

ANALISIS KEKUATAN TEKAN DAN PERMEABILITAS *PERVIOUS GEOPOLYMER CONCRETE* DENGAN VARIASI RASIO ALKALI AKTIVATOR TERHADAP *FLY ASH*

M.A.B. Wijaya¹, B. B. Adhitya^{1*} dan A. Costa¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

^{1*} *Corresponding author: bimo@unsri.ac.id*

ABSTRAK: Dalam pembangunan infrastruktur yang masif menyebabkan kurangnya daerah resapan air pada beberapa tempat sehingga dibutuhkan inovasi yaitu *pervious concrete*. Material yang umum digunakan pada *pervious concrete* adalah beton tanpa agregat halus yaitu agregat kasar berukuran seragam, semen dan air. Tetapi penggunaan semen dapat mengakibatkan pemanasan global yang disebabkan oleh emisi gas CO₂ akibat dari produksi semen untuk pengikat campuran beton. Maka dari itu muncul bahan alternatif pengganti semen yaitu geopolimer. Geopolimer adalah pengikat yang terdiri dari silika dan alumina atau biasanya dipakai yaitu *fly ash* dan bahan alkali yaitu sebagai aktivator. Demi mengatasi kurangnya daerah resapan air dan semakin meningkatnya pemanasan global akibat produksi semen akibat emisi gas CO₂ maka munculnya inovasi mengenai *pervious geopolymer concrete* berbahan yang ramah lingkungan dan berfungsi sebagai beton yang dapat menyerap aliran air dengan cepat dengan penerapan pada lapangan parkir, stabilisasi lereng dan sebagainya. Penelitian ini mengenai pengaruh rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* yang digunakan terhadap kuat tekan, kuat belah, permeabilitas, dan porositas optimum pada *pervious geopolymer concrete*. Dari hasil penelitian kuat tekan dan kuat belah maksimum terdapat pada campuran PGC45 sebesar 6,072 MPa dan 1,050 MPa. Nilai porositas dan permeabilitas maksimum didapatkan pada campuran PGC35 yaitu sebesar 34,33% dan 1,557 cm/detik .

Kata Kunci: *pervious geopolymer concrete, kuat tekan, kuat belah, porositas, permeabilitas.*

ABSTRACT: Massive infrastructure development causes a lack of water supply areas in several places so that innovation is needed, namely *pervious concrete*. The material commonly used in *pervious concrete* is concrete without fine aggregate, namely coarse aggregate of uniform size, cement and water. But the use of cement can cause global warming caused by CO₂ gas emissions resulting from the production of cement for binding concrete mixes. Therefore, an alternative material to replace cement emerged, namely geopolymer. Geopolymer is a binder consisting of silica and alumina or usually used, namely *fly ash* and alkaline materials as activators. In order to overcome the lack of water catchment areas and the increasing global warming due to cement production due to CO₂ emissions, there is an innovation regarding *pervious geopolymer concrete* made from environmentally friendly and functioning as concrete that can absorb water flow quickly with application in parking lots, slope stabilization and so on. . This research is about the effect of the ratio of alkali activator to *fly ash* used on the optimum compressive strength, splitting strength, permeability, and porosity in *pervious geopolymer concrete*. From the results of the study the maximum compressive strength and splitting strength were found in the PGC45 mixture of 6.072 MPa and 1.050 MPa. The maximum porosity and permeability values obtained in the PGC35 mixture are 34.33% and 1.557 cm/second..

Keywords: *pervious geopolymer concrete, compressive strength, split tensile strength, porosity, permeability.*

PENDAHULUAN

Dalam pembangunan infrastruktur, material beton adalah material yang umum digunakan mulai dari pembangunan gedung, irigasi, jalan raya dan sebagainya. Pembangunan yang masif dilakukan oleh masyarakat demi menciptakan sarana dan prasarana agar terciptanya kehidupan yang nyaman dan sejahtera. Pembangunan tersebut menimbulkan akibat yaitu berkurangnya ketersediaan lahan hijau sebagai daerah resapan air dan akhirnya terjadinya banjir. Solusi untuk mengatasi kekurangan daerah resapan air tersebut adalah dengan menggunakan *pervious concrete* yang tingkat permeabilitas airnya yang tinggi dan juga porositasnya. *Pervious concrete* merupakan beton khusus yang memiliki tingkat porositas tinggi dan permeabilitas tinggi. Campuran dari beton porus terdiri dari agregat berukuran seragam atau tunggal, semen dan air. Penggunaan *pervious concrete* dalam sarana dan prasarana di kehidupan sehari-hari adalah untuk lapangan parkir, stabilisasi lereng, trotoar dan sebagainya. Fungsi dari *pervious concrete* adalah agar air hujan dapat dialirkan menuju tanah sehingga daerah resapan dan ketersediaan air tanah terjaga. Pada umumnya beton adalah material yang terdiri dari agregat, semen dan air. Semen yang diproduksi menimbulkan pemanasan global akibat dari emisi gas CO₂ sehingga menimbulkan kesadaran masyarakat global untuk mereduksi CO₂ ini. Pada tahun 1978, Professor Joseph Davidovitz memperkenalkan beton geopolimer. Dimana beton geopolimer mendukung konsep ramah lingkungan yang mengganti semen dengan bahan alternatif sebagai pengikat yaitu geopolimer.

Geopolimer adalah pengikat yang terdiri dari silika dan alumina atau biasanya dipakai yaitu *fly ash* dan bahan alkali yaitu sebagai aktivator. *Fly ash* adalah merupakan limbah batu bara yang ketersediaannya banyak dan digunakan dalam geopolimer sebagai bahan dasar (prekursor). Selain *fly ash*, alkali aktivator merupakan bahan utama dari geopolimer. Dimana komposisi alkali aktivator yaitu NaOH dan Na₂SiO₃ mempengaruhi kekuatan tekan (Kotwal dkk, 2014). Dalam mengatasi kekurangan akan ketersediaan daerah resapan yang mengakibatkan berkurangnya air resapan dan terjadinya banjir serta untuk mengurangi CO₂ akibat dari produksi semen, oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *pervious geopolymer concrete* dengan variasi rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* (AA/FA) terhadap kekuatan tekan (*compressive strength*) dan kekuatan tarik (*tensile strength*). Selain itu penelitian ini juga menganalisa permeabilitas dan porositas dalam *pervious geopolymer concrete*

Adapun ruang lingkup penelitian ini adalah:

1. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini agregat ukuran seragam dengan satu ukuran gradasi yaitu 4,75 mm - 9,5 mm.
2. *Fly ash* dari PT. Pupuk Sriwijaya sebagai prekursor.
3. Rasio alkali aktivator dengan *fly ash* (AA/FA) dengan rasio 0.35, 0.40, 0.45, 0.50.
4. Rasio *fly ash* dan agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah satu banding tujuh (1:7)

dengan perbandingan massa.

5. Konsentrasi sodium hidroksida yang digunakan adalah sebesar 10 molaritas.
6. Rasio sodium silikat dan sodium hidroksida sebagai pembentuk larutan alkali yang digunakan adalah sebesar 2,5.
7. Bekisting yang digunakan adalah berbentuk silinder dengan ukuran 100 mm x 200 mm yang terbuat dari besi.
8. Perawatan (*curing*) terhadap benda uji dilakukan dengan cara disteam atau dioven pada temperatur 90°C selama 24 jam.
9. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari, 28 dan 56 hari dengan tiap variasi dan pengujian berjumlah 3 sampel. Jumlah total yang digunakan adalah sampel 72 *pervious geopolymer concrete*.

TINJAUAN PUSTAKA

Definisi *Pervious Geopolymer Concrete*

Pervious geopolymer concrete atau beton geopolimer yang dapat ditembus adalah beton yang memiliki rongga didalamnya dengan tujuan agar air dapat melewatinya. Kelebihan dari beton jenis ini adalah dapat mengisi kembali air tanah, mencegah aliran air hujan yang berlebih, mencegah genangan air pada saat musim hujan, dan lain sebagainya. Beton ini hanya memiliki agregat kasar sehingga tingkat porositasnya tinggi dan air dapat melewati beton dengan melalui rongga – rongga yang terdapat diantara agregat tersebut. Beton ini berbeda dari beton porus lainnya karena menggunakan *binder* atau pengikat yang terbuat dari bahan yang mengandung senyawa yang terdapat dalam semen dan diaktifkan dengan larutan alkali sehingga terbentuk geopolimer.

Material Penyusun *Pervious Geopolymer Concrete*

Fly ash

Fly ash atau abu terbang merupakan residu dari proses pembakaran batu bara. *Fly ash* merupakan material anorganik yang berasal dari pembakaran unit pembangkit uap (*boiler*).

Agregat Kasar

Agregat kasar terdiri dari kerikil, kerikil pecah, batu pecah, terak atau hancuran hidraulik beton semen, atau kombinasinya. Agregat kasar yang digunakan pada beton yang akan mengalami pembasahan, paparan ke atmosfer atau kontak terhadap tanah lembab yang lama tidak diperbolehkan mengandung bahan yang reaktif terhadap alkali dalam semen.

Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini adalah aquades, air yang bebas dari kandungan zat organik. Keperluan air ditentukan oleh campuran beton. Air yang digunakan harus bersih, bebas dari minyak, alkali, asam, zat organik, dan sebagainya. *Pervious geopolymer concrete* hanya menggunakan air dalam kebutuhan

pembuatan *binder* geopolimer.

Larutan Alkali

Larutan alkali dalam beton geopolimer berfungsi sebagai *aktivator* senyawa-senyawa yang terdapat dalam *fly ash* sehingga terjadi proses polimerisasi. Larutan alkali yang umum digunakan dalam beton geopolimer adalah natrium hidroksida (NaOH) yang berbentuk padat kemudian dilarutkan dengan *aquades* sampai konsentrasi tercapai dan larutan sodium silikat atau *waterglass* (Na₂SiO₃). Natrium hidroksida dalam campuran beton geopolimer berperan sebagai reaktan alkalin dan sodium silikat sebagai katalisator berguna untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Dalam pengikat beton geopolimer, terdapat kadar larutan alkali terhadap *pozzolan* yaitu *fly ash* yang digunakan. Kadar tersebut berperan penting dan berpengaruh terhadap kekuatan tekan dan permeabilitas air

Pengujian *Fly ash*

X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan pengujian abu terbang dengan tujuan untuk mengetahui tentang identifikasi fase kristal terhadap bahan yang digunakan dalam penelitian ini. Kandungan kristal pada *fly ash* tidak boleh mendominasi karena dapat mengganggu proses pengecoran material, karena *fly ash* tidak akan bereaksi dengan material lain. Tujuan dari XRD adalah menentukan sistem kristal, menerangkan parameter kisi, susunan atom pada kristal, jenis struktur, orientasi dan ukuran butir.

X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF merupakan pengujian dengan tujuan pemeriksaan kandungan unsur-unsur yang membentuk material yaitu *fly ash*. Umumnya digunakan untuk menentukan konsentrasi suatu unsur menggunakan panjang gelombang dan jumlah sinar X yang dipancarkan kembali setelah suatu unsur material tersebut ditembak oleh sinar X berenergi tinggi. Terdapat dua cara analisis yang dilakukan yaitu analisis secara kualitatif dan analisis secara kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan untuk menganalisis jenis-jenis unsur yang terkandung dalam material, sedangkan analisis kuantitatif dilakukan untuk menganalisis konsentrasi unsur yang terkandung dalam material metode analisis untuk mengidentifikasi komposisi material.

Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM merupakan pemeriksaan dengan mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai permukaan dengan sinar elektron. Pengujian SEM ini dilakukan untuk mengetahui bentuk, ukuran, dan struktur pada material.

Pengujian *Pervious geopolymer concrete* *Kuat Tekan (Compressive Strength)*

Kekuatan tekan atau *compressive strength* adalah kemampuan dari beton untuk menerima beban atau tekanan per satuan luas. Pengujian kuat tekan mengikuti standar pengujian ASTM C 39 yang dihitung dengan rumus:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

f_c = Kuat tekan (N/mm² = MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas permukaan (mm²)

Pengujian Kuat Belah (Split Tensile Strength)

Pengujian kuat tarik belah dilakukan dengan cara spesimen beton silinder diletakan dengan posisi rebah, kemudian beton silinder diberikan beban vertikal secara berangsur hingga mencapai nilai maksimum dan beton silinder *crack* atau belah karena gaya tarik horizontal. Pengujian kuat belah mengacu standar pengujian ASTM C 496 yang dihitung dengan rumus:

$$f_{st} = \frac{2P}{\pi.L.D}$$

Keterangan:

f_{st} = Kuat tarik belah beton (N/mm² = MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Tinggi silinder (mm)

D = Diameter silinder (mm)

Porositas (Porosity)

Porositas adalah rasio antara volume pori dengan volume total yang ada dalam spesimen. Menurut ACI 522R-10 nilai porositas pada *pervious concrete* berkisar antara 15 – 35%. Nilai porositas pada *pervious geopolymer concrete* dilakukan mengacu standar pengujian ASTM C 1688. Dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \left[1 - \left(\frac{W_1 - W_2}{P_w V} \right) \right] \times 100\%$$

Keterangan:

P = Porositas (%)

W1 = Berat sampel setelah dikeringkan (kg)

W2 = Berat sampel dalam air (kg)

V = Volume sampel (m³)

Pw = Massa jenis air (kg/m³)

Permeabilitas (Permeability)

Permeabilitas air adalah kemampuan air untuk meloloskan atau menembus dari suatu *pervious geopolymer concrete*. Permeabilitas tersebut diukur dengan Hukum Darcy yaitu tepatnya disebut dengan koefisien Darcy. Pada Pengujian permeabilitas digunakan alat *falling head permeameter*. Standar pengujian yang digunakan dalam mengukur permeabilitas adalah dengan acuan ASTM C1701/M. Pengujian menggunakan alat *falling head permeameter*. Berikut rumus perhitungan yang digunakan :

$$k = 2,303 \times \frac{A_1 \times L}{A_2 \times t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

Keterangan:

A1 = Luas penampang tabung (cm²)

A2 = Luas penampang benda uji (cm²)

L = Panjang spesimen sampel silinder (cm)

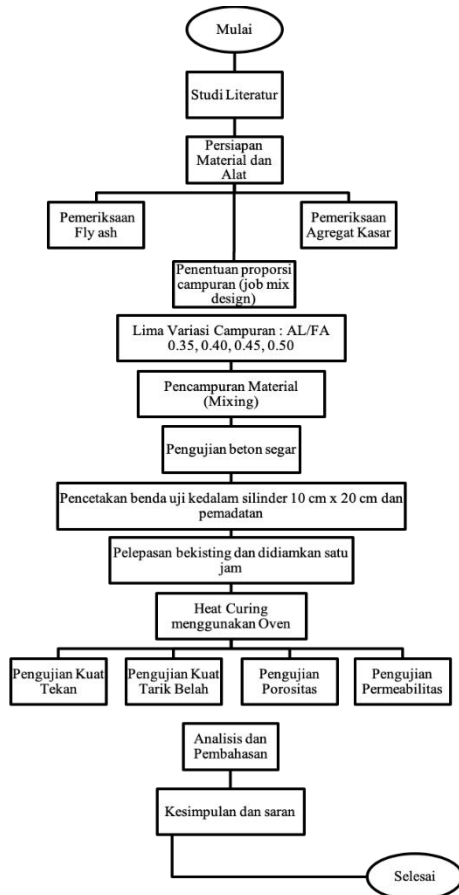
h1 = Permukaan air awal (cm)

h2 = Permukaan air akhir (cm)

t = Waktu dari h1 ke h2 (s)

METODOLOGI

Berikut ini merupakan diagram alir yang akan digunakan sebagai langkah-langkah dalam penelitian.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Tahap I

Tahap awal yang pertama kali dilaksanakan yaitu persiapan dari material dan alat yang diperlukan untuk pencampuran *pervious geopolymer concrete*. Material yang dipersiapkan adalah agregat kasar, *fly ash*, dan larutan alkali yang terdiri dari sodium silikat dan sodium hidroksida serta *aquades*. Peralatan yang dipersiapkan adalah bekisting, *mixer*, gelas ukur, alat pemadatan dan *oven*.

Tahap II

Tahap kedua merupakan tahap yang dilakukan untuk pengujian terhadap agregat kasar dan prekursor yang digunakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari material penyusun *pervious geopolymer concrete*, berikut adalah pengujiannya yang dilakukan sesuai standar. Pada agregat kasar dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan mengadopsi standar ASTM C 127 dan ASTM C136 untuk analisa saringan demi mendapatkan agregat seragam, pengujian berat volume mengadopsi standar ASTM C29. Sedangkan pada *fly ash* dilakukan pengujian XRD, XRF, dan SEM.

Tahap III

Tahap ketiga adalah tahap perencanaan dan penyusunan komposisi campuran atau mix design *pervious geopolymer concrete*. Perencanaan dan penyusunan dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang berasal dari penelitian terdahulu dan juga standar ACI. *Mix design* yang direncanakan berdasarkan *trial* yang telah dilakukan di laboratorium.

1. Rasio agregat kasar terhadap prekursor *fly ash* yang digunakan sebesar 7 berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Arafa et al., (2017) mengenai *Optimum Mix For Pervious Geopolymer Concrete based on water permeability and compressive strength*
2. Rasio alkali aktivator Na_2SiO_3 terhadap NaOH yang digunakan sebesar 2,5 berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Arafa et al., (2017) mengenai *Optimum Mix For Pervious Geopolymer Concrete based on water permeability and compressive strength*.
4. Molaritas NaOH yang digunakan sebesar 12 Molar
5. Ukuran Agregat yang digunakan adalah ukuran agregat seragam dengan ukuran 4,75 mm – 9,5 mm.

Variasi rasio alkali aktivator terhadap prekursor *fly ash* yang digunakan terdiri dari 4 variasi yaitu AA/FA yang digunakan bervariasi yaitu 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 dengan penamaan variasi 0,35 yaitu PGC35, variasi 0,40 yaitu PGC40, variasi 0,45 yaitu PGC45, variasi 0,50 yaitu PGC50. Jumlah benda uji pada setiap variasi terdiri dari tiga sampel. Berikut adalah perencanaan campuran yang digunakan untuk 1 sampel dapat dilihat pada tabel 1 Tabel 1. Perencanaan campuran

Kode	Agg Kasar (kg)	Fly-Ash (kg)	AA/FA	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Larutan Alkali (kg)	NS (kg)	NH (kg)
PGC35	1400	200	0,35	2,5	70	50	20
PGC40	1400	200	0,40	2,5	80	57,143	22,857
PGC45	1400	200	0,45	2,5	90	64,286	25,714
PGC50	1400	200	0,50	2,5	100	71,429	28,571

Tahap IV

Tahap keempat merupakan tahap pengecoran benda uji *pervious geopolymer concrete*. Pada awalnya dilakukan penimbangan pada material yang diperlukan tiap variasi. Kemudian campurkan larutan Na_2SiO_3 dan NaOH sesuai rasio yang telah ditentukan, lalu aduk hingga tercampur merata. Setelah itu proses pencampuran dilakukan dengan cara masukkan agregat kasar dan *fly ash* ke dalam molen. Kemudian hidupkan molen. Proses pengadukan selama 3 menit hingga seluruh permukaan agregat terselimuti *fly ash*. Lalu tuang larutan alkali aktivator yang telah dibuat. Kemudian molen dihidupkan kembali untuk pengadukan. Proses pengadukan selama 5 menit hingga campuran terlihat homogen. Selanjutnya masukkan campuran kedalam *bekisting* yang sudah dibersihkan dan diolesi oil pada permukaan dalam. Pada saat memasukkan campuran ke dalam *bekisting* dibagi menjadi 3 bagian, dimana setiap bagiannya dilakukan penumbukan sebanyak 25 kali agar

Analisis Kekuatan Tekan dan Permeabilitas Pervious Geopolymer Concrete dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator terhadap Fly Ash

campuran menjadi lebih padat. Setelah campuran memenuhi *bekisting*, kemudian permukaan atas diratakan. Setelah benda uji tercetak selanjutnya dilakukan *curing* dengan cara mengoven benda uji dengan suhu 90°C selama 24 jam.

Tahap V

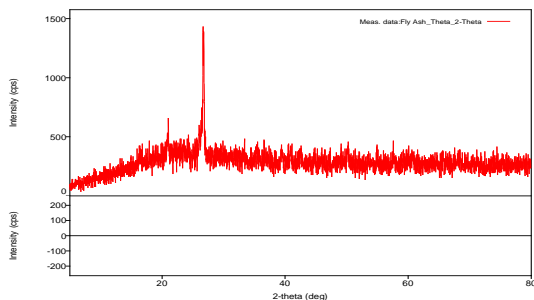
Pada tahap terakhir dilakukan pengujian benda uji. Pengujian dilakukan pada beton berumur 7 hari, 28 hari dan 56 hari untuk pengujian kuat tekan dan kuat belah dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM), sedangkan pengujian porositas dan permeabilitas dilakukan pada beton berumur 28 hari.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Fly ash

Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pada pengujian ini analisis dilakukan dengan sumber sinar X-Ray dengan tegangan sebesar 30 kV dan arus sebesar 10 mA, dengan kecepatan 10°/menit dan sudut difraksi yang digunakan sebesar 2θ yaitu (5-80)°. Hasil difraksi yang telah diuji ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2 Hasil Pengujian XRD

Hasil difraktogram menunjukkan pola difraksi yang landai, dimana puncak khas difraktogram tersebut di 2θ yaitu pada 26,7°. Berdasarkan pengujian XRD, *fly ash* yang digunakan memiliki struktur amorf. Hal ini dapat dilihat dari sedikitnya puncak kristalin yang dihasilkan oleh *fly ash*. Struktur amorf dan sedikitnya puncak kristalin yang mendominasi pada *fly ash* menunjukkan bahwa *fly ash* tersebut reaktif dan mempunyai proses pelarutan yang mudah.

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)

Dalam pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil Fe₂O₃ sebesar 5,74 % dan SiO₂ sebesar 36,36 % serta Al₂O₃ sebesar 18,64 % dengan total kandungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ sebanyak 60,74 % sedangkan kandungan CaO sebesar 2,91 %. Berdasarkan data yang didapatkan dari pengujian XRF, apabila mengacu ASTM C618 dan AASHTO M295 versi terbaru serta penelitian yang dilakukan oleh Suraneni, (2021) tentang perbedaan spesifikasi *fly ash* pada tiap standar yang digunakan tiap negara. *Fly ash* yang digunakan tergolong sebagai kelas F

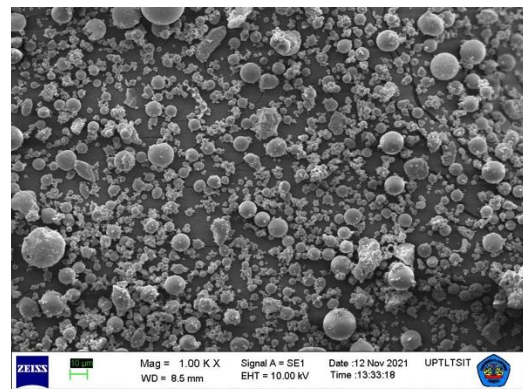
karena memiliki SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ lebih dari 50% dan kadar kalsium atau CaO yang ada kurang atau sama dengan 18 % yaitu sebesar 2,91 %. Kadar kalsium yang rendah ini dapat mempengaruhi kuat tekan dari *pervious geopolymer concrete*. Dalam beton geopolimer kandungan kalsium atau CaO memiliki peran penting dalam waktu *setting* geopolimer dan kuat tekan. Hasil pengujian XRF dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian XRF

Komposisi Kimia	Jumlah Kandungan (%)
Fe ₂ O ₃	5,7413
SiO ₂	36,3552
Al ₂ O ₃	18,6427
P ₂ O ₅	0,2055
SO ₃	0,2849
K ₂ O	0,7973
CaO	2,9143
TiO ₂	0,9807
MgO	0,2866
MnO	0,0932
CuO	0,0116
ZnO	0,0246
SrO	0,0931
Y ₂ O ₃	0,0095
ZrO ₂	0,0555
Balance	33,5039

Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Hasil yang didapatkan berdasarkan pengujian SEM dalam penelitian ini adalah partikel *fly ash* sebagian besar memiliki bentuk partikel berbentuk bulat. Hasil pengujian SEM dengan perbesaran 10.000x. Dari gambar yang didapatkan dari hasil pengujian, sebagian besar ukuran partikel *fly ash* didominasi oleh partikel ukuran kurang dari 2 μm. Bentuk partikel dari *fly ash* ini adalah berbentuk bulat dengan beragam ukuran partikel *fly ash* tersebut. Ukuran partikel yang terkandung mempengaruhi kehalusan dari *fly ash*, dimana kehalusan dari *fly ash* tersebut mempengaruhi terhadap reaktivitas *fly ash*. Semakin banyak *fly ash* memiliki ukuran partikel kurang dari 43 μm maka semakin mudah campuran untuk dilarutkan dan juga mempengaruhi kuat tekan dari beton tersebut. Hasil pengujian SEM dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

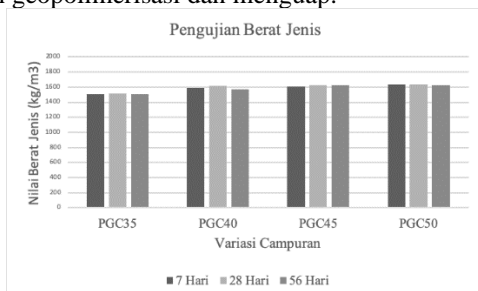


Gambar 3 Hasil Pengujian SEM

Pengujian Pervious geopolymer concrete

Pengujian Berat Jenis

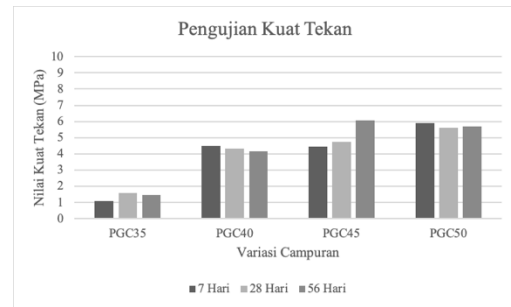
Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dari keempat jenis variasi didapatkan nilai berat jenis meningkat setiap bertambahnya rasio alkali aktivator terhadap *fly ash*. Penambahan nilai berat jenis ini tidak secara signifikan dimana penambahan berat jenis ini akibat dari semakin banyaknya *binder fly ash* yang bereaksi sehingga membentuk ikatan geopolimer dan mengeras lalu menambah massa dari benda uji tersebut. Sedangkan pada grafik berdasarkan waktu, berat jenis dari variasi tersebut menurun tetapi tidak secara signifikan, hal ini disebabkan semakin lama dari umur benda uji tersebut maka benda uji akan kehilangan kelembapannya akibat air yang terdapat pada benda uji telah bereaksi membentuk ikatan geopolimerisasi dan menguap.



Gambar 4. Hasil Pengujian Berat Jenis

Pengujian Kuat Tekan

Dari hasil pengujian kekuatan tekan yang dihasilkan memiliki hasil yang berbeda tiap variasinya. Berdasarkan tabel diatas, kekuatan tekan yang dihasilkan memiliki hasil yang berbeda tiap variasinya. Variasi rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* sebesar 0,5 pada umur 7 hari menghasilkan kekuatan tekan paling tinggi sebesar 5,902 MPa. Sedangkan untuk umur 28 hari, kekuatan tekan paling tinggi terdapat pada variasi PGC50 yaitu sebesar 5,605 MPa. Untuk umur 56 hari, kekuatan tekan paling tinggi terdapat pada variasi PGC45 yaitu sebesar 6,072 MPa. Sedangkan untuk kekuatan tekan paling rendah terdapat pada variasi PGC35 pada umur 7 hari, 28 hari dan 56 hari secara berurutan yaitu sebesar 1,104 MPa, 1,571 MPa dan 1,444 MPa. Berdasarkan grafik pada gambar 5 pengaruh pertambahan rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* pada tiap variasi menghasilkan pertambahan nilai kuat tekan ketika variasi dari rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* dinaikkan. Dapat dilihat pada grafik, variasi PGC35 menghasilkan kuat tekan yang rendah hal ini disebabkan karena campuran tersebut kering, akibat dari larutan alkali aktivator tidak bisa memenuhi kebutuhan dari *fly ash* untuk bereaksi sehingga kekuatan *binder* pun menurun. Pada grafik variasi pada umur 7 hari, 28 hari dan 56 hari kekuatan dari benda uji memiliki *trend line* yang meningkat akan tetapi, dapat dilihat grafik berdasarkan umur dari benda uji nilai tidak ada perbedaan yang signifikan. Berdasarkan grafik dan tabel diatas variasi PGC45 merupakan variasi yang memiliki trend naik secara konsisten berdasarkan grafik umur benda uji dan variasi PGC50 menghasilkan kuat tekan yang paling tinggi diakibatkan karena kebutuhan alkali aktivator untuk membuat *binder* geopolimer yang terpenuhi.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan perbandingan dengan ACI 522R-10, dapat dilihat bahwa variasi benda uji dengan kode PGC35 memiliki nilai kuat tekan yang rendah dengan angka dibawah minimal persyaratan ACI 522R-10 yaitu 2,8 MPa – 28 MPa. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa benda uji dengan variasi kode PGC35 tidak dapat dikategorikan sebagai *pervious concrete* yang memenuhi ACI 522R-10.

Dapat dilihat dan dibandingkan dengan penelitian terdahulu, perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi acuan penelitian ini yaitu Arafa, dkk, (2016) dan Tho-in, dkk, (2012) yang memiliki nilai lebih besar. Terdapat satu hal yang menjadi perbedaan penting yang menjadi penyebab hasil kekuatan tekan penelitian ini berbeda dengan penelitian terdahulunya yaitu kandungan-kandungan unsur yang terdapat pada *fly ash* yang digunakan. Perbedaan jumlah persentase kandungan-kandungan unsur utama sebagai pembentuk ikatan geopolimer pada *fly ash* dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. Perbedaan kandungan kimia dengan penelitian terdahulu

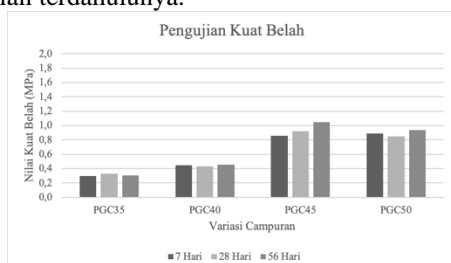
Kandungan Kimia	Peneliti	Arafa et al (2016)	Tho-in (2012)
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	60,74 %	71,70 %	89,02 %

Perbedaan kandungan kimia yang dimiliki pada *fly ash* menghasilkan perbedaan nilai kuat tekan. Dimana kandungan kimia SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ merupakan senyawa kimia yang menjadi peran penting dalam pembentukan ikatan geopolimer. Senyawa SiO₂ dan Al₂O₃ bereaksi dengan natrium hidroksida atau alkali aktivator yang kemudian membentuk ikatan struktur Si – O – Al – O sehingga terbentuklah ikatan geopolimer dengan nama polysialate. Dimana jumlah senyawa tersebut mempengaruhi kekuatan tekan dari *binder* geopolimer yang terbentuk. Semakin tinggi persentase SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ maka semakin meningkat pula kuat tekan yang dihasilkan. Selain senyawa kimia pada *fly ash* yang mempengaruhi kuat tekan benda uji, terdapat salah satu faktor lain yaitu suhu yang digunakan untuk *curing* benda uji. Menurut penelitian yang dilakukan Jaarsveld, dkk, (2002) dan Bakri, dkk, (2011) penggunaan suhu tinggi untuk *curing* geopolimer dan *curing* dalam jangka waktu lama dapat meningkatkan kuat tekan dari beton tersebut tetapi, terdapat suatu resiko bahwa benda uji itu akan mengalami keretakan secara fisik akibat kurangnya larutan alkali aktivator dan mengakibatkan benda uji

mengalami penurunan kekuatan mekanis dari *pervious geopolimer concrete*. Suhu tinggi yang diberikan pada geopolimer merusak struktur gel yang terdapat pada struktur kimia geopolimer tersebut. Pada penelitian Arafa, dkk, (2016) memiliki kelebihan yaitu memiliki nilai kuat tekan yang tergolong tinggi akibat menggunakan suhu *curing* yang tinggi yaitu 80° C dalam jangka waktu 24 jam, tetapi tidak untuk hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu menggunakan suhu 90° C dalam waktu 24 jam menghasilkan kuat tekan yang rendah memiliki nilai kuat tekan yang tergolong rendah hal ini diakibatkan adanya resiko keretakan pada *binder* geopolimer pada benda uji.

Pengujian Kuat Belah

Dalam pengujian kuat belah *pervious geopolymer concrete* berdasarkan grafik dibawah didapatkan hasil berikut yaitu nilai kuat belah tertinggi pada variasi PGC45 pada umur benda uji 56 hari yaitu 1,050 MPa. Sedangkan untuk nilai kuat belah terendah pada variasi PGC35 pada umur 56 hari yaitu 0,297 MPa. Berdasarkan grafik pengaruh pertambahan rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* pada tiap variasi menghasilkan pertambahan nilai kuat belah. Berdasarkan tabel yang telah ditunjukkan diatas, perbedaan kuat belah berdasarkan umur benda uji tidak terlalu signifikan. Sedangkan untuk nilai kuat belah berdasarkan variasi alkali aktivator terhadap *fly ash* mengalami kenaikan *trend* setiap nilai rasio ditingkatkan. dapat dilihat trend kenaikan dari nilai kuat belah dari benda uji, dan kenaikan berhenti pada variasi PGC45 yang kemudian tidak ada perbedaan yang signifikan pada variasi PGC50. Terlihat nilai terendah pada variasi PGC35 dimana disebabkan oleh *fly ash* tidak seluruhnya aktif bereaksi akibat kurangnya alkali aktivator pada campuran. Dibandingkan dengan ACI 522R-10 pengujian kuat tarik belah tidak terdapat nilai kuat tarik belah secara umum yang dicantumkan didalamnya. Tetapi, pengujian kuat tarik belah dapat dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Tho-in, dkk, (2012) yang disajikan dalam tabel dibawah ini. Apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulunya, akibat resiko terjadinya retakan akibat *curing* menggunakan suhu tinggi yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Nilai kuat tarik belah yang didapatkan bernilai dibawah dari nilai penelitian terdahulunya.

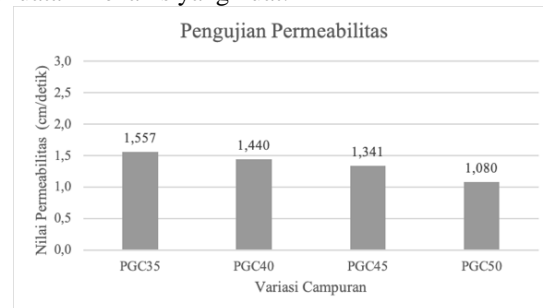


Gambar 6 Hasil Pengujian Kuat Belah

Pengujian Permeabilitas

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa nilai permeabilitas paling tinggi terdapat pada variasi rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* adalah variasi 0,35

sebesar 1,557 cm/detik. Sedangkan nilai permeabilitas yang terendah terdapat pada variasi rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* yaitu 0,5. Pada penambahan rasio alkali aktivator terhadap *fly ash*, semakin bertambah alkali aktivator yang digunakan sehingga semakin banyak *fly ash* yang bereaksi dan menutupi pori atau rongga yang terdapat pada benda uji. Pengaruh dari banyak alkali aktivator yang digunakan atau bertambahnya rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* maka permeabilitas semakin rendah, hal ini berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan yaitu semakin bertambah rasio maka nilai kuat tekan semakin tinggi. Hasil pengujian permeabilitas dapat dilihat pada gambar 7. Apabila dibandingkan dengan persyaratan yang terdapat pada ACI 522R-10 secara umum *pervious concrete* memiliki nilai permeabilitas sebesar 0,14 cm/detik sampai 1,22 cm/detik. Dalam penelitian ini, hanya variasi dengan kode PGC50 yang memenuhi syarat sesuai dengan ACI 522R-10 yaitu sebesar 1,080 cm/detik. Sedangkan variasi yang lainnya memiliki nilai lebih dari 1,22 cm/detik yang ditetapkan oleh ACI 522R-10. Hal ini disebabkan karena tingginya jumlah rongga yang terdapat pada benda uji mengakibatkan nilai permeabilitas juga meningkat. Apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulu, dapat dilihat bahwa nilai permeabilitas yang terdapat pada penelitian terdahulu tergolong besar sesuai dengan ukuran agregat yang digunakan. Nilai permeabilitas penelitian terdahulu melebihi nilai yang terdapat pada ACI 522R-10. Dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan, nilai permeabilitas memiliki nilai lebih kecil. Nilai permeabilitas yang rendah menunjukkan bahwa kondisi benda uji tersebut padat sehingga dapat menghasilkan kekuatan mekanis yang kuat.

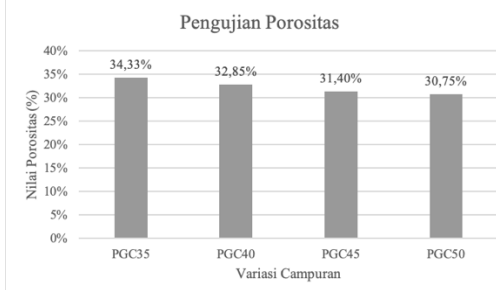


Gambar 7 Hasil Pengujian Permeabilitas

Pengujian Porositas

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan variasi PGC35 memiliki nilai porositas tertinggi karena *binder* yang terdapat pada beton berjumlah sedikit akibat kurangnya larutan alkali aktivator untuk membuat *binder* geopolimer, nilai porositas yang dimiliki adalah sebesar 34,33%. Dan untuk nilai porositas terendah terdapat pada variasi PGC50 karena rongga atau pori yang terdapat benda uji sudah terisi oleh *binder* geopolimer, nilai porositasnya yaitu 30,75%. Pada penambahan rasio alkali aktivator terhadap *fly ash*, semakin bertambah alkali aktivator yang digunakan maka semakin banyak *fly ash* yang bereaksi dan menutupi pori atau rongga yang terdapat pada benda

uji. Oleh karena itu, tiap variasi dari benda uji mempengaruhi porositas dari benda uji. Pengaruh dari pertambahan rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* dalam porositas *pervious geopolymer concrete* yaitu nilai porositas menjadi semakin rendah. Nilai-nilai porositas yang didapatkan tiap variasi pada penelitian ini telah memenuhi syarat yang secara umum ditetapkan di ACI 522R-10 yaitu sebesar 15%-35%.



Gambar 8. Hasil Pengujian Porositas

KESIMPULAN

1. Pengaruh variasi rasio alkali aktivator dan *fly ash* terhadap berat jenis dan sifat mekanis yaitu kuat tekan dan kuat belah pada *pervious geopolymer concrete* diuraikan sebagai berikut pengujian berat jenis pada dengan variasi PGC50 menghasilkan berat jenis tertinggi, yaitu 1635,24 kg/m³. Sedangkan pengujian berat jenis dengan variasi PGC35 menghasilkan berat jenis terendah, yaitu 1501,61 kg/m³. Pengujian kuat tekan variasi PGC45 menghasilkan kuat tekan maksimum, yaitu 6,072 MPa. Pengujian kuat tarik dengan variasi PGC45 menghasilkan kuat tekan maksimum, yaitu 1,050 MPa. *Pervious geopolymer concrete* dengan variasi PGC45 merupakan variasi yang paling optimum berdasarkan umur benda uji dan kuat tekan dan kuat belah tarik benda uji, hal ini dikarenakan nilai yang dihasilkan kuat tekan meningkat seiring bertambahnya waktu. Bertambahnya rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* maka kuat tekan dan kuat belah benda uji semakin meningkat. Sedangkan untuk hubungan antara sifat mekanis (kuat tekan dan kuat tarik belah) terhadap nilai koefisien permeabilitas dan porositas adalah berbanding terbalik, dimana semakin meningkatnya nilai kuat mekanis maka nilai koefisien permeabilitas dan porositas akan menurun. Dapat disimpulkan menurut definisi ACI 522R-10 variasi PGC40, PGC45 dan PGC50 merupakan *pervious geopolymer concrete* yang memenuhi syarat disebut *pervious concrete* ACI 522R-10 karena memiliki nilai kuat tekan antara 2,8 MPa – 28 MPa, sedangkan untuk variasi dengan kode PGC35 tidak dapat memenuhi syarat dikarenakan mempunyai nilai kuat tekan dibawah batas minimal 2,8 MPa.
2. Hasil pengujian permeabilitas pada variasi PGC35 menghasilkan permeabilitas dengan nilai paling tinggi, yaitu 1,557 cm/detik dan permeabilitas terendah terdapat pada variasi PGC50 yaitu sebesar 1,080 cm/detik. Permeabilitas *pervious geopolymer*

concrete semakin menurun sering bertambahnya jumlah rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* yang digunakan. Hasil pengujian porositas pada variasi PGC35 menghasilkan permeabilitas maksimum, yaitu 34,33% dan porositas terendah terdapat pada variasi PGC50 yaitu sebesar 30,75%. Porositas *pervious geopolymer concrete* semakin menurun sering bertambahnya jumlah rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* yang digunakan. Sedangkan untuk hubungan antara nilai porositas dan koefisien permeabilitas terhadap sifat mekanis (kuat tekan dan kuat tarik belah) adalah berbanding terbalik, dimana semakin meningkatnya nilai porositas dan permeabilitas maka nilai kuat tekan dan kuat tarik belah akan menurun. Dapat disimpulkan menurut definisi ACI 522R-10 variasi dengan kode PGC50 merupakan *pervious geopolymer concrete* yang memenuhi syarat disebut *pervious concrete* ACI 522R-10 karena memiliki nilai porositas sebesar 30,75% dengan definisi ACI 522R-10 *pervious concrete* memiliki nilai porositas diantara 15% – 35% dan dengan nilai permeabilitas sebesar 1,080 cm/detik dengan definisi ACI 522R-10, *pervious concrete* memiliki nilai permeabilitas dengan nilai 0,14 cm/detik – 1,22 cm/detik. Sedangkan untuk variasi dengan kode PGC35, PGC40 dan PGC45 memenuhi definisi ACI 522R-10 dalam hal porositas sedangkan nilai permeabilitas yang dimiliki tidak memenuhi yaitu diatas 1,22 cm/detik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Mohd Mustafa Al Bakri, H Kamarudin, M Bnhussain, I Khairul Nizar, A R Rafiza, and Y Zarina. 2011. *The Relationship of NaOH Molarity, Na2SiO3/NaOH Ratio, Fly ash/Alkaline Activator Ratio, and Curing Temperature to the Strength of Fly ash-Based Geopolymer*. Trans Tech Publ : *Advanced Materials Research*, 328:1475–82.
- Abdulsalam Arafa, S., Mohd Ali, A. Z., Rahmat, S. N., & Lee, Y. L. 2017. *Optimum Mix for Pervious Geopolymer Concrete (GEOCRETE) Based on Water Permeability and Compressive Strength*. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1024.
- ACI Committee 522R-10. 2010. *Pervious Concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- Adhitya, B. B., Anis Saggaff, Hanafiah, & Dinar Dwi Anugerah Putranto. 2022. *The Effect Of Porous Concrete With Artificial Aggregate Handling On Erosion Reduction In Slope And Sandy Clay Condition*. *GEOMATE Journal*, 22(91), 80–86.
- Agmeliana, Nadya, Bimo Brata Adhitya, and Anthony Costa. 2022. Analisis Sifat Mekanis, Permeabilitas, Dan Porositas *Pervious geopolymer concrete* Dengan Variasi Ukuran Agregat 4, 75MM-9, 55MM dan 12, 5MM-19MM. Sriwijaya University.
- ASTM C 29, *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate Annual*

- Books of ASTM Standards. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C33. 1999. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. USA: Association of Standard Testing Materials: Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM C39. 2014. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. USA: Association of Standard Testing Materials: Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM C127. 2015. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. USA: Association of Standard Testing Materials: Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM C136. 2014. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C496. 2017. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. USA: Association of Standard Testing Materials: Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM C618. 2014. *Standard Specification for Coal Fly ash and Raw of Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. USA: Association of Standard Testing Materials: Annual Books of ASTM Standards.
- Ayachit, A. C., Nikam, P. B., Pise, S. N., Shah, A. D., Pawar, V. H., & Wagh, K. K. 2016. *Mix Design of Fly-Ash Based Geopolymer Concrete*. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 6(2).
- Bakria, A M Mustafa Al, H Kamarudin, M BinHussain, I Khairul Nizar, Y Zarina, and A R Rafiza. 2011. *The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers*. *Physics Procedia* 22 : 286–91.
- Boonanunwong, P., Keawpapasson, P., Tippayasam, C., Thavorniti, P., Chindaprasirt, P., & Chaysuwan, D. 2016. *Properties of geopolymer paste from fly ash blended with metakaolin as pervious concrete*. *Key Engineering Materials*, 690, 179–186.
- Chithambar Ganesh, A., Vinod Kumar, M., Kanniga Devi, R., Srikar, P., Prasad, S., Manoj Kumar, M., & Sarath, R. P. 2021. *Pervious Geopolymer Concrete under Ambient Curing*. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2737–2741.
- 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, 2422–2425.
- Gourley, J. T. 2014. *Geopolymers in Australia*. *Journal of the Australian Ceramics Society*, 50, 102–110.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. 2004. *On the development of fly ash-based geopolymer concrete*. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- Jaarsveld, J G S Van, Jannie S J Van Deventer, and G C Lukey. 2002. *The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly ash-and Kaolinite-Based Geopolymers*. *Chemical Engineering Journal* 89, no. 1–3 : 63–73.
- Mahalingam, R., & Mahalingam, S. V. 2016. *Analysis of pervious concrete properties*. *Gradjevinar*, 68(6), 493–501.
- Nguyen-Tuan, T., Phan-Quang, M., Pham-Thanh, T., & Nguyen-Viet, P. 2020. *Experimental study on mechanical and hydraulic properties of porous geopolymer concrete*. *International Journal of GEOMATE*, 19(74), 66–74.
- Obla, K. H. 2010. *Pervious concrete—An overview*. *Indian Concrete Journal*, 84(8), 9.
- Pratama, M. A., Subaer, S., & Malago, J. 2019. *Potensi Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun Fly ash Beton Geopolimer Berpori Sebagai Bahan Bahu Jalan*. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 15(2).
- Risdanareni, P., Ekaputri, J. J., & Triwulan. 2015. *The influence of alkali activator concentration to mechanical properties of geopolymer concrete with trass as a filler*. *Materials Science Forum*, 803, 125–134.
- Sata, V., Wongsa, A., & Chindaprasirt, P. 2013. *Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates*. *Construction and Building Materials*, 42, 33–39.
- Sengkey, S.L; Irmawaty, R; Hustim, M. P. 2020. *Pengaruh Alkali Aktivator Terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Fly ash Klas C*. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 101–108.
- Soundararajan, E. K., & Vaiyapuri, R. 2021. *Geopolymer binder for pervious concrete*. *Gradjevinar*, 73(3), 209–218.
- Sun, Z., Lin, X., & Vollpracht, A. 2018. *Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers*. *Construction and Building Materials*, 189, 797–803.
- Tho-In, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., & Jaturapitakkul, C. 2012. *Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete*. *Construction and Building Materials*, 30, 366–371.
- Uma Mageswari, M., Muthaiyan, P., Yugasini, S., & Ammaipappan, M. 2020. *Experimental studies on pervious geopolymer concrete*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 989(1), 12032.
- Zaetang, Y., Wongsa, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. 2015. *Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete*. *Construction and Building Materials*, 96, 289–295.