

PENGGUNAAN *BOTTOM ASH* DARI SISTEM PEMBAKARAN CIRCULATED FLUIDIZED BED BURNING DAN DARI BOILER SEBAGAI AGREGAT HALUS DALAM PEMBUATAN MORTAR

Wangsa Hioewono Chandra¹, Kevin Saputra Yusuf², Antoni³, dan Djwantoro Hardjito⁴

ABSTRAK : PLTU Ngoro adalah PLTU yang menggunakan sistem pembakaran CFBD (*Circulated Fluidized Bed Burning*) terletak di Mojokerto, Jawa Timur. Terdapat juga perusahaan M yang menggunakan boiler dengan sistem pembakaran PCC (*Pulverized Coal Combustion*). Batu bara yang digunakan menghasilkan limbah berupa *fly ash* dan *bottom ash*. Karena *bottom ash* memiliki permukaan yang kasar dan berpori, pemanfaatannya sebagai agregat halus akan mengakibatkan penurunan *workability* campuran. Tetapi penggunaan *fly ash* berkualitas baik dapat membantu melawan sifat *bottom ash* yang menurunkan *workability* campuran. *Bottom ash* yang didapat dari PLTU Ngoro dengan sistem pembakaran CFBD dapat dibedakan menjadi dua, yaitu yang berwarna lebih terang dinamakan *bottom ash* Ngoro cerah, dan yang berwarna lebih gelap dinamakan *bottom ash* Ngoro gelap, sedangkan *bottom ash* dari perusahaan M yang menggunakan boiler dengan sistem pembakaran PCC bersifat homogen. Dari penelitian ini, penggunaan *bottom ash* Ngoro cerah dengan kadar *fly ash* hingga 50 % dapat mencapai kuat tekan 52,27 MPa pada umur 56 hari. Penggunaan *bottom ash* Ngoro gelap menghasilkan rata-rata kuat tekan tertinggi yaitu 38 MPa pada umur 7 hari, 55 MPa pada umur 28 hari, dan 58 MPa pada umur 56 hari. Sedangkan penggunaan *bottom ash* dari perusahaan M memiliki rata-rata kuat tekan yang relatif rendah.

KATA KUNCI: *fly ash, bottom ash, mix design, workability, circulated fluidized bed burning, pulverized coal combustion*

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia, penggunaan batu bara terbesar berada di sektor pembangkit listrik dan akan terus meningkat. Penggunaan batu bara untuk pembangkit listrik diperkirakan akan meningkat dengan pertumbuhan rata-rata 7,1% per tahun selama kurun waktu 2013-2050 (Anindhita et al., 2015). Oleh karena itu, dibutuhkan solusi untuk mengolah limbah yang dihasilkan dari pembakaran batu bara tersebut. *Bottom ash* (abu dasar) merupakan material limbah dari proses pembakaran batu bara, umumnya memiliki ukuran partikel atau butiran seperti pasir dan memiliki sifat *pozzolan* (Ristinah et al., 2012). *Fly ash* yang juga limbah dari pembakaran batu bara merupakan material yang umum digunakan sebagai pengganti semen karena dapat meningkatkan kelecakan dan durabilitas beton. Akan tetapi, *fly ash* yang dapat digunakan adalah *fly ash* yang memiliki kualitas baik, yaitu *fly ash* yang memiliki bentuk *spherical* dan kandungan karbon yang rendah (Canpolat et al., 2004). Penggunaan *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus mengakibatkan penurunan *workability*, sehingga dibutuhkan penambahan *superplasticizer* untuk mencapai *workability* yang ditargetkan (Sulistio et al., 2015). Karena *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari sumber berbeda memiliki bentuk dan karakteristik yang berbeda juga, penelitian ini akan membandingkan pengaruh penggunaan *bottom ash* yang berasal

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, wangshioe@gmail.com

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, kevinsyusuf@gmail.com

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, antoni@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, djwantoro.h@petra.ac.id

dari PLTU Ngoro dengan sistem pembakaran CFBD (*Circulated Fluidized Bed Burning*) dan *bottom ash* yang berasal dari *boiler* perusahaan M dengan sistem pembakaran PCC (*Pulverized Coal Combustion*) dalam pembuatan mortar. Komposisi campuran dalam penelitian ini menggunakan semen secara efisien untuk menghasilkan kuat tekan sedang dengan memperhatikan *flowability* mortar segar.

2. STUDI LITERATUR

2.1. Fly Ash

Fly Ash adalah limbah hasil pembakaran batu bara yang ditangkap oleh suatu sistem pengumpul debu pada PLTU. Material ini berukuran 0,5-150 μm dengan bentuk seperti bola, lonjong, ataupun tidak teratur. Performa dari *fly ash* sebagai pengganti dari sebagian semen sangat dipengaruhi dari bentuk fisik, kandungan mineral, dan komponen senyawa penyusun *fly ash* itu sendiri (Thomas, 2007). Berdasarkan *Canadian Standards Association (CSA)* dan *American Standard Testing and Material (ASTM) C618*, *fly ash* terdiri dari dua jenis (Ramezaniapour, 2014), yaitu tipe C dari pembakaran batu bara *lignite* atau *subbituminous*, dan tipe F dari pembakaran batu bara *bituminous*. Kedua jenis *fly ash* sama-sama bersifat *pozzolanik*, dengan perbedaan pada kadar oksida yang terkandung di dalamnya.

2.2. Bottom Ash

Bottom ash adalah limbah hasil pembakaran batu bara yang tertinggal di dasar tungku pembakaran. Komponen utama dari *bottom ash* adalah oksida – oksida atau mineral yang mengandung silika, aluminium, besi, kalsium, natrium, dan magnesium (Suseno et al., 2012). Walaupun *bottom ash* bertekstur mirip pasir, *bottom ash* memiliki permukaan yang kasar dan berongga, sehingga penggunaannya sebagai agregat halus akan menyebabkan penurunan *workability* campuran pada saat pengerjaan. *Bottom ash* juga bersifat menyerap air dan memiliki porositas tinggi yang akan meningkatkan kebutuhan air campuran sehingga akan menurunkan kuat tekan yang dihasilkan.

3. RANCANGAN PENELITIAN

3.1. Material dan Peralatan yang Digunakan

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah semen Gresik, *fly ash* dari PLTU Paiton, pasir silika dari Tuban, *bottom ash* dari PLTU Ngoro, *bottom ash* dari perusahaan M, *superplasticizer* Viscocrete 1003 tipe *polycarboxylate* dari Sika, dan air. *Bottom ash* yang didapat dari PLTU Ngoro dibedakan menjadi dua, yaitu yang berwarna lebih terang dinamakan *bottom ash* Ngoro cerah, dan yang berwarna lebih gelap dinamakan *bottom ash* Ngoro gelap, sedangkan *bottom ash* dari perusahaan M yang menggunakan *boiler* dengan sistem pembakaran PCC bersifat homogen. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ayakan 1 cm, timbangan, oven, *mixer*, bekisting 5 cm x 5cm x 5cm, *Universal Testing Machine*, dan *flow table*.

3.2. Komposisi Campuran

3.2.1 Komposisi Campuran Pasta

Sebelum pembuatan mortar, dilakukan pembuatan pasta untuk mengetahui kadar *fly ash* yang paling optimum. Kadar *fly ash* yang diuji adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% (**Tabel 1**).

Tabel 1. Komposisi Campuran Pasta

Kode	Semen (kg/m^3)	Fly Ash (kg/m^3)	w/cm
PCTRL	2400	0	0,35
FA10	2160	240	
FA20	1920	480	
FA30	1680	720	
FA40	1440	960	
FA50	1200	1200	

3.2.2 Komposisi Campuran Mortar Kontrol

Mortar kontrol dibuat untuk mengetahui perbedaan kekuatan mortar yang menggunakan *bottom ash* dan mortar yang menggunakan pasir silika sebagai agregat halus.

Tabel 2. Mix Design Mortar Kontrol

Kode	Semen (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	w/cm
CTRL2	800	1600	0,35
CTRL1.5	960	1440	0,35

3.2.3. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Ngoro Cerah

Mortar dengan *bottom ash* Ngoro cerah memiliki w/cm dan penggunaan *superplasticizer* yang berbeda-beda tiap komposisi campuran (**Tabel 3**). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan *target flow* yaitu 14 ± 1 cm dengan penggunaan *superplasticizer* dibawah 1% dari *cementitious materials*.

Tabel 3. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Ngoro Cerah

Kode	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	SP (%)	w/cm
MBAC2	800	0	1600	0,36	0,461
MBAC(FA10)2	720	80		0,34	0,45
MBAC(FA20)2	640	160		0,27	0,45
MBAC(FA30)2	560	240		0,33	0,45
MBAC(FA40)2	480	320		0,3	0,45
MBAC(FA50)2	400	400		0,7	0,41

3.2.4. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Ngoro Gelap

Berbeda dengan mortar yang menggunakan *bottom ash* Ngoro cerah, mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap memiliki w/cm yang sama tiap komposisi campuran yaitu 0,35 (**Tabel 4**). Hal ini dikarenakan *bottom ash* Ngoro gelap memiliki penyerapan yang lebih sedikit dibandingkan Ngoro cerah, sehingga untuk mencapai *target flow* 14 ± 1 cm tidak membutuhkan air sebanyak mortar dengan *bottom ash* Ngoro cerah.

Tabel 4. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Ngoro Gelap

Kode	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	SP (%)	w/cm
MBAG2	800	0	1600	0,43	0,35
MBAG(FA10)2	720	80		0,367	0,35
MBAG(FA20)2	640	160		0,297	0,35
MBAG(FA30)2	560	240		0,19	0,35
MBAG(FA40)2	480	320		0,14	0,35
MBAG(FA50)2	400	400		0,07	0,35

3.2.5. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Perusahaan M

Pembuatan mortar dengan *bottom ash* dari perusahaan M dilakukan secara berulang untuk tiap komposisi campuran yang sama sebanyak 2 sampai 3 kali. Di mana campuran yang menggunakan air lebih sedikit dimasukkan ke dalam bekisting, sedangkan campuran yang menggunakan air lebih banyak dibuang.

Tabel 5. Komposisi Campuran Mortar dengan *Bottom Ash* Perusahaan M

Kode	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	SP (%)	w/cm
MBAM1,5	960	0	1440	0,0063	0,4
MBAM(FA10)1,5	864	98		0,05	0,38
MBAM(FA20)1,5	768	192		0,47	0,37
MBAM(FA30)1,5	672	288		0,64	0,36
MBAM(FA40)1,5	576	384		0,33	0,35
MBAM(FA50)1,5	480	480		0	0,35

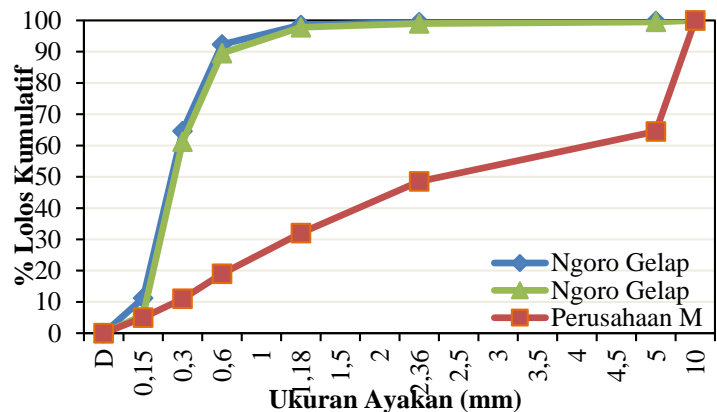
4. HASIL DAN ANALISA DATA

4.1. Analisa Material

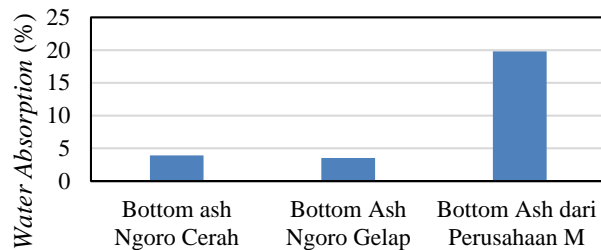
Fly ash dianalisa terhadap X-Ray Fluorescence. Hasil pengujian XRF menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan merupakan tipe C, karena mempunyai kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (66,95%) < 70% dan mempunyai kadar CaO (19,50%) > 10% yang dapat dilihat pada Tabel 6. Sedangkan *bottom ash* akan ditentukan *fineness modulus*nya dengan cara mengayak *bottom ash*. Data hasil analisa ayakan, *fineness modulus*, berat volume, dan berat jenis *bottom ash* dapat dilihat pada Gambar 1 dan Tabel 7. Selanjutnya *bottom ash* akan dianalisa terhadap *water absorption*. Hasil dari analisa *water absorption* dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 6. Komposisi Kimia *Fly Ash*

Parameter	Jumlah (%)
SiO ₂	36,57
Al ₂ O ₃	19,06
Fe ₂ O ₃	11,32
TiO ₂	0,75
CaO	19,50
MgO	6,21
SO ₃	1,35
Na ₂ O	2,45
K ₂ O	1,35
MnO ₂	0,15
P ₂ O ₅	0,21
LOI	0,63



Gambar 1. Hasil Uji Analisa Ayakan *Bottom Ash*



Gambar 2. Water Absorption Ketiga *Bottom Ash*

Tabel 7. Gradasi Kepadatan Agregat

<i>Bottom Ash</i>	<i>Fineness Modulus</i>	Berat Volume Rata-rata (kg/m³)	Gs Rata- rata
<i>Bottom Ash</i> Ngoro Cerah	2,342	1303,2	2,59
<i>Bottom Ash</i> Ngoro Gelap	2,472	1381,3	2,61
<i>Bottom Ash</i> dari perusahaan M	5,2	904,7	1,63

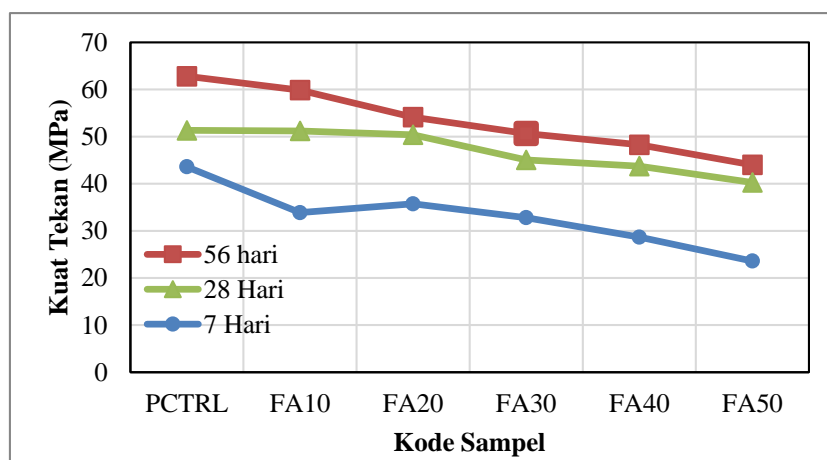
4.2. Analisa Hasil Pengujian *Flowability* dan Kuat Tekan Pasta

Pengujian dilakukan terhadap pasta dengan 6 macam komposisi campuran. Hasil *flowability test* dapat dilihat pada **Tabel 8**. Diameter *flow* yang paling besar didapat oleh sampel FA30, FA40 dan FA50 sebesar 25 cm, masing - masing dengan kombinasi 70% semen : 30% *fly ash*, 60% semen : 40% *fly ash*, dan 50% semen : 50% *fly ash*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dari PLTU Paiton sebagai pengganti sebagian semen dapat meningkatkan *flowability* pasta segar. Dari grafik kuat tekan pasta yang ditunjukkan pada **Gambar 3**, dapat dilihat bahwa pasta kontrol tanpa *fly ash* pada umur 7, 28, dan 56 hari memiliki kekuatan yang paling tinggi, yaitu masing – masing sebesar 43,6; 51,33; dan 62,8 MPa. Akan tetapi, pasta yang menggunakan kadar *fly ash* sebesar 10% (FA 10) memiliki kuat tekan yang tidak jauh berbeda dengan pasta kontrol pada umur 28 hari dan 56 hari.

Tabel 8. Hasil *Flowability Test* Pasta

Sampel	Semen (kg/m³)	Fly Ash (kg/m³)	w/cm	Air (kg/m³)	Flow diameter (cm)
CTRL	2400	0	0.35	840	22
FA10	2160	240			23
FA20	1920	480			24
FA30	1680	720			25
FA40	1440	960			25*
FA50	1200	1200			25*

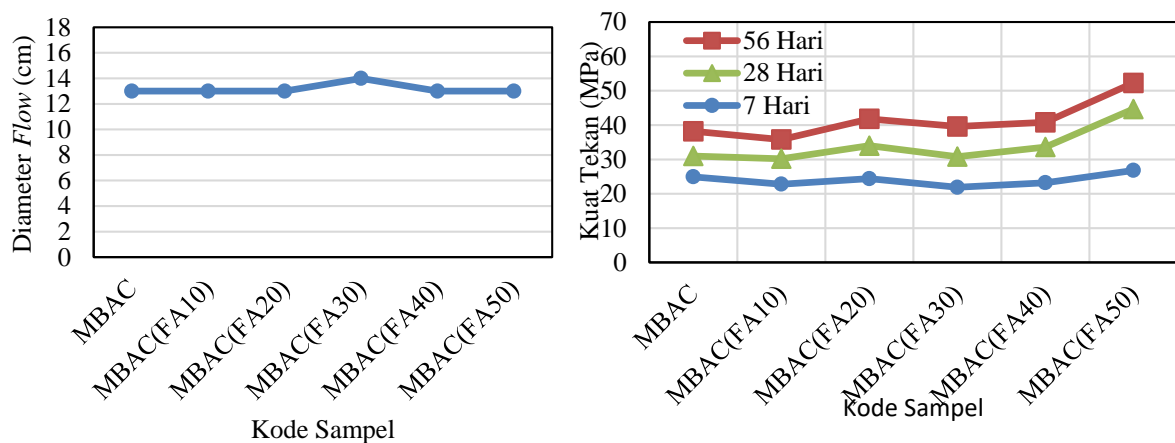
*) Belum mencapai 25 ketukan pada alat *flow table test*, diameter pasta sudah lebih besar dari diameter *flow table*.



Gambar 3. Kuat Tekan Pasta

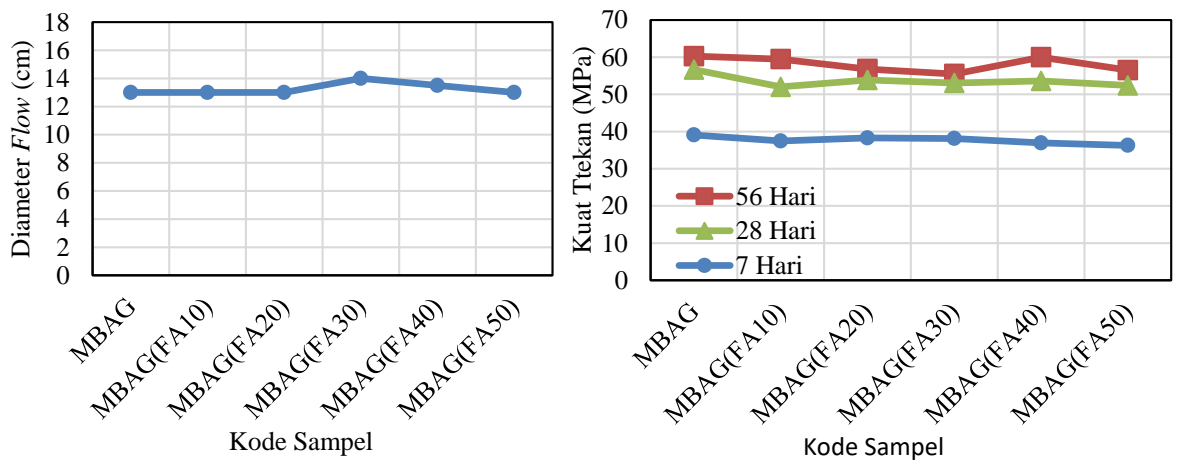
4.3. Analisa Pengujian *Flowability* dan Kuat Tekan Mortar dengan *Bottom Ash* sebagai Agregat Halus

Pembuatan mortar dengan *bottom ash* dari ketiga sampel memiliki *water per cementitious materials* yang relatif berbeda dari 0,461 hingga 0,35. Hal ini dikarenakan ketiga sampel *bottom ash* memiliki perbedaan dalam penyerapan air sehingga menetapkan *water per cementitious materials* pada suatu nilai tertentu untuk seluruh *mix design* campuran sulit dilakukan. Pembuatan sampel mortar dengan *bottom ash* Ngoro cerah dan *bottom ash* Ngoro gelap dilakukan dengan menambah air sedikit demi sedikit ke dalam campuran yang telah disiapkan hingga diameter *flow* campuran yang didapat sekitar 11 cm. Kemudian *superplasticizer* ditambahkan hingga didapatkan campuran sesuai dengan diameter *flow* yang ditargetkan yaitu 14 ± 1 cm. Sedangkan pembuatan sampel mortar dengan *bottom ash* dari perusahaan M dilakukan dengan cara diulang 2 sampai 3 kali untuk tiap *mix design*. Campuran yang menggunakan air lebih sedikit kemudian dimasukkan ke dalam bekisting. Hasil dari pengujian *flowability* dan kuat tekan untuk campuran mortar dengan *bottom ash* Ngoro cerah dapat dilihat pada **Gambar 4**. Kemudian hasil pengujian *flowability* dan kuat tekan untuk campuran mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap dapat dilihat pada **Gambar 5**. Lalu hasil pengujian *flowability* dan kuat tekan untuk campuran mortar dengan *bottom ash* dari perusahaan M dapat dilihat pada **Gambar 6**.



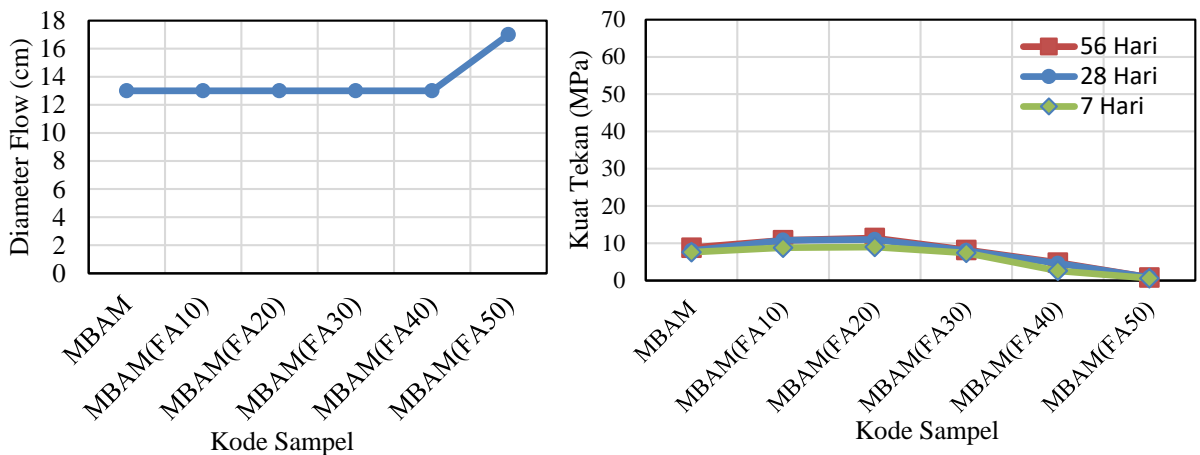
Gambar 4. Hasil Uji *Flowability* dan Kuat Tekan Mortar dengan *Bottom Ash* Ngoro Cerah

Dari **Gambar 4** dapat dilihat semakin banyak kadar *fly ash* yang digunakan hingga 50%, semakin tinggi pula kuat tekan mortar yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan penggunaan *fly ash* mengurangi kebutuhan air campuran sehingga *target flow* dicapai lebih mudah dan menghasilkan mortar dengan kuat tekan lebih tinggi yaitu 52,27 MPa pada umur 56 hari. Kuat tekan tersebut dicapai oleh sampel MBAC(FA50)2, dimana campuran tersebut menggunakan *fly ash* sebagai pengganti 50% semen, *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus sepenuhnya, w/cm sebesar 0,41 dan penggunaan SP sebesar 0,7% dari *cementitious materials*. Kuat tekan mortar yang dihasilkan dari *bottom ash* Ngoro cerah sudah melebihi kuat tekan mortar kontrol pada umur yang sama. Sedangkan untuk *flowability* dari tiap sampel mortar telah mencapai diameter *flow* yang ditargetkan yaitu 14 ± 1 cm.



Gambar 5. Hasil Uji Flowability dan Kuat Tekan Mortar dengan Bottom Ash Ngoro Gelap

Dari **Gambar 5** dapat dilihat kuat tekan mortar tertinggi pada umur 56 hari yaitu 61 MPa yang dicapai oleh kode sampel MBAG(FA40)2, dimana campuran tersebut menggunakan *fly ash* sebagai pengganti 40% semen, *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus sepenuhnya, w/cm sebesar 0,35, dan SP sebesar 0,14% dari *cementitious materials*. Kuat tekan mortar yang dihasilkan dari *bottom ash* Ngoro Gelap suda melebihi kuat tekan mortar kontrol pada umur yang sama. *Flowability* dari mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap telah mencapai diameter *flow* yang ditargetkan yaitu 14 ± 1 cm. Pada campuran mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap, w/cm yang digunakan adalah 0,35 untuk tiap komposisi campuran. Namun dengan bertambahnya kadar *fly ash* yang digunakan, penambahan SP dapat dikurangi untuk mencapai diameter *flow* yang ditargetkan.



Gambar 6. Hasil Uji Flowability dan Kuat Tekan Mortar dengan Bottom Ash dari Perusahaan M

Dari **Gambar 6** dapat dilihat mortar yang menggunakan *bottom ash* dari perusahaan M memiliki kuat tekan yang jauh lebih rendah dibandingkan mortar dengan *bottom ash* lainnya meskipun menggunakan perbandingan pasta banding *bottom ash*, yaitu 1 : 1,5. Kuat tekan mortar dengan *bottom ash* dari perusahaan M berada di bawah 12 MPa pada 28 hari dan 56 hari sehingga dapat dikategorikan sebagai mortar berkekuatan rendah. Pada campuran mortar dengan *bottom ash* dari perusahaan M, semakin banyak *fly ash* yang ditambahkan, kebutuhan air dan SP campuran pun berkurang untuk mencapai *flow* yang ditargetkan. Dari penggunaan ketiga *bottom ash* sebagai pengganti agregat halus sepenuhnya, terlihat mortar yang menggunakan *bottom ash* Ngoro gelap memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan mortar dengan *bottom ash* lainnya pada 7, 28, maupun 56 hari. Hal ini dikarenakan

penyerapan air *bottom ash* Ngoro gelap yang lebih sedikit, sehingga komposisi campuran menggunakan w/cm yang lebih kecil pula, yaitu 0,35. Penggunaan *bottom ash* dari perusahaan M tidak mampu menghasilkan mortar dengan kuat tekan yang tinggi dikarenakan LOI atau *Lost on Ignition* yang tinggi pada saat pembakaran batu bara. Pembakaran yang tidak sempurna tersebut menghasilkan *bottom ash* berfineness modulus tinggi dan menyebabkan berkurangnya kepadatan mortar saat digunakan sebagai agregat halus sehingga kuat tekan mortar yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Dan lagi, *bottom ash* dari perusahaan pembakaran M memiliki penyerapan air yang tinggi juga menyebabkan penurunan kuat tekan mortar.

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian tersebut, didapatkan bahwa :

- Penggunaan kadar *fly ash* paling optimum untuk pasta adalah 10%. Selain memperlecek campuran, pasta dengan kadar *fly ash* 10% memiliki kuat tekan yang tidak menurun jauh dari pasta kontrol yang menggunakan 100% semen.
- Kekuatan mortar yang menggunakan *bottom ash* Ngoro cerah meningkat diikuti dengan penambahan kadar *fly ash* Paiton. Hal ini dikarenakan penggunaan *fly ash* yang memperbaiki *workability* campuran sehingga w/cm yang digunakan dapat diminimalkan untuk mencapai *target flow* 14 ± 1 cm. Penggunaan kadar *fly ash* hingga 50% dapat menghasilkan mortar dengan kuat tekan 52,27 MPa melebihi mortar kontrol dengan kuat tekan 41,60 MPa pada umur 56 hari. Menarik untuk diteliti, apakah dengan menggunakan *fly ash* berkadar lebih dari 50% akan tetap meningkatkan kuat tekan mortar secara linear.
- Tidak terlihat perbedaan kuat tekan yang signifikan pada mortar yang menggunakan *bottom ash* Ngoro gelap dengan kadar *fly ash* yang bervariasi. Hal ini dikarenakan *bottom ash* Ngoro gelap memiliki nilai serapan yang paling baik, sehingga *mix design* mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap memiliki w/cm yang paling rendah yaitu 0,35. Penggunaan w/cm yang rendah tersebut menghasilkan kuat tekan yang paling tinggi dibandingkan mortar yang menggunakan kedua *bottom ash* lainnya. Rata-rata kuat tekan mortar dengan *bottom ash* Ngoro gelap adalah 38 MPa pada umur 7 hari, 55 MPa pada umur 28 hari dan 58 MPa pada umur 56 hari.
- Mortar yang menggunakan *bottom ash* dari perusahaan M memiliki kuat tekan yang jauh lebih rendah dibandingkan mortar yang menggunakan kedua *bottom ash* lainnya. Hal ini dikarenakan gradasi dan penyerapan air material yang kurang baik. Untuk memanfaatkan *bottom ash* dari perusahaan M, diperlukan penelitian lebih lanjut tentang *treatment* yang paling efektif untuk *bottom ash* supaya menghasilkan mortar dengan kuat tekan yang lebih tinggi.

6. DAFTAR REFERENSI

- Anindhita, F., Adiarso, Sugiyono, A., & Boedoyo, M. S. (2015). *Outlook Energi Indonesia*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Canpolat, F., Yilmaz, K., Köse, M. M., Sümer, M., & Yurdusev, M. A. (2004). "Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production". *Cement and Concrete Research*, 34(5), 731–735. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00063-2)
- Ramezaniapour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials*. Tehran: Springer; 2014 edition. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>
- Ristinah, Zacob, A., Setyowulan, D., & Soehardjono, M. . (2012). "Pengaruh Penggunaan Bottom Ash sebagai Pengganti Semen pada Campuran Batako terhadap Kuat Tekan Batako". *Rekayasa Sipil*, 6(3), 264–271.
- Sulistio, A. V., Wahjudi, S., & Hardjito, D. (2015). "Penggunaan Bottom Ash Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Mortar Hvf". *Jurnal Teknik Sipil*, 5(2), 1–8.
- Suseno, H., Prastumi, Susanti, L., & Setyowulan, D. (2012). "Pengaruh Penggunaan Bottom Ash sebagai Pengganti Tanah Liat pada Campuran Bata terhadap Kuat Tekan Bata". *Jurnal Rekayasa Sipil*, 6(3), 264–271.
- Thomas, M. D. A. (2007). "Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete". *Portland Cement Association*, 24. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2015.0409047>