



Pengaruh Dosis Pada Kehilangan Berat Mortar Dengan Bahan Pengikat Alkali *Activated Slag*

Bayu Rahmat Ramadhan¹, Fritswel Ratmadi Payung¹, Sri Nur Akifa¹, William Arrang Sarungallo¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Jalan Soekarno Hatta

*Penulis korespondensi: bayurramadhan@untad.ac.id

DISUBMIT 2 Desember 2024

DIREVISI 11 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Sulawesi Tengah merupakan salah satu wilayah di Indonesia dengan produksi limbah baja terbesar, didorong oleh pesatnya pertumbuhan industri baja berbasis nikel. Limbah baja tersebut, seperti *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan dasar dalam produk alkali-activated slag (AAS), seperti pasta, mortar, dan beton. Inovasi ini menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan penggunaan semen konvensional. Namun, tantangan utama adalah memastikan ketahanan material berbasis AAS di lingkungan agresif, khususnya dalam media asam sulfat. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi dosis terhadap perubahan berat mortar berbasis AAS (alkali-activated slag mortar atau AASM), yang diaktifkan dengan Na_2SiO_3 dan NaOH sebagai *activator* utama, dalam larutan asam sulfat (H_2SO_4) 7% selama 56 hari, dengan rasio air semen, modulus, *activator/binder*, dan *superplasticizer* yang tetap. Kinerja AASM dibandingkan dengan mortar Portland Composite Cement (PCC) konvensional dan mortar campuran untuk mengevaluasi ketahanannya. Lima desain campuran diuji pada ketiga jenis mortar, masing-masing dirancang untuk mencapai kuat tekan target sebesar 40 MPa. Hasil pengujian selama 56 hari menunjukkan perbedaan signifikan dalam perubahan berat dan karakteristik visual antar jenis mortar. Sampel AASM mengalami ekspansi, dengan berat yang tetap stabil atau bahkan meningkat, disertai munculnya retakan di tepi sampel. Sebaliknya, mortar campuran dan PCC menunjukkan sifat rapuh, pelarutan material, serta penurunan berat yang signifikan. Hasil ini mengindikasikan bahwa AASM memiliki kemampuan mempertahankan berat yang lebih baik dalam lingkungan asam sulfat 7% dibandingkan dengan mortar campuran maupun PCC, sehingga menjadikannya alternatif yang lebih tahan lama untuk konstruksi di kondisi kimia yang agresif. Penelitian ini mempertegas potensi AAS sebagai solusi konstruksi ramah lingkungan, dengan menyoroti pentingnya optimalisasi desain campuran untuk meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat.

KATA KUNCI Alkali Activated slag Mortar; Asam Sulfat; Serangan Sulfat; Dosis; GGBS

1 PENGANTAR

Alkali-Activated Slag (AAS) merupakan teknologi beton terbaru yang mampu menggantikan semen konvensional, serupa dengan alternatif berbasis geopolimer. AAS terdiri dari *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) dan *activator* seperti natrium hidroksida (NaOH), natrium silikat (Na_2SiO_3), atau kalium hidroksida (KOH). Pada tahap awal hidrasi, kation alkali berperan sebagai katalis dengan bertukar ion kalsium (Ca^{2+}), yang kemudian terintegrasi ke dalam struktur dan membentuk fasa seperti zeolit [1]. Proses aktivasi ini menghilangkan kebutuhan akan semen tradisional, menjadikan AAS sebagai alternatif berkelanjutan terhadap beton berbasis *Ordinary Portland Cement* (OPC).

Berkat kandungan silika oksida (SiO_2) dan alumina oksida (Al_2O_3) yang tinggi, AAS memiliki sifat mekanik dan durabilitas yang menjanjikan, sehingga layak digunakan untuk aplikasi non-struktural maupun struktur beton bertulang. Selain itu, AAS menawarkan emisi karbon yang lebih rendah, memperkuat posisinya sebagai material konstruksi berkelanjutan untuk proyek yang peduli terhadap lingkungan [2].

Penelitian ini menggunakan NaOH dan Na_2SiO_3 sebagai aktivator dengan variasi rasio aktivator, yang disebut juga sebagai dosis, didefinisikan oleh persentase Na_2O dalam GGBFS. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan modulus yang tetap, yaitu rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dalam aktivator, sebagai salah satu parameter dalam desain campuran mortar.

Salah satu keterbatasan utama dalam teknologi beton konvensional adalah kerentanannya terhadap serangan asam. Lingkungan seperti hujan asam, sungai yang bersifat asam, saluran pembuangan, dan fasilitas kimia merupakan contoh kondisi asam yang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada struktur beton [3]. Kerusakan ini mengakibatkan penurunan kekuatan dan massa beton. Dalam kasus yang parah, beton dapat mengalami retak ekspansif akibat reaksi antara alkali dan silika atau interaksi antara natrium sulfat dan magnesium sulfat dengan kalsium hidroksida, yang berujung pada kerusakan struktural yang signifikan [4].

Beberapa penelitian telah mengeksplorasi durabilitas *alkali-activated slag* (AAS) terhadap serangan asam seperti HCl, yang menunjukkan ketahanannya dalam lingkungan kimia yang agresif [5]. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa AASC (*alkali-activated slag concrete*) memiliki durabilitas yang jauh lebih baik dibandingkan dengan beton konvensional di bawah kondisi agresif, dengan ketahanan yang lebih tinggi terhadap degradasi asam dan tingkat kehilangan material yang lebih rendah [6]. Kinerja yang unggul dalam lingkungan korosif ini menyoroti potensi AAS untuk digunakan pada aplikasi di mana ketahanan kimia menjadi faktor kritis, seperti pada struktur industri dan lingkungan laut.

Penelitian ini berfokus pada hubungan perbedaan dosis terhadap ketahanan mortar AAS didalam lingkungan agresif yang diwakili oleh asam sulfat H_2SO_4 dengan konsentrasi 7 % dengan cara pengukuran perubahan berat benda uji selama 0, 7, 14, 28, 56 hari target.

2 MATERIAL

GGBFS (*Ground Granulated Blast Furnace Slag*) yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT Krakatau Semen Indonesia. Komposisi kimia GGBFS ditentukan melalui berbagai metode pengujian, seperti ICP, *combustion*, dan *gravimetric*, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi kimia GGBFS

Oxide	% by Mass
CaO	41.56%
SiO_2	37.42%
Al_2O_3	15.2 %

Larutan Sodium silika campuran (15,4% Na_2O ; 32,33% SiO_2) dan larutan sodium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 10 M digunakan sebagai aktivator kimia. Larutan natrium hidroksida disiapkan dengan melarutkan serpihan natrium hidroksida ke dalam air suling, kemudian didiamkan selama satu hari sebelum digunakan dalam proses pencampuran.

Untuk menghasilkan mortar dengan tingkat kepadatan yang baik, digunakan pasir sungai berkualitas tinggi yang memiliki gradasi baik dengan *fineness* modulus sebesar 3,87 sebagai agregat halus.

3 METODOLOGI

Sebanyak 5 Mix Desain mortar disiapkan untuk mengkaji pengaruh dosis terhadap perubahan berat. Rincian campuran serta hasil pengujian kuat tekan disajikan pada

Proporsi bahan, termasuk GGBFS, aktivator kimia, agregat, dan air, ditentukan menggunakan metode volume absolut [7]. Oleh karena itu, total berat pengikat (*binder*) dan air disesuaikan untuk menjaga volume material yang konsisten pada setiap variabel yang diamati. Dalam rasio air terhadap padatan, kandungan air mencakup total air yang terdapat dalam larutan sodium silika, larutan sodium hidroksida, dan air tambahan. Sementara itu, padatan terdiri dari GGBFS, serta komponen padat dari larutan natrium silikat dan natrium hidroksida.

Urutan proses pencampuran. Pada tahap awal, air, GGBFS, dan larutan aktivator dicampur kering di dalam mixer selama 2.5 menit. Selanjutnya, agregat halus kering dan *superplasticizer* ditambahkan, dan proses pencampuran kering dilanjutkan selama 1.5 menit. Setelah itu pencampuran dilanjutkan dengan mesin pada kecepatan tinggi selama 30 detik. Setelah proses pencampuran selesai, kemampuan kerja (*workability*) mortar dievaluasi menggunakan *flow table*.

Tabel 2 AAS, PCC, dan *blended mix* desain

Mix Code	Binde Type	D (%)	M (%)	A	W	SP (%)	G (%)	PCC %
AAS 1	GGBFS+ Aktivator	4	1.2	2.25	0.47	1	100	0
AAS 2	GGBFS+ Aktivator	4	0.8	2.25	0.47	1	100	0
AAS 3	GGBFS+ Aktivator	4	1	2.25	0.47	1	100	0
PCC1	PCC	-	-	2.25	0.47	-	-	100
BLENDDED 1	PCC + GGBFS	-	-	2.25	0.47	-	50	50

Tabel 3 Persentase perubahan berat terhadap berat awal

No.	Desain Campuran	Kehilangan Berat/Penambahan Berat Terhadap Berat Awal %			
		0	14	28	56
1	D4M1.2W0.47A2.25S1	100,00%	102,11%	107,20%	111,07%
2	D4M0.8W0.47A2.25S1	100,00%	102,75%	108,60%	106,58%
3	D4M1W0.47A2.25S1	100,00%	103,26%	106,26%	111,44%
4	PCCA2.25W0.47	100,00%	87,93%	64,08%	25,02%
5	G50%A2.25W0.47	100,00%	100,65%	79,02%	38,97%

Mortar kemudian dituangkan ke dalam cetakan berbentuk persegi panjang dengan ukuran 50 mm x 50 mm, diikuti dengan proses pemadatan menggunakan getaran selama 1 menit. cetakan dilepaskan dari cetakan setelah 24 jam.

Tiga desain campuran dipilih untuk evaluasi lebih lanjut. Desain ini mencakup variasi dosis sebesar 4%, 5%, dan 6% dikembangkan untuk mencapai target kuat tekan sebesar 40 MPa. Desain campuran yang terpilih mempertahankan parameter yang konsisten untuk rasio air terhadap pengikat (*water-to-binder ratio*), rasio *superplasticizer*, modulus dan rasio agregat terhadap pengikat, sementara nilai *dosage* divariasikan.

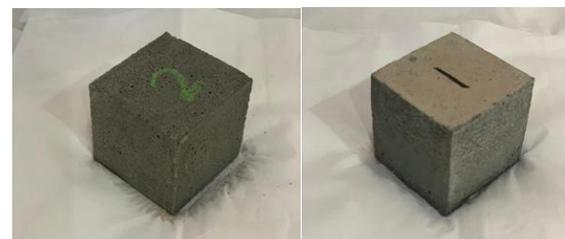
Sebagai perbandingan, desain campuran lain juga disiapkan dengan menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai satu-satunya pengikat serta campuran 50% GGBFS dan 50% PCC. Desain campuran perbandingan ini juga dikembangkan dengan target kuat tekan, rasio air terhadap pengikat, dan rasio agregat terhadap pengikat yang sama. Rincian semua desain campuran disajikan pada Tabel 3.

Untuk mengevaluasi durabilitas mortar di lingkungan agresif, digunakan proses *curing* tiga tahap. Spesimen dibasahi dengan menyemprotkan air pada permukaannya selama 27 hari, kemudian disegel dalam

plastik kedap udara untuk menjaga suhu. Setelah itu, spesimen direndam dalam air selama satu hari sebelum direndam dalam larutan asam sulfat, sesuai dengan ASTM C 267, selama periode 0, 14, 28, 56 hari. Untuk menjaga konsistensi larutan asam, larutan diganti setiap dua minggu.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

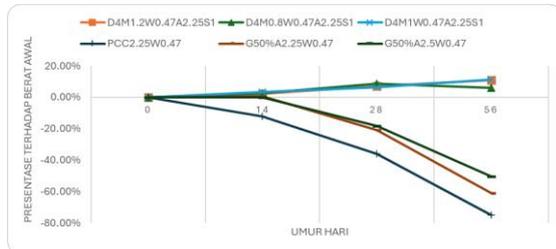
Sebelum dilakukan perendaman, setiap benda uji ditimbang dan beratnya dibandingkan dengan berat awal yang diukur pada umur 0 hari sesuai Gambar 2. Setiap benda uji diberi nomor identifikasi untuk memastikan akurasi data. Tabel 3 dan Gambar 2 menyajikan perubahan berat benda uji dibandingkan dengan berat awalnya.



Gambar 1 Penomoran mortar AAS dan mortar normal

Gambar 2 menunjukkan perbedaan tren perubahan berat benda uji dibandingkan dengan berat awal. Seluruh desain campuran mortar AAS mengalami peningkatan berat yang berkisar antara 5% hingga 19% dari berat awal. Secara visual, benda uji mortar AAS menunjukkan

ekspansi, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3 yang berbanding terbalik dengan mortar normal dan mortar *blended*, yang mengalami kehilangan berat seiring berjalannya waktu.



Gambar 2 Grafik perubahan berat terhadap berat awal



Gambar 3 Benda uji setelah 56 hari perendaman, a) blended b) PCC c) AAS

Dapat diamati semakin tinggi kadar persentase dosis maka semakin tinggi penambahan berat benda uji di umur perendaman ke-56 hari.

Terdapat dua skenario reaksi yang berbeda antara mortar PCC normal dan mortar AAS setelah perawatan dalam larutan asam sulfat dengan konsentrasi 7% selama 28 hari. Secara visual, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Mortar AAS mengalami ekspansi, di mana terjadi peningkatan reaksi pengkristalan dibandingkan dengan kondisi pada umur perendaman 0 hari. Asam sulfat mengubah struktur mikro internal mortar, di mana ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi dalam mortar untuk membentuk kristal *ettringite* dan *gypsum* yang bersifat ekspansif. Peningkatan produksi kristal ini, disertai dengan gaya ekspansi yang lebih besar, menyebabkan munculnya retakan mikro di dalam mortar yang semakin meluas seiring waktu. Retakan ini mendorong ekspansi lebih lanjut serta penetrasi retakan dan pori, yang pada akhirnya menyebabkan kerusakan struktur makro dan mengurangi kinerja mortar [8]. Pada mortar normal dan *blended* terjadi hal yang berbeda.

Ditemukan reaksi pengkristalan tapi hanya sedikit dan bukannya mengembang melainkan terjadinya penyusutan. Asam sulfat menyerang kalsium hidroksida di dalam mortar dan merubahnya menjadi *calcium sulphate* yang dapat larut di air sebagaimana terlihat pada sampel C pada Gambar 3. *Calcium silicate hydrate* bereaksi dengan asam sulfat dan membentuk *silica gel* yang rapuh, yang mudah untuk larut akibat gaya luar. *Calcium sulphate* membentuk reaksi inisial yang bereaksi dengan *calcium aluminate* fase semen dan membentuk *voluminous calcium sulphoaluminate*, yang mana bisa menyebabkan pengembangan, retakan, kehilangan kekuatan dan kehancuran mortar [9].

5 KESIMPULAN

Pada perendaman selama 56 hari pada lingkungan agresif asam sulfat dengan kadar 7% kedua jenis mortar mengalami perkembangan benda uji yang berbeda. Mortar konvensional dan *blended* mengalami penyusutan (*shrinkage*) pengurangan berat hingga 81% dari berat awal, sementara mortar AAS mengalami pengembangan (*expansive*) dengan mengalami penambahan rata-rata 13% dari berat awal.

Mortar AAS melebihi performa mortar *blended* dan mortar konvensional dalam ketahanan (*durability*) terhadap lingkungan agresif asam sulfat dengan kadar 7% yang diukur dalam perubahan berat mortar. Mortar AAS dengan desain campuran D4M1W0.47A2.25S1 memiliki ketahanan tertinggi dengan mempertahankan rata-rata 39% kuat tekannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Shi, D. Roy and P. Krivenko, Alkali-activated cements and concretes, London: Taylor & Francis, 2003.
- [2] O. A. Mohamed and R. Al Khatib, "Fresh Properties and Sulfuric Acid Resistance of Sustainable Mortar using Alkali-Activated GGBS/Fly Ash Binder," *Polymers*, vol. 14, no. 591, 2022.
- [3] A. Khatab, M. T. Arshad, F. M. Awan and I. Khan, "Development of an Acid Resistant Concrete: A Review," *International Journal of Sustainable*

- Construction Engineering & Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 33-38, 2013.
- [4] M. Teymouri, K. Behfarnia and A. Shabani, "Mix Design Effects on the Durability of Alkali-Activated Slag Concrete in a Hydrochloric Acid Environment," *Sustainability*, vol. 13, no. 8096, 2021.
- [5] A. Ozcan and M. B. Karakoc, "The Resistance of Blast Furnace Slag-and Ferrochrome Slag-Based Geopolymer Concrete Against Acid Attack," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, pp. 1571-1583, 2019.
- [6] F. Matakah, T. Salem and P. Soroushian, "Acid Resistance and Corrosion Protection Potential of Concrete Prepared with Alkali Aluminosilicate," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, pp. 705-711, 2018.
- [7] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Pearson, 2011.
- [8] D. Min and T. Mingshu, "Formation and Expansion of Ettringite Crystals," *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 1, pp. 119-126, 1994.
- [9] S. R. Ahmed and N. Munirudrappa, "Effect of Sulphuric Acid on Plasticized Concrete," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 5, pp. 291-294, 1998.

