

STUDI KARAKTERISTIK DAN MIKROSTRUKTUR BETON DENGAN AGREGAT BUATAN GEOPOLIMER DENGAN METODE *COLD BOND PELLETIZATION*

A. Fadlyba¹, B. B. Adhitya^{1*}, S.Y. Iriyani¹, C. Indriyati¹ dan B. Nayobi¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya

Corresponding author: bimo@unsri.ac.id

ABSTRAK: Selama dekade terakhir, terjadi pertumbuhan signifikan dalam pembangunan infrastruktur di seluruh dunia, yang menyebabkan peningkatan konsumsi material. Salah satu material yang paling umum digunakan dalam industri konstruksi adalah beton yang tersusun dari beberapa unsur penyusun termasuk agregat kasar. Ketersediaan agregat tersebut di alam diketahui telah menurun secara signifikan sehingga mendorong pencarian sumber alternatif. Produksi agregat buatan melalui proses geopolimerisasi adalah contoh sumber alternatif ini. Prosesnya melibatkan pereaksian material yang mengandung silika dan alumina tinggi seperti fly ash yang diaktifasi menggunakan aktivator, oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan kajian mengenai karakteristik dan mikrostruktur beton dengan agregat buatan berbahan dasar *fly ash*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dan struktur mikro beton dengan agregat buatan geopolimer dengan metode *cold bond pelletization*. Bahan penyusun beton adalah semen, air, pasir, agregat kasar natural, dan agregat kasar buatan. Pada penelitian ini dilakukan pengujian kuat tekan beton dengan kuat tekan rencana $f_c' 25$ Mpa dan dilakukan pengujian *scanning electron microscope* (SEM). Pada pengujian kuat tekan beton agregat natural maupun beton agregat buatan pada umur beton 28 hari memenuhi target sebesar 28,976 Mpa dan 25,582 Mpa. Kuat tekan beton agregat buatan lebih rendah karena agregat buatan memiliki pori-pori yang lebih banyak dibandingkan agregat natural, dan juga ikatan antara pasta dan agregat pada beton agregat natural lebih rapat dibandingkan beton dengan agregat buatan. Hal ini terlihat dari hasil uji SEM.

Kata Kunci: Geopolimer, Mikrostruktur, Agregat, Beton

ABSTRACT: Over the past decade, there has been significant growth in infrastructure development worldwide, leading to increased material consumption. One of the most common materials used in the construction industry is concrete which is composed of several constituent elements including coarse aggregate. The availability of these aggregates in nature is known to have decreased significantly, prompting a search for alternative sources. The production of artificial aggregates through geopolymerization processes is an example of this alternative source. The process involves the reaction of materials containing high silica and alumina such as fly ash which are activated using an activator, therefore in this research a study will be carried out regarding the characteristics and microstructure of concrete with artificial aggregates made from fly ash. The aim of this research is to determine the characteristics and microstructure of concrete with geopolymer artificial aggregates using the cold bond pelletization method. The ingredients that make up concrete are cement, water, sand, natural coarse aggregate and artificial coarse aggregate. In this research, concrete compressive strength testing was carried out with a design compressive strength $f_c' 25$ Mpa and scanning electron microscope (SEM) testing was carried out. In testing the compressive strength of natural aggregate concrete and artificial aggregate concrete at 28 days, the concrete met the target of 28,976 Mpa and 25,582 Mpa. The compressive strength of artificial aggregate concrete is lower because artificial aggregate has more pores than natural aggregate, and also the bond between paste and aggregate in natural concrete is tighter than concrete with artificial aggregate. This can be seen from the SEM test results.

Key Words: Geopol

mer, Microstructure, Aggregate, Concret

PENDAHULUAN

Beton menjadi salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan saat ini di Indonesia. Dalam berbagai infrastruktur, beton menjadi material yang sangat penting karena beton sering digunakan sebagai struktur utama pada bangunan berupa kolom dan balok. Hal tersebut disebabkan karena beton memiliki kuat tekan yang tinggi (Martinez et al. 2016). Material tersebut terbuat dari campuran agregat halus atau pasir, agregat

kasar atau kerikil, semen, dan juga air. Bahan-bahan campuran tersebut sangat mudah ditemukan hampir disemua toko bangunan. Hal tersebut menjadi salah satu alasan beton sering digunakan sebagai struktur utama pada sebuah bangunan.

Meskipun demikian agregat kasar atau batu pecah saat ini sedang mengalami penurunan di alam. Agregat kasar menjadi bahan penyusun yang penting dalam pembuatan beton karena menempati sekitar 60%-80% dari total volume beton (Asroni 2015). Dengan menurunnya ketersediaan agregat kasar atau batu pecah di alam, maka diperlukan alternatif yang dapat menggantikan agregat

kasar natural, yaitu dengan membuat agregat kasar buatan (Saedi et al. 2019).

Banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk membuat agregat kasar buatan sebagai opsi lain dari agregat kasar natural. Ada tiga jenis alternatif yang telah dilakukan yaitu, mengolah ulang agregat dari limbah beton, memanfaatkan limbah baja sebagai agregat, dan membuat agregat buatan seperti geopolimerisasi (Rafiza et al. 2013). Geopolimerisasi adalah teknik pembuatan dengan menggunakan bahan alumina dan silika serta alkali aktivator (Buchwald et al. 2009). Fly ash menjadi salah satu bahan yang kaya akan silika dan alumina. Fly ash merupakan limbah dari pembakaran batu bara, dimana sangat berbahaya jika limbah tersebut tersebar di lingkungan yang ramai penduduk (Malik 2014).

Pemanfaatan fly ash untuk pembuatan agregat kasar dapat mengurangi tercemarnya lingkungan dari limbah hasil pembakaran batu bara tersebut. Pencampuran agregat buatan dan natural dapat menghasilkan beton yang lebih ringan dari beton normal. Pembuatan beton dengan agregat buatan geopolimer ini dilakukan dengan metode cold bond pelletization (Huda 2013). Dengan membuat beton dengan agregat buatan ini menjadi langkah yang baik untuk pemanfaatan limbah dan daur ulang dengan skala produksi yang cukup besar (chen et al. 2012).

Larutan alkali aktivator merupakan bagian penting dari sintesis dan pengembangan kekuatan geopolimer (Atis et al. 2009). Natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) biasanya digunakan sebagai alkali aktivator untuk berfungsi sebagai zat atau unsur yang menyebabkan unsur lain bereaksi. Aktivator ini biasanya mengandung NaOH dan silika, yang merupakan asam kuat yang mampu bereaksi dengan basa kuat. Na_2SiO_3 dapat mempercepat reaksi polimerisasi sedangkan NaOH bereaksi dengan Si dan Al dalam abu terbang menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Patel et al. 2018).

Perbandingan massa fly ash dan aktivator alkali yang digunakan pada seluruh metode pembuatan campuran agregat berbahan geopolimer pada penelitian ini adalah 3:1, perbandingan massa Na_2SiO_3 terhadap NaOH adalah 2,5:1, dan konsentrasi NaOH adalah 15 M.

Saat ini belum diketahui perbandingan karakteristik dan mikrostruktur antara beton dengan agregat natural dan beton dengan agregat buatan dengan metode cold bond pelletization. Mekanik dari itu penelitian tentang karakteristik dan mikrostruktur beton dengan agregat buatan geopolimer dengan metode cold bond pelletization dilakukan.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan memahami karakteristik dan mikrostruktur beton dengan agregat buatan geopolimer dengan metode cold bond pelletization.

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 dalam penelitian ini adalah bekisting berbentuk silinder yang berbahan dasar dari besi dan memiliki ukuran 100 mm x 200 mm.
8. Metode perawatan (curing) dilakukan adalah 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 merupakan bahan konstruksi yang tersusun atas campuran pasir, batu pecah yang digabungkan dengan bahan perekat seperti semen dan air untuk menciptakan suatu komposit yang menyerupai batuan.

Komponen Penyusun Beton

Beton adalah suatu material komposit yang terdiri dari pencampuran beberapa material penyusun seperti agregat halus, agregat kasar, semen, air, dan jika dibutuhkan terdapat bahan tambahan (admixtures). Job Mix Formula atau JMF menjadi penentu banyaknya masing masing material yang akan digunakan yang juga akan memengaruhi kekuatan beton tersebut.

Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton yang direpresentasikan dengan f_c' merupakan tegangan tekan maksimum yang diperoleh melalui prosedur pengujian standar. Metode pengujian kuat tekan beton dengan memberikan beban bertingkat dengan kecepatan tertentu pada sampel kubus atau silinder dengan menggunakan mesin uji kuat tekan hingga beton pecah. Pada saat pecah, beton mengalami gaya tekan maksimum. Kekuatan beton dapat dihitung dengan rumus:

$$f'_c = \frac{P_{maks}}{A} \quad (1)$$

dengan:

F'_c = kuat tekan beton (MPa)

P_{maks} = gaya tekan maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

Mikrostruktur Beton

Mikrostruktur beton merupakan bagian-bagian kecil penyusun beton itu sendiri, seperti morfologi beton, fasa kristalin beton, dan dominasi partikel penyusun beton. Untuk mengetahui mikrostruktur beton biasanya dilakukan pengujian mikrostruktur seperti X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), dan juga Scanning Electron Microscope (SEM).

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang sangat penting dan sangat umum digunakan. 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. Struktur mikro geopolimer dan substansi termal selanjutnya berupa karakteristik fisik geopolimer yang diaktifkan alkali, sebagian besar pada bahan baku (Kamal et al. 2018). Meskipun morfologi dan struktur molekul FA dan MK menunjukkan kesamaan, terdapat perbedaan karakteristik mekanik dan daya tahan diantara mereka, menunjukkan perbedaan dalam reaksi kimia yang terjadi selama sintesis bahan-bahan.

Agregat Buatan Geopolimer

Agregat buatan dengan proses geopolimerisasi merupakan salah satu upaya untuk mendapatkan agregat buatan yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, penggunaan geopolimer dalam pembuatan agregat buatan difokuskan untuk menghasilkan material dengan lapisan permukaan yang kuat dan pencapaian struktur yang memenuhi syarat agar ideal digunakan dalam beton.

Agregat buatan berbasis geopolimer umumnya dibuat melalui proses geopolimerisasi yang melibatkan tiga langkah. Prosesnya melibatkan beberapa langkah, misalnya pelarutan unsur Al dan Si dari bahan mentah, orientasi atau pengangkutan ion prekursor menjadi *monomer*, dan polikondensasi *monomer* untuk membentuk struktur polimer. Pencampuran aktivator dan prekursor berdasarkan karakteristik campurannya masing-masing perlu dilanjutkan dengan pembentukan agregat.

Agregat buatan dibuat dengan dua metode yaitu menggunakan granulator (*cold bond pelletization*) dan satu lagi menggunakan *stone crusher* (Qian et al. 2021).

Metode Cold Bond Pelletization

Metode *Cold Bond Pelletization* merupakan proses pengikatan partikel halus untuk membentuk partikel yang lebih besar dengan metode aglomerasi tekanan atau non-tekanan. Ikatan dingin dianggap sebagai metode yang hemat biaya karena menggumpal pada suhu kamar. Selain itu, metode *cold bond pelletization* cenderung meminimalkan konsumsi energi dibandingkan dengan proses produksi lainnya. Untuk ikatan dingin, partikel akan dikeringkan pada suhu kamar selama 24 jam setelah pembentukan. Pelet kemudian disegel sampai hari pengujian. Tantangan utama dengan agregat *cold bond pelletization* adalah periode pengerasan yang lebih lama,

karena biasanya membutuhkan waktu 28 hari untuk mengeras sebelum dapat digunakan sebagai bahan bangunan.

METODOLOGI PENELITIAN

Alur penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tahap I

Pada tahap awal dilakukan studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan materi dan data yang berhubungan dengan agregat buatan, geopolimer, metode *cold bond pelletization*, *fly ash*, serta mikrostruktur. Materi-materi tersebut dikumpulkan dari artikel, buku, jurnal, dan juga karya tulis yang nantinya akan dijadikan referensi untuk penelitian.

Tahap II

Pada tahap kedua ini, dilaksanakan pengujian *properties* pada material-material penyusun beton seperti pengujian agregat halus atau pasir, sedangkan pengujian *properties* pada *fly ash* seperti pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), serta *Scanning Electron Microscope* (SEM). Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui kelayakan material sebagai penyusun beton serta untuk menentukan *Job Mix Formula* dengan tujuan kuat beton $f_c' 25$ MPa, pengujian *properties* ini berpatokan menggunakan standar ASTM.

Tahap III

Kemudian penelitian dilanjutkan pada tahap ke tiga yaitu proses pembuatan taupun perencanaan *mix design* yang akan digunakan dalam pembuatan beton uji nantinya, *mix design* ini berlaku dan harus digunakan dalam pembuatan beton tinjauan maupun beton geopolimer nantinya, dengan proporsi volume material yang digunakan sama, karena agregat natural dan agregat geopolimer memiliki berat yang berbeda sehingga perlu konversi dari berat ke volumenya agar dapat dibandingkan kuat tekan dan kuat belahnya nanti. Perencanaan dan perhitungan *mix design* ini perlu dilakukan agar kita dapat tahu berapa proporsi setiap material yang dibutuhkan dalam pembuatan beton agar dapat tercapai target campuran beton dengan $f_c' 25$ MPa, dengan pedoman pada ASTM sebagai standar acuan yang kemudian akan disesuaikan sesuai dengan kebutuhan pembuatan beton, masing masing pengujian akan dibuat 3 sampel bekisting dengan ukuran 100 mm x 200 mm untuk 3, 7, dan 28 hari secara berturut turut, sehingga membutuhkan total 18 beton normal dan 18 beton geopolimer.

Tahap IV

Pada tahap 4 ini adalah proses pembuatan benda uji, pada tahap ini dilakukan pencampuran terhadap semua material yang sudah disiapkan. Semua material dicampurkan menggunakan *concrete mixer*, setelah itu campuran beton dimasukkan kedalam bekisting untuk dicetak dan dibiarkan sampai mengeras. Proses

pengecoran ini dilakukan dua kali yaitu untuk beton dengan agregat natural dan beton dengan agregat buatan geopolimer

Tahap V

Pada tahap kelima atau tahap terakhir ini adalah pengujian kuatn tekan beton serta mikrostruktur beton. Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui kuat tekan serta mikrostruktur beton serta untuk mengetahui perbandingan kuat tekan dan mikrostruktur antara beton tinjauan dengan beton substitusi agregat buatan berbasis geopolymer dengan metode *cold bond pelletization* setelah benda uji dilakukan *curing*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian *Properties* Agregat

Pada penelitian ini, perlu dilakukan beberapa uji *properties* terhadap pasir, batu alam, dan agregat buatan yang telah dibuat untuk mengetahui karakteristik serta kelayakan dari material ini apakah layak atau tidak untuk digunakan sebagai material penyusun beton. Untuk menguji *properties*nya ini mengadopsi spesifikasi standar ASTM. Pengujian pengujian yang akan dilakukan antara lain kadar air, *specific gravity*, penyerapan, pengujian analisis saringan agregat, kadar lumpur, zat organik, berat volume, dan *aggregate Impact value* (AIV).

Tabel 1. Hasil Pengujian Sifat Agregat

No	Pengujian	Agregat			Standar Pengujian
		Agregat Kasar	Agregat Buatan Pellet	Agregat Halus	
1	BERAT JENIS DAN PENYERAPAN				
	Berat Jenis (Kondisi Kering)	2.443	1.953	2.213	ASTM C128
	Berat Jenis Semu	2.703	2.182	2.291	
	Berat Jenis (Kondisi SSD)	2.539	2.058	2.247	
Persentase Penyerapan Air (%)	3.940	5.382	1.523	ASTM C127	
2	KADAR AIR				
	Persentase Kadar Air (%)	1.668	4.080	4.384	ASTM C566
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				
	<i>Maximum size (mm)</i>	19.00	19.00	2.36	ASTM C136 :2012
	<i>Grade Area Number</i>	57	67	4	
<i>Fineness Mod.</i>	2.272	1.520	1.464		
5	KADAR ORGANIK				
	<i>The samples are in color number</i>	-	-	2	SNI 2816: 2014
6	KADAR LUMPUR				
	<i>Clay content (%)</i>			2.75	ASTM C142
7	Aggregate Impact Value				
	AIV(%)	1,460 %	8,660 %		BS81 2-112

Dari hasil pengujian material yang dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa agregat buatan geopolymer menghasilkan mutu yang tidak lebih baik dari agregat natural.

Hasil Pengujian *Fly Ash*

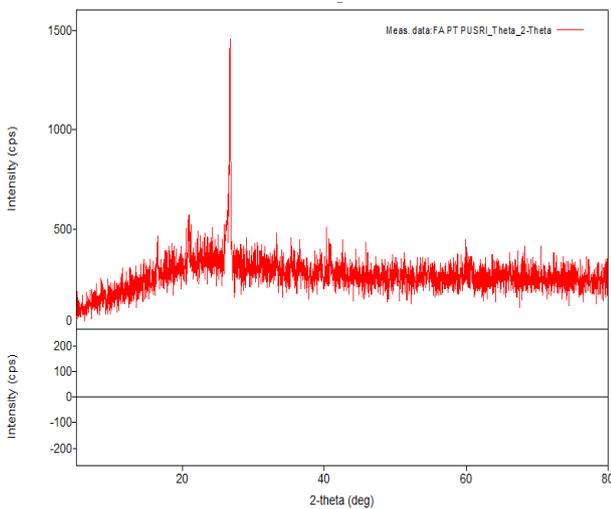
Pada penelitian ini dilakukan pengujian XRF yang berfungsi untuk mendapatkan data senyawa yang terdapat di dalam fly ash yang akan digunakan (moon et al. 2016). Hal ini berpengaruh terhadap kekuatan agregat buatan geopolimer yang nantinya akan dibuat menggunakan fly ash, kuat tekan beton sendiri akan dipengaruhi oleh hasil pengujian ini. Pada pengujian ini didapatkan hasil CaO sebesar 3,223117% dan fly ash yang akan digunakan masuk ke dalam kelas F, dimana berdasarkan standar ASTM C618 apabila kandungan CaO < 10% maka masuk kedalam kelas F. Setelah dilakukan pengujian XRF pada fly ash ini didapatkanlah sedikit puncak kristalin yang terbentuk dengan sudut difraksi 26,7° sebesar 1433,333 cps dan pola difraksi yang landau, yang dilihat bahwa fly ash terdapat struktur amorf. Setelah melakukan pengujian XRD ini akan mendapatkan difraktogram yang akan menjelaskan hubungan intensitas pada sumbu y dengan sudut difraksi (2θ) yang pada sumbu x. Pada saat pencampuran alkali activator, yang akan larut selama proses pencampuran hanyalah Si dan Al dengan struktur amorf.

Tabel 2. Hasil Pengujian XRF

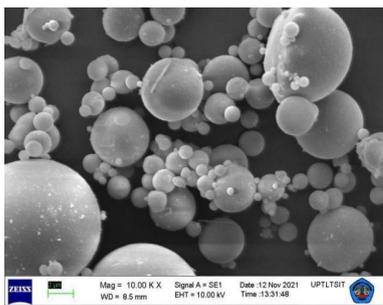
Komposisi Kimia	Jumlah (%)
Al ₂ O ₃	25,63202
SiO ₂	62,20433
SO ₃	1,801144
K ₂ O	0,871144
CaO	3,223117
TiO ₂	0,694794
Fe ₂ O ₃	5,418913
SrO	0,122813
V ₂ O ₅	0,031721

Berdasarkan tabel 2, ditemukan bahwa komposisi CaO dalam *fly ash* adalah 3,223117%, yang memenuhi syarat kandungan senyawa kimia $CaO \leq 10\%$ untuk kategori *fly ash* kelas F menurut ASTM C618. Oleh karena itu, digunakanlah kategori *fly ash* kelas F.

Gambar 1 menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan memiliki sedikit puncak kristalin hanya pada sudut difraksi 26,7° dengan amplitudo 1433,333 cps, menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki struktur amorf yang hanya Si dan Al-nya yang dapat larut saat dicampur dengan larutan alkali aktivator. *Fly ash* dengan struktur amorf lebih reaktif sehingga mudah larut pada larutan alkali aktivator.



Gambar 1. Hasil Pengujian XRD Pada *Fly Ash*

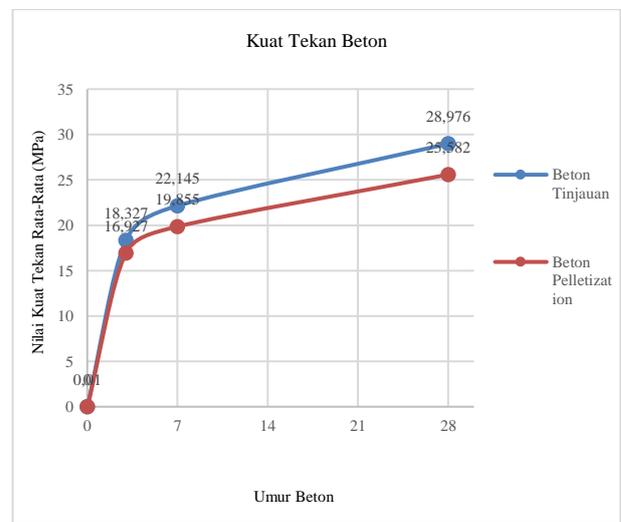


Gambar 2 Hasil Pengujian SEM Pada *Fly Ash*

Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa butiran *fly ash* memiliki bentuk bulat, seperti yang terlihat pada Gambar 2 dengan pembesaran 10.000x, memudahkan *fly ash* untuk bereaksi dengan senyawa lain selama proses pencampuran beton.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton berungsi untuk mengetahui kekuatan material sebagai penyusun beton ketika diberi beban tekan per satuan luas sampai mendapatkan nilai maksimal pada alat. Pengujian ini sangat penting untuk mengetahui mutu dan kekuatan beton sebagai material yang akan digunakan di bangunan-bangunan konstruksi. Komposisi beton sendiri dirancang menggunakan JMF (*Job Mix Formula*).

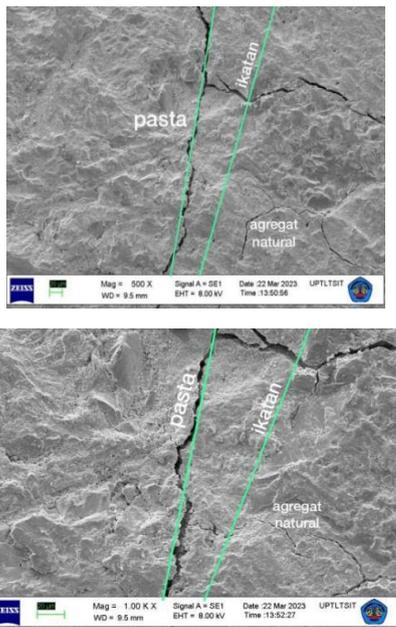


Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Berdasarkan data di atas mengenai pengujian kuat tekan beton, didapatkan nilai kuat tekan terkecil yang terdapat pada beton dengan agregat natural adalah beton dengan umur 3 hari yaitu sebesar 18,327 MPa, Sementara nilai kuat tekan terbesarnya terdapat pada hari ke 28 dengan besaran 28,976 MPa. Sedangkan, pada beton dengan agregat geopolimer nilai kuat tekan terkecil terdapat pada beton berumur 3 hari yaitu sebesar 16,927 Mpa, sementara nilai kuat tekan terbesar terdapat pada beton berumur 28 hari dengan besaran 25,582 MPa. Pada pengujian ini terjadi penurunan kuat tekan beton dengan agregat buatan terhadap beton tinjauan sebesar 7,639% saat usia 3 hari dan 11,713% saat usia 28 hari. Pengujian ini menggunakan masing-masing 3 sampel pada setiap pengujiannya dan kemudian menghitung nilai rata-rata dari ketiga sampel tersebut. Kuat tekan beton sendiri dipengaruhi banyak faktor salah satunya kekuatan material penyusun beton itu sendiri. Beton dengan agregat buatan geopolimer memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan beton dengan agregat natural.

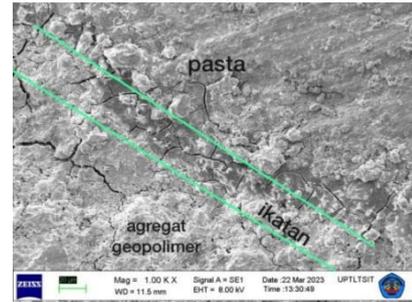
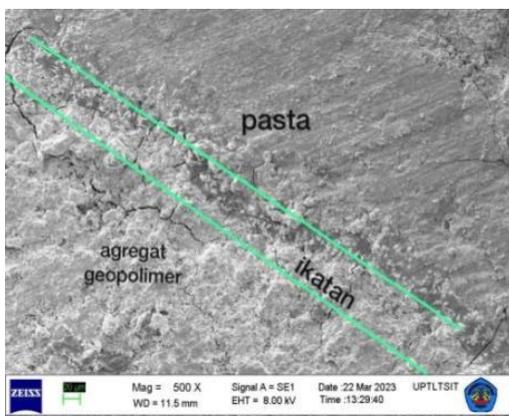
Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian scanning electron microscope ini bertujuan untuk mengetahui kerapatan ikatan antara binder semen dan juga agregat pada beton (Sutama 2022)(Fu et al. 2021). Pengujian ini dilaksanakan Laboratorium Kimia Universitas Lampung. Pengujian dilakukan pada 2 titik yaitu, pada ikatan antara pasta dan agregat dan pada agregat. Perbesaran yang digunakan pada ikatan sebesar 500x, 1000x, sedangkan pada agregat menggunakan perbesaran sebesar 1000x, dan 5000x. Pengujian pada agregat dilakukan untuk mengetahui pori yang terdapat pada agregat natural dan agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *cold bond pelletization*.

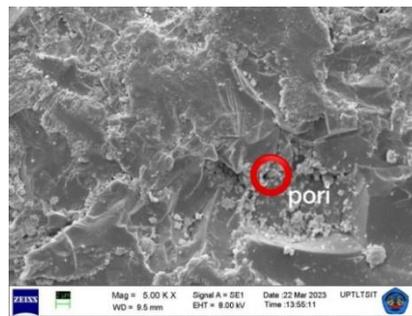
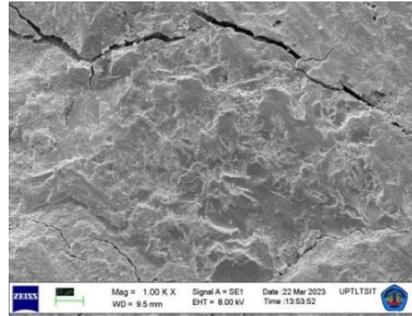


Gambar 4. Hasil SEM Pada Ikatan Beton dengan agregat natural

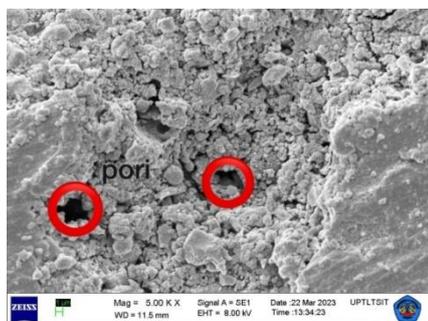
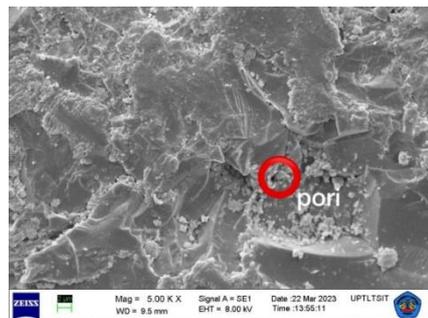
Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa ikatan antara pasta dan agregat natural terlihat lebih rapat dan kuat dibandingkan dengan ikatan antara pasta dan agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *cold bond pelletization*. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya retakan dan yang terletak antara pasta dan agregat buatan.



Gambar 5. Hasil SEM Pada Ikatan Beton Geopolimer



Gambar 6. Hasil SEM Pada Agregat natural



Gambar 7 Hasil SEM Pada Agregat Geopolimer

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *cold bond pelletization* memiliki pori yang lebih banyak dibandingkan agregat natural. Hal ini yang menyebabkan kekuatan agregat buatan lebih rendah daripada agregat natural, dan juga membuat nilai AIV agregat buatan lebih besar dibandingkan agregat natural. Jika setiap campuran dan material memiliki ukuran pori-pori dan lebar microcracks semakin besar, maka kuat tekan yang dihasilkan semakin rendah (Abdullah et al., 2012).

KESIMPULAN

Mengacu dari penelitian yang sudah dilakukan, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian ini. Berdasarkan dari hasil pengujian *scanning electron microscope* menunjukkan bahwa beton dengan agregat buatan geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *cold bond pelletization* memiliki ikatan antara pasta dan agregat yang lebih tidak rapat jika dibandingkan dengan beton dengan agregat natural, hal ini juga berbanding lurus dengan hasil kuat tekan beton dengan agregat natural yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton dengan agregat geopolimer. Agregat geopolimer berbasis *fly ash* dengan metode *cold bond pelletization* sendiri memiliki nilai aiv yang lebih besar dari agregat natural. Hal tersebut disebabkan oleh banyaknya pori pada agregat buatan geopolimer yang membuat kekuatan agregat geopolimer memiliki kekuatan yang lebih rendah daripada agregat natural.

DAFTAR PUSTAKA

A. Buchwald, K. Dombrowski, M. Weil, (2009). The influence of calcium content on the performance of geopolimeric binder especially the resistance against acids, in: 4th International Conference on Geopolimers, 2005.

Aroni, A. (2015). Balok dan Pelat Beton Bertulang. D.H. 로렌스 연구, 23(1), 37–54. <http://www.riss.kr/link?id=A100727777>

ASTM C 566 - 97. (1997). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. Annual Book of ASTM Standards, 5–7. <https://doi.org/10.1520/C0566-19.2>

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 C128. 2015. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. 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 C142. 2010. Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. USA: Association of Standard Testing Materials.

C.D. Atis, C. Bilim, O. Celik, O. Karahan,(2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, Construct. Build. Mater. 23(1), 548-555.

Chen, H. J., Yang, M. Der, Tang, C. W., & Wang, S. Y. (2012). Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments. Construction and Building Materials,28(1),387–394..

Huda, C. (2013). Analisa sifat mekanik pasta geopolimer ringan berbahan dasar fly ash, lumpur sidoarjo dan foam, 1(1), 1–5.

Koksal, A. (1990). Testing aggregates - BS°812. British Standard BS 812-112: 1990, 1, 14.

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 mortars 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 mortar. 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.

Patel, Jignesh kumar., Patil, Hemant., Patil, Yogesh., Vesmawala, Gaurang at (2018). Production and Performance of alkali-activated cold-bonded lightweight aggregate in concrete.

Qian L. P., Xu L. Y., Alrefaei Y., Wang T., Ishida T., and J. G. Dai, (2021) Artificial alkali-activated aggregates developed from wastes and by-products: A state-of-the-art review, Resources, Conservation and Recycling, vol. 177.

Qiang Fu, Wenrui Xu, Xu Zhao, Mengxin Bu, Qiang Yuan, Ditao Niu, (2021). The microstructure and durability of fly ash-based geopolimer concrete, Ceramics zinternational 47 (2021) 29550-29566

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.

Saeli, M. et al. (2019). Innovative Recycling of Lime Slaker Grits from Paper-Pulp Industry Reused as Aggregate in Ambient Cured Biomass Fly Ash-Based Geopolimers for Sustainable Construction Material. Journal of Sustainability.

Sutama, Adji (2022). Studi Mikrostruktur Beton Ringan Geopolimer Dengan Scanning Electron Microscope (SEM) dan X-Ray Diffraction (XRD).