

STUDI KARAKTERISTIK DAN MIKROSTRUKTUR BETON DENGAN AGREGAT BUATAN GEOPOLIMER DENGAN METODE CRUSHING

F. A. Siregar¹, B. B. Adhitya¹, S.Y. Iriyani¹, C. Indriyati¹ dan B. Nayobi¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya

Corresponding author: bimo@unsri.ac.id

ABSTRAK: Peningkatan penggunaan beton dalam proyek konstruksi semakin mengurangi ketersediaan agregat alam, sementara permintaan akan beton terus meningkat karena beton adalah komponen penting dalam konstruksi. Salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengurangi polusi lingkungan adalah memanfaatkan limbah *fly ash* untuk menciptakan agregat buatan. Saat ini, Agregat buatan Geopolimer yang menggunakan limbah *fly ash* sudah mulai digunakan dalam elemen konstruksi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi karakteristik dan struktur mikro beton yang menggunakan agregat buatan berbasis *fly ash* dengan menggunakan metode *cold bond pelletization*. Komposisi beton melibatkan semen, air, pasir, agregat kasar alami, dan agregat kasar buatan. Penelitian ini berfokus pada mencapai target kuat tekan sebesar 25 MPa (*fc'* 25 Mpa) dan melibatkan pengujian *scanning electron microscope* (SEM). Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa baik beton dengan agregat alami maupun beton dengan agregat buatan memenuhi target yang telah ditetapkan, dengan hasil masing-masing sebesar 28,976 MPa dan 25,582 MPa. Penurunan kuat tekan pada beton dengan agregat buatan dapat disebabkan oleh porositas yang lebih tinggi pada agregat buatan dibandingkan dengan agregat alami. Selain itu, ikatan antara pasta dan agregat pada beton alami lebih kuat daripada pada beton yang mengandung agregat buatan, sebagaimana terlihat dari hasil uji SEM.

Kata Kunci: Geopolimer, Mikrostruktur, Agregat, Beton

ABSTRACT: *The increasing usage of concrete in construction projects is leading to a gradual depletion of natural aggregates, even as the demand for concrete continues to rise due to its fundamental role in construction. A potential solution to mitigate environmental pollution is the utilization of fly ash waste for creating synthetic aggregates. Presently, artificial aggregate Geopolymer incorporating fly ash waste is gaining traction in construction applications. Therefore, this research aims to investigate the properties and microstructure of concrete containing artificial aggregates made from fly ash. The primary objective of this study is to assess the characteristics and microstructure of concrete using the geopolymer cold bond pelletization method to create artificial aggregates from fly ash. The essential components of the concrete mixture comprise cement, water, sand, natural coarse aggregates, and synthetic coarse aggregates. This investigation involves testing the compressive strength of concrete with a target strength of 25 MPa (*fc'* 25 Mpa) and employing scanning electron microscope (SEM) analysis. In the compressive strength evaluation, both concrete variants, one with natural aggregates and the other with synthetic aggregates, achieved the specified target strengths of 28.976 MPa and 25.582 MPa, respectively. The reduced compressive strength observed in concrete with synthetic aggregates can be attributed to the higher porosity of these artificial aggregates in comparison to natural ones. Additionally, the bond between the cement paste and aggregates in natural concrete is more robust than in concrete containing artificial aggregates, as evidenced by the SEM test results.*

Key Words: Geopolymer, Microstructure, Aggregate, Concrete

PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan konstruksi yang umum digunakan sebagai struktur utama bangunan seperti balok dan kolom. Kemampuan beton untuk menahan beban struktural dan tahan terhadap tekanan sangat penting untuk ketahanan penggunaan bangunan dalam jangka panjang. Sebagai bahan yang sangat penting dalam

infrastruktur dan pembangunan bangunan, pemahaman mendalam tentang karakteristik beton menjadi kunci dalam memastikan keamanan, kekuatan, dan keberlanjutan struktur bangunan.

Dalam analisis struktur mikro beton, terdapat beragam metode yang dapat digunakan. Beberapa di antaranya mencakup *X-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy* (SEM), dan lain sebagainya. Setiap metode

memiliki keunggulan tersendiri, namun juga memiliki kelemahan masing-masing. Sebagai contoh, XRD adalah teknik non-destruktif, tetapi hanya berguna untuk menganalisis senyawa kristal. Sedangkan SEM umumnya hanya memberikan informasi pada gambar permukaan 2D (Chung et al., 2019).

Penelitian tentang agregat kasar buatan telah menjadi topik yang semakin relevan dalam mengurangi dampak lingkungan industri konstruksi dan mengelola sumber daya alam yang terbatas. Ada 3 jenis alternatif pembuatan agregat kasar yang telah dilakukan, yaitu mengolah ulang agregat dari limbah beton, memanfaatkan limbah baja sebagai agregat, dan membuat agregat buatan seperti geopolimerisasi. Geopolimerisasi adalah metode pembuatan dengan menggunakan alumina, silika, dan alkali aktivator. *Fly ash* menjadi salah satu bahan yang mengandung silika dan alumina yang merupakan limbah dari hasil pembakaran batu bara. Limbah ini dapat menjadi permasalahan serius jika tersebar di lingkungan yang ramai penduduk.

Alternatif penggunaan *fly ash* dalam pembuatan agregat kasar dapat mengurangi pencemaran lingkungan hasil pembakaran batu bara. Penggunaan metode geopolimer menghasilkan kekuatan yang tinggi, tahan terhadap korosi, serta tahan terhadap suhu tinggi. Pembuatan beton dengan agregat kasar buatan ini dilakukan dengan metode *crushing* yaitu pemecahan atau penghancuran material geopolimer yang telah terbentuk menjadi ukuran partikel yang lebih kecil dengan mesin penghancur (*crusher*).

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan memahami karakteristik dan mikrostruktur beton dengan agregat buatan geopolimer dengan metode *crushing*.

Berikut merupakan ruang lingkup dari penelitian ini:

1. Agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* berukuran 10-20 mm.
2. Pasir Tanjung Raja yang memiliki kadar lumpur sebesar 2%
3. *Fly ash* yang berasal dari PT Pupuk Sriwidjaja (Pusri).
4. Semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dari semen Baturaja.
5. Menggunakan *mix design formula* dengan $f'c = 25$ MPa.
6. Campuran beton menggunakan volume agregat dan volume air yang sama.
7. Bekisting yang digunakan adalah bekisting berbentuk silinder yang berbahan dasar dari besi dengan ukuran 100 mm x 200 mm.
8. Metode perawatan (*curing*) dilakukan dengan cara melapisi beton menggunakan *plastic wrap*.

9. Pengujian dilakukan pada beton berumur 3 hari, 7 hari, 28 hari.
10. Jumlah sampel yang dibuat sebanyak 3 sampel setiap variasi. Total sampel yang diuji sebanyak 36 beton.
11. Pengujian mikrostruktur menggunakan sampel beton yang telah melalui pengujian kuat tekan pada umur 28 hari.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian Beton

Beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa. Pada umumnya, sifat-sifat beton dipengaruhi oleh material penyusunnya sehingga perlu dilakukan analisis mikrostruktur sehingga karakteristik beton dapat diketahui.

Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beban beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990, 1990). Kuat tekan beton yang direpresentasikan dengan $f'c$ merupakan tegangan tekan maksimum yang diperoleh melalui prosedur pengujian standar. Sesuai dengan SNI 03-6825-2002, metode pengujian kuat tekan beton adalah dengan memberikan beban bertingkat dengan kecepatan tertentu pada sampel kubus dengan menggunakan mesin uji kuat tekan hingga beton pecah. Pada saat pecah, beton mengalami gaya tekan maksimum. Kekuatan beton dapat dihitung dengan rumus:

$$f'c = \frac{P \text{ maks}}{A} \quad (1)$$

dengan:

$F'c$ = kuat tekan beton (MPa)

P_{maks} = gaya tekan maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

Mikrostruktur Beton

Kualitas setiap material penyusun beton akan mempengaruhi kualitas dan kekuatan beton yang dihasilkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis struktur mikro terkait material penyusun beton yang berpengaruh terhadap sifat fisis dan mekaniknya sehingga karakteristik beton tersebut dapat diketahui. Dalam menyelidiki struktur mikro beton terdapat banyak metode yang dapat digunakan, beberapa diantaranya yaitu metode *mercury intrusion porosimetry* (MIP), *X-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy* (SEM), *X-ray computed tomography* (CT), dan lain sebagainya.

Struktur mikro geopolimer dan substansi termal selanjutnya berupa karakteristik fisik geopolimer yang

diaktifkan alkali, sebagian besar pada bahan baku. Meskipun morfologi dan struktur molekul geopolimer FA dan MK menunjukkan kesamaan, terdapat perbedaan karakteristik mekanik dan daya tahan di antara mereka, menunjukkan perbedaan dalam reaksi kimia yang terjadi selama sintesis bahan-bahan.

Metode *Crushing*

Crushing atau penghancuran merupakan suatu metode yang digunakan untuk memperkecil ukuran material dengan menggunakan suatu gaya. Dalam metode *crushing* dalam proses kominusi terdapat 2 tahapan, yaitu:

1. *Primary Crushing*

Merupakan tahap penghancuran pertama, umpan pada tahapan ini ukurannya sangat besar, berupa bongkahan.

2. *Secondary Crushing*

Secondary crushing adalah tahapan selanjutnya setelah dari *primary crushing*, dimana *feed* (umpan) yang akan dihancurkan lebih kecil di banding dengan *feed* (umpan) pada *primary crushing*. Sehingga produk yang dihasilkan juga memiliki ukuran yang lebih kecil.

METODOLOGI PENELITIAN

Berikut langkah-langkah atau tahapan penelitian ini:

Tahap I

Pada tahap awal, kami melakukan studi literatur untuk mengumpulkan informasi dan data terkait agregat buatan, geopolimer, metode *crushing*, *fly ash*, dan mikrostruktur. Informasi ini diperoleh dari berbagai sumber seperti artikel, buku, jurnal, dan karya tulis lainnya yang akan kami jadikan referensi dalam penelitian.

Tahap II

Pada tahap kedua, dilakukan pengujian sifat-sifat material yang akan digunakan dalam pembuatan beton, seperti agregat halus (pasir), serta pengujian sifat-sifat *fly ash* dengan metode *X-Ray Diffraction (XRD)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)*, dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kecocokan material sebagai komponen pembentuk beton dan menentukan rumus campuran beton (Job Mix Formula) dengan target kekuatan beton f_c' 25 MPa. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM.

Tahap III

Kemudian, penelitian dilanjutkan pada tahap ketiga, yaitu proses perencanaan dan perancangan campuran yang akan digunakan dalam pembuatan beton uji. Campuran ini harus seragam dalam proporsi volumenya, mengingat agregat alami dan agregat geopolimer memiliki berat yang berbeda. Perencanaan campuran ini dilakukan untuk mencapai target kekuatan beton f_c' 25 MPa, dengan pedoman dari ASTM sebagai acuan awal

yang kemudian disesuaikan dengan kebutuhan pembuatan beton. Untuk masing-masing pengujian, akan dibuat 3 sampel bekisting dengan ukuran 100 mm x 200 mm untuk pengujian pada 3, 7, dan 28 hari, sehingga total ada 18 beton konvensional dan 18 beton geopolimer yang akan dihasilkan.

Tahap IV

Pada tahap keempat, dilakukan proses pembuatan menggunakan *concrete* benda uji. Semua material yang telah disiapkan dicampur *mixer*. Campuran beton kemudian dimasukkan ke dalam bekisting untuk dicetak dan dibiarkan mengeras. Proses pengecoran ini dilakukan dua kali, pertama untuk beton dengan agregat alami dan kedua untuk beton dengan agregat geopolimer.

Tahap V

Tahap kelima dan terakhir adalah pengujian kekuatan tekan beton serta mikrostruktur beton. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan tekan dan mikrostruktur beton, serta membandingkan hasil antara beton konvensional dengan beton yang menggunakan agregat geopolimer berdasarkan metode *crushing*. Setelah itu, benda uji akan melalui proses perawatan (*curing*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Properti Agregat

Dalam konteks penelitian ini, perlu dilakukan serangkaian pengujian properti pada batu alam, pasir, dan agregat buatan yang sudah diproduksi, dengan maksud untuk menilai karakteristik dan kesesuaian mereka sebagai komponen bahan dalam pembuatan beton. Pengujian sidat-sifat ini mengacu pada panduan standar yang telah ditetapkan oleh ASTM. Jenis pengujian yang telah direncanakan meliputi nilai densitas, tingkat absorpsi, kadar air, analisis penyaringan agregat, estimasi kandungan lumpur, identifikasi komponen organik, uji AIV, serta perhitungan volume berat.

Tabel 1. Hasil pengujian kadar air agregat halus

No	Pengujian	Agregat			Stand ar Pengujian
		Agregat Kasar	Agregat Buatan Pellet	Agregat Halus	
1	BERAT JENIS DAN PENYERAPAN				
	Berat Jenis (Kondisi Kering)	2.443	1.953	2.213	SNI 03-1969-
	Berat Jenis Semu	2.703	2.182	2.291	1990 SNI

	Berat Jenis (Kondisi SSD)	2.539	2.058	2.247	03-1970-1990
	Persentase Penyerapan Air (%)	3.940	5.382	1.523	
2	KADAR AIR				
	Persentase Kadar Air (%)	1.668	4.080	4.384	SNI 03-1971-1990
3	BERAT VOLUME				
	Kondisi Padat (kg/ltr)	1.433	1.262	-	SNI 03-4804-1998
	Kondisi Gembur (kg/ltr)	1.336	1.212	-	
4	ANALISA SARINGAN				
	Maximum size (mm)	19.00	19.00	2.36	AST M C136: 2012
	Grade Area Number	57	67	4	
	Fineness Mod.	2.272	1.520	1.464	
5	KADAR ORGANIK				
	The samples are in color number	-	-	2	SNI 2816: 2014
6	KADAR LUMPUR				
	Clay content (%)			2.75	SNI 03-4142-1996
7	Aggregate Impact Value				
	AIV(%)	1,460%	8,660%		BS81 2-112

Berdasarkan hasil pengujian material yang telah dilaksanakan dapat disimpulkan bahwa agregat buatan dari geopolimer tidak menunjukkan kualitas yang lebih unggul dibandingkan dengan agregat alami.

Hasil Pengujian Fly Ash

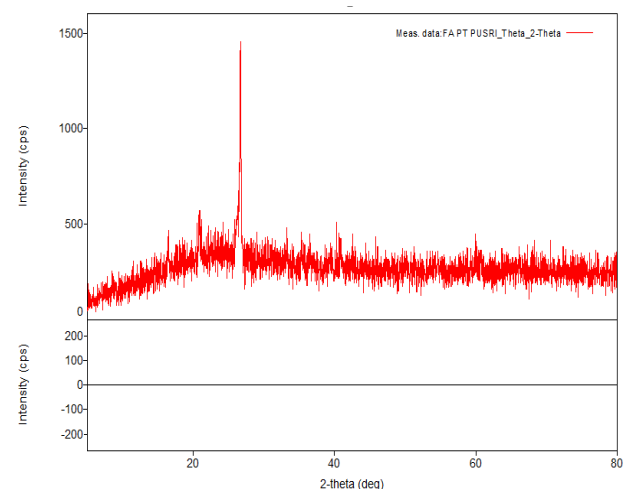
Dalam penelitian ini, penggunaan pengujian XRF dilakukan dengan tujuan mendapatkan data tentang senyawa yang ada dalam fly ash yang akan digunakan. Hasil pengujian tersebut memiliki dampak signifikan pada kekuatan agregat buatan geopolimer yang akan diproduksi dengan menggunakan fly ash, serta akan

memengaruhi kuat tekan dari beton yang dihasilkan. Dalam hasil pengujian ditemukan bahwa kandungan CaO dalam fly ash adalah sekitar 3,223117%, sehingga mengklasifikasikan fly ash ini ke dalam kelas F sesuai standar ASTM C618, yang mengategorikan fly ash dengan kandungan CaO di bawah 10% sebagai kelas F. Saat melakukan pengujian XRF pada fly ash, terdapat deteksi beberapa puncak kristalin dengan sudut difraksi sekitar 26,7° dan intensitas sekitar 1433.333 cps, serta pola difraksi yang menunjukkan bahwa fly ash memiliki struktur amorf. Setelah melaksanakan pengujian XRD, akan dihasilkan difraktogram yang menjelaskan korelasi intensitas pada sumbu y dengan sudut difraksi (2θ) pada sumbu x. Selama proses pencampuran alkali activator, yang dapat larut hanyalah Si dan Al dengan struktur amorf.

Tabel 2. Hasil Pengujian XRF

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
Al ₂ O ₃	25,63202
SiO ₂	62,20433
SO ₃	1,801144
K ₂ O	0,871144
CaO	3,223117
TiO ₂	0,694794
Fe ₂ O ₃	5,418913
SrO	0,122813
V ₂ O ₅	0,031721

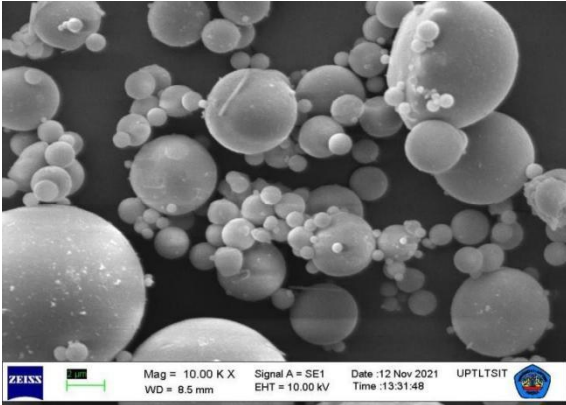
Dengan merujuk kepada tabel 2, dapat disimpulkan bahwa persentase kandungan CaO dalam fly ash adalah sekitar 3,223117%, sehingga sesuai dengan batasan kandungan senyawa kimia CaO yang harus kurang dari atau sama dengan 10% untuk klasifikasi fly ash sebagai kelas F menurut ASTM C618. Oleh karena itu, fly ash ini masuk dalam kategori fly ash kelas F yang digunakan.



Gambar 1. Hasil Analisis XRD Terhadap Fly Ash

Dalam gambar 1, terlihat bahwa fly ash yang digunakan memiliki sedikit puncak kristalin hanya pada sudut difraksi 26,7° dengan amplitude sekitar 1433,333 cps. Hal

ini mengindikasikan bahwa *fly ash* memiliki struktur amorf, sehingga hanya unsur Si dan Al yang dapat larut Ketika dicampur dengan larutan alkali aktivator. Keberadaan struktur amorf pada *fly ash* menjadikan lebih reaktif, sehingga lebih mudah larut dalam larutan alkali aktivator.

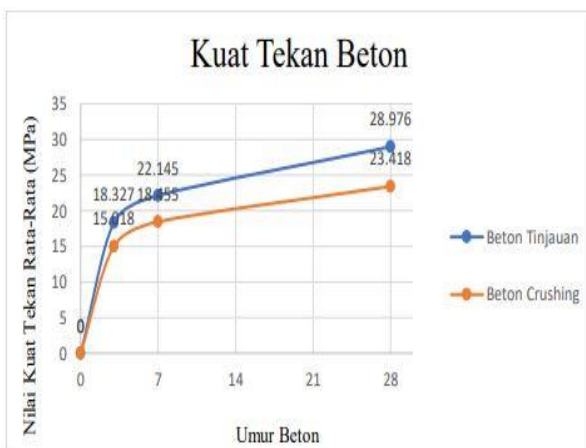


Gambar 2 Hasil Analisis SEM Pada *Fly Ash*

Pengamatan dengan SEM mengungkapkan bahwa partikel fly ash memiliki bentuk yang bulat, sebagaimana terlihat pada Gambar 2 dengan perbesaran 10.000x. Hal ini mempermudah reaksi fly ash dengan senyawa lain selama proses pencampuran beton.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kekuatan tekan beton digunakan untuk menilai kekuatan bahan yang membentuk beton saat dikenakan beban tekan per satuan luas hingga mencapai nilai maksimum pada peralatan khusus. Pengujian ini memiliki signifikansi besar dalam menilai mutu dan daya tahan beton sebagai bahan yang akan digunakan dalam proyek konstruksi. Komposisi beton sendiri dirancang dengan menggunakan JMF (*Job Mix Formula*).



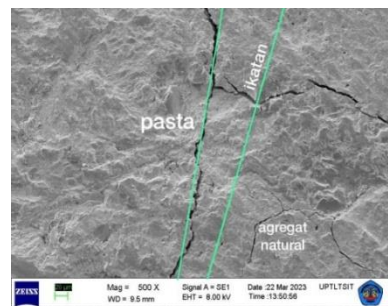
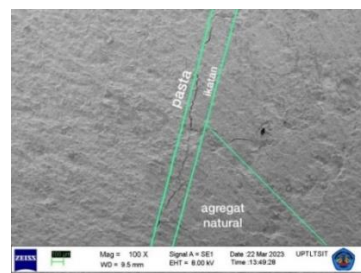
Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Berdasarkan data pengujian kuat tekan beton yang telah disajikan, ditemukan bahwa pada beton dengan agregat alami, nilai kuat tekan terendah terjadi pada umur 3 hari, yaitu sebesar 18,327 MPa, sementara nilai kuat

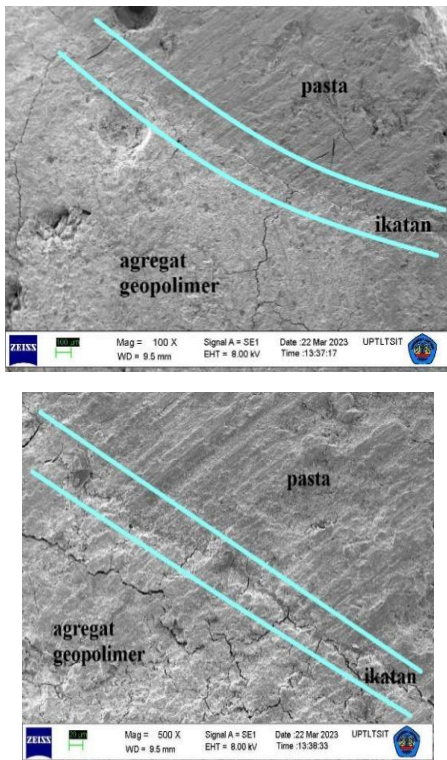
tekan tertinggi tercapai pada hari ke-28 dengan nilai 28,976 MPa. Di sisi lain, pada beton yang menggunakan agregat geopolimer, nilai kuat tekan terkecil tercatat pada usia 3 hari, yaitu 15,018 MPa, sementara nilai kuat tekan tertinggi dicapai setelah 28 hari dengan besaran 23,418 MPa. Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan kuat tekan pada beton dengan agregat buatan dalam perbandingan dengan beton yang menggunakan agregat alami, yakni sebesar 18,056% pada usia 3 hari dan 19,180% pada usia 28 hari. Pengujian ini melibatkan tiga sampel untuk setiap kondisi pengujian, kemudian hasilnya diambil nilai rata-rata dari ketiga sampel tersebut. Penting untuk dicatat bahwa kuat tekan beton dipengaruhi oleh sejumlah faktor, salah satunya adalah kekuatan bahan yang membentuk beton itu sendiri. Beton dengan agregat geopolimer menunjukkan nilai kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat alami.

Hasil Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Penggunaan *scanning electron microscope* (SEM) dilakukan dengan maksud untuk mengkarakterisasi tingkat ikatan antara bahan pengikat semen dan agregat dalam komposisi beton. Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Kimia Universitas Lampung. Dalam rangka pengujian ini, ada dua lokasi spesifik yang dianalisis, yakni titik ikatan antara pasta dan agregat, serta pada agregat itu sendiri. Perbesaran yang digunakan dalam pengujian ikatan adalah 100x dan 500x, sementara perbesaran yang digunakan dalam pengujian agregat adalah 1000x dan 5000x. Pengujian pada agregat dilakukan untuk mengidentifikasi struktur yang ada pada agregat alami dan agregat buatan yang berbasis *fly ash* dengan menggunakan metode *crushing*.

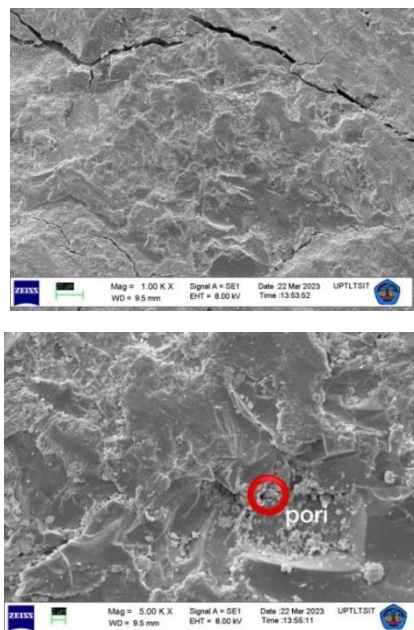


Gambar 4. Hasil Pengujian SEM Pada Ikatan Beton Normal

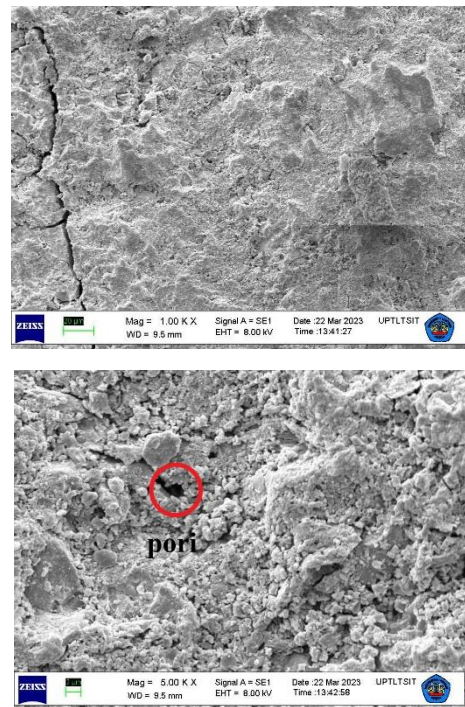


Gambar 5. Hasil Pengujian SEM Pada Ikatan Beton Geopolimer

Dari gambar yang ditampilkan di atas, terlihat bahwa koneksi antara pasta dan agregat alami menunjukkan kepadatan dan kekokohan yang lebih tinggi dibandingkan dengan hubungan antara pasta dan agregat buatan yang menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *crushing*. Perbedaan ini dapat dilihat dari jumlah retakan yang lebih banyak yang muncul di antara pasta dan agregat buatan tersebut.



Gambar 6. Hasil Pengujian SEM Pada Agregat Normal



Gambar 7. Hasil Pengujian SEM Pada Agregat Geopolimer

Dari gambar yang ditampilkan di atas, terlihat bahwa agregat buatan yang dihasilkan dengan menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* dan metode *crushing* memiliki porositas yang lebih tinggi daripada agregat alami. Hal ini mengakibatkan kekuatan agregat buatan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan agregat alami, dan juga menghasilkan nilai AIV (*Aggregate Impact Value*) yang lebih tinggi pada agregat buatan dibandingkan dengan agregat alami.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan penting. Hasil pengujian dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) menunjukkan bahwa beton yang menggunakan agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *crushing* memiliki ikatan yang lebih longgar antara pasta dan agregat dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat alami. Hal ini juga berkorelasi dengan hasil pengujian kuat tekan, dimana beton dengan agregat alami memiliki kuat tekan yang lebih tinggi daripada beton dengan agregat geopolimer. Selain itu, agregat geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *crushing* memiliki nilai *Aggregate Impact Value* (AIV) yang lebih tinggi dibandingkan dengan agregat alami. Peningkatan nilai AIV pada agregat geopolimer ini disebabkan oleh tingginya jumlah pori pada agregat buatan geopolimer, yang pada akhirnya mengakibatkan kekuatan agregat geopolimer menjadi lebih rendah daripada agregat alami.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Buchwald, K. Dombrowski, M. Weil, (2009). The influence of calcium content on the performance of geopolymeric binder especially the resistance against acids, in: 4th International Conference on Geopolimers, 2005.
- ASTM C 618-05. 2005. Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C136. 2014. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM, "Astm C330," Stand. Specif. Light. Aggregates Struct. Concr., vol. 04, pp. 3–6, 2000, doi: 10.1520/C0330.
- ASTM C142. 2010. Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C128. 2015. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C127. 2012. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C131. 2014. Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C535. 2016. Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. USA: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C88. 2018. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. USA: Association of Standard Testing Materials.
- Ayachit, A. C., Nikam, P. B., Pise, S. N., Shah, A. D., Pawar, V. H., & Wagh, K.
- [BSN] Badan Standarisasi Indonesia. 2002. SNI 03-6882-2002. Spesifikasi beton Untuk Pekerjaan Pemasangan: Jakarta.
- [BSN] Badan Standarisasi Indonesia. 2008. SNI-1969-2008. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar: Jakarta.
- [BSN] Badan Standarisasi Indonesia. 2008. SNI 2417-2008. Cara Uji Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles: Jakarta.
- [BSN] Badan Standarisasi Indonesia. 2008. SNI 3407-2008. Cara Uji Sifat Kekekalan Agregat Dengan Cara Perendaman Menggunakan Larutan Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat: Jakarta.
- Chung, S. Y., Kim, J. S., Stephan, D., & Han, T. S. (2019). Overview of the use of micro-computed tomography (micro-CT) to investigate the relation between the material characteristics and properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 229, 116843.
- Edenia, Bunga. (2021). Analisis Mikrostruktur dan Sifat elastis Beton Menggunakan Micro-Computed Tomography (micro-CT)
- Huda, C. (2013). Analisa sifat mekanik pasta geopolimer ringan berbahan dasar fly ash, lumpur sidoarjo dan foam, 1(1), 1–5.
- Malik, Yulianti. (2014). Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Curing Terhadap Sifat Fisik-Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Slag Ferronickel.
- Martinez, Isabel. et al. (2016). Concretes and betons with waste paper industry: Biomass ash and dregs. *Journal of Environmental Management*.
- Moon, G.D. Oh, S. Choi, Y.C. (2016). Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash beton. *Journal of Construction and Building Materials*.
- Neupane, Kamal., Chalmers, Des., Paul Kidd. 2018. High-Strength Geopolimer Concrete- Properties, Advantages and Challenges. *Advances in Materials Journal*. 7(2) : 15-25.
- Rafiza, A. R., Bakri, A. M. M. Al, Kamarudin, H., Nizar, I. K., Hardjito, D., & Zarina, Y. (2013). Reviews on the Properties of Aggregates made with or without Geopolimerisation Method, 626, 892–895. doi:10.4028/www.scientific.net/A MR.626.892.
- SNI 03-1974-1990. (1990). Metode Pengujian Kuat Tekan Beton.
- SNI 15-2049-2004. (2004). Semen Portland. Badan Standarisasi Nasional (BSN).