

Pengaruh Gradasi Pasir Terhadap Kekuatan Tekan dan Penyerapan Paving Blok Geopolimer

Sandri L. Sengkey^{1*}, Geertje E. Kandiyoh², Stefani S. Peginusa³, Dwars Soukotta⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Manado

*Koresponden email: sandri.sengkey@polimdo.ac.id

Diterima: 13 Februari 2024

Disetujui: 25 Februari 2024

Abstract

The quality of paving blocks is greatly influenced by many factors, one of which is sand as the constituent material. Sand has various types and different gradations based on grain size distribution. This difference in sand gradation is the focus of research to determine the effect of sand gradation on the compressive strength and absorption of geopolymer paving blocks made from fly ash. The geopolymer block paving mixture is made with a composition of 10M NaOH, a Na₂SiO₃/NaOH ratio of 2.5, an alkali activator/FA solution ratio of 0.4 and curing at ambient temperature. The test results show the influence of sand gradation on compressive strength and absorption. The highest compressive strength and lowest absorption values were obtained in the Z3-BP and Z2-AB mixtures. There is a relationship between compressive strength and absorption. The smaller the paving absorption value, the greater the compressive strength.

Keywords: *geopolymer, fly ash, compressive strength, gradation, absorption*

Abstrak

Kualitas paving blok sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya pasir sebagai material penyusunnya. Pasir memiliki jenis yang beragam dan gradasi yang berbeda berdasarkan distribusi ukuran butir. Perbedaan gradasi pasir ini yang menjadi fokus penelitian dengan tujuan mengetahui pengaruh gradasi pasir terhadap kekuatan tekan dan penyerapan dari paving blok geopolimer berbahan fly ash. Campuran paving blok geopolimer dibuat dengan komposisi NaOH 10M, rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2.5, rasio larutan alkali activator/FA sebesar 0.4 serta curing pada temperatur ambient. Hasil pengujian menunjukkan adanya pengaruh gradasi pasir terhadap kuat tekan dan penyerapan. Nilai kekuatan tekan tertinggi dan penyerapan terendah diperoleh pada campuran Z3-BP dan Z2-AB. Ada hubungan antara kuat tekan dengan penyerapan. Semakin kecil nilai penyerapan paving, makin besar kekuatan tekannya.

Kata kunci: *geopolimer, fly ash, kuat tekan, gradasi, penyerapan*

1. Pendahuluan

Produksi semen portland untuk memenuhi kebutuhan pembangunan suatu konstruksi, ternyata memberi dampak meningkatnya emisi CO₂ yang dilepaskan. Kondisi ini menjadi salah satu faktor penyebab pemanasan global. Upaya-upaya dilakukan untuk mengurangi emisi CO₂ yang dikeluarkan oleh semen portland, salah satunya mencari alternatif bahan pengikat lain. Semen geopolimer menjadi salah satu bahan pengganti semen Portland, yang lebih ramah lingkungan. Selain emisi CO₂ yang dilepaskan ke udara lebih sedikit dibandingkan semen Portland, bahan dasar geopolimer dapat menggunakan bahan-bahan limbah seperti fly ash yang merupakan sisa produksi batu bara. Potensi pengikat geopolimer dalam menghasilkan produk beton cukup besar, karena ketersediaan fly ash sebagai bahan dasar yang banyak. Berdasarkan data, pada tahun 2019 limbah fly ash yang dihasilkan dari produk batubara sekitar 9.7 juta ton dan diperkirakan dapat mencapai 15.3 juta ton pada tahun 2028 [1]. Melimpahnya fly ash ini perlu dimanfaatkan secara maksimal. Dengan memanfaatkan kembali fly ash, selain dapat mengurangi limbah yang membebani lingkungan, juga dapat mengurangi pemakaian sumber daya alam.

Pembuatan paving blok geopolimer dengan menggunakan fly ash, merupakan salah satu usaha yang dapat dilakukan. Paving blok sebagai produk turunan beton banyak dimanfaatkan sebagai material untuk infrastruktur jalan baik jalan umum, tempat parkir kendaraan, trotoar maupun jalan taman. Kualitas paving blok sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain material-material penyusunnya. Pasir sebagai salah satu bahan penyusun paving, dikenal memiliki jenis yang beragam jika ditinjau dari lokasi pengambilan pasir (quarry) antara lain pasir sungai, pasir pantai, pasir gunung. Selain itu juga memiliki

gradasi yang berbeda ditinjau dari distribusi ukuran butirannya yang terlihat dari nilai modulus kehalusan pasir. Penggunaan agregat khususnya pasir yang cukup banyak dalam pembuatan produk beton, tentunya dapat memberi pengaruh terhadap kinerja beton yang dihasilkan.

Penelitian-penelitian mengenai pembuatan paving blok geopolymer telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya [2 – 5]. Penelitian tentang kinerja kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, kekuatan lentur dan ketahanan terhadap abrasi dari paving blok geopolimer berbahan dasar fly ash dan ground granulated blast furnace slag (GGBFS), serta larutan NaOH dan Na₂SiO₃ sebagai alkali activator dan pasir sungai sebagai agregat halus [2] melaporkan bahwa paving blok dapat diaplikasikan pada lalulintas ringan sampai medium jika ditinjau dari kekuatan tekannya dan pada lalulintas padat/berat atau industri jika ditinjau dari kekuatan lenturnya.

Penelitian tentang kinerja material geopolimer sebagai perkerasan kaku dengan kombinasi fly ash dan GGBFS sebagai bahan dasar, pasir sungai zone 3 dan batu pecah ukuran < 20 mm dengan aktivator berupa kombinasi NaOH dan Na₂SiO₃. Metode curing dilakukan pada temperatur ambient. Campuran dibuat dengan variasi konsentrasi NaOH sebesar 10M, 12M, 14M dan kandungan GGBFS sebesar 20%, 25%, 28% dan 33% dari berat binder, kemudian dilakukan pengujian kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, kekuatan lentur dan ketahanan terhadap abrasi. Ditemukan bahwa setelah meningkatkan konsentrasi aktivator dan jumlah kandungan GGBFS, kinerja kekuatan dan daya tahan beton meningkat secara signifikan namun, peningkatan konsentrasi aktivator lebih dari 12M dan kandungan GGBFS di atas 28% tidak terlalu signifikan [4].

Penelitian tentang komposisi paving blok geopolimer menggunakan rasio NaOH/Na₂SiO₃ yang berbeda dan divariasikan dengan fly ash [6] menunjukkan bahwa kinerja yang optimal diprediksi untuk kisaran rasio NaOH/Na₂SiO₃ 0,4 hingga 0,67 pada umur 28 hari. Kekerasan sampel paving blok geopolimer meningkat dengan cepat dengan menggunakan konsentrasi NaOH yang cukup tinggi dalam aktivator menyebabkan peningkatan kuat tekan paving block cukup signifikan.

Penelitian lain terkait paving blok geopolimer dengan mengganti agregat halus dengan bahan lain pada pembuatan bata dan paving geopolimer, dengan memanfaatkan quarry dust sebagai pengganti sebagian pasir dan kombinasi fly ash-GGBFS sebagai bahan binder [7]. Penelitian lain berupa studi kelayakan bahan konstruksi berkelanjutan untuk pembuatan paving beton yaitu limbah pengecoran pasir sebagai agregat halus [8].

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, agregat halus yang digunakan dalam pembuatan paving blok geopolimer adalah pasir alami atau kombinasi bahan substitusi pasir, dan masih sedikit yang meninjau dari segi variasi gradasi pasir. Untuk itu pada penelitian ini, pengaruh gradasi pasir terhadap kekuatan tekan dan penyerapan paving geopolymer berbahan dasar fly ash, menjadi fokus investigasi.

2. Metode Penelitian

Bahan dasar Fly Ash berasal dari PLTU Amurang, yang mempunyai komposisi kimia seperti diperlihatkan pada **Tabel 1** berdasarkan hasil analisa X-Ray Fluorescence (XRF).

Tabel 1. Komposisi Kimia Fly Ash

Unsur Kimia	% berat
SiO ₂	36.86
Al ₂ O ₃	8.19
Fe ₂ O ₃	34.65
CaO	14.23
K ₂ O	0.77
SO ₃	3.06
TiO ₂	0.98
SrO	0.26
MnO	0.63
BaO	0.18

Tabel 2 kandungan kimia Pozzolan (ASTM C 618-19)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Silicon dioxide</i> (SiO ₂) plus <i>aluminium oxide</i> (Al ₂ O ₃) plus <i>iron</i>	70	50	50

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>oxide</i> (Fe ₂ O ₃), min, %			
<i>Calcium Oxide</i> (CaO), %	<i>Report</i>	18	>18
<i>Sulfur trioxide</i> (SO ₃), maks, %	<i>only</i> 4.0	max 5.0	5.0
<i>Moisture</i> , maks, %	3.0	3.0	3.0
<i>Loss on ignition</i> (LOI), maks, %	10.0	6.0	6.0

Hasil Analisa XRF ini kemudian dibandingkan dengan standar ASTM C 618-19 [9] yang membagi pozzolan dalam tiga kategori yaitu kelas N, kelas F dan kelas C seperti diperlihatkan pada **Tabel 2**. Terlihat bahwa FA yang digunakan dalam penelitian ini masuk pada kelas F karena jumlah senyawa SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ = 79,7% > 50% dan kadar CaO sebesar 14,23% < 18%.

Pasir diambil dari beberapa quarry yang tersebar di Sulawesi Utara yaitu Tendeki, Amurang dan Bitung. Pasir Tendeki dan pasir Bitung merupakan jenis pasir gunung, sedangkan pasir Amurang termasuk jenis pasir sungai. Hasil pemeriksaan karakteristik fisik pasir meliputi uji berat jenis dan penyerapan, berat isi, kadar lumpur, kadar organik dan analisa ayakan ditunjukkan pada **Tabel 3**. Abu batu diambil dari Tateli dan batu pecah 5-10 mm dari Kema.

Tabel III. Hasil Pemeriksaan Karakteristik fisik Pasir

NO.	JENIS PEMERIKSAAN	QUARRY PASIR		
		TENDEKI	AMURANG	BITUNG
1	Berat jenis:			
	- Berat Jenis bulk/ov.	2.253	2.408	2.099
	- Berat Jenis ssd	2.357	2.491	2.288
	- Berat Jenis app.	2.514	2.625	2.586
2	Penyerapan (%)	4.614	3.432	8.976
3	Berat Isi Agregat (kg/dm ³)	1.303	1.388	1.290
4	Kadar Lumpur (%)	1.760	1.387	1.310
5	Kadar Organik	No. 1	No. 1	No. 1
6	Modulus Kehalusan	3.209	2.562	2.392

Larutan alkali activator yang digunakan adalah kombinasi sodium hidroksida (NaOH) bentuk flake dan sodium silikat (Na₂SiO₃) dengan kandungan Na₂O 16,2%, SiO₂ 37,26% dan H₂O 46,54%. NaOH digunakan untuk mereaksikan unsur-unsur silika dan alumina yang ada dalam fly ash sedangkan Na₂SiO₃ sebagai katalisator yaitu mempercepat terjadinya proses polimerisasi.

Paving blok geopolimer dibuat menggunakan NaOH dengan molaritas 10 M, rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2,5, rasio larutan alkali activator/FA sebesar 0,4, dengan komposisi bahan untuk 1m³ yaitu fly ash = 430 kg, pasir = 1200 kg, batu pecah = 600 kg, NaOH = 50 kg, air untuk melarutkan NaOH = 123 kg, dan Na₂SiO₃ = 123 kg. Disain campuran paving geopolimer dilakukan dengan mengambil asumsi kepadatan beton sebesar 2400 kg/m³ [2], selanjutnya dibuat perbandingan antara binder, pasir, batu pecah dan binder, pasir, abu batu sebesar 1:2:1. Enam variasi campuran dibuat berupa gradasi pasir zone 1, zona 2 dan zona 3 pada kombinasi pasir dengan batu pecah ukuran 5-10 mm (Z1-BP, Z2-BP, Z3-BP) dan kombinasi pasir dengan abu batu (Z1-AB, Z2-AB, Z3-AB).

Proses pembuatan paving blok diawali dengan penyiapan bahan. Larutan NaOH disiapkan lebih dahulu (sehari sebelumnya) dengan cara melarutkan dengan air sesuai molaritas yang akan dibuat. Larutan aktivator kemudian dibuat dengan mencampurkan NaOH dengan Na₂SiO₃ sesuai dengan perbandingan yang sudah ditentukan yaitu 2,5. Selanjutnya proses pencampuran dilakukan dengan memasukkan semua bahan kering yaitu fly ash, pasir dan batu pecah ke dalam mixer kemudian dicampur sampai merata lalu tambahkan larutan alkali aktivator sambil terus diaduk. Terakhir masukkan air tambahan lalu diaduk dengan mixer selama 5 menit sampai menjadi homogen. Adukan kemudian dicetak memakai mesin dengan ukuran 21 cm x 10 cm x 8 cm. Pembuatan dan pencetakan paving blok geopolimer dilakukan di industri paving blok dengan menggunakan alat cetak paving blok hidrolik seperti

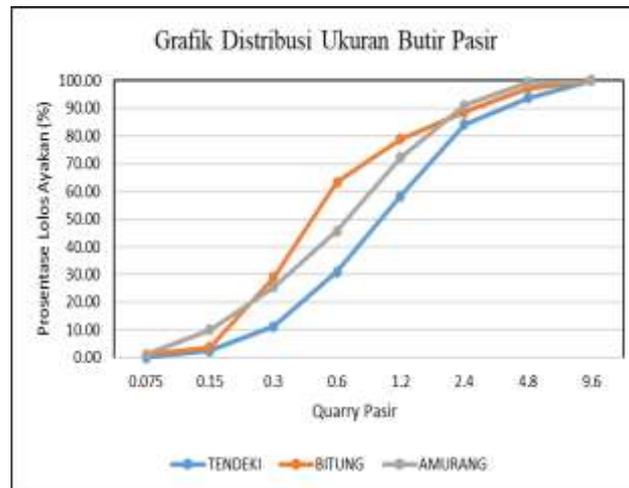
pada **Gambar 1**. Setelah selesai dicetak, paving blok di letakkan di lokasi pencetakan pada temperatur ambien selama 24 jam, kemudian dipindahkan di laboratorium untuk perawatan lanjutan dalam suhu ruangan sampai umur pengujian 7 dan 28 hari. Pemilihan metode curing pada temperatur ambien dilakukan, agar mudah diaplikasikan di lapangan. Setelah mencapai umur uji, dilakukan pengujian paving blok geopolimer mengacu pada SNI-03-0691-1996 [10] meliputi uji kekuatan tekan pada umur 7 dan 28 hari dan uji penyerapan pada umur 28 hari. Hasil pengujian adalah nilai rata-rata dari 3 buah sampel.



Gambar 1. Pembuatan dan pencetakan paving blok geopolimer dengan mesin cetak paving

3. Hasil dan Pembahasan

A. Gradasi Pasir

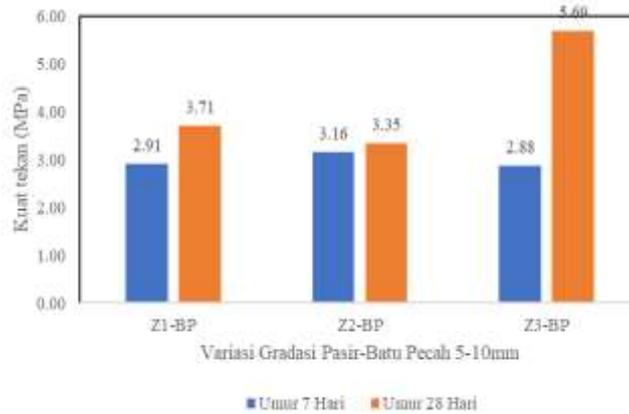


Gambar 2. Distribusi Ukuran Butir Pasir

Berdasarkan hasil analisa ayakan yang disajikan dalam **Gambar 2** menunjukkan bahwa pasir Tendeke masuk pada daerah zona 1 yang dikategorikan gradasi pasir kasar, pasir Amurang pada zona 2 atau gradasi sedang/agak kasar dan pasir Bitung pada zona 3 tergolong agak halus dengan modulus kehalusan masing-masing pasir sebesar 3.209, 2.562 dan 2.392 seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

B. Kekuatan Tekan

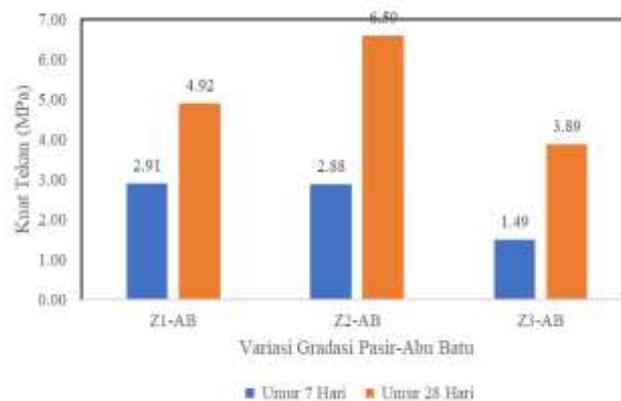
Hasil pengujian kuat tekan paving blok geopolimer dengan kombinasi variasi gradasi zona pasir - batu pecah ditunjukkan pada **Gambar 3** dan kombinasi variasi gradasi zona pasir – abu batu pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Kekuatan Tekan Paving Pada Kombinasi Variasi Gradasi Zona Pasir – Batu Pecah

Pada **Gambar 3** dapat dilihat bahwa kekuatan tekan tertinggi pada umur 28 hari dicapai pada kombinasi gradasi pasir zona 3 dengan batu pecah (Z3-BP) sebesar 5,69 MPa, sedangkan Z1-BP dan Z2-BP menunjukkan kekuatan yang hampir sama yaitu 3,71 MPa dan 3,35 MPa. Hasil kuat tekan pada Z3-BP menunjukkan kombinasi yang memberikan sifat interlocking yang kuat. Rongga-rongga antar butir batu pecah 5-10 mm, dapat diisi oleh pasir zona 3 yang masuk kategori agak halus, sehingga ukuran rongga semakin kecil, campuran paving semakin padat, yang memberi pengaruh pada meningkatnya nilai kuat tekan paving.

Hal lain yang dapat dilihat dari **Gambar 3**, bahwa peningkatan kekuatan tekan dari umur 7 hari ke 28 hari berjalan sangat lambat. Hal ini sesuai dengan hasil-hasil penelitian tentang geopolimer yang menyatakan bahwa peningkatan kekuatan campuran geopolimer yang menggunakan fly ash tipe F lebih lambat dibandingkan fly ash tipe C jika menggunakan metode curing pada temperatur ambien [11, 12] Hal ini karena proses geopolimerisasi berjalan sangat lambat. Hasil sebaliknya jika menggunakan metode curing pada temperatur yang lebih tinggi sekitar 60°C [13-15].



Gambar 4. Kekuatan Tekan Paving Pada Kombinasi Pasir – Abu Batu

Hasil kekuatan tekan pada kombinasi gradasi pasir zona 2 dengan abu batu (Z2-AB) pada **Gambar 4** memperlihatkan nilai tertinggi sebesar 6.59 MPa pada umur 28 hari, sedangkan kombinasi Z1-AB dan Z3-AB berturut-turut sebesar 4.92 MPa dan 3.89 MPa. Hasil ini menggambarkan bahwa kombinasi Z2-AB memberikan sifat interlocking yang lebih kuat yang membuat ukuran rongga semakin kecil dan berdampak pada meningkatnya kekuatan tekan.

Perilaku yang sama seperti pada **Gambar 3** dapat dilihat pada **Gambar 4** yaitu lambatnya peningkatan kekuatan tekan dari umur 7 hari ke 28 hari. Selain itu juga rendahnya nilai kuat tekan yang dihasilkan. Salah satu faktor penyebabnya adalah metode curing yang dilakukan. Hasil-hasil penelitian tentang metode curing [11, 12, 16] melaporkan bahwa curing secara konvensional pada temperatur ambien menunjukkan pengembangan kekuatan yang rendah sementara curing pada temperatur lebih tinggi, menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan.

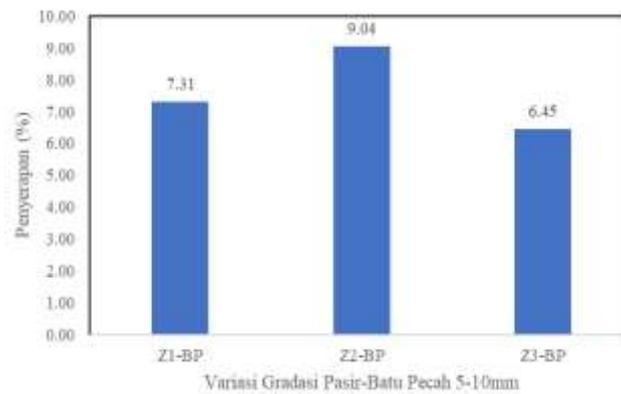
Nilai Kekuatan tekan pada kombinasi gradasi zona pasir dengan batu pecah yang disajikan pada **Gambar 3** dan kombinasi gradasi zona pasir dengan abu batu yang diperlihatkan pada **Gambar 4**,

menunjukkan adanya pengaruh gradasi pasir terhadap kekuatan tekan paving blok geopolimer. Pada kombinasi Z3-AB, pasir zona 3 yang menunjukkan pasir agak halus dapat mengisi rongga-rongga antara batu pecah sehingga menghasilkan campuran yang memiliki kepadatan yang tinggi dengan rongga yang kecil, yang memberi dampak pada kekuatan tekan yang lebih tinggi. Pada kombinasi Z2-AB, pasir zona 2 yang menunjukkan pasir agak kasar ketika dikombinasikan dengan abu batu, memberikan tingkat kepadatan yang baik pada campuran paving yang ditunjukkan melalui nilai kekuatan tekan.

C. Penyerapan

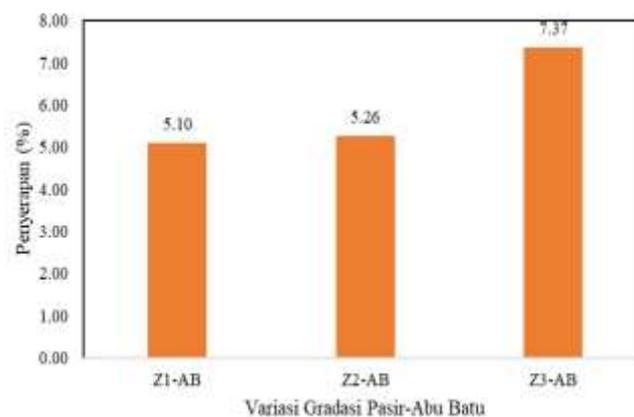
Penyerapan menggambarkan kemampuan sampel paving menyerap air atau banyaknya air yang dapat terserap oleh paving. Kemampuan menyerap air ini berkaitan erat dengan ruang kosong (pori) yang ada paving.

Hasil pengujian penyerapan paving blok geopolimer dengan kombinasi variasi gradasi zona pasir - batu pecah ditunjukkan pada **Gambar 5** dan kombinasi variasi gradasi zona pasir – abu batu pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Penyerapan Paving Pada Kombinasi Pasir – Batu Pecah

Pada **Gambar 5** dapat dilihat bahwa nilai penyerapan paving blok geopolimer terendah dicapai pada kombinasi gradasi pasir zona 3 dengan batu pecah (Z3-BP) sebesar 6.45%, sedangkan penyerapan tertinggi pada Z2-BP sebesar 9.04% diikuti Z1-BP sebesar 7.31%. Besar kecilnya nilai penyerapan paving blok dapat memberi gambaran mengenai besar kecilnya volume pori yang ada dalam sampel paving blok tersebut. Semakin besar nilai penyerapan menunjukkan semakin besar volume pori yang mampu diisi oleh air, dan sebaliknya. Selain itu, nilai penyerapan juga dapat memberi gambaran tentang padat tidaknya suatu sampel. Semakin padat sampel akan memberikan nilai penyerapan yang semakin kecil. Hasil yang ditunjukkan pada **Gambar 5** menunjukkan adanya pengaruh gradasi zona pasir terhadap nilai penyerapan paving blok geopolimer. Kombinasi batu pecah ukuran 5-10 mm dengan pasir zona 3 membuat campuran semakin padat karena ukuran pasir yang halus dapat mengisi rongga antar butir batu pecah, sehingga volume rongga semakin kecil yang berdampak pada semakin kecilnya nilai penyerapan paving blok geopolimer.



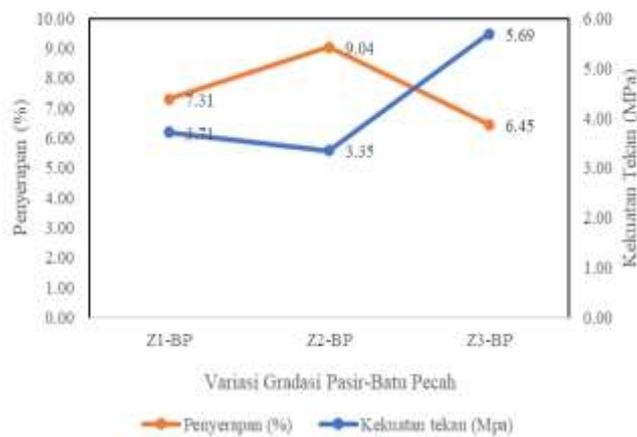
Gambar 6. Penyerapan Paving Pada Kombinasi Pasir – Abu Batu

Nilai penyerapan paving blok pada kombinasi gradasi zona pasir – abu batu yang disajikan pada **Gambar 6** menunjukkan nilai penyerapan terendah diperoleh pada kombinasi Z1-AB sebesar 5.10% diikuti oleh kombinasi Z2-AB sebesar 5.26%. Nilai penyerapan Z1-AB dan Z2-AB menunjukkan hasil yang hampir sama. Penyerapan tertinggi berada pada kombinasi Z3-AB sebesar 7.37%. Nilai penyerapan yang tinggi pada Z3-AB ada hubungannya dengan ukuran butir pasir dan abu batu karena semakin halusnya ukuran butir pasir dan abu batu, berarti luas permukaan yang harus diselimuti oleh pasta geopolimer semakin besar. Dengan jumlah pasta yang konstan pada semua variasi campuran, sedangkan luas permukaan butir yang semakin besar menunjukkan bahwa ada butiran yang kurang dibungkus atau diselimuti dengan pasta geopolimer. Hal ini menyebabkan kurang padatnya sampel sehingga nilai penyerapan menjadi tinggi.

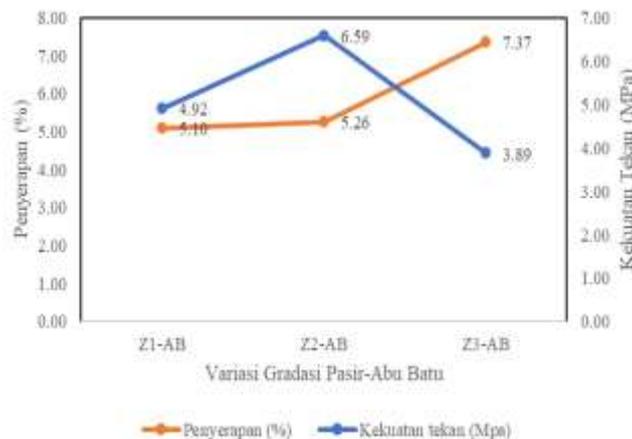
D. Hubungan Kekuatan Tekan dengan Penyerapan

Berdasarkan hasil pengujian kekuatan tekan dan penyerapan paving blok geopolimer, dapat diperoleh hubungan yang ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **8**.

Pada **Gambar 7** dapat dilihat bahwa campuran Z1-BP memiliki nilai penyerapan paling besar dan kuat tekan paling rendah, sebaliknya campuran Z3-BP memiliki nilai penyerapan terendah dan kuat tekan tertinggi. Berdasarkan grafik ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara kuat tekan dan penyerapan dimana semakin rendah nilai penyerapan, semakin tinggi nilai kuat tekan dan sebaliknya.



Gambar 7. Hubungan Antara Kekuatan Tekan dan Penyerapan Pada Variasi Pasir-Batu Pecah



Gambar 8. Hubungan Antara Kekuatan Tekan dan Penyerapan Pada Variasi Pasir-Abu Batu

Pada **Gambar 8** menunjukkan bahwa campuran Z3-AB memiliki nilai penyerapan paling besar dan kuat tekan paling rendah, sebaliknya campuran Z2-AB memiliki nilai kuat tekan yang paling tinggi tapi penyerapan yang rendah. Trend yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, terlihat juga pada **Gambar 8** bahwa semakin kecil nilai penyerapan maka nilai kekuatan tekan semakin besar.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terhadap campuran paving blok geopolimer dengan kombinasi antara gradasi zona pasir dengan batu pecah dan kombinasi gradasi zona pasir dengan

abu batu, diperoleh kesimpulan bahwa terdapat hubungan antara gradasi zona pasir terhadap kekuatan tekan dan penyerapan paving blok geopolimer. Nilai kekuatan Tekan tertinggi dan penyerapan terendah diperoleh pada campuran Z3-BP dan Z2-AB.

5. Ucapan Terima Kasih

Tulisan ini merupakan bagian dari Laporan Penelitian Skema Penelitian Dasar Produk Vokasi (PDPV) Tahun 2023 yang didanai oleh Politeknik Negeri Manado. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu selama proses penelitian dan secara khusus kepada Politeknik Negeri Manado yang telah mendanai penelitian ini.

6. Referensi

- [1] Dikecualikan dari limbah B3, FABA dari PLTU bisa menjadi berkah, 2021 <https://ekonomi.bisnis.com/read/20210315/44/1367856/dikecualikan-dari-limbah-b3-faba-dari-pltu-bisa-menjadi-berkah>
- [2] Kumutha R, Aswini A, Ellakkiya M, Karthika T, Vijai K, 2017. Properties of I Shaped Paver Blocks Using fly ash Based Geopolymer Concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X. Volume 14, Issue 2 Ver. VI (Mar-Apr. 2017), pp 06-12
- [3] Janitha Migunthannaa, Pathmanathan Rajeeva, Jay Sanjayana, 2021. Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application. Construction and Building Materials, Volume 305, 25 October 2021, 124787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124787>
- [4] Badkul Aishwarya, Paswan Rakesh, Singh S. K. & Tegar J. P, 2021. A comprehensive study on the performance of alkali activated fly ash/GGBFS geopolymer concrete pavement, Road Materials and Pavement Design. DOI: 10.1080/14680629.2021.1926311
- [5] Girish M.G, Kiran K. Shetty, Gopinatha Nayak. 2021. Synthesis of Fly-ash and Slag Based Geopolymer Concrete for Rigid Pavement. Materials Today: Proceedings, Available online 7 December 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.332>
- [6] Jonbi Jonbi, Mohamad Ali Fulazzaky, (2020). Modeling the water absorption and compressive strength of geopolymer paving block: An empirical approach. Measurement 158 (2020) 107695. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107695>
- [7] Banupriya C, John S, Suresh R, Divya E, Vinitha D, 2016. Experimental Investigations on geopolymer bricks/paver blocks. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9(16). DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i16/92209
- [8] Patil A R, Sathe S B, 2020. Feasibility of sustainable construction materials for concrete paving blocks: A review on waste foundry sand and other materials. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.402>
- [9] ASTM C618-19 (2019) Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete
- [10] SNI-03-0691-1996 Bata Beton (Paving Blok). Badan Standarisasi Indonesia
- [11] Nurrudin, M. F., Haruna, S., Mohamed, B. S., and Sha'aban, I. G. 2018. Methods of Curing Geopolymer Concrete: A Review. International Journal of Advanced and Applied Sciences. 5(1): 31-36
- [12] Chindaprasirt, P., and Rattanasak, U. 2017. Characterization oh the High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar with Hot-Weather Curing Systems for Sustainable Application. Advanced Powder Technology. 28(9):2317-2324
- [13] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., and Cao, T. 2010. High Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash. Journal of materials in Civil Engineering. 23(3):264-270
- [14] Demmie, S., Nuruddin, M., Ahmed, M., and Shafiq, N. 2011. Effects of Curing Temperature and Superplasticizer on Workability and Compressive Strength of Self-Compacting Geopolymer Concrete. National Postgraduate Conference (NPC), 19-20 September 2011, Tronoh Perak, Malaysia, IEEE, 1-5
- [15] Reddy, D., Edouard, J., and Sobhan, K., 2012. Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Structural Concrete in the Marine Environment. Journal of Materials in Civil Engineering. 25(6):781-787
- [16] Wallah, S., E. 2014. Pengaruh perawatan dan Umur Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Abu terbang. Jurnal Ilmiah Media Engineering. ISSN:2087-9334. 4(1): 1-7