



Pengaruh Air Laut Terhadap Kuat Tekan, Permeabilitas, dan Mikrostruktur Beton Geopolimer dengan *Fly ash* dan Tanah Putih Sebagai Pengganti Semen

***Yulita Arni Priastiwi, Hardi Wibowo, Purwanto, Arif Hidayat, Inandhiya Ayu Ulayya, Nensi Carita**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*)}yulitaarnipriastiwi@gmail.com

Received: 7 Mei 2024 Revised: 28 Agustus 2024 Accepted: 2 September 2024

Abstract

The increasing infrastructure development of an area is sometimes located in an aggressive environment, one of which is in coastal areas so that direct contact with sea air cannot be avoided. This research aims to determine the effect of sea water on geopolimer concrete using fly ash and white soil as cement substitutes with testing parameters for compressive strength, permeability and microstructure. The test objects used were cylindrical in shape measuring 150x300 mm and 100x200 mm. The ratio of fly ash and white soil used was 85%:15% and the activator used was NaOH 8M and Na₂SiO₃ with a ratio of 1:2,5. The mixture proportion using a ratio of 1 fly ash: 1,497 sand: 2 split: 0,451 alkali activator with a mutual plan is 35 MPa. Tests were carried out after the concrete had gone through a curing process for 56 days, then the concrete was conditioned without soaking and with soaking for 28 days. Tests were carried out at concrete ages of 56 and 87 days. The test results show that geopolimer concrete with the influence of sea water has a higher compressive strength value and a smaller permeability coefficient compared to concrete without the influence of sea water. Microstructural testing of geopolimer concrete under the influence of sea air produces a matrix-shaped structure morphology that is denser with fewer pores compared to concrete without the influence of sea air.

Keywords: *Geopolimer, fly ash, white soil, sea water, activator*

Abstrak

Meningkatnya pembangunan infrastruktur suatu kawasan terkadang terletak pada lingkungan agresif salah satunya yaitu pada wilayah pesisir pantai sehingga kontak langsung dengan air laut tidak dapat dihindari. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh air laut terhadap beton geopolimer menggunakan fly ash dan tanah putih sebagai pengganti semen dengan parameter pengujian kuat tekan, permeabilitas dan mikrostruktur. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berukuran 150x300 mm dan 100x200 mm. Perbandingan fly ash dan tanah putih yang digunakan sebesar 85%: 15% serta aktivator yang digunakan yaitu NaOH 8M dan Na₂SiO₃ dengan perbandingan 1:2,5. Proporsi campuran menggunakan perbandingan 1 fly ash : 1,497 pasir : 2 split : 0,451 alkali aktivator dengan mutu rencana adalah 35 MPa. Pengujian dilakukan setelah beton melalui proses curing selama 56 hari, kemudian beton dikondisikan tanpa rendaman dan dengan rendaman lebih dari 28 hari. Pengujian dilakukan pada umur beton 56 dan 87 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan pengaruh air laut memiliki nilai kuat tekan lebih tinggi dengan koefisien permeabilitas lebih kecil dibanding dengan beton tanpa pengaruh air laut saat umur pengujian. Mikrostruktur beton geopolimer dengan pengaruh air laut menghasilkan struktur morfologi berbentuk matriks yang lebih padat dengan sedikit pori-pori dibandingkan dengan beton tanpa pengaruh air laut.

Kata kunci: *Geopolimer, fly ash, tanah putih, air laut, aktivator*

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur di Indonesia pada saat ini menjadi prioritas utama dalam Proyek Strategis Nasional (PSN). PSN tersebut diperkenalkan oleh Pemerintahan Presiden Joko Widodo sejak 2016 dalam upaya pertumbuhan dan pembangunan yang berkeadilan guna menciptakan lapangan pekerjaan, meningkatkan kesejahteraan rakyat dan mendorong pertumbuhan ekonomi (Bulba & Oktaviani., 2023). PSN membutuhkan ketersediaan lahan yang cukup besar. Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia sehingga meningkatnya pembangunan infrastruktur suatu daerah tanpa disadari dapat terletak di kawasan yang berada pada lingkungan agresif, salah satunya yaitu pada wilayah pesisir pantai. Hal ini mengakibatkan kontak langsung antara material yang digunakan dengan air laut tidak dapat dihindari sehingga akan berpengaruh pada kekuatan struktur maupun kuat tekan beton.

Lingkungan agresif dapat didefinisikan sebagai suatu keadaan dimana terdapat kandungan kimia dengan konsentrasi tertentu yang dapat mengganggu sifat mekanik maupun sifat fisik beton (Rambabu & Mahindrakar, 2017; Rifaldi *et al.*, 2022). Syamsuddin dan Wicaksono, 2011 mengungkapkan bahwa tingginya kandungan klorida pada air laut tergolong dalam garam yang bersifat agresif terhadap beton. Beton dapat mengalami kehilangan sebagian massa, kehilangan kekuatan, dan kekakuannya serta mempercepat proses pelapukan disebabkan karena adanya reaksi antara senyawa beton dengan air laut sehingga air jenis ini sangat memungkinkan dapat merusak, mengurangi umur beton bahkan mengurangi tingkat keawetan beton.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan beton mutu tinggi dengan jenis semen yang dapat bertahan pada lingkungan pesisir pantai seperti *portland pozzolan cement* (PPC). Penggunaan semen yang terus bertambah pada material beton akan memunculkan dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini disebabkan oleh produksi semen menghasilkan emisi CO₂ ke atmosfer sehingga akan berpengaruh terhadap perubahan iklim dan dapat mengakibatkan efek rumah kaca.

Industri semen diperkirakan menyumbang sebesar 5-7% emisi gas CO₂ di dunia (Ali *et al.*, 2011; Reza *et al.*, 2013; Stafford *et al.*, 2015). Maka, diperlukan inovasi dan solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan sebagai bahan pengganti semen dalam campuran beton. Salah satunya adalah menggunakan beton dengan bahan pengikat anorganik seperti *alumina-silikat polymer* yang biasa dikenal dengan geopolimer.

Geopolimer yang merupakan sintesa dari material geologi pada alam dengan kandungan *alumina* dan *silica* (J Davidovits, 1999). Kandungan *silica* dan *alumina* banyak didapati pada material hasil industri seperti blas *furmace*, *pozzolan*, *fly ash*, *slag*, dan lain-lain (Firdous *et al.*, 2018; Duitama & Avellaneda, 2022). Menurut Budiningrum *et al.*, 2021 dan Qomaruddin *et al.*, 2018 *fly ash* (abu terbang) dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen bahkan dapat meningkatkan kuat tekan beton geopolimer.

Menurut ASTM C618-21, *fly ash* tersusun atas material CaO, SO₃, Fe₂O₃, SiO₂, dan Al₂O₃. *Fly ash* merupakan material yang dihasilkan dari industri tenaga uap yaitu hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap yang mengandung sebagian besar Silika (SiO₂) dan Alumina (Al₂O₃) dalam bentuk *amorphous*. Menggunakan sedikit tambahan dan pengolahan *fly ash* dapat digunakan menjadi bahan alternatif pengganti semen dalam pembuatan beton geopolimer.

Selain menggunakan *fly ash* sebagai material pengganti semen, terdapat material lain seperti tanah putih yang berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur. Tanah putih adalah batuan yang telah berubah dalam komposisi kimia disebabkan oleh pengaruh kondisi pada air bawah tanah dan pelapukan. Bahan galian ini berwarna putih kekuningan sampai putih kecoklatan, padat dan cukup sulit digali dengan alat sederhana. Bahan kimia penyusun pada tanah putih yaitu P₂O₅, SiO₂, Fe₂O₃, FeO, MgO, MnO, Al₂O₃, Na₂O, CaO, TiO₂, K₂O, SO₃ (Nurhuda *et al.*, 2022 dan Priastiwi, *et al.*, 2020). Pengikatan material beton geopolimer membutuhkan binder yang terdiri dari *alkaline aktivator* dan *fly ash* dengan komposisi yang tepat untuk meningkatkan kekuatan beton (Kaselle & Ruga, 2021). Umumnya beton geopolimer menggunakan perekat dengan campuran antara natrium silikat (Na₂SiO₃) dan Natrium hidroksida (NaOH) yang berfungsi mengikat antar material beton geopolimer (Hardjito, 2005; Martinez & Miller, 2023)

Aktivator yang umumnya digunakan adalah campuran NaOH dan Na₂SiO₃ dengan konsentrasi 8M sampai 14M (Ekaputri & Triwulan, 2013; Teng *et al.*, 2018). Perbandingan yang digunakan diambil berkisar 0,4 sampai 2,5 pada NaOH dan Na₂SiO₃ (Hardjito, 2004). Presentase penambahan air dan molaritas larutan aktivator mempengaruhi karakteristik beton, dimana untuk mendapatkan karakteristik beton yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan menambahkan sedikit persentase air dalam molaritas yang lebih besar (Ekaputri & Triwulan, 2013). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kuat tekan, permeabilitas, dan mikrostruktur beton

geopolimer dengan pengikat fly ash dan tanah putih dengan kondisi yang berhubungan dengan lingkungan air laut.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium dengan membuat benda uji. Penentuan metode penting dalam penelitian dimulai dari studi literatur hingga didapatkan kesimpulan agar mendapatkan hasil yang maksimal.

Material

Bahan yang digunakan sebagai material beton geopolimer dalam penelitian ini meliputi *fly ash*, tanah putih, agregat halus, agregat kasar, dan alkali aktivator yang digunakan masing-masing sebagai berikut: *Fly ash* digunakan sebagai bahan pengikat atau binder bersama dengan tanah putih. *Fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU Tanjung Jati B, Jepara. Unsur kimia yang terkandung pada *fly ash* ini menurut Mulyana & Yolanda, 2017 memiliki total kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan FeO adalah 83,28%, sehingga dapat digolongkan pada kelas F (ASTM C618, 2021). *Fly ash* dikondisikan agar mempunyai ukuran kurang dari 0,075 mm atau lolos saringan no. 200 dengan kadar air 0%. Secara lengkap kandungan *fly ash* dari PLTU Tanjung Jati B Jepara ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan oksida *fly ash*

Kandungan oksida	Persentase (%)
Na ₂ O	1,59
MgO	2,86
Al ₂ O ₃	24,95
SiO ₂	46,52
SO ₃	1,13
K ₂ O	2,77
CaO	5,89
TiO ₂	1,36
FeO	11,81
CuO	1,12

Sumber: Mulyana & Yolanda, 2017

Tanah putih berperan sebagai substitusi *fly ash* dalam binder geopolimer. Tanah putih yang digunakan berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur. Tanah putih memiliki persentase kandungan oksida terbesar adalah kalsium oksida (CaO) yaitu sebesar 56,19%, hal ini menunjukkan bahan penyusun tanah putih didominasi oleh kalsium (Hunggurami *et al.*, 2015). Tanah putih dikondisikan agar mempunyai ukuran kurang dari 0,075 mm atau lolos saringan no. 200 dengan kadar air 0%. Penggunaan substusi tanah putih sebanyak 15% proporsi *fly ash*. Dalam penelitian Priastiwi, *et al.*, 2021 didapatkan hasil kuat tekan optimum saat

diberikan substitusi tanah putih 15% dibandingkan proporsi lainnya. Secara lengkap kandungan dari tanah putih ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan oksida tanah putih

Kandungan oksida	Persentase (%)
CaO	56,1900
MgO	0,6470
SiO ₃	0,4330
Al ₂ O ₃	0,1780
Fe ₂ O ₃	0,0875
SrO	0,0801
SO ₃	0,0685
P ₂ O ₅	0,0435
TiO ₂	0,0065
MnO	0,0060
K ₂ O	0,0020
LOI	41,9300

Sumber: Hunggurami, *et al.*, 2015

Agregat halus yang digunakan berasal dari Muntilan, Jawa Tengah dan memiliki gradasi menerus dan memenuhi syarat SNI 03-2834-2000, sedang agregat kasar yang digunakan berupa split ukuran 10-20 mm yang berasal dari Jati Kencana Beton. Agregat kasar yang dipergunakan telah memenuhi spesifikasi ASTM C33. Larutan aktivator digunakan sebagai pengaktif terjadinya polimerisasi pada campuran fly ash dan tanah putih. Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na₂SiO₃) dalam bentuk larutan aktivator yang digunakan dalam penelitian ini.

Perawatan beton (*curing*)

Pemilihan metode *curing* beton yang tepat perlu diperhatikan dikarenakan adanya kandungan CaO (Kalsium Oksida) yang tinggi pada tanah putih. Apabila dilakukan *curing* beton geopolimer dengan temperatur rendah maka akan meningkatkan nilai kuat tekan pada beton geopolimer (Temuujin *et al.*, 2009). Proses *curing* dengan menggunakan pelapisan plastik dan karung goni selama 56 hari, kemudian benda uji akan dikondisikan kedalam dua kondisi yang berbeda yaitu direndam air laut dan didiamkan pada suhu ruang selama 28 hari.

Komposisi

Beton geopolimer pada penelitian ini dibuat dengan proporsi campuran 1 Binder: 1,497 pasir : 2 split : 0,451 faktor air binder. Binder merupakan bahan pengikat yang terdiri dari *fly ash* 85% dan tanah putih 15%. Benda uji yang dibuat adalah silinder ukuran 10 x 20 cm dan 15 x 30 cm. Molaritas untuk NaOH adalah 12M. Diketahui bahwa nilai Mr NaOH = 40 (jumlah dari Ar, Na = 23, O = 16 dan H= 1). Kebutuhan NaOH yang digunakan dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$M = \frac{\text{Massa NaOH}}{\text{Mr NaOH}} \times \frac{1000}{\text{Volume Air (ml)}} \quad (1)$$

Dari Persamaan 1 didapat massa NaOH sebesar 29.337 gr. Komposisi campuran beton geopolimer per 1 m³ ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi campuran beton geopolimer/m³

Item	Berat (kg)
Fly ash	403,730
Tanah putih	71,247
NaOH	61,188
Na ₂ SiO ₃	152,969
Pasir	710,857
Split	950,009

Air laut

Air laut merupakan campuran yang terdiri dari 96,5% air murni dan 3,5% material lain seperti garam, bahan organik dan partikel-partikel tak terlarut. Air laut memiliki nilai PH bervariasi antara 7,5 – 8,5. Kadar garam pada air laut (salinitas) memiliki rata-rata sekitar 35.000 ppm atau 35 gram/liter, yang berarti dalam 1 liter air laut (1000 ml) terdapat 35 gram (Idris & Ibrahim, 2018). Kandungan garam-garaman utama pada air laut terdiri dari unsur : 55% klorida (Cl); 31% natrium (Na); 8% sulfat (SO₄); 4% magnesium (Mg), 1% kalsium (Ca), dan kurang dari 1% sisanya mengandung zat-zat lain terdiri dari bikarbonat, bromida, asam borak, strontium, dan florida (Muaya *et al.*, 2015). Penelitian (Oktaviastuti & Yurnalisdel, 2020) menyatakan bahwa kuat tekan beton geopolimer dengan perendaman menggunakan air laut menghasilkan nilai yang lebih signifikan dibandingkan perendaman air PDAM.

Pengujian beton

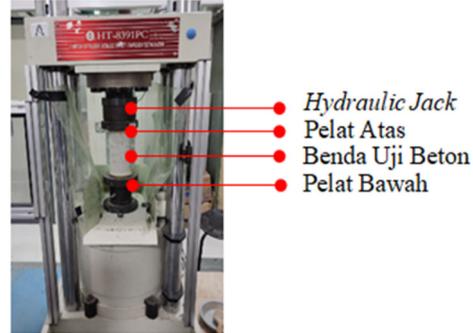
Metode pengujian beton berdasarkan standar pengujian yang ditetapkan. Metode pengujian terdiri dari tiga parameter yaitu kuat tekan, permeabilitas dan mikrostruktur.

Pengujian kuat tekan beton mengacu pada SNI 1974:2011 mengenai cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Pengujian dilakukan dengan memberikan pembebanan secara bertahap pada benda uji sampai benda uji mengalami retak fraktur. Hasil dari pengujian kuat tekan didapatkan dari gaya aksial (P) yang terdistribusi pada batang penekan. Pengujian kuat tekan dengan menggunakan alat *compressive strength machine* merk Hungta kapasitas 2000kN (Gambar 1).

Berdasarkan SNI 1974:2011, perhitungan kuat tekan beton (f_c) diperoleh dengan menghitung gaya

tekan aksial (P) dibagi dengan luas penampang (A) sehingga didapatkan rumus seperti Persamaan 2.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$



Gambar 1. Pengujian kuat tekan

Pengujian permeabilitas digunakan untuk mengetahui ketahanan terhadap penetrasi air pada beton. Mutu beton yang baik dapat menghindari kerusakan bangunan akibat penetrasi air. Pengujian permeabilitas beton menggunakan metode penetrasi air (*penetration test*) dengan alat *Concrete Permeability Apparatus*. Menurut Neville dan Brook (1987), pengujian permeabilitas beton diukur dengan melakukan percobaan yaitu sampel beton yang *disealed* dari air yang bertekanan pada bagian atasnya saja dan aspek banyaknya air yang mengalir pada beton dalam waktu tertentu (SK SNI S-36-1990-03 ayat 2.2.1.2).

Peraturan yang digunakan sebagai acuan pada pengujian permeabilitas yaitu ACI 301-729 (revisi 1975) mengenai batas maksimum nilai koefisien permeabilitas sebesar 1,5x10⁻¹¹. Dalam SNI 03-2914-1992 mengenai batas kedalaman penetrasi beton, kedalaman penetrasi kurang dari 50 mm dengan penilaian kualitatif beton merupakan beton kedap air (*impermeable concrete*) dan kedalaman kurang dari 30 mm merupakan beton tahan pada lingkungan agresif (*impermeable under aggressive condition*).

Secara umum koefisien permeabilitas beton berkisar pada 10⁻¹⁰ m/s yang merupakan permeabilitas tinggi (*high permeable*) dan berkisar pada 10⁻¹¹ sampai 10⁻¹³ m/s bila permeabilitas rendah (*lower permeable*) (Neville, 2011). Pengujian permeabilitas ditunjukkan di Gambar 2. Uji penetrasi, koefisien permeabilitas ditentukan melalui pendekatan penggunaan hukum Darcy-Weisbach (Valenta, 1969; Li, 2011; Neville, 2022) dan digunakan rumus seperti dalam Persamaan 3.

$$K = \frac{x^2 v}{2Th} \quad (3)$$

dimana K merupakan koefisien permeabilitas (m/det), x merupakan kedalaman penetrasi (m), T merupakan waktu penetrasi (det), h merupakan tinggi tekanan (m), v merupakan angka pori beton.

Nilai pori (v) dihitung dari penambahan massa beton selama uji penetrasi. Pertimbangan bahwa hanya rongga pada spesimen yang ditembus air, pendekatan nilai v dalam Persamaan 4 (Li, 2011).

$$V = \frac{\Delta W}{DAx} \quad (4)$$

dimana ΔW merupakan pertambahan berat benda uji selama penetrasi, D adalah berat jenis beton ($2363,6265 \text{ kg/m}^3$), A adalah luas penampang (m^2).



Gambar 2. Pengujian Permeabilitas

Pengujian mikrostruktur dimaksudkan untuk mengetahui perbedaan struktur mikro beton geopolymer dengan tanah putih yang direndam ataupun tidak direndam dalam air laut selama waktu tertentu (28 hari). Pengujian menggunakan SEM-EDX (*scanning electronic microscope - Energy Dispersive X-Ray*) yang merupakan gabungan dari SEM dengan EDX. SEM merupakan jenis alat mikroskop electron yang dapat menghasilkan gambar dengan mengubah berkas electron menjadi gambar bentuk permukaan material yang sedang dianalisis, sedangkan EDX merupakan salah satu teknik untuk menentukan kandungan atau komposisi unsur suatu benda uji (Hartini 2013). Analisis EDX adalah pengukuran dan pelacakan dari sifat yang dihasilkan oleh sinar X melalui perbesaran diatas 100x. Pengujian mikrostruktur dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian untuk setiap spesimen beton geopolimer tanah putih dengan dan tanpa pengaruh air laut dihitung dan dianalisis, dan disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Pembahasan meliputi pengujian kuat tekan, pengujian permeabilitas, dan pengujian mikrostruktur

Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan beton geopolimer dilakukan dengan membandingkan 2 variasi beton yaitu beton geopolimer tanpa rendaman air laut (BGTL) dan beton geopolimer dengan rendaman air laut (BGL). Pengujian kuat tekan beton geopolimer tanpa adanya pengaruh air laut dilaksanakan pada saat beton berumur 56 hari dan 87 hari, sedangkan pengujian beton geopolimer dengan pengaruh air laut dilaksanakan pada umur 87 hari. Hasil rata-rata kuat tekan beton geopolimer dengan dan tanpa pengaruh air laut ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil rata-rata kuat tekan beton

Variasi	Lama rendaman	Umur beton	Rata-rata kuat tekan
	(hari)	(hari)	(N/mm ²)
BGTL	0	56	52,523
BGTL	0	87	52,613
BGL	28	87	56,259

Hasil kuat tekan rata-rata menunjukkan bahwa beton yang tidak direndam air laut memiliki nilai rata - rata kuat tekan lebih kecil dibandingkan dengan beton yang mendapatkan pengaruh air laut. Nilai rata - rata kuat tekan beton yang tidak terpengaruh air laut pada umur beton 56 hari sebesar $52,523 \text{ N/mm}^2$, dan umur beton 87 hari sebesar $52,613 \text{ N/mm}^2$ sedangkan nilai rata – rata kuat tekan beton yang mendapatkan pengaruh air laut umur beton 87 hari sebesar $56,259 \text{ N/mm}^2$. Kondisi ini menunjukkan beton geopolymer dengan tanah putih memiliki kondisi yang stabil melewati umur 56 hari seiring dengan pertambahan umurnya bahkan saat direndam hingga 28 hari dalam kondisi air laut.

Adanya pengaruh air laut pada beton akan mengakibatkan terbentuknya kristal garam *Friedel* yang dapat meningkatkan pH dan alkalinitas, serta mampu memberikan struktur beton yang lebih padat dengan pori - pori yang lebih kecil (Cheng *et al.*, 2018). Selain itu, kandungan CaO (Kalsium Oksida) yang tinggi pada tanah putih mempengaruhi kenaikan kuat tekan pada beton geopolimer dengan tanah putih. Kandungan CaO dalam tanah putih dapat meningkatkan nilai kuat tekan pada beton geopolimer apabila dilakukan perawatan beton dengan temperatur rendah (Temuujin *et al.*, 2009). Kandungan CaO yang tinggi bereaksi dengan air (H_2O) akan menghasilkan kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan mengeluarkan kalor kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Kondisi ini akan mengikat karbon dioksida (CO_2) dan akan menghasilkan terbentuknya struktur CaCO_3 yang bersifat keras dan tidak larut dalam air sehingga meningkatkan sifat mekanik dan mikrostruktur. Meningkatnya kandungan CaO

dapat mengisi rongga sehingga menyebabkan nilai porositas mengecil, akan tetapi kandungan CaO yang terlalu tinggi menyebabkan nilai porositas besar. (Fitriahsari., 2018).

Pengujian permeabilitas

Pengujian permeabilitas beton dilakukan pada saat umur beton 56 hari untuk beton tanpa pengaruh air laut dan pengujian pada saat umur beton 87 hari untuk beton dengan pengaruh air laut. Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian permeabilitas beton geopolimer tanpa pengaruh air laut dan adanya pengaruh air laut.

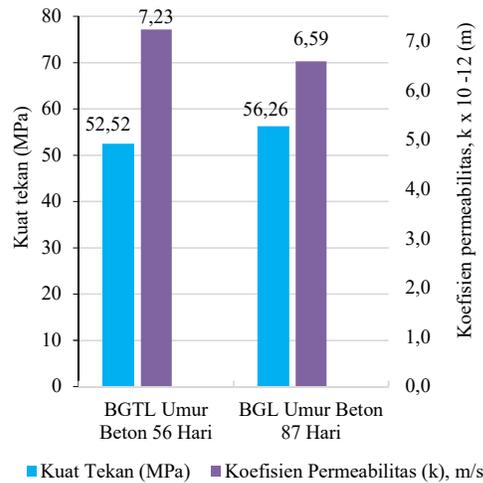
Tabel 5. Hasil pengujian permeabilitas

Umur beton	Vaiasi	Kode	Rerata kedalaman penetrasi	Rerata koefisien permeabilitas
			x	k
			(m)	(m/s)
56	Tanpa pengaruh air laut	BGTL1	0,022	5,26E-12
		BGTL2		
		BGTL3		
87	Pengaruh air laut	BGTL1	0,019	6,59E-12
		BGTL2		
		BGTL3		

Beton geopolimer tanpa pengaruh air laut menunjukkan nilai rata-rata koefisien permeabilitas lebih tinggi dibanding dengan beton geopolimer dalam pengaruh air laut. Kedalaman penetrasi berbanding lurus dengan koefisien permeabilitas yang dihasilkan dengan pemberian tekanan dan durasi penetrasi yang sama. Nilai koefisien permeabilitas yang diperoleh dari pengujian jauh lebih kecil dari batas permeabilitas maksimum yang sudah disyaratkan ACI 301-729 (revisi 1975) yaitu $1,5 \times 10^{-11}$ baik untuk beton geopolymer tanah putih tanpa atau dengan rendaman air laut, yaitu $7,23 \times 10^{-12}$ (BGTL) dan $6,59 \times 10^{-12}$ (BGL) serta memiliki nilai rata-rata kedalaman penetrasi cairan pada beton kurang dari 0,03 m, sehingga keduanya masih tergolong dalam permeabilitas rendah (*lower permeable*) menurut (Neville, 2011). Nilai rata-rata kedalaman penetrasi beton tanpa pengaruh air laut kurang dari 50 mm menunjukkan beton kedap air dan rata-rata kedalaman penetrasi beton dengan pengaruh air laut kurang dari 30 mm menunjukkan ketahanan terhadap lingkungan agresif menurut SNI 03-2914-1992.

Hubungan kuat tekan dan permeabilitas beton yang juga terdapat pada penelitian terdahulu seperti penelitian Khonado *et al.*, 2019 menyatakan bahwa permeabilitas memiliki hubungan berbanding terbalik dengan kuat tekan, permeabilitas cenderung akan lebih tinggi jika kuat tekan semakin rendah.

Beton dengan permeabilitas tinggi berarti memiliki rongga atau pori yang lebih banyak sehingga kepadatan beton menurun, begitu pula dengan kuat tekan dari beton tersebut. Hubungan kuat tekan dengan permeabilitas beton geopolimer dapat dilihat pada Gambar 3. Dapat diketahui bahwa nilai kuat tekan dan permeabilitas beton geopolimer memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Semakin besar nilai kuat tekan beton maka akan semakin kecil nilai koefisien permeabilitas, begitu pula sebaliknya semakin kecil kuat tekan beton maka akan semakin besar nilai koefisien permeabilitas, hal ini sesuai dengan penelitian Khonado *et al.*, 2019.



Gambar 3. Hubungan kuat tekan dengan permeabilitas

Pengujian mikrostruktur

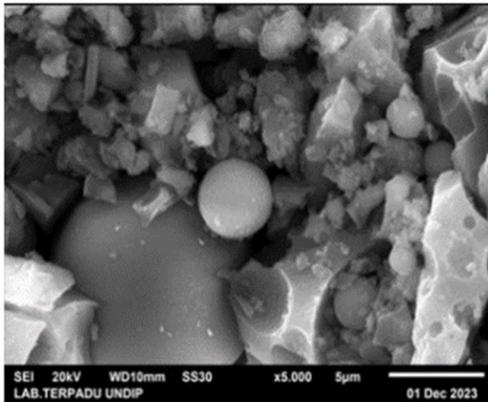
Pengujian mikrostruktur dilakukan dua jenis pengujian yaitu pengujian menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDX (*Energy Dispersive X-Ray*). Pengujian dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh air laut pada struktur morfologi dan senyawa yang terkandung pada beton geopolimer tanah putih. Pengujian SEM dan EDX dilakukan pada beton tanpa pengaruh air laut umur 56 hari (BGTL) dan beton pengaruh air laut umur 87 hari (BGL).

SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

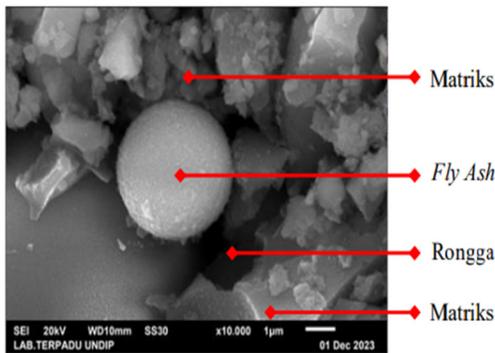
Beton geopolimer tanpa pengaruh air laut pada Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa struktur morfologi beton tersebut membentuk matriks yang tidak padat dan bergradasi heterogen dengan ukuran partikel beragam. Selain itu, juga terdapat banyak pori – pori atau ruang kosong yang tersebar merata dikarenakan matriks yang tidak padat. Banyaknya pori menandakan bahwa beton memiliki struktur morfologi yang kurang rapat

sehingga akan mempengaruhi sifat-sifat fisik dan mekanik beton, termasuk kuat tekan dan permeabilitas. Hal ini dibuktikan dengan hasil kuat tekan beton tanpa rendaman air laut mengalami penurunan sebesar $0,09 \text{ N/mm}^2$ atau $0,171\%$ dibandingkan dengan beton geopolimer tanah putih dengan pengaruh air laut. Selain itu nilai koefisien permeabilitas yang di dapatkan juga lebih besar yaitu $7,23170\text{E}^{-12}$ dan $6,59337\text{E}^{-12}$ untuk beton geopolimer tanah putih dengan pengaruh air laut.

Beton Geopolimer dengan pengaruh air laut pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa struktur morfologi beton tersebut membentuk matriks yang lebih padat dan bergradasi homogen dengan ukuran partikel yang hampir sama dibandingkan dengan beton geopolimer tanah putih tanpa pengaruh air laut. Ikatan antar partikel lebih solid yang ditandai dengan lebih sedikit pori-pori yang terdapat pada beton.



Gambar 4. Hasil pengujian SEM beton geopolimer tanah putih tanpa pengaruh air laut umur 56 hari perbesaran 5000x

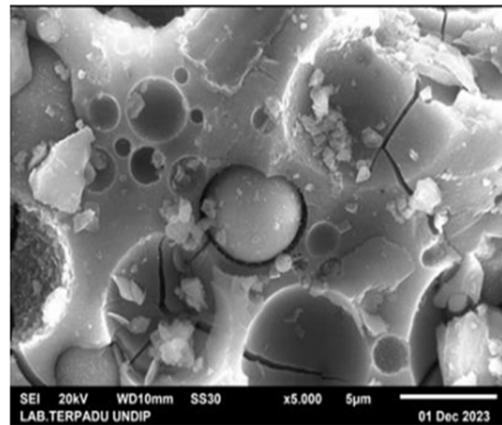


Gambar 5. Hasil pengujian SEM beton geopolimer tanah putih tanpa pengaruh air laut umur 56 hari perbesaran perbesaran 10000x

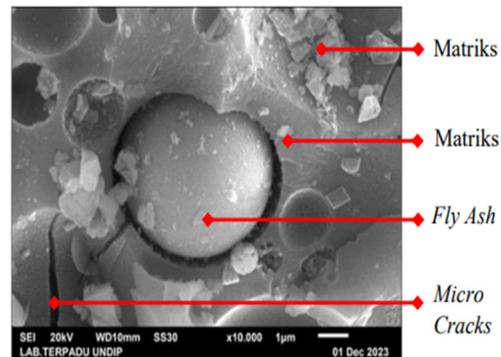
Beton yang memiliki struktur morfologi rapat akan mempengaruhi sifat-sifat fisik dan mekanik beton, termasuk kuat tekan dan permeabilitas menjadi

lebih baik. Hal ini dibuktikan dengan hasil kuat tekan beton dengan rendaman air laut sebesar $56,259 \text{ MPa}$ lebih tinggi dibandingkan tanpa rendaman yaitu $52,523 \text{ MPa}$. Selain itu nilai koefisien permeabilitas yang didapatkan juga lebih kecil yaitu $6,59337\text{E}^{-12}$ dibandingkan dengan beton geopolimer tanah putih tanpa pengaruh air laut. EDX (*Energy Dispersive X-Ray*)

Pengujian *Energy Dispersive X-Ray* dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur atau senyawa kimia yang terdapat pada benda uji. Hasil pengujian *Energy Dispersive X-Ray* ditunjukkan pada Tabel 6. Pengujian menunjukkan bahwa terdapat kenaikan maupun penurunan pada senyawa akibat adanya pengaruh rendaman air laut. Senyawa yang mengalami peningkatan tertinggi pada senyawa CaO , dan penurunan paling banyak pada senyawa FeO . Senyawa yang terkandung dalam beton geopolimer tanah putih memiliki fungsi masing-masing untuk setiap senyawa. Kandungan senyawa CaO yang lebih tinggi dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi (Wijaya & Ekaputri, 2017).



Gambar 6. Hasil pengujian SEM beton geopolimer tanah putih dengan pengaruh air laut umur 87 hari perbesaran 5000x



Gambar 7. Hasil pengujian SEM beton geopolimer tanah putih dengan pengaruh air laut umur 87 hari perbesaran perbesaran10000x

Kenaikkan nilai MgO berbanding lurus dengan kenaikan nilai ekspansi, dimana semakin besar kenaikan pada MgO maka semakin besar MgO dapat mengisi ruang kosong. Namun, jika ekspansi yang terjadi terlalu besar, maka retak dapat terjadi (Du, 2005). MgO ternyata juga memiliki peran dalam menaikkan nilai kuat tekan. Hal tersebut terjadi karena saat MgO bereaksi dengan air dan proses ekspansi dimulai, menyebabkan rongga-rongga udara yang ada dalam mortar akan terisi, sehingga mortar akan lebih kompak dan menambah kuat tekan (Du, 2005).

Senyawa Na₂O dan K₂O memiliki fungsi sebagai fluks untuk menurunkan suhu dimana silika meleleh, kandungan unsur Na₂O yang berkurang setelah rendaman air laut terjadi karena adanya reaksi dengan air laut (Setiawan *et al.*, 2020). Semakin besar TiO₂ akan menyebabkan merusak kekuatan mekanis komposit geopolimer (Mustaqim *et al.*, 2020). Senyawa SO₃ dapat memperbaiki pengikatan dan kuat tekan beton (Hariawan., 2007). Senyawa SO₃ dan Al₂O₃ dapat meningkatkan daya rekat (Khusna *et al.*, 2013). Meningkatnya kandungan SiO₂ pada tiap-tiap adukan telah mengakibatkan porositas bahan semakin kecil (Wiryasa & Sudarsana, 2009).

Tabel 6. Hasil pengujian energy dispersive X-Ray

Parameter pengujian	Kondisi benda uji		Selisih
	Tanpa pengaruh air laut	Dengan pengaruh air laut	
	% Berat	% Berat	
C	17,18	16,67	0,51
Na ₂ O	10,05	10,11	0,06
MgO	1,53	2,25	0,72
Al ₂ O ₃	13,01	14,12	1,11
SiO ₂	40,50	38,87	1,63
SO ₃	0,63	0,66	0,03
K ₂ O	1,54	1,03	0,51
CaO	7,17	9,00	1,83
TiO ₂	0,77	0,99	0,22
FeO	6,71	5,63	1,08
CuO	0,90	0,66	0,24

Peningkatan kandungan senyawa dapat mempengaruhi kuat tekan maupun permeabilitas pada beton. Hal ini dapat dibuktikan dengan meningkatkan kuat tekan beton substitusi tanah putih yang terkena pengaruh air laut yaitu 52,52 MPa menjadi 56,26 MPa. Adanya peningkatan senyawa MgO yang dapat mengisi pori-pori pada beton menyebabkan beton semakin padat sehingga permeabilitas semakin kecil. Hal ini dapat dibuktikan dengan menurunnya nilai koefisien permeabilitas beton substitusi tanah putih yang

terkena pengaruh air laut yaitu $7,23 \times 10^{-12}$ menjadi $6,59 \times 10^{-12}$.

Kesimpulan

Hasil studi pengaruh air laut terhadap kuat tekan, permeabilitas, dan mikrostruktur beton geopolimer dengan fly ash dan tanah putih sebagai pengganti semen adalah sebagai berikut:

Beton geopolimer dengan tanah putih dalam pengaruh kondisi atau lingkungan air laut memiliki nilai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton geopolimer tanpa pengaruh air laut. Nilai kuat tekan beton geopolimer dengan tanah putih tidak mengalami peningkatan setelah melewati umur 56 hari atau cenderung stabil. Beton geopolimer dalam pengaruh air laut memiliki nilai koefisien permeabilitas yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai koefisien permeabilitas beton geopolimer tanpa pengaruh air laut. Dalam kondisi terendam air laut hingga 28 hari belum menunjukkan adanya pengurangan kekuatan, sebaliknya kekuatan beton masih meningkat dan nilai koefisien permeabilitas menurun.

Hubungan yang dimiliki antar kuat tekan dan permeabilitas adalah memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Semakin besar nilai kuat tekan beton maka akan semakin kecil nilai koefisien permeabilitas, begitu pula sebaliknya semakin kecil kuat tekan beton maka akan semakin besar nilai koefisien permeabilitas.

Selain itu, pengujian SEM menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan pengaruh air laut memiliki struktur morfologi matrik yang lebih padat dan ikatan antar partikel lebih solid yang ditandai dengan lebih sedikit pori - pori pada beton dibandingkan beton tanpa pengaruh air laut.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Fakultas Teknik Universitas Diponegoro yang telah mensupport pembiayaan penelitian melalui Hibah Riset Strategis TA 2024. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A Review on Emission Analysis in Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261.
- ASTM C-33. (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. US.

- Badan Standarisasi Nasional. (1992). *SNI 03-2914 Spesifikasi Beton Bertulang Kedap Air* (Vol. 19920). SNI 03-2914. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Budiningrum, D. S., Kustirini, A., Purnijanto, B., Mahasukma, D., & Utama, T. Y. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Tanjungjati B Jepara. *Bangun Rekaprima: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa, Sosial dan Humaniora*, 7(2, Oktober), 55-61.
- Bulba, A. T., & Oktaviani, C. Z. (2023). Faktor Keterlambatan Proses Pengadaan Tanah Terhadap Pencapaian Kinerja Proyek Strategis Nasional (PSN) Jaringan Irigasi Aceh. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 245-252.
- Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Huang, Y., & Liu, K. (2018). Effects of seawater and supplementary cementitious materials on the durability and microstructure of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 1081-1090.
- Davidovits, J. (1999, June). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In *Geopolymer* (Vol. 99, No. 292, pp. 9-39). sn.
- Du, C. (2005). A Review of Magnesium Oxide in Concrete. *Concrete International*, 27(12), 45-50.
- Duitama, J.A.B & Avellaneda, D.R. (2022). Pozzolans: A review. *Engineering and Applied Science Research, EASR*. 49(4). 495-504.
- Ekaputri, J. J., & Triwulan, T. (2013). Sodium Sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 20(1), 1-10.
- Firdous, R., Stephan, D., and Djabo, J.N.Y. (2018). Natural Pozzolan Based Geopolymers: A Review on Mechanical, Microstructural. And Durability Characteristics. *Construction and Building Materials. Elsevier*, 190, 1251-1263.
- Fitriahsari, B. N. (2018). Pengaruh Substitusi Fly Ash dengan Limbah Marmer Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton Geopolimer Pada NaOH 15M. *Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 10-15.
- Hardjito, D. (2005). On the Development of Fly Ash-Based. *ACI Materials Journal*, 101, 467-472.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Civil engineering dimension*, 6(2), 88-93.
- Hariawan, J. B. (2007). Pengaruh perbedaan karakteristik type semen ordinary portland cement (OPC) dan portland composite cement (PCC) terhadap kuat tekan mortar. *Universitas Gunadarma*.
- Hartini, (2013) Studi Karakteristik dan Mikrostruktur Self Compacting Concrete (SCC) dengan Penggunaan Air Laut. Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin. 1: 81–109.
- Hunggurami, E., Simatupang, P. H., & Lori, A. L. (2015). Studi Kelayakan Penggunaan Tanah Putih Sebagai Pengganti Agregat Halus (Pasir) Terhadap Kualitas Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 4(1), 29-38.
- Idris, M., & Ibrahim, A. (2018, December). Analisis Pengaruh Perendaman Air Laut Terhadap Kuat Tekan Mortar Yang Ditambahkan Abu Terbang (Fly Ash). In *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)* (Vol. 3, No. 1).
- Nurhuda, I., Priastiwi, Y. A., Nuroji, N., Ardidawa, V., & Nizami, C. A. (2023). Daya Tahan Mortar Geopolimer dan Mortar Semen Portland Pozzolan (PPC) terhadap Larutan Asam Sulfat. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 219-229.
- Kaselle, H., & Ruga, S. (2021). Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Bottom Ash. In *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)* (Vol. 6, No. 1, pp. 66-71).
- Khonado, M. F., Manalip, H., & Wallah, S. E. (2019). Kuat Tekan Dan Permeabilitas Beton Porous dengan Variasi Ukuran Agregat. *Jurnal Sipil Statik*, 7(3).
- Khusna, H., Sunarto, W., & Alauhdin, M. (2013). Analisis Kandungan Kimia dan Pemanfaatan Sludge Industri Kertas Sebagai Bahan Pembuatan Batako. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 2(2).
- Martinez, A., & Miller, S. A. (2023). A review of drivers for implementing geopolymers in

- construction: Codes and constructability. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107238.
- Muaya, G. S., Kaseke, O. H., & Manoppo, M. R. (2015). Pengaruh Terendahnya Perkerasan Aspal oleh Air Laut yang Ditinjau Terhadap Karakteristik Marshall. *Jurnal Sipil Statik*, 3(8).
- Mulyana, F., & Yolanda, T. (2017). Studi Properties Beton Geopolimer Sebagai Substitusi Beton Konvensional. *Skripsi Universitas Diponegoro*.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Harlow: Pearson Educatio Limited.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete Technology (Vol. 438)*. England: Longman Scientific & Technical.
- Oktaviastuti, B., & Yurnalisdell, Y. (2020). Studi Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Fly Ash Sebagai Perkerasan Kaku Di Pesisir Pantai. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 201-214.
- Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Daryanto, D., Salamsyah, Z. (2020). Pengaruh Substitusi Tanah Putih pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktifator Natrium Hidroksida. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 9-16.
- Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Tamrin, R., & Sendrika, D. B. (2021). Resistance Of Mortar With PPC Cement and Geopolymer Mortar With White Soil Substitution In H₂SO₄ Immersion. *Astonjadro*, 10(2), 213-224.
- Qomaruddin, M., Munawaroh, T. H., & Sudarno, S. (2018). Studi Komparasi Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Beton Konvensional. *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, 1(1).
- Rambabu, V and Mahindrakar, A. (2017). Impact of Aggressive Environment on Concrete-A Review. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(9), 777-788.
- Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (2013). Environmental and Economic Aspects of Production and Utilization of RDF as Alternative Fuel in Cement Plants: A Case Study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 105-114.
- Rifaldi, M., Nursandah, A., & Farichah, H. (2022). Pengaruh Air Payau Terhadap Kuat Tekan Beton. *AGREGAT*, 7(1).
- Stafford, F. N., Viquez, M. D., Labrincha, J., & Hotza, D. (2015). Advances and Challenges for the Co-Processing in Latin American Cement Industry. *Procedia Materials Science*, 9, 571-577.
- Suraneni, P., Burriss, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 fly ash specification: Comparison with other specifications, shortcomings, and solutions. *ACI Mater. J*, 118(1), 157167.
- Syamsuddin, R., & Wicaksono, A. (2011). Pengaruh Air Laut pada Perawatan (Curing) Beton Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton dengan Variasi Faktor Air Semen dan Durasi Perawatan. *Rekayasa Sipil*, 5(2), 68-75.
- Temuujin, J., Williams, R. P., & van Riessen, A. (2009). Effect of Mechanical Activation of Fly Ash on The Properties of Geopolymer Cured at Ambient 177 Temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(12-13), 5276-5280.
- Teng, N. H., Yong, H.C., Ming, L.Y., and Abdullah, M.M. (2018). The Effect of Various Molarities of NaOH Solution on Fly Ash Geopolymer Paste. *AIP Conference Proceedings*, 2045 (1) 020098.
- Wijaya, A. L., & Ekaputri, J. J. (2017). Factors Influencing Strength and Setting Time of Fly Ash Based-Geopolymer Paste. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 138, p. 01010). EDP Sciences.
- Wiryasa, M. A., & Sudarsana, I. W. (2009). Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Bahan Substitusi semen dalam pembuatan bata beton pejal. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 13(1).