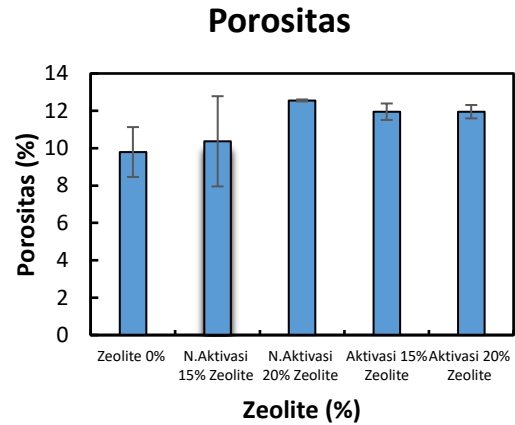


Gambar 1 Hasil Pengujian Slump

Hasil dari pengujian berbanding terbalik dimana semakin rendah nilai slump yang didapat, nilai kuat tekan pada penelitian ini semakin besar dikarenakan hasil keruntuhan yang terjadi tidaklah besar dan membuat kekuatan tekan beton makin besar.

Pengujian Porositas Beton

Pengujian porositas dilakukan sebelum pengujian kuat tekan. Gambar 2 merupakan tabel hasil pengujian porositas yang didapat.



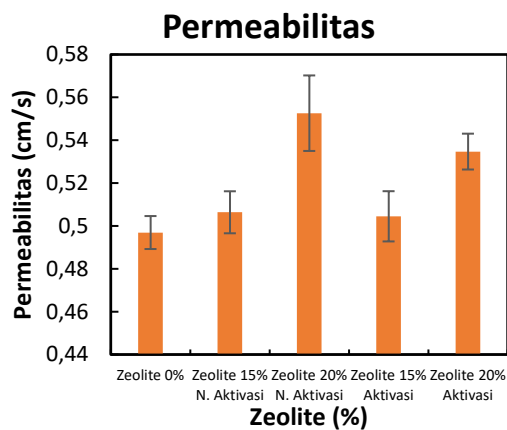
Gambar 2 Hubungan Nilai Porositas dan Variasi Zeolit

Berdasarkan Gambar 2 variasi non aktivasi zeolit 20% mendapat kan nilai porositas terbesar, dan variasi beton poros normal atau zeolit 0% mendapatkan nilai porositas terkecil. Zeolit memiliki pengaruh terhadap nilai porositas beton. Pori terbentuk karena proses hidrasi dan penguapan yang terjadi pada beton (Li et al., 2021). Beton non aktivasi cenderung memiliki nilai porositas yang terbesar dikarenakan zeolit yang belum diaktivasi kurang bagus dalam mengikat material dalam beton sehingga menimbulkan banyaknya lubang pada beton, selain itu beton poros normal atau zeolite 0% memiliki nilai porositas yang lebih kecil. Nilai porositas beton berpengaruh terhadap nilai kekuatan tekan beton karena semakin tinggi porositasnya, nilai kekuatan tekan beton cenderung lebih rendah. Hal ini juga menjadikan beton dapat mengalirkan air dengan cepat dikarenakan adanya lubang poros pada beton.

Pengujian Permeabilitas Beton

Pengujian permeabilitas dilakukan terlebih dahulu sebelum pengujian kuat tekan. Berdasarkan Gambar 3, yang menunjukkan hasil pengujian permeabilitas terhadap variasi zeolit pada beton poros, nilai permeabilitas yang terbesar adalah zeolit 20% non aktivasi dengan nilai koefisien 0,552 cm/s dan nilai permeabilitas terkecil yaitu beton poros normal atau zeolit 0% dengan nilai permeabilitas 0,49%. Hal ini disebabkan zeolit membuat pori dalam beton yang membuat air dapat mengalir lebih cepat dibandingkan dengan pori yang lebih sedikit pada beton. Permeabilitas juga berbanding

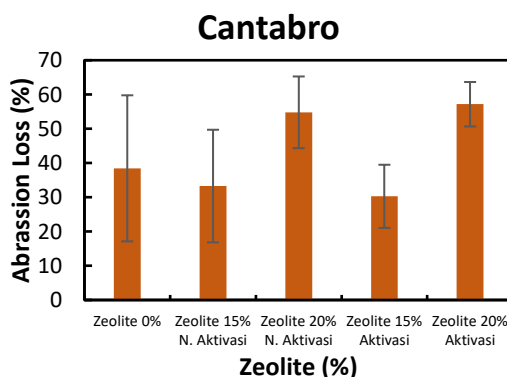
lurus terhadap nilai porositas beton dimana semakin tinggi nilai permeabilitas semakin tinggi juga porositas yang dihasilkan akan tetapi beton yang memiliki permeabilitas tinggi dapat mengurangi nilai kekuatan tekan. Beton berpori ini berfungsi baik untuk mengalirkan air (Pereira et al., 2021). Tingkat permeabilitas yang tinggi menunjukkan adanya lebih banyak rongga atau pori dalam beton, yang pada gilirannya mengurangi kepadatan beton.



Gambar 3 Hasil Pengujian Permeabilitas

Pengujian Cantabro

Pengujian cantabro dilakukan dengan menggunakan ukuran sampel yang berbeda dari pengujian porositas, permeabilitas, dan kuat tekan. Berikut merupakan grafik hasil pengujian cantabro terhadap variasi zeolit yang telah dilakukan:



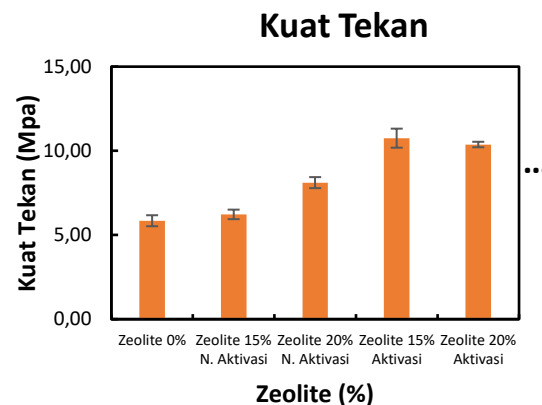
Gambar 4 Hubungan Nilai Abrasi dengan Variasi Zeolit

Pada Gambar 4 didapatkan nilai abrasi terbesar terdapat pada variasi zeolit 20% non aktivasi sebesar 54,797% dan nilai abrasi terkecil didapat pada variasi zeolit 15%

aktivasi dengan nilai abrasi sebesar 30,272%. Pada pengujian kali ini tidak ada yang mencapai nilai maksimal abrasi 7% pada pengujian cantabro, kejadian ini dikarenakan oleh sifat beton yang getas menyebabkan beton hancur dalam pengujian ini ditambah dengan pengujian cantabro pada beton poros yang memiliki pori pada beton yang membuat beton dapat dengan mudah hancur pada saat pengujian, sehingga beton pada penelitian ini tidak cocok untuk pengujian cantabro, dan pada pengaplikasian beton ini hanya disarankan untuk pembuatan trotoar pejalan kaki dikarenakan memiliki nilai abrasi yang besar. Pengujian cantabro hanya mencakup pengujian terhadap aspal dan pengujian cantabro pada beton tidak dapat bekerja dengan baik sesuai pengujian yang diinginkan.

Pengujian Kuat Tekan Beton

Beton poros pada penelitian ini memiliki kegunaan untuk pejalan kaki sehingga kekuatan tekan beton dari variasi zeolit tidak mencapai sebesar kekuatan beton normal. Berikut adalah grafik hasil pengujian kekuatan tekan terhadap variasi zeolit:



Gambar 5 Hubungan Nilai Kuat Tekan dengan Variasi Zeolit

Pada Gambar 5 didapatkan nilai kuat tekan terbesar pada variasi zeolite aktivasi 15% dengan nilai kuat tekan 10,75 Mpa dan nilai kuat tekan terkecil terdapat pada beton poros normal atau variasi 0% dengan nilai kuat tekan 5,85 Mpa. Pada pengujian kuat tekan dapat diketahui nilai optimum untuk variasi zeolit 15% aktivasi, hal ini dikarenakan zeolit dapat mengikat material dalam campuran beton dan membuat porositas terdapat beton menjadi menurun dan

meningkatkan kuat tekan, zeolit aktivasi dengan variasi 15% juga dapat mengalirkan air dengan baik karena memiliki nilai permeabilitas yang bisa mengalirkan air (Schumacher et al., 2020). Zeolit yang dilakukan aktivasi dengan yang tidak dilakukan aktivasi memiliki perbedaan terhadap nilai kuat tekan dikarenakan zeolit yang sudah diaktivasi dapat mengikat material pada beton dengan baik dari zeolit yang tidak diaktivasi. Dalam hal ini aktivasi fisika berpengaruh pada nilai dari setiap pengujian yang dilakukan terhadap beton porous.

ANOVA (Analysis of Variance)

Strategi terukur yang disebut pengujian fluktuasi (ANOVA) adalah teknik penyelidikan faktual yang digunakan untuk melihat proses setidaknya pada tiga kelompok atau obat yang berbeda. Hal ini memungkinkan kita untuk mencapai kesimpulan berdasarkan informasi faktual yang dapat disimpulkan. Estimasi uji terukur khususnya F hitung dan F tabel diperlukan dalam eksplorasi ANOVA untuk menentukan ada atau tidaknya kelompok uji. Spekulasi dapat dimanfaatkan untuk mendiskreditkan H_0 dan memberikan bukti adanya teori elektif (H_1 : Bukan H_0) (Teymouri et al., 2023). Untuk menentukan H_0 , Anda harus melihat contoh ukuran kumpulan responden/tes/anggota dan mencatat kualitas tunggalnya (variabel bawahan). Kemudian lihat apakah aspek-aspek di atas bersifat unik, artinya berlaku pada keadaan yang berbeda. Dengan asumsi keduanya unik, Anda akan diminta memilih H_0 . Terlepas dari pengujian terukur lainnya, kami membatasi H_0 ketika kami melihat pengukuran pengujian yang dinilai menggunakan perhitungan F dan melampaui F tabel dengan tingkat kepastian yang signifikan.

Tabel 6 Hasil Data Sesuai Data Statistik

Source of Variation	SS	df	F	P-value	F crit
Between Groups	62,0	4	121	$2,005 \times 10^{-8}$	3,5
Within Groups	1,3	10			
Total	63,3	14			

Data yang didapat pada Tabel 6 terdapat perbedaan nilai kuat tekan yang signifikan oleh zeolit dengan aktivasi fisika dan tidak diaktivasi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai f-value sebesar 121 yang berarti variasi antar kelompok melebihi dari nilai variasi dalam kelompok. Untuk p-value nilai yang didapat sebesar $2,005 \times 10^{-8}$ yang berarti nilai tersebut kurang dari standar signifikansi sebesar 0,05. Pada nilai f-crit sebesar 3,47805 lebih kecil dari nilai f-value yang berarti analisis ANOVA pada penelitian ini memiliki perbedaan antar campuran yang dianggap signifikan.

KESIMPULAN

Penggunaan variasi zeolit dapat meningkatkan nilai kuat tekan pada beton, namun pada penggunaan zeolit aktivasi 20% sudah mengalami penurunan kuat tekan dikarenakan campuran zeolit membuat nilai workability pada beton menurun dan Zeolit memengaruhi kekuatan tekan beton. Dalam pengujian porositas, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak campuran zeolit dalam beton, semakin tinggi nilai porositas yang dihasilkan oleh beton tersebut.

Penggunaan zeolit yang diaktivasi fisika dengan tidak diaktivasi fisika memperoleh perbedaan hasil yaitu pada pengujian kuat tekan zeolit yang diaktivasi fisika memiliki nilai kuat tekan terbesar yaitu 10,75 MP, hal ini dikarenakan aktivasi fisika membuat zeolit melepaskan zat-zat kotor pada zeolit sehingga fungsi zeolit sebagai pengikat bahan pada campuran beton mejadi lebih meningkat. Penggunaan zeolit yang tidak diaktivasi tidak dapat mengikat bahan campuran beton dengan baik sehingga menimbulkan pori yang lebih banyak pada beton.

Penggunaan zeolit yang diaktivasi fisika menghilangkan zat pengotor pada zeolit sehingga menambah nilai kerja pada zeolit yang berperan dalam mengikat material dalam campuran beton sehingga nilai kuat tekan bertambah. Penggunaan zeolit yang tidak diaktivasi masih memiliki zat pengotor didalam kandungannya sehingga fungsi kerja zeolit sebagai bahan pengikat material tidak bekerja dengan baik dan membuat porous pada beton meningkat.

Penggunaan zeolit sebagai bahan substitusi semen berpengaruh terhadap nilai permeabilitas beton porous, yaitu dengan

presentase 0%, 15%, 20% dengan aktivasi maupun tidak diaktivasi dapat mempengaruhi nilai koefisien permeabilitas beton. Pada pengujian permeabilitas didapat nilai koefisien permeabilitas naik secara linear terhadap besar variasi zeolit yang pakai. Aktivasi fisika juga mempengaruhi nilai koefisien permeabilitas, karena nilai koefisien permeabilitas zeolit dengan aktivasi fisika lebih besar dari zeolit yang tidak diaktivasi fisika sehingga penggunaan zeolit yang diaktivasi lebih baik dari yang tidak diaktivasi fisika.

Penggunaan zeolit pada pengujian cantabro menghasilkan nilai kehilangan abrasi yang tidak signifikan, didapatkan hasil abrasi pada pengujian ini adalah 38,4% pada sampel kontrol, 33,2% dan 54,79% pada zeolit yang tidak diaktivasi fisika, dan 30,2%, 57% pada zeolit yang diaktivasi fisika. Hasil dari pengujian ini jauh dari standar yang harus didapatkan pada pengujian cantabro, mengacu pada standar pengujian, maksimal abrasi yang didapatkan harus lebih kecil dari 7% nilai abrasi pada sampel benda uji, dan dari penelitian ini mendapatkan nilai yang jauh dari standar pengujian. Dapat disimpulkan bahan sampel pada penelitian ini tidak memiliki nilai kerusakan butir yang bagus dikarenakan nilai abrasi pada penelitian ini yang cukup besar.

Untuk penelitian selanjutnya diharapkan agar pengkajian terhadap campuran beton yang dipakau agar mendapat kualitas beton yang lebih baik, dan menggunakan bahan tambah seperti zat aditif agar mendapat hasil dari pengujian beton lebih baik, diharapkan juga pada penelitian selanjutnya menambahkan umur beton yang lebih lama untuk mendapatkan nilai pengujian yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Akkaya, A., & Çağatay, İ. H. (2021). Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods. *Construction and Building Materials*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123539>
- Amini, K., Wang, X., & Delatte, N. (2018). Statistical Modeling of Hydraulic and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Nondestructive Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002268](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002268)
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L., & James, R. S. (2017). State of Knowledge for Cantabro Testing of Dense Graded Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002020](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002020)
- Elango, K. S., Gopi, R., Saravanakumar, R., Rajeshkumar, V., Vivek, D., & Raman, S. V. (2021). Properties of pervious concrete - A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>
- Elizondo-Martínez, E. J., Andrés-Valeri, V. C., Jato-Espino, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2020). Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 27). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100967>
- Faisal, G. H., Jaeel, A. J., & Al-Gasham, T. S. (2020). BOD and COD reduction using porous concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00396>
- Fynnisa, Z., Frida, E., Susilawati, Bukit, N., & Zebua, H. M. (2023). The effect of pressure strength of porous concrete on the addition of natural pahae zeolite as a partial replacement of cement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2672(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2672/1/012014>
- Ikotun, B. D., & Ekolu, S. (2010). Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24(5). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.033>
- Iswarya, G., & Beulah, M. (2021). Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete - A review. *Materials Today: Proceedings*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.329>
- Leon Raj, J., & Chockalingam, T. (2020). Strength and abrasion characteristics of

- pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8).
<https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1596828>
- Li, Y., Mu, J., Wang, Z., Liu, Y., & Du, H. (2021). Numerical simulation on slump test of fresh concrete based on lattice Boltzmann method. *Cement and Concrete Composites*, 122.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104136>
- Liu, C., Xia, Y., Chen, J., Huang, K., Wang, J., Wang, C., Huang, Z., Wang, X., Rao, C., & Shi, M. (2023). Research and Application Progress of Vegetation Porous Concrete. In *Materials* (Vol. 16, Issue 21).
<https://doi.org/10.3390/ma16217039>
- Martins, J. V., Garcia, D. C. S., Aguilar, M. T. P., & Santos, W. J. (2021). Influence' study of heterogeneity on concrete sludge waste used as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 303.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124519>
- Matusiak, J., Przekora, A., & Franus, W. (2023). Zeolites and zeolite imidazolate frameworks on a quest to obtain the ideal biomaterial for biomedical applications: A review. In *Materials Today* (Vol. 67).
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.06.008>
- Mijailović, N. R., Nedić Vasiljević, B., Ranković, M., Milanović, V., & Uskoković-Marković, S. (2022). Environmental and Pharmacokinetic Aspects of Zeolite/Pharmaceuticals Systems—Two Facets of Adsorption Ability. In *Catalysts* (Vol. 12, Issue 8).
<https://doi.org/10.3390/catal12080837>
- Milović, T., Šupić, S., Malešev, M., & Radonjanin, V. (2022). The Effects of Natural Zeolite as Fly Ash Alternative on Frost Resistance and Shrinkage of Blended Cement Mortars. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/su14052736>
- Pereira, M., Carbajo, J., Godinho, L., Ramis, J., & Amado-Mendes, P. (2021). Improving the sound absorption behaviour of porous concrete using embedded resonant structures. *Journal of Building Engineering*, 35.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102015>
- Roy, N., Sarkar, S., Kuna, K. K., & Ghosh, S. K. (2021). Effect of coarse aggregate mineralogy on micro-texture deterioration and polished stone value. *Construction and Building Materials*, 296.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123716>
- Schumacher, K., Saßmannshausen, N., Pritzel, C., & Trettin, R. (2020). Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density. *Construction and Building Materials*, 264.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120167>
- Serati-Nouri, H., Jafari, A., Roshangar, L., Dadashpour, M., Pilehvar-Soltanahmadi, Y., & Zarghami, N. (2020). Biomedical applications of zeolite-based materials: A review. In *Materials Science and Engineering C* (Vol. 116).
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111225>
- Teymouri, E., Wong, K. S., Tan, Y. Y., & Pauzi, N. N. M. (2023). Mechanical behaviour of adsorbent pervious concrete using iron slag and zeolite as coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 388.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131720>
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., & Du, H. (2020). Laboratorial investigation on sound absorption property of porous concrete with different mixtures. *Construction and Building Materials*, 259.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120414>
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., Yang, J., & Wang, H. (2021). Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. *Construction and Building Materials*, 266.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121074>