

Pengaruh Penggunaan Material *Slag* Sebagai Bahan Substitusi Semen terhadap Sifat Fisis, Kuat Tekan dan Karakterisasi Mortar

Anwar

Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai

Jl. Imam Bonjol No.486 Langkapura Kota Bandar Lampung Lampung 35118. E-mail: feryhjaya@gmail.com

Muhammad Amin^(*)

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung. Email: muha041@brin.go.id

Sudibyo

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung. Email: dibyochemeng@gmail.com

David Candra Birawida

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung. Email: davi004@brin.go.id

Yusup Hendronursito

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung. Email: yusuph_ugm07@yahoo.com

Evi Dwi Yanti

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung. Email: evid001@brin.go.id

Kusno Isnugroho

Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN),
Jl. Ir. Sutami, Serdang, Tj. Bintang, Lampung Selatan, Lampung 35361 E-mail: kusn010@brin.go.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi ukuran butir dan substitusi material slag sebagai bahan substitusi semen terhadap sifat fisik dan nilai kuat tekan mortar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh substitusi slag terhadap sifat fisik dan kekuatan mortar yang ditambahkan pada campuran mortar serta dengan membandingkan mortar tanpa substitusi slag. Komposisi variasi substitusi slag yang ditambahkan yaitu berturut-turut 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dari berat semen dan variasi ukuran butir slag yaitu 100, 200 dan 350 mesh. Kemudian mortar dilakukan perendaman selama 21 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan mortar pada masing-masing ukuran butir benda uji dengan substitusi slag lebih tinggi dibandingkan nilai kuat tekan mortar tanpa substitusi slag. Kuat tekan tertinggi pada substitusi slag ukuran butir 100 mesh, 200 mesh dan 350 mesh berturut-turut yaitu sebesar 5,55 Mpa, 5,65 Mpa dan 9,66 Mpa. Sedangkan nilai kuat tekan mortar tanpa substitusi slag yaitu sebesar 4,81 Mpa. Kadar optimum substitusi slag yaitu sebesar 10% dari berat semen. Hasil ini menunjukkan semakin kecil ukuran butir akan menurunkan porositas yang terbentuk pada mortar, sehingga massa jenis mortar akan semakin tinggi. Semakin tinggi massa jenis mortar, maka absorpsi yang dihasilkan akan semakin kecil. Hasil penelitian yang diperoleh dapat dikatakan bahwa slag dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen karena slag merupakan bahan yang bersifat pozzolan berdasarkan ASTM-C 168.

Kata-kata Kunci: Slag, substitusi, semen, kuat tekan dan uji fisis.

Abstract

Research has been carried out on the effect of variations in grain size and substitution of slag as a cement substitute on the physical properties and compressive strength of mortar. This study aims to determine the effect slag on the physical properties and strength of the mortar added to the mortar mixture and by comparing the mortar without slag. substitution variation slag is 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of the cement weight, respectively and variations in slag grain size are 100, 200 and 350 mesh. Then the mortar was soaked for 21 days. The test results show that the compressive strength of mortar in each grain size of the specimen with slag is higher than the compressive strength of mortar without slag. The highest compressive strength in slag grain sizes of 100 mesh, 200 mesh and 350 mesh, respectively, is 5.55 Mpa, 5.65 Mpa and 9.66 Mpa. Meanwhile, the compressive strength of mortar without slag is 4.81 MPa. The optimum level of slag is 10% of the cement weight. These results indicate that

* Penulis Korespondensi: muha041@brin.go.id

the smaller the grain size will reduce the porosity formed in the mortar, so that the density of the mortar will be higher. The higher the density of the mortar, the smaller the absorption will be. The results obtained can be said that slag can be used as a cement substitute because slag is a pozzolanic material based on ASTM-C 168.

Keywords: Slag, substitution, cement, compressive strength and physical test.

1. Pendahuluan

Semen merupakan kontributor paling signifikan untuk pelepasan dan emisi karbon dioksida (CO₂) di antara bahan penyusun mortar lainnya. Produksi semen menyumbang sebanyak 4% - 6% dari emisi CO₂ di seluruh dunia. Hal ini merupakan penyebab emisi langsung dari kalsinasi kalsium karbonat dan emisip tidak langsung dari pengabuan bahan bakar fosil yang dimanfaatkan dalam transportasi, kalsinasi dan manufaktur mineral (Crossin, 2015). Mengingat bahwa mortar merupakan bahan yang paling sering digunakan, emisi CO₂ yang terikat dengan penggunaannya merupakan sumber utama masalah bagi lingkungan. Oleh karena itu, berbagai cara telah dilakukan untuk mengurangi efek tersebut, dan salah satu metode yang paling sering digunakan adalah dengan merubah sebagian semen dengan bahan tambahan Supplementary Cementitious Material (SCM) untuk membuat campuran semen (Miller et al., 2015).

SCM biasanya terdiri dari material yang bersifat pozzolan seperti fly ash atau self-hydraulic dan Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS). Sifat kekuatan dan daya tahan mortar yang lebih lama diketahui dapat meningkat dengan pemanfaatan bahan - bahan tersebut jika dicampurkan pada jumlah optimal masing - masing (Li and Zhao, 2003).

Blast furnace slag merupakan produk sampingan dari proses pembuatan besi yang digunakan untuk membuat GGBFS. Blast furnace yang digunakan untuk membuat besi beroperasi pada suhu 1500°C hingga 2000°C dan diisi dengan campuran bijih besi, kokas, dan batu kapur. Bijih besi kemudian diubah menjadi besi, yang tenggelam ke dasar Blast furnace, sedangkan komponen sisa mengapung di atas besi sebagai slag. Blast furnace slag kemudian dengan cepat dipadatkan dengan air, digranulasi, dan akhirnya dikeringkan dan digiling menjadi bentuk bubuk yang lebih halus. GGBFS memiliki fase amorf atau kaca dan karakteristik semen sebagai hasil dari proses tersebut (Higgins, 2007).

GGBFS sebagian besar terdiri dari silikon dioksida (SiO₂), kalsium oksida (CaO), dan magnesium oksida (MgO). Telah diamati bahwa menggunakan GGBFS dalam mortar menghasilkan sejumlah kualitas yang bermanfaat, termasuk panas hidrasi yang lebih rendah, kuat tekan jangka panjang yang lebih tinggi, dan peningkatan daya tahan mortar (Beushausen et al., 2012; Siddique, R., dan Bennacer, 2012).

Penelitian sebelumnya tentang material yang dapat digunakan sebagai substitusi semen, yaitu penelitian yang dilakukan oleh Amin et al., (2018) mengenai penggunaan Blast furnace solid waste (Slag) sebagai bahan substitusi pada pembuatan mortar. Presentase

slag yang digunakan sebagai substitusi semen adalah 10%, 20%, dan 30% dari total volume. Variasi butir yang digunakan yaitu ukuran partikel 80, 100, dan 120 mesh dengan perendaman selama 3 hari. Benda uji dibuat dengan mengompresi semua bahan campuran dalam cetakan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm berbentuk kubus. Uji fisik mortar yang dilakukan yaitu uji porositas, uji densitas dan uji kuat tekan. Hasil penelitian diperoleh substitusi slag 10% dengan ukuran 100 mesh menghasilkan porositas sebesar 3,459%, sedangkan substitusi slag 20% dan slag 30% dengan ukuran mesh yang sama menghasilkan 5,0896% dan 5,76%. Uji kuat tekan yang dihasilkan pada substitusi 10% adalah 19,3 Mpa, sedangkan substitusi slag 20% dan slag 30% menghasilkan kuat tekan dengan nilai 19,1 Mpa dan 18,7 Mpa. Selain substitusi rasio slag, ukuran partikel slag juga mempengaruhi kuat tekan dan porositas. Komposisi kimia dari slag dalam penelitian Amin et al (2018) disajikan dalam **Tabel 1**.

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi ukuran butir dan substitusi slag sebagai bahan substitusi semen terhadap sifat fisik dan nilai kuat tekan mortar, dengan komposisi slag 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat semen. Mortar dicetak berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm³. Variasi butir yang digunakan yaitu ukuran partikel 100, 200, dan 350 mesh dengan perendaman selama 21 hari.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Non Logam BRIN Lampung Selatan. Bahan pengganti sebagian semen yang digunakan adalah Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) dengan variasi komposisi substitusi yang digunakan adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Slag dicampurkan pada komposisi pembuatan mortar dengan perbandingan 5:1 (bottom ash : semen). Pengujian yang dilakukan adalah kuat Tekan dan uji fisis (massa jenis, porositas dan absorpsi). Benda uji yang digunakan adalah kubus dengan ukuran 5x5x5 cm³. Total sampel adalah 48 benda uji, dengan 32 benda uji untuk pengujian kuat tekan dan 16 benda uji untuk pengujian sifat fisik mortar. Kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia dan dilakukan karakterisasi Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada mortar.

Komposisi bahan yang digunakan untuk penelitian ini dapat dilihat dalam **Tabel 2**.

2.1 Pengujian kuat tekan mortar

Berdasarkan ASTM C-305-82-2001, kekuatan tekan mortar adalah kemampuan mortar untuk menerima beban maksimum per satuan luas. Alat yang digunakan dalam pengujian kuat tekan mortar adalah Universal Testing Machine (UTM). Kuat tekan mortar dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$f'c = \frac{P}{A} \tag{1}$$

dengan $f'c$ adalah kuat tekan mortar (Mpa), P adalah beban maksimum (Kg) dan A adalah luas penampang permukaan kubus. Alat uji kuat tekan *Universal Testing Machine* (UTM) dapat dilihat pada **Gambar 1**.

2.2 Pengujian massa jenis mortar

Massa jenis merupakan massa yang terdapat dalam satu satuan volume. Massa jenis disebut juga dengan kerapatan (density) (Hasanah dkk., 2021). Menurut ASTM-C 642-06 nilai massa jenis dapat dihitung menggunakan Persamaan:

$$\rho = \frac{w_1}{w_2 - w_3} \times \rho_{air} \tag{2}$$

Dengan ρ adalah massa jenis mortar (g/cm^3), w_1 adalah berat awal (g), w_2 adalah berat setelah dikeringkan (g), w_3 adalah berat direndam dalam air (g), ρ_{air} adalah massa jenis air ($1 g/cm^3$).

2.3 Pengujian porositas mortar

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan volume void (pori) terhadap volume total mortar. Porositas mortar adalah tingkatan yang menggambarkan kepadatan konstruksi mortar. Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas mortar. Porositas merupakan persentase pori-pori atau ruang kosong dalam mortar terhadap volume benda (volume total mortar). Porositas juga

dapat diakibatkan adanya partikel-partikel bahan penyusun mortar yang relatif besar, sehingga kerapatan tidak maksimal. Porositas menggambarkan besar kecilnya kekuatan mortar dalam menopang suatu konstruksi. Semakin padat mortar, semakin tinggi tingkat kepadatan maka semakin besar kuat tekan atau mutu mortar (Tumingan dkk, 2016). Menurut ASTM-C 642-06 nilai porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan:

$$\text{Porositas} = \frac{w_2 - w_1}{w_2 - w_3} \times 100\% \tag{3}$$

dengan w_1 adalah berat awal (g), w_2 adalah berat setelah dikeringkan (g) dan w_3 adalah berat direndam dalam air (g).

2.4 Pengujian absorpsi mortar

Absorpsi atau resapan adalah suatu proses yang terjadi pada mortar dengan cara masuknya air melalui pipa kapiler atau pori-pori yang terdapat pada permukaan mortar (Pribadi, 2010). Menurut ASTM-C 642-06 nilai absorpsi dapat dihitung menggunakan Persamaan:

$$\text{Absorpsi} = \frac{w_2 - w_1}{w_2 - w_3} \times 100\% \tag{4}$$

dengan w_1 adalah berat awal (g) dan w_2 adalah berat setelah dikeringkan (g). Gambar proses pengujian absorpsi dapat dilihat pada **Gambar 2**.

2.5 Karakterisasi

2.5.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi XRF pada sampel mortar bertujuan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia yang terkandung di dalam campuran mortar. Karakterisasi dilakukan dengan menghancurkan sampel mortar, kemudian diayak menggunakan ayakan lolos saringan 325 mesh sebanyak 10 gram. Karakterisasi XRF dilakukan dengan menggunakan alat XRF PANalytical tipe:Minipal 4.

Spektrometer XRF menggunakan sinar-X yang dipancarkan oleh sampel dan ditangkap oleh detektor untuk menentukan komposisi unsur suatu material.

Tabel 1. Komposisi kimia slag (Amin et al., 2018)

No	Senyawa	Komposisi (%)
1	CaO	40,23
2	SiO ₂	28,45
3	MgO	4,28
4	Al ₂ O ₃	5,67
5	Fe ₂ O ₃	0,54
6	MnO	0,63
7	TiO ₂	0,55
8	SO ₃	0,26

Tabel 2. Komposisi bahan baku

Sampel	Berat (g)		
	Bottom Ash	Semen	Slag
Blanko	833,35	166,65	-
A1	833,35	149,985	16,665
A2	833,35	133,32	33,33
A3	833,35	116,655	49,995
A4	833,35	99,99	66,66
A5	833,35	83,325	83,325



Gambar 1. Pengujian kuat tekan mortar
Sumber:Dokumen pribadi, 2021

Konsentrasi unsur-unsur dalam suatu bahan ditentukan dengan analisis kuantitatif, sedangkan berbagai unsur yang termasuk dalam zat ditentukan dengan pemeriksaan kualitatif (Munasir, 2012).

2.5.2 Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

Karakterisasi SEM-EDS pada sampel mortar bertujuan untuk mengetahui morfologi sampel mortar dan mengetahui penyebaran unsur yang terkandung di dalam campuran mortar. Karakterisasi dilakukan dengan menghancurkan sampel mortar, kemudian diayak menggunakan ayakan lolos saringan 325 mesh sebanyak 10 gram. Karakterisasi SEM-EDS dilakukan dengan menggunakan alat SEM Thermo Scientific-Quattro S.

SEM (Scanning Electron Microscope) merupakan metode karakterisasi material yang umum digunakan untuk mengkaji morfologi permukaan material nano dan ukuran butir (Mursal, 2018). Mikroskop elektron pemindaian (SEM) dapat melihat batas butir, distribusi, batas fasa, bukti deformasi mekanis, dan komposisi kimia pada perbesaran 200.000 kali dan ketebalan mulai dari 200 nm hingga 0,5 µm (Mursal, 2016).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian kuat tekan mortar

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan alat Universal Testing Machines (UTM) tipe:HT-2402 untuk mendapatkan besarnya beban tekan maksimum yang bisa diterima oleh sampel. Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui komposisi substitusi dan ukuran butir (mesh) terbaik pada mortar. Hasil pengujian fisis dan kuat tekan mortar disajikan pada **Tabel 3**.

Berdasarkan **Gambar 3** terlihat bahwa nilai kuat tekan mortar tanpa substitusi slag 0 wt% memiliki kuat tekan sebesar 4,81 Mpa. Nilai kuat tekan tertinggi menggunakan ukuran butir slag 100 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 5,55 Mpa, sedangkan



Gambar 2. Perendaman benda uji untuk pengujian massa jenis, porositas dan absorpsi

Sumber: Dokumen pribadi, 2021

nilai kuat tekan terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 2,44 Mpa. Nilai kuat tekan mortar tertinggi menggunakan ukuran butir slag 200 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 5,61 Mpa, sedangkan nilai kuat tekan terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 4,38 Mpa. Kemudian nilai kuat tekan mortar tertinggi menggunakan ukuran butir slag 350 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 9,66 Mpa, sedangkan nilai kuat tekan terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 4,92 Mpa.

Berdasarkan **Gambar 3**, menunjukkan bahwa variasi komposisi substitusi slag dan variasi ukuran butir slag mempengaruhi nilai kuat tekan mortar. Data hasil kuat tekan yang diperoleh dapat dilihat bahwa penggunaan slag sebagai bahan substitusi semen memberikan kontribusi dalam pengembangan kuat tekan mortar. Hal ini dikarenakan mortar tanpa substitusi slag memiliki kuat tekan lebih rendah daripada mortar dengan substitusi slag. Sehingga penambahan kandungan silika yang terkandung di dalam slag ke dalam campuran semen akan menyebabkan kapur mati (CH) yang dimana senyawa ini akan memperlemah mortar, berubah menjadi Calcium Silica Hydrate (CSH). Substitusi material slag ke dalam campuran semen membuat terbentuknya CSH sekunder yang

Tabel 3. Hasil uji fisis dan kuat tekan

Ukuran Butir Sampel	Komposisi Substitusi Slag (%)	Kuat Tekan (Mpa)	Porositas (%)	Massa Jenis (g/cm ³)	Absorpsi (%)
Standar	Tanpa slag	4,81	13,76	1,65	8,41
	Slag mesh 100	10	5,55	10,63	1,70
Slag mesh 200	20	4,89	13,72	1,62	8,48
	30	3,02	14,39	1,46	9,85
	40	2,44	14,60	1,38	12,04
	50	4,85	13,74	1,61	8,45
	10	5,61	9,18	1,71	5,37
Slag mesh 350	20	4,97	10,71	1,65	6,51
	30	4,75	11,20	1,60	7,36
	40	4,38	11,61	1,59	7,73
	50	5,53	9,49	1,68	5,64
	10	9,66	7,70	1,81	4,25
Slag mesh 350	20	8,28	7,82	1,75	4,46
	30	5,06	11,02	1,62	6,86
	40	4,92	11,41	1,58	7,19
	50	7,38	7,89	1,73	3,56

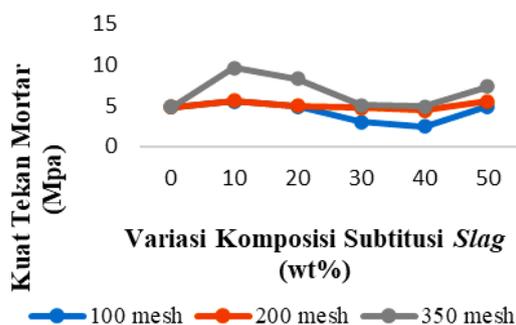
dapat memperlambat ikatan antar butir dalam campuran mortar.

Namun, penambahan slag lebih dari 10% dalam komposisi substitusi semen pada mortar menunjukkan nilai kuat tekan yang semakin menurun. Hasil ini didukung oleh penelitian yang dilakukan Amin et al (2018), bahwa jumlah substitusi slag untuk semen jangan terlalu banyak dan berlebihan karena senyawa pengikat dalam semen akan digantikan oleh slag sebagai bahan organik. Oleh karena itu penambahan substitusi slag lebih dari 20% mengakibatkan penurunan kuat tekan mortar, sehingga substitusi slag 10% sudah memiliki kualitas fisik yang lebih tinggi daripada standar mortar tanpa tambahan slag. Penelitian terdahulu yang dilakukan (Cahyani dkk., 2020) juga menyatakan penggunaan GGBFS di atas 10% dari total volume binder tidak efisien mengingat semakin tinggi kadar substitusi GGBFS, akan ada sebagian GGBFS yang tidak dapat masuk ke reaksi pozzolanic yang justru berperilaku sebagai bahan pengisi.

Namun pada penelitian ini variasi komposisi substitusi slag 50% tiap variasi ukuran butir mengalami peningkatan dari variasi substitusi slag 40%. Hal ini dikarenakan mortar mengalami laju penurunan kemudian dapat meningkat ketika mortar berada dalam kondisi siklus basah-kering (*wetting-drying cycle*) (Ming, Deng and Li, 2016; Tian and Han, 2017). Kemudian peningkatan ini didukung oleh penelitian Wahid dan Muhammad Taufan (2020), bahwa bahwa semakin besar penambahan GGBFS pada aduk mortar, maka semakin tinggi kekuatan tekan mortar yang dihasilkan terutama pada aduk mortar dengan umur antara 21 dan 28 hari. Penambahan variasi GGBFS pada aduk mortar, kemungkinan disebabkan butiran GGBFS yang halus sehingga dapat mengisi rongga di antara butiran agregat halus dan semen, serta sifat aktifnya GGBFS dapat membentuk ikatan tambahan bahan perekat akibat reaksi antara bahan posolan dengan kapur bebas yang dihasilkan dari reaksi semen dan air.

Kemudian Penelitian terdahulu juga mengatakan bahwa GGBFS dapat digunakan sebagai substitusi semen hingga 50% dari total volume binder tanpa adanya reduksi kekuatan tekan mortar (Raman and Krishnan, 2017; Cahyani and Rusdianto, 2020).

Selain variasi komposisi substitusi, ukuran butir slag juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi nilai kuat



Gambar 3. Grafik hubungan variasi komposisi substitusi slag dan variasi ukuran butir slag terhadap kuat tekan mortar

tekan mortar. Grafik pada Gambar 3 menunjukkan nilai kuat tekan mortar dengan menggunakan ukuran butir slag 100 mesh lebih rendah dari ukuran butir slag 200 mesh dan ukuran butir slag 200 mesh lebih rendah dari ukuran butir slag 350 mesh. Merujuk dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses hidrasi semen dan slag dengan ukuran lebih besar akan memiliki reaksi lebih lama dibandingkan slag dengan butiran lebih halus. Menurut penelitian yang dilakukan Widodo (2010) bahwa proses hidrasi dimulai dari luar butiran semen yang memiliki partikel butiran lebih halus dari semen dan slag, setelah itu proses hidrasi berjalan lebih cepat dan terjadi pengikatan waktu partikel lebih pendek yang menghasilkan kekuatan mortar lebih cepat.

3.2 Pengujian massa jenis mortar

Pengujian massa jenis dilakukan untuk mengetahui kepadatan atau kerapatan dalam mortar. Hasil pengujian massa jenis pada mortar yang dicampur dengan penambahan variasi komposisi substitusi slag (wt%) terhadap berat semen pada umur uji 21 hari disajikan pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa nilai massa jenis mortar tanpa substitusi slag 0 wt% memiliki massa jenis sebesar 1,65 g/cm³. Nilai massa jenis tertinggi menggunakan ukuran butir slag 100 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 1,70 g/cm³, sedangkan nilai massa jenis terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 1,38 g/cm³. Nilai massa jenis mortar tertinggi menggunakan ukuran butir slag 200 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 1,71 g/cm³, sedangkan nilai massa jenis terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 1,59 g/cm³. Kemudian nilai massa jenis mortar tertinggi menggunakan ukuran butir slag 350 mesh yaitu pada substitusi slag 10 wt% sebesar 1,81 g/cm³, sedangkan nilai massa jenis terendah terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 1,58 g/cm³.

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa mortar dengan massa jenis terbaik terdapat pada penggunaan ukuran butir slag 350 mesh dengan komposisi substitusi slag 10 wt%. Hal ini dikarenakan ukuran butir yang lebih halus yang berasal dari slag dapat mengisi rongga – rongga di dalam campuran mortar, sehingga membuat mortar jauh lebih padat atau rapat. Semakin rapatnya mortar, maka semakin tinggi massa jenisnya dan semakin tinggi juga kuat tekan yang dimiliki oleh mortar. Menurut penelitian Hasanah dkk (2021), menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kuat tekan maka semakin besar juga nilai massa jenis yang diperoleh. Kemudian studi terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan GGBFS dapat memperbaiki struktur pori dan membuatnya lebih rapat (Attari, McNally and Richardson, 2016).

Selain itu, hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan Herastuti dan Nurmaya (2016), bahwa ukuran butir juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi nilai massa jenis mortar. Semakin kecil ukuran butir maka semakin rapat material tersebut. Semakin rapat material maka nilai massa jenis pada mortar akan semakin besar. Ini berarti variasi ukuran

butir slag 350 mesh mempunyai kerapatan yang paling tinggi, sehingga nilai kuat tekannya yang paling tinggi di antara variasi ukuran butir slag 100 mesh dan 200 mesh.

3.3 Pengujian porositas mortar

Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui besarnya presentase pori – pori dalam mortar. Hasil pengujian porositas pada mortar yang dicampur dengan penambahan variasi komposisi substitusi slag (wt%) terhadap berat semen pada umur uji 21 hari disajikan pada **Gambar 5**.

Berdasarkan **Gambar 5** terlihat bahwa hasil pengujian porositas pada mortar tanpa substitusi slag 0 wt% memiliki nilai porositas sebesar 13,76%. Hasil pengujian porositas pada mortar menggunakan ukuran butir slag 100 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 10,63% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 14,60%. Hasil pengujian porositas pada mortar menggunakan ukuran butir slag 200 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 9,18% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 11,61%. Hasil pengujian porositas pada mortar menggunakan ukuran butir slag 350 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 7,70% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 11,41%.

Maka diperoleh kesimpulan bahwa mortar dengan variasi komposisi substitusi slag 10 wt% memiliki nilai porositas terendah, sedangkan pada variasi komposisi substitusi slag 40 wt% diperoleh porositas yang tinggi. Hal ini membuktikan bahwa nilai porositas berbanding lurus dengan nilai absorpsi dan berbanding terbalik dengan kuat tekan dan massa jenis.

Berdasarkan **Gambar 5** terlihat bahwa semakin kecil ukuran butir menghasilkan porositas yang lebih kecil. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Amin et al (2018), bahwa penurunan porositas secara langsung sejajar dengan kehalusan bahan slag. Ini karena partikel halus yang berasal dari slag, dapat mengisi pori – pori di dalam mortar. Sehingga membuat mortar lebih padat dan dapat mengurangi daerah yang seharusnya dipenuhi oleh air. Mengurangi ukuran partikel slag akan menyebabkan penurunan porositas

mortar, karena partikel slag akan cepat bereaksi terhadap proses hidrasi. Dimana hal ini dikarenakan proses hidrasi dapat memperkecil pori-pori pada matriks mortar (Cahyani and Rusdiyanto, 2020).

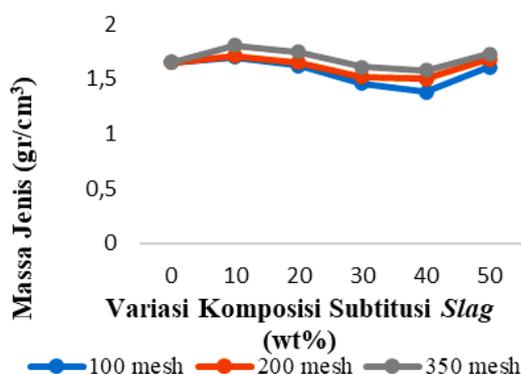
Menurut penelitian Wahid dan Muhammad Taufan (2020), bahwa penggunaan bahan tambahan yang paling umum digunakan untuk pencampuran mortar adalah bahan tambahan aktif pozzolanic, yaitu zat yang dapat mengikat kapur bebas yang terjadi akibat reaksi antara semen dan air, membentuk senyawa keras sekaligus menurunkan porositas. Jika memiliki ukuran butir yang lebih halus daripada semen, memungkinkannya mengisi ruang antara agregat dan semen untuk bertindak sebagai pengisi.

3.4 Pengujian absorpsi mortar

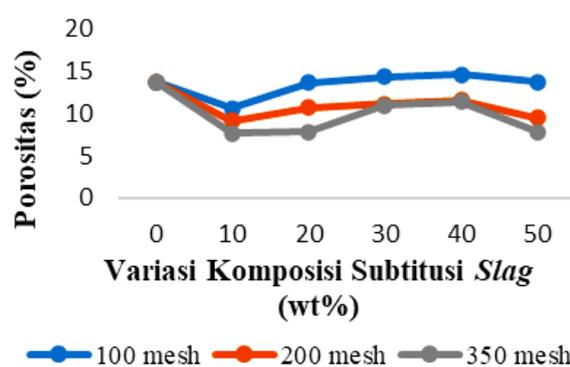
Pengujian absorpsi dilakukan untuk mengetahui daya serap air dalam mortar. Hasil pengujian absorpsi pada mortar yang dicampur dengan penambahan variasi komposisi substitusi slag (wt%) terhadap berat semen pada umur uji 21 hari disajikan pada **Gambar 6**.

Berdasarkan **Gambar 6** terlihat bahwa hasil pengujian absorpsi pada mortar tanpa substitusi slag 0 wt% memiliki nilai absorpsi sebesar 8,41%. Hasil pengujian absorpsi pada mortar menggunakan ukuran butir slag 100 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 6,46% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 12,04%. Hasil pengujian porositas pada mortar menggunakan ukuran butir slag 200 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 5,37% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 7,73%. Hasil pengujian porositas pada mortar menggunakan ukuran butir slag 350 mesh memiliki nilai terendah pada substitusi slag 10 wt% sebesar 4,25% sedangkan nilai tertinggi terdapat pada substitusi slag 40 wt% sebesar 7,19%.

Berdasarkan **Gambar 6** menunjukkan komposisi substitusi slag sebesar 10 wt% memiliki nilai absorpsi terendah, semakin rendah nilai absorpsi maka semakin kecil kadar penyerapan air pada mortar. Sedangkan hasil absorpsi atau penyerapan air terjadi peningkatan dikarenakan adanya faktor butir slag berpori dari komposisi bahan itu sendiri. Hal ini diakibatkan



Gambar 4. Hubungan variasi komposisi substitusi slag dan variasi ukuran butir slag terhadap massa jenis



Gambar 5. Hubungan variasi komposisi substitusi slag dan variasi ukuran butir slag terhadap porositas

adanya butir yang cukup besar sehingga kurang mampu masuk kedalam lubang - lubang jarak antar butir.

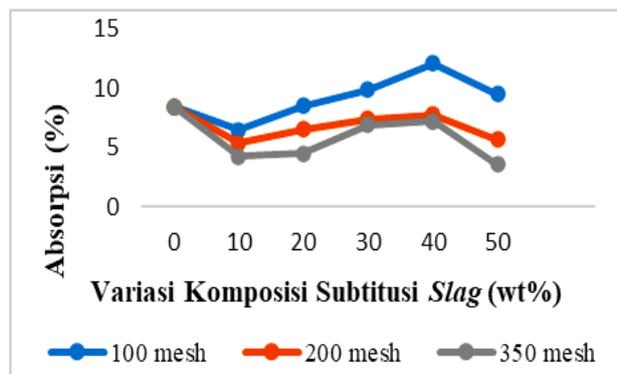
Butir-butir agregat dapat bersifat kurang kuat karena dua hal yaitu terdiri dari bahan yang lemah atau terdiri dari partikel yang kuat tetapi tidak baik dalam pengikatannya (Mulyono, 2003). Dengan meningkatnya nilai absorpsi pada mortar, maka kuat tekan dan massa jenis pun akan menurun seiring dengan bertambahnya nilai absorpsi pada suatu campuran mortar (Sliwinski, 2012; Koliass and Georgiou, 2005). Pada umumnya, material pozolan seperti GGBFS ini menghasilkan campuran yang kohesif yang dapat mempertahankan sifat plastis dari campuran sehingga meningkatkan workabilitas campuran. Material ini juga bersifat menyerap air dari campuran dan menyimpannya untuk kebutuhan pada saat curing time (Sujivorakul, 2011).

3.5 Hasil karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi XRF dilakukan pada sampel dengan nilai kuat tekan tertinggi (ukuran butir slag 350 mesh dan komposisi substitusi slag 10 wt%) yaitu sampel A1 dan nilai kuat tekan terendah (ukuran butir slag 100 mesh dan komposisi substitusi slag 40 wt%) yaitu sampel A4. Karakterisasi mortar menggunakan XRF PANalytical tipe: Minipal 4. Hasil XRF mortar sebagian besar dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Berdasarkan **Tabel 4** terlihat bahwa mortar memiliki kandungan senyawa yang didominasi oleh senyawa CaO dan SiO₂. Pada sampel A1 yaitu variasi komposisi slag 10% diperoleh CaO sebesar 53,901% dan SiO₂ sebesar 23,860%. Sedangkan pada sampel A4 yaitu variasi komposisi 40% diperoleh CaO sebesar 54,999% dan SiO₂ sebesar 22,114%. Selain CaO dan SiO₂, senyawa lain yang juga dihasilkan pada sampel mortar diantaranya yaitu senyawa Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Fe₂O₃, MnO, TiO₂, SO₃, SrO dan ZnO.

Berdasarkan **Tabel 4**, kadar senyawa CaO yang paling tinggi diperoleh pada sampel A4. Hal ini dikarenakan Slag dan semen merupakan material yang mengandung senyawa CaO yang paling mendominasi dibandingkan dengan senyawa lain yang terkandung pada kedua material tersebut. Kadar CaO yang terkandung dalam slag dan semen yaitu sebesar 40,23% dan 47,64%. Sehingga, ketika slag dan semen disubstitusikan sebagai



Gambar 6. Hubungan variasi komposisi substitusi slag dan variasi ukuran butir slag terhadap absorpsi

material utama pada mortar mampu meningkatkan kadar senyawa CaO. Sedangkan senyawa SiO₂ mengalami penurunan pada substitusi semen dengan komposisi slag 40%. Dimana kadar SiO₂ yang terkandung di dalam semen lebih besar daripada kadar SiO₂ di dalam slag. Hal ini membuat senyawa SiO₂ yang terkandung menurun seiring dengan penambahan komposisi substitusi slag ke dalam semen. Semakin banyak kadar senyawa CaO dalam mortar, maka akan menyebabkan pembentukan senyawa tricalcium silikat (3CaO.SiO₂) yang terbentuk (Reni dkk., 2018). Senyawa ini mengeras dalam beberapa jam dan dapat melepaskan panas dan menciptakan mortar yang lebih kuat pada awal umurnya, terutama pada 14 hari pertama (Widojoko, 2010).

3.6 Hasil karakterisasi Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

Karakterisasi SEM-EDS dilakukan pada sampel dengan nilai kuat tekan tertinggi yaitu sampel A1 dengan variasi butir slag 350 mesh dan nilai kuat tekan terendah yaitu sampel A4 dengan variasi butir slag 100 mesh. Karakterisasi mortar menggunakan SEM Thermo Scientific-Quattro S. Hasil analisa SEM mortar sebagian besar dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.

Gambar 7 menunjukkan hasil analisa SEM pada sampel A1 variasi 350 mesh dengan perbesaran 5002x. Berdasarkan **Gambar 7** terlihat bahwa dari morfologi sampel A1 berbentuk bulat dan kubik yang tak beraturan. Ukuran butir slag dengan variasi 350 mesh dapat mengisi pori – pori mortar, sehingga sampel mortar terlihat lebih rapat. Hal ini menunjukkan bahwa struktur kristal didominasi oleh kalsit yang berbentuk kubik tidak beraturan. Kemudian ditutupi oleh distribusi kuarsa berbutir halus dan menghasilkan permukaan yang berpori sedikit dan halus (Amin et al., 2018). Hasil ini diperkuat dengan nilai kuat tekan tertinggi yang dimiliki oleh sampel A1 variasi 350 mesh.

Gambar 8 menunjukkan morfologi pada sampel, dimana terdapat penyebaran unsur kimia yang terdeteksi di area sampel A1. Unsur-unsur yang terdeteksi pada sampel A1 antara lain yaitu O, Mg, Al, Si, Ca, Fe, Na, C, S dan K. Dapat dilihat bahwa penyebaran yang paling merata ditunjukkan oleh unsur Si dan Ca. Berdasarkan **Gambar 8**, menunjukkan unsur

Tabel 4. Hasil karakterisasi sampel mortar

Senyawa	Kadar (%)	
	A1	A4
CaO	53,901	54,999
SiO ₂	23,860	22,114
MgO	0,733	1,054
Al ₂ O ₃	6,953	6,726
Fe ₂ O ₃	10,728	10,311
MnO	0,346	0,649
TiO ₂	0,907	0,873
SO ₃	1,245	1,771
ZnO	0,155	-
SrO	0,251	0,235

(Sumber: Hasil analisis, 2021)

Si saling berikatan dengan unsur Ca secara merata sehingga akan terbentuk senyawa tricalcium silikat (C3S) dan senyawa dicalcium silikat (C2S). Penyebaran yang paling merata terbukti dari warna yang mendominasi. Warna yang mendominasi pada sampel A1 yaitu warna biru cyan yang menandakan penyebaran Si dan warna ungu yang menandakan penyebaran unsur Ca. Hasil ini sesuai dengan hasil analisa XRF yang disajikan pada **Tabel 4** Dimana hasil XRF menunjukkan senyawa SiO₂ dan CaO yang paling dominan di antara senyawa lainnya.

Gambar 9 menunjukkan hasil analisa SEM pada sampel A4 variasi 100 mesh dengan perbesaran 5000x. Berdasarkan **Gambar 9** terlihat bahwa dari morfologi sampel A4 berbentuk bulat dan kubik yang tak beraturan. Ukuran butir slag dengan variasi 100 mesh terlihat dapat mengisi pori – pori pada mortar. Namun pada variasi 100 mesh ini terlihat dengan penggunaan ukuran butir yang lebih besar mortar terlihat banyak memiliki rongga – rongga, sehingga sampel mortar terlihat tidak begitu rapat. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar ukuran butir, maka semakin besar porositas yang membuat berkurangnya kuat tekan yang dimiliki mortar.

Berdasarkan **Gambar 10** dapat dilihat bahwa penyebaran yang paling merata juga ditunjukkan oleh unsur Ca dan Si. Berdasarkan **Gambar 10**, menunjukkan unsur Ca dan unsur Si kurang berikatan secara merata, sehingga membuat ikatan antar partikel di dalam campuran mortar tidak begitu berikatan. Hal ini yang membuat kuat tekan yang diperoleh pada sampel A4 memperoleh kuat tekan terendah.

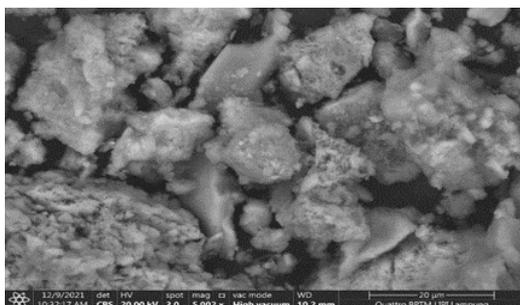
4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini diantaranya:

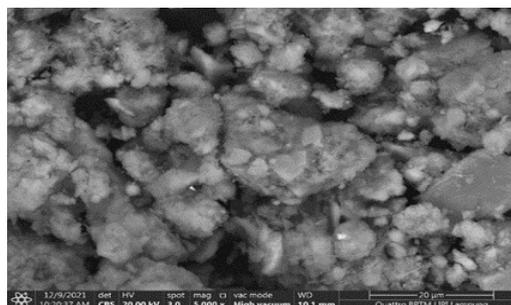
1. Slag sebagai substitusi semen sebanyak 10% dengan ukuran butir 350 *mesh* mempunyai kuat tekan yang paling optimum yaitu sebesar 9,66 MPa.
2. Slag dengan substitusi sebanyak 10% terhadap semen mempunyai nilai porositas terkecil yaitu sebesar 7,70%, massa jenis tertinggi yaitu sebesar 1,81 gr/cm³ dan nilai absorpsi terkecil sebesar 4,25%
3. komposisi 4 merupakan komposisi bahan baku yang mempunyai kekuatan yang optimum
4. Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa slag dapat digunakan sebagai material substitusi semen dikarenakan slag adalah material yang bersifat pozzolan berdasarkan ASTM-C 168.
5. *Bottom ash* dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus, terlihat dari hasil pembentukan mortar yang mempunyai ikatan kuat.

Ucapan Terima Kasih

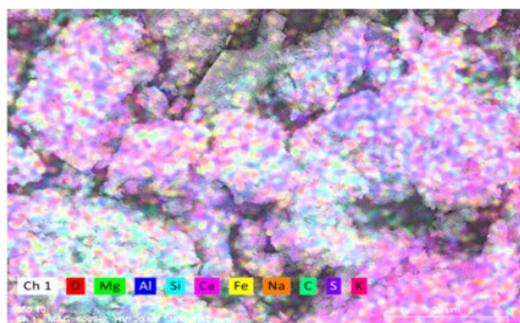
Ucapan terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan dan Laboratorium Non Logam dan Analisis Kimia Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) – Lampung Selatan yang telah membantu penyediaan bahan, serta memfasilitasi peralatan dalam pembuatan sampel dan pengujian.



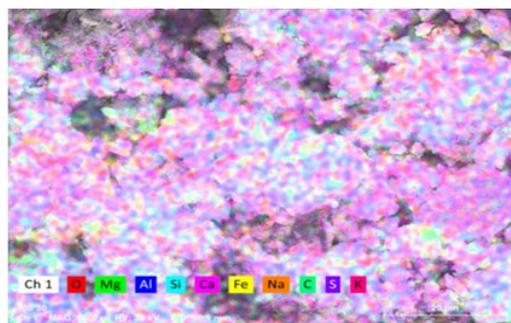
Gambar 7. Hasil analisa SEM sampel A1 variasi butir slag 350 mesh perbesaran 5002x



Gambar 9. Hasil analisa SEM-EDS sampel A4 variasi butir slag 100 mesh perbesaran 5000x



Gambar 8. Hasil analisa SEM-EDS sampel A1 variasi butir slag 350 mesh perbesaran 5009x



Gambar 10. Hasil analisa SEM-EDS sampel A4 variasi butir slag 100 mesh perbesaran 5007x

Daftar Pustaka

- Amin, M., Isnugroho, K., & Hendronursito, Y. (2018). *Utilization of blast furnace solid waste (Slag) as cement substitution material on mortar manufacture*. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 9(1), 22-28.
- ASTM C-305-82. 2001. *Portland and Blended Cements for Mortar Testing*. Standards Australia. Queensland: Australia.
- Attari, A., McNally, C., & Richardson, M. G. (2016). *A combined SEM–Calorimetric approach for assessing hydration and porosity development in GGBS concrete*. *Cement and concrete composites*, 68, 46-56.
- Beushausen, H., Alexander, M., & Ballim, Y. (2012). *Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios*. *Construction and Building Materials*, 29, 533-540.
- Cahyani, R. A. T. and Rusdianto, Y. (2020). *Concrete Performance with Ground Granulated Blast Furnace Slag as Supplementary Cementitious Materials*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 771(1). doi: 10.1088/1757-899X/771/1/012062
- Crossin, E. (2015). *The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute*. *Journal of Cleaner Production*, 95, 101-108.
- Herastuti, K. A. (2016). *Studi Analisis Pengaruh Variasi Ukuran Butir batuan terhadap Sifat Fisik dan Nilai Kuat Tekan*. ReTII.
- Higgins, D. Briefing. (2007). *GGBS and sustainability*. *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater*, 160, 99–101.
- Kolias, S. and Georjoui, C. (2005). *The Effect of Paste Volume and of Water Content on the Strength and Water Absorption of Concrete*. *Journal of Cement and Concrete Composite*. Vol. 27. Pp. 211-216.
- Li, G., & Zhao, X. (2003). *Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag*. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 293-299.
- Miller, S. A., Horvath, A., Monteiro, P. J., & Ostertag, C. P. (2015). *Greenhouse gas emissions from concrete can be reduced by using mix proportions, geometric aspects, and age as design factors*. *Environmental Research Letters*, 10(11), 114017.
- Ming, F., Deng, Y. S. and Li, D. Q. (2016). *Mechanical and Durability Evaluation of Concrete with Sulfate Solution Corrosion*, *Advances in Materials Science and Engineering*. (2016). doi: 10.1155/2016/6523878.
- Mulyono, T. (2003). *Teknologi Beton*. Andi Offset: Yogyakarta.
- Munasir, M., Triwikantoro, T., Zainuri, M., & Darminto, D. 2012. *Uji XRD dan XRF pada bahan mineral (batuan dan pasir) sebagai sumber material cerdas (CaCO₃ dan SiO₂)*. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 2(1), 20-29.
- Mursal, I. L. P. (2018). *Karakterisasi XRD Dan SEM Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System*. *Pharma Xplore: Jurnal Sains dan Ilmu Farmasi*, 3(2).
- Pribadi, A. (2010). *Tinjauan Absorpsi Dan Permeabilitas Mortar Kertas Pada Variasi Campuran*. Laporan Tugas Akhir. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
- Raman, J. V. M. and Krishnan, V. M. (2017). *Partial Replacement of Cement with GGBS in Self Compacting Concrete for Sustainable Construction*, *International Journal of Civil Engineering*, 4(3), pp. 24–28. doi: 10.14445/23488352/ijce-v4i3p106
- Śliwiński, J., & Zdeb, T. (2012). *Reactive powder concrete as a polymer modified concrete*. *Restoration of Buildings and Monuments*, 18(3-4), 161-168.
- Sujivorakul, C., Jaturapitakkul, C., and Taotip, A. (2011). *Utilization of Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash in Glass Fiber Reinforced Concrete*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 9, ISSN 0899-1561/2011/9-1281–1288.
- Tian, W. and Han, N. (2017). *Experiment Analysis of Concrete's Mechanical Property Deterioration Suffered Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles*, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. doi: 10.1155/2017/5673985.
- Tumingan, Tjaronge, M. W., Victor, S., dan Rudy, D. (2016). *Penyerapan Dan Porositas Pada Mortar Menggunakan Bahan Pond Ash sebagai Pengganti Pasir*. *Jurnal Politeknologi*. Vol. 15. No. 1. Januari 2016.
- Wahid, N., & Taufan, M. (2020). *Pemanfaatan GGBFS Sebagai Bahan Tambah Aduk Mortar*. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 22(1), 44-54.
- Widjojoko, L. (2010). *Pengaruh Sifat Kimia Terhadap Unjuk Kerja Mortar*. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(1).

