



Dampak Penambahan *Fly Ash* Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan dan Durabilitas Beton Akibat Serangan Sulfat

*Widodo Kushartomo, Vanessa Adistya Wildan, Andy Prabowo

Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Jakarta

*widodo@untar.ac.id

Received: 8 Maret 2025 Revised: 22 Juli 2025 Accepted: 30 Juli 2025

Abstract

Concrete is the primary choice for construction projects, including its use in aggressive environments such as coastal areas. The high sulfate content in these environments poses a threat to the durability and compressive strength of concrete. The impact of sulfate attack on concrete can result in degradation and a decrease in concrete quality. Several methods have been used to maintain the durability of concrete, such as applying coatings to the surface of the concrete or using pozzolanic materials in the concrete mixture. In this study, Fly Ash was used as a pozzolanic material to reduce the impact of sulfate attack on concrete. The experiment involved adding Fly Ash to the concrete mixture in proportions of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% by weight of cement. Three test specimens were made for each variation in diameter and height of 10 cm and 20 cm, respectively. The durability test of the concrete used a magnesium sulfate ($MgSO_4$) solution with a dry-wet cycle method according to SNI 3407-2008, which was conducted after curing in water for 28 days. The results of the test showed that adding Fly Ash to the concrete mixture has been proven to reduce damage and minimize the degradation of concrete quality due to sulfate attack compared to normal concrete without the use of Fly Ash. The use of Fly Ash also increased the compressive strength of all test specimens compared to normal concrete without Fly Ash.

Keywords: Fly Ash, pozzolan, durability, sulfate attack

Abstrak

Beton merupakan pilihan utama dalam proyek konstruksi, termasuk penggunaannya di lingkungan agresif seperti daerah pesisir laut. Tingginya kandungan sulfat menjadi ancaman terhadap durabilitas dan kuat tekan beton. Dampak serangan sulfat pada beton dapat berupa degradasi dan mutu beton. Beberapa metode telah digunakan untuk mempertahankan durabilitas beton, seperti penggunaan coating pada permukaan beton atau penggunaan material pozzolanik dalam campuran beton. Dalam penelitian ini digunakan Fly Ash sebagai material pozzolanik untuk mengurangi dampak serangan sulfat pada beton. Percobaan dilakukan dengan menambahkan Fly Ash dalam campuran beton sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dari berat semen. Benda uji dibuat dalam bentuk silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm sebanyak 3 benda uji untuk setiap variasi persentase. Pengujian durabilitas beton menggunakan larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) dengan metode dry-wet cycle sesuai dengan SNI 3407-2008 yang dilakukan setelah proses curing di dalam air selama 28 hari selesai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan Fly Ash dalam campuran beton terbukti dapat mengurangi kerusakan dan dapat memperkecil degradasi mutu beton akibat serangan sulfat dibandingkan dengan beton normal tanpa penggunaan Fly Ash. Penggunaan Fly Ash juga meningkatkan kuat tekan beton pada seluruh benda uji dibandingkan dengan beton normal yang tidak menggunakan Fly Ash.

Kata kunci: Fly Ash; pozzolan; durabilitas; serangan sulfat

Pendahuluan

Beton merupakan komponen konstruksi yang sangat penting karena memiliki aplikasi yang luas dan umum, sehingga memiliki peran besar di dalam

dunia konstruksi. Dalam tahap perancangan, beton harus memenuhi kriteria perancangan yang berlaku untuk mendapatkan beton yang baik. Beberapa kriteria yang harus dipenuhi yaitu memiliki kekuatan (*strength*) yang tinggi, mudah diolah

(*workability*) dan keawetan (*durability*) yang baik. Ketika beberapa kriteria tersebut terpenuhi, akan menghasilkan beton yang memenuhi standar spesifikasi dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi (Sujatmiko, 2019). Durabilitas beton dapat didefinisikan sebagai tingkat ketahanan beton terhadap siklus pembekuan dan pencairan, korosi, penetrasi, karbonisasi, tekanan dan efek kimia, seperti korosi akibat sulfat (Jaworska-Wędzińska & Jasińska, 2022).

Struktur beton dapat dianggap berada dalam lingkungan agresif ketika beton berada dalam tanah, lingkungan perairan laut, atau di wilayah industri yang memiliki konsentrasi sulfat yang tinggi. Dalam kondisi tersebut, beton akan menjadi lebih rentan terhadap serangan sulfat yang berpotensi mengurangi durabilitas beton (Suhana & Mualifah, 2017). Beton sangat rentan terhadap kerusakan akibat penetrasi air dan bahan kimia, karena sifat beton yang berpori dan permeabel. Karakteristik beton tersebut akan mempengaruhi penetrasi air yang dapat membawa senyawa sulfat agresif ke dalam beton (Kushartomo & Prabowo, 2019).

Serangan sulfat pada beton merupakan proses yang kompleks dan melibatkan beberapa proses sekunder. Beton mengalami penurunan kekuatan seiring dengan waktu karena kerusakan yang terjadi secara bertahap akibat paparan lingkungan yang mengandung sulfat dalam jangka waktu yang lama (Anwar & Makhlof, 2021). Serangan sulfat eksternal merupakan jenis yang paling umum dan biasanya terjadi ketika larutan yang mengandung sulfat menembus beton. Struktur mikro dan komposisi beton akan berubah sebagai hasil dari reaksi yang sering kali dapat dilihat di bagian halus pada beton. Perubahan ini dapat bervariasi dalam jenis atau tingkat keparahan namun, umumnya mencakup keretakan ekstensif, pemuaihan, hilangnya ikatan antara pasta semen dan agregat. Kekuatan beton secara keseluruhan akan berkurang akibat dari perubahan ini (Kushartomo *et al.*, 2014).

Beberapa cara yang dapat diterapkan pada beton untuk mengurangi efek serangan sulfat yaitu, dengan mengurangi rasio air-semen, yang dapat mengurangi permeabilitas beton. Selain itu, penggunaan semen anti sulfat dan penambahan *supplementary cementitious material* seperti *limestone*, *slag*, *Fly Ash*, dan *silica fume* juga dapat membantu mengurangi hilangnya masa beton akibat serangan sulfat sehingga meningkatkan durabilitas beton (Reddy *et al.*, 2013).

Pengaruh dari penggantian sebagian dari semen dengan pozzolan menunjukkan hasil positif dengan adanya peningkatan sifat mekanik, durabilitas dan juga ketahanan beton terhadap sulfat, karena

mineral pozzolan mengurangi porositas dan mengkonsumsi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang rentan terhadap serangan sulfat (Suleiman, 2014). Pozzolan merupakan material yang mengandung silikon dioksida (SiO_2) *amorphous* yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dengan kehadiran air untuk membentuk produk hidrasi semen yaitu kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai bahan perekat yang memperkuat beton (Walker dan Pavia, 2011).

Hendrawati *et al.* (2018), menambahkan material pozzolan berupa *silica fume* dengan persentase 7,5%, 15%, 22,5%, 30% dan 37,5% ke dalam campuran beton. Hasilnya menunjukkan terjadi penurunan kuat tekan sampel pada umur 7 dan 28 hari, dibandingkan dengan beton tanpa *silica fume*. Hal ini disebabkan lambatnya reaksi pozzolan (*silica fume*). Penelitian Merida dan Kharchi (2017) menggunakan penambahan material pozzolan berupa abu vulkanik sebanyak 5% dari berat semen. Proses serangan sulfat dengan cara perendaman di dalam larutan 5% sodium sulfat. Hasil penelitian ini menunjukkan penurunan kuat tekan pada beton dengan penambahan abu vulkanik sebesar 5,48%, sedangkan beton tanpa penambahan abu vulkanik mengalami penurunan kuat tekan sebesar 17,77%. Selain itu, terjadi kenaikan durabilitas beton dengan penambahan abu vulkanik yang ditunjukkan dengan ekspansi pada beton berkurang hingga 65,21% dibandingkan dengan beton tanpa penambahan abu vulkanik.

Penggunaan *Fly Ash* sebagai material tambah dalam pembuatan campuran adukan beton menunjukkan efek positif pada banyak penelitian. Purwono *et al.* (2020) menggunakan *Fly Ash* untuk menyelidiki peningkatan kuat tekan beton pada campuran tanpa pasir. Meskipun persentase penambahan *Fly Ash* berada di rentang 10-30%, peningkatan kuat tekan yang diperoleh dapat mencapai lebih dari 40%. Basuki (2015) menyatakan bahwa campuran beton yang menggunakan *Fly Ash* dapat meningkatkan nilai kuat tekan sebesar 1,1% dibandingkan dengan beton normal, terutama dengan rasio air-semen yang berkurang. Peningkatan kekuatan yang relatif rendah tersebut dikarenakan persentase volume *Fly Ash* yang dipakai berada di 10-15% dari berat semen. Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan nilai penetrasi air yang rendah pada beton, yaitu kurang dari 5 cm.

Penelitian lain yang menggunakan *Fly Ash* untuk peningkatan kuat tekan beton dilakukan oleh Budi *et al.* (2021), yang menyelidiki efek penggunaan *Fly Ash* dengan kadar yang relatif tinggi, yaitu 50-70%. Kuat tekan beton yang dihasilkan berada di kisaran 20-30 MPa, yang merupakan kuat tekan beton normal. Penelitian serupa yang menggunakan kadar

Fly Ash 50-70% dilakukan juga oleh Amalia *et al.* (2018), sehingga, dapat disimpulkan apabila semakin tinggi nilai *Fly Ash* maka terjadi penurunan kekuatan beton.

Pada penelitian ini mempunyai tujuan untuk membuktikan efektivitas penambahan *Fly Ash* pada beton normal terhadap ketahanan (*durability*) dan kekuatan beton dari serangan sulfat yang belum pernah dibuktikan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Adanya kandungan SiO_2 *amorphous* pada *Fly Ash* dapat menurunkan porositas beton akibat peningkatan kuantitas reaksi hidrasi semen. Dengan demikian, efektivitas penggunaan *Fly Ash* untuk mencegah serangan sulfat melalui perhitungan volume penggunaan *Fly Ash* juga menjadi obyek penelitian. Selain itu, kuat tekan sisa pada beton yang mengalami serangan sulfat juga diperiksa. Kuat tekan beton yang ingin dicapai pada campuran tanpa *Fly Ash* termasuk pada kategori beton mutu tinggi.

Metode

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yang berbasis pada pengujian dan observasi langsung terhadap benda uji yang diteliti. Pengujian ini melibatkan penambahan abu terbang (*Fly Ash*) tipe F dari PLTU Suralaya dalam campuran beton untuk mengetahui tingkat ketahanan (*durability*) beton *Fly Ash* terhadap serangan sulfat. Uji laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara yang dimulai pada 18 April 2024. Variasi penambahan *Fly Ash* pada beton adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat semen dengan perencanaan *mix design* pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi campuran *mix design* (kg/m³)

<i>Fly Ash</i>	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Semen	438	394	350	306	263	219
<i>Fly Ash</i>	0	44	88	131	175	219
Air	197	197	197	197	197	197
Agregat halus	511	501	492	482	473	463
Agregat kasar	905	905	905	905	905	905

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Jumlah benda uji yang akan mengalami serangan sulfat dan benda uji pembanding (tanpa serangan sulfat) masing-masing sebanyak 3 buah per-variasi. Total seluruh benda uji sebanyak 36 buah. Satu hari setelah pencetakan, beton menjalani proses *curing* dengan metode perendaman dalam air bertemperatur 20–

25° C selama 27 hari. Pengujian durabilitas beton *Fly Ash* menggunakan metode *dry-wet cycle* (ASTM C88) dimulai setelah umur beton 28 hari (satu hari pencetakan dan 27 hari perendaman) sesuai dengan standar SNI 2493-2011 tentang pembuatan dan perawatan benda uji di laboratorium.

Proses *dry-wet cycle* adalah proses yang diawali dengan proses pengeringan menggunakan oven pada temperature 110 ± 5 °C selama 24 jam, setelah benda uji didinginkan hingga temperature ruangan kemudian dilakukan penimbangan yang pertama. Proses selanjutnya adalah perendaman dengan larutan magnesium sulfat (MgSO_4) jenuh selama 16–18 jam, kemudian dilanjutkan dengan proses pencucian dengan air panas (43 ± 6 °C). Pencucian benda uji dengan air panas ditujukan untuk melarutkan kristal garam yang terbentuk pada permukaan beton akibat perendaman dalam larutan magnesium sulfat.

Proses *dry-wet cycle* diulang kembali secara berkala sebanyak 7 kali atau dilakukan dalam 7 siklus. Benda uji didokumentasikan dan ditimbang sebelum dan sesudah mengalami serangan sulfat untuk mendapatkan perubahan kondisi pada benda uji. Setelah proses pengujian durabilitas beton selesai, dilakukan uji kuat tekan sisa beton setelah mengalami serangan sulfat.

Hasil dan Pembahasan

Rencana campuran

Dalam penelitian ini *Fly Ash* bertindak sebagai pengganti/substitusi semen sesuai dengan jumlah yang digantikan seperti termuat di Tabel 1. Disain campuran menggunakan SNI 7656:2012 tentang “Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa”. Metode yang digunakan adalah menggunakan volume absolut, yang dalam SNI 7656:2012 tersebut jumlah agregat kasar dipertahankan tetap, dan tidak ada perubahan jumlah agregat pada berbagai variasi yang dilakukan. Berat jenis semen adalah 3150 kg/m^3 dan *Fly Ash* adalah 2200 kg/m^3 . Dalam perhitungan volume absolute massa semen yang digantikan dengan masa *Fly Ash* berdampak pada total volume adukan melebihi 1 m^3 . Guna mempertahankan volume adukan tetap 1 m^3 , maka massa pasir yang dikurangi seperti diatur dalam disain campuran menggunakan metode volume absolute tersebut.

Perhitungan volume agregat halus didapatkan dengan cara: 1 m^3 dikurangi volume semen, air, *Fly Ash*, dan kerikil seperti diatur dalam SNI 7656:2012. Berdasarkan penjelasan tersebut maka pada Tabel 1 memperlihatkan pengurangan massa

agregat halus yang bersesuaian dengan penambahan massa *Fly Ash*. *Fly Ash* yang digunakan dalam hal ini bertindak untuk mensubstitusi jumlah semen, bukan mensubstitusi jumlah agregat halus. Pengurangan jumlah agregat halus sebagai konsekuensi perhitungan rencana campuran dengan metode volume absolute dimana jumlah agregat kasar telah ditentukan.

Workabilitas beton

Penggunaan *Fly Ash* mempengaruhi tingkat workabilitas adukan, semakin tinggi persentase penambahan *Fly Ash* pada beton maka tingkat workabilitas beton juga semakin menurun, seperti yang disajikan pada Tabel 2. Penurunan tingkat workabilitas adukan beton ini terjadi disebabkan oleh penyerapan air pada *Fly Ash* yang tinggi. Jadi, meskipun rasio air-binder dipertahankan sama, namun dengan bertambahnya jumlah *Fly Ash* maka jumlah air yang diserap oleh *Fly Ash* juga meningkat. Hal ini akan berdampak pada penurunan nilai workabilitas adukan.

Tabel 2. Nilai slump beton

No	Jenis variasi (%)	Nilai slump (cm)
1	0	18,5
2	10	17,5
3	20	17
4	30	15,5
5	40	15
6	50	14

Dalam Tabel 3 memperlihatkan kalsifikasi tingkat workabilitas yang disajikan oleh Neville dan Brooks, 2006. Berdasarkan klasifikasi tersebut tingkat workabilitas untuk seluruh variasi penggunaan *Fly Ash* seperti yang disajikan pada Tabel 2, masuk dalam kategori tinggi, ini berarti

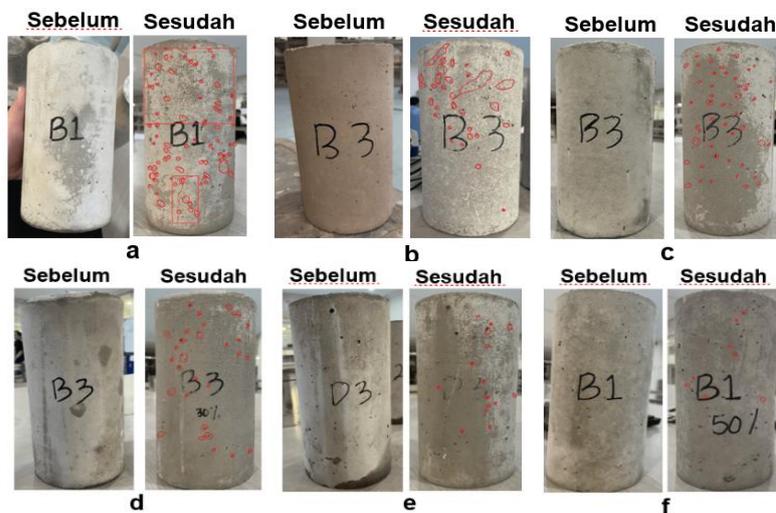
adukan mudah diaduk, diangkut, dituang, dan dipadatkan. Pengaruh penambahan *Fly Ash* pada workabilitas beton sebanding dengan yang diperoleh pada penelitian lain, seperti pada penelitian Basuki (2015), Purwono *et al.* (2020), dan Budi *et al.* (2021). Efek negatif pada workabilitas perlu menjadi pertimbangan ketika memperhitungkan *Fly Ash* dalam mendesain campuran beton.

Tabel 3. Tingkat workabilitas berdasarkan nilai slump (Neville & Brooks, 2006)

Tingkat workabilitas	Nilai slump (mm)
Sangat rendah	0 - 25
Rendah	25 - 50
Sedang	50 - 100
Tinggi	100 - 175

Pengamatan visual beton

Pengujian durabilitas dengan metode *dry-wet cycle* memberikan hasil visualitas yang disajikan pada Gambar 1. Pada gambar tersebut menunjukkan semakin banyak *Fly Ash* yang digunakan pada campuran beton maka proses serangan sulfat yang berasal dari garam magnesium sulfat semakin dapat diredam. Gambar 1.a merupakan beton tanpa menggunakan *Fly Ash* merupakan beton yang paling terdampak akibat serangan sulfat. Dampak serangan sulfat tersebut ditandai dengan lingkaran merah yang menandakan abrasi atau lubang-lubang kecil yang terjadi pada permukaan beton. Pada Gambar 1.d, jumlah *Fly Ash* yang menggantikan semen sebanyak 50% memperlihatkan beton yang paling tidak terdampak akibat serangan sulfat dalam hal ini ditandai dengan jumlah lingkaran merah yang terbentuk paling sedikit. Terjadinya abrasi atau korosi pada permukaan beton, membuat permukaan menjadi lebih kasar.



Gambar 1. Kondisi permukaan beton akibat serangan sulfat dengan kadar sulfat a. 0%, b. 10%, c. 20%, d. 30%, e. 40%, f. 50%

Kerusakan pada permukaan beton tersebut disebabkan oleh reaksi antara larutan magnesium sulfat dengan salah satu produk hidrasi semen yaitu kalsium hidroksida Ca(OH)_2 , reaksi tersebut menghasilkan gypsum dan ettringite. Kedua senyawa ini memiliki volume yang lebih besar dari kalsium hidroksida, dan mudah larut dengan air (Torres, 2004). Dengan peningkatan persentase penambahan *Fly Ash*, kerusakan yang terjadi pada permukaan beton semakin berkurang.

Gambar 1 memperlihatkan luas cakupan kerusakan pada permukaan beton. Pada Gambar 1.a. dimana kandungan *Fly Ash* dalam beton sebesar 0% atau tidak menggunakan *Fly Ash*, setelah melalui proses *dry-wet cycle* luas cakupan kerusakannya sangat besar, abrasi pada permukaan beton terjadi dengan cepat ditandai dengan banyaknya pori-pori yang muncul mencakup luasan sangat besar. Sedangkan substitusi semen dengan *Fly Ash* sebesar 10-20% *Fly Ash* yang disajikan pada Gambar 1.b. dan Gambar 1.c. luas cakupan kerusakan permukaan beton mengecil. Pada Gambar 1.d. dan Gambar 1.e. memperlihatkan semakin menurunnya cakupan abrasi apabila substitusi semen dengan *Fly Ash* yang ditambahkan semakin banyak. Pada Gambar 1.f. beton dengan 50% *Fly Ash* memperlihatkan luasan permukaan munculnya pori-pori paling kecil bila dibandingkan dengan kadar *Fly Ash* yang lebih sedikit.

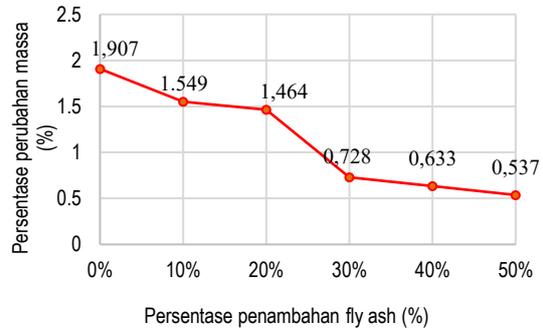
Berdasarkan gambar tersebut substitusi semen dengan *Fly Ash* sebanyak 30-50% akan mengurangi dampak serangan sulfat atau dengan kata lain meningkatkan durabilitas beton. Penggunaan *Fly Ash* dalam campuran beton pada penelitian ini dapat dimanfaatkan pada konstruksi beton di daerah yang mengandung kadar sulfat tinggi. Bangunan yang berhubungan dengan air laut atau memiliki kadar sulfat tinggi dianjurkan menggunakan beton dengan penambahan *Fly Ash* untuk mengurangi dampak dari serangan sulfat. Penggunaan *Fly Ash* untuk meredam dampak serangan sulfat merupakan inovasi dalam penelitian ini.

Perubahan massa beton

Berdasarkan Gambar 2, hasil pengujian durabilitas dengan metode *dry-wet cycle* menunjukkan bahwa terjadinya penurunan perubahan massa pada beton seiring dengan kenaikan penambahan persentase *Fly Ash*. Persentase perubahan massa tertinggi dialami pada beton tanpa *Fly Ash* sebesar 1,907% dan perubahan massa paling rendah dialami pada beton dengan 50% *Fly Ash* sebesar 0,537%.

Serangan sulfat bertanggung jawab pada hilangnya integritas pada matriks semen karena terjadinya reaksi secara kimiawi antara produk hidrasi semen

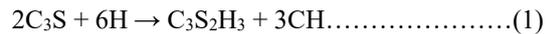
dengan larutan sulfat. Hal ini dapat diperburuk dengan terjadinya abrasi pada beton. *Dry-wet cycle* umumnya terjadi di lingkungan ekstrim seperti laut, dimana bagian struktur terpapar percikan dan ombak. Pada saat proses basah, SO_4^{2-} dengan perlahan menembus beton melalui retakan mikro dan pori-pori lalu berakumulasi. Sedangkan pada saat proses kering, terjadi secara cepat air menguap, sehingga mengakibatkan konsentrasi SO_4^{2-} meningkat dan bereaksi dengan produk hidrasi semen (Guo *et al.*, 2021).



Gambar 2. Grafik hubungan persentase perubahan massa dengan penambahan *Fly Ash*

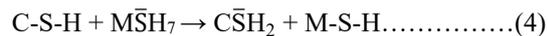
Reaksi hidrasi semen dapat digambarkan sebagai Persamaan 1 dan 2 (Torres, 2004).

Fase hidrasi silika:



Pada reaksi diatas yang disebut juga sebagai fase kalsium silika ketika C_3S dan C_2S bereaksi dan menghasilkan produk hidrasi semen yaitu *portlandite* (CH) dan kalsium silikat hidrat ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$). Kedua reaksi dapat terpengaruh oleh sulfat yang digambarkan dalam Persamaan 3 dan 4 (Torres, 2004).

Reaksi dengan magnesium sulfat:



Berdasarkan reaksi di atas, C-S-H bereaksi dengan magnesium sulfat dan menghasilkan gipsium $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ dan MSH yang merupakan produk yang tidak mengikat, oleh karena itu, matriks semen kehilangan kohesivitasnya (Torres, 2004). Dari fase hidrasi aluminat yang ada pada semen portland, *ettringite* ($\text{C}_3\text{A}.3\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_3$) terbentuk pada tahap awal, tetapi kemudian diubah menjadi monosulfat ($\text{C}_3\text{A}.3\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$) pada tahap selanjutnya. Namun, monosulfat berubah menjadi ettringite ketika konsentrasi sulfat meningkat dalam pori-pori beton (Torres, 2004).

Kedua produk hasil reaksi yaitu gipsum dan *ettringite* dapat menyebabkan beton berekspansi, retak, mengelupas, hancur, dan mengakibatkan percepatan kerusakannya. Secara bersamaan, proses serangan sulfat mengkonsumsi banyak OH⁻ yang dapat mengakibatkan dekomposisi gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang tidak stabil, sehingga melemahkan efek pengikatan (C-S-H) dan mengakibatkan beton kehilangan massa seiring berjalannya waktu (Guo *et al.*, 2021). Namun, secara bersamaan pemakaian material pozzolan seperti *Fly Ash* dapat meningkatkan kepadatan dan resistensi terhadap serangan pada beton melalui reaksi pozzolanik. Reaksi pozzolanik dapat menyempurnakan struktur pori dan membantu menghambat ion sulfat untuk masuk lebih dalam ke beton dengan cara mengonsumsi kalsium hidroksida dalam proses hidrasi sekunder dan menggabungkan silika menjadi C-S-H, sehingga mengurangi produksi *ettringite* selama serangan sulfat dan juga meningkatkan resistensi korosi pada beton (Liu *et al.*, 2022).

Perubahan kuat tekan beton

Hasil pengujian kuat tekan beton sebelum dan sesudah proses *dry-wet cycle* disajikan pada Tabel 4. Sebelum proses *dry-wet cycle* penggunaan *Fly Ash* 10% dan 20% pada campuran beton meningkatkan nilai kuat tekan beton. Penggunaan *Fly Ash* di atas 20% berakibat penurunan nilai kuat tekan beton, dan penurunan terjadi secara signifikan jika semen yang digantikan berjumlah 40% dan 50%.

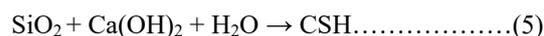
Tabel 4. Perbedaan kuat tekan akibat serangan sulfat

Persentase <i>Fly Ash</i>	Kuat tekan benda uji		
	Tanpa serangan sulfat (MPa)	Dengan serangan sulfat (MPa)	Perbedaan kuat tekan (%)
0%	42,67	35,12	17,67
10%	44,72	39,53	11,61
20%	46,03	42,73	7,17
30%	41,09	37,96	7,61
40%	27,24	25,15	7,66
50%	24,95	23,46	5,98

Penurunan tersebut dikarenakan: 1) Jumlah semen yang digantikan terlalu banyak sehingga jumlah CSH yang terproduksi selama proses hidrasi semakin sedikit. CSH dalam hal ini berfungsi sebagai pengikat agregat dan pembentuk kekuatan pada beton seperti yang disajikan pada reaksi-1 dan reaksi-2. 2) Jumlah *Fly Ash* yang besar mengganggu ikatan antara CSH dengan agregat. Kedua faktor tersebut yang mengakibatkan penurunan kuat tekan secara drastis.

Kuat tekan tertinggi dicapai ketika jumlah semen yang digantikan *Fly Ash* sebesar 20%. Peningkatan kuat tekan terjadi karena 2 hal yaitu;

Pertama, Terjadinya reaksi pozzolanik antara produk hidrasi semen yaitu Ca(OH)₂ dengan (SiO₂) yang terkandung di dalam *Fly Ash* (Kushartomo *et al.*, 2014). Reaksi pozzolanik merupakan reaksi kimia yang terjadi pada proses hidrasi semen antara silika yang terkandung di dalam *Fly Ash* dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) yang dimiliki oleh semen pada temperatur normal untuk membentuk senyawa yang bersifat semen yaitu kalsium silikat hidrat (C-S-H) (ACI, 1996). Reaksi pozzolanik yang terjadi digambarkan sebagai Persamaan 5.



Secara umum, penambahan *Fly Ash* pada campuran beton dapat berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton seiring dengan bertambahnya umur *curing* karena keberadaan air yang menyebabkan reaksi pozzolanik yang tidak terganggu untuk pembentukan gel C-S-H (Ghazali *et al.*, 2021). Reaksi pozzolanik ini berlangsung selama beberapa waktu, dan dapat terus berlangsung selama kandungan kalsium hidroksida di dalam semen masih tersedia.

Kedua, terjadinya penyisipan butiran *Fly Ash* kedalam pori-pori beton mengakibatkan beton menjadi lebih padat. Penyisipan ini dapat terjadi karena ukuran butiran *Fly Ash* yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran butiran semen. Menurut Kushartomo *et al* (2014) ukuran butiran semen adalah 75 micro meter sedangkan ukuran butiran *Fly Ash* berkisar antara 40 – 45 mikro meter. Dengan ukuran butiran yang jauh lebih kecil maka memudahkan *Fly Ash* menyisip pada pori-pori beton, *Fly Ash* mampu mengisi rongga-rongga pada beton yang akan menambah kohesi internal dan mengurangi porositas daerah transisi yang merupakan daerah terkecil dalam beton. Hal ini berkontribusi dalam menghasilkan beton dengan kekuatan yang baik (Setiawati, 2018).

Proporsi penambahan *Fly Ash* harus tepat, sebab penambahan dalam jumlah yang berlebihan justru dapat mengurangi kekuatan beton. Penggunaan *Fly Ash* yang berlebihan dalam menggantikan jumlah semen menghalangi proses pengikatan antara pasta semen dengan agregat di dalam campuran beton dan menghasilkan beton yang kurang kuat (Ghazali *et al.*, 2021). Ini menunjukkan bahwa penambahan *Fly Ash* pada beton dapat membantu mempertahankan kuat tekan beton secara optimal pada persentase tertentu.

Setelah proses *dry-wet cycle*, seluruh sampel mengalami penurunan nilai kuat tekan beton akibat serangan sulfat. Penurunan terbesar terjadi pada

beton tanpa *Fly Ash* yaitu sebesar 17,67%, sementara itu penurunan kuat tekan terendah terjadi pada beton dengan penggantian semen dengan 50% *Fly Ash* yaitu sebesar 5,98 %. Penurunan nilai kuat tekan ini disebabkan terjadinya reaksi antara magnesium sulfat ($MgSO_4$) dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) seperti yang disajikan pada reaksi-3 dan reaksi-4 tersebut diatas. Pada reaksi hidrasi seperti disajikan dalam reaksi-1 dan reaksi-2, terbentuk 2 komponen utama yaitu, kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (CH). Komponen ini merupakan komponen utama pembentuk kekuatan pada beton. Apabila beton mendapat serangan sulfat maka kedua komponen ini merupakan bagian utama yang bereaksi dengan sulfat dan berdampak pada penurunan nilai kuat tekan atau durabilitas beton (Torres, 2004).

Penggunaan *Fly Ash* sebagai komponen campuran beton dapat meningkatkan kuat tekan beton. Hal ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara silika (SiO_2) di dalam *Fly Ash* dan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) dalam produk hidrasi semen. Dengan adanya *Fly Ash*, serangan sulfat terhadap ($Ca(OH)_2$) dapat diminimalkan karena ($Ca(OH)_2$) telah digunakan di dalam proses reaksi pozzolanik (Liu *et al.*, 2022). Dengan demikian, penggunaan *Fly Ash* terbukti dapat mengurangi serangan sulfat pada beton sehingga durabilitas beton dapat dipertahankan merupakan novelty penelitian ini.

Berdasarkan ASTM C 618. *Fly Ash* dibedakan menjadi 3 kelas yaitu kelas N, F, dan C. perbedaan kelas tersebut didasarkan pada jumlah komposisi kimia $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ yang dikandung dalam *Fly Ash* dan lainnya. Untuk tipe N dan tipe F jumlah komposisi kimia $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ sama yaitu sebesar 70% yang membedakan adalah jumlah kadar sulfur trioksida (SO_3), sedangkan tipe C jumlah komposisi kimia $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ sebesar 50%. Berdasarkan analisis komposisi kimia tersebut penggunaan *Fly Ash* tipe F dan Tipe N seharusnya memberikan dampak yang perbedaan terhadap serangan sulfat maupun nilai kuat tekan, meskipun jumlah $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ dalam *Fly Ash* tipe F, N dan C terkandung sama.

Serangan sulfat dan perubahan nilai kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh keberadaan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) dalam beton. Jumlah $Ca(OH)_2$ akan berkurang bila sebelumnya telah terjadi reaksi pozzolanik seperti dituliskan pada reaksi-1. Reaksi pozzolanik tersebut mengakibatkan jumlah gel CSH semakin bertambah banyak sehingga berakibat peningkatan kekuatan beton. Apabila jumlah $Ca(OH)_2$ dalam beton telah berkurang akibat reaksi pozzolanik, maka reaksi sulfat dengan $Ca(OH)_2$ juga semakin berkurang, ini berdampak pada peningkatan durabilitas beton

mengingat tidak banyak terbentuk gypsum dan ettringite seperti yang dituliskan dalam reaksi-4 dan reaksi-5.

Kesimpulan

Hasil uji efektivitas penambahan *Fly Ash* pada beton normal terhadap ketahanan dan kekuatan beton dari serangan sulfat adalah sebagai berikut:

Penggunaan *Fly Ash* sebagai substitusi semen pada campuran beton terbukti dapat mempertahankan durabilitas beton akibat serangan sulfat. Semakin besar substitusi yang dilakukan maka dampak serangan sulfat semakin dapat diredam. Dalam jumlah tertentu substitusi semen dengan *Fly Ash* dapat meningkatkan nilai kuat tekan beton. Substitusi maksimum ada diangka 20%, substitusi semen dengan *Fly Ash* diatas 20% berdampak pada penurunan nilai kuat tekan beton. Penggunaan optimum substitusi semen dengan *Fly Ash* berkisar pada angka 20 - 30%. Penggunaan *Fly Ash* di dalam campuran beton mempengaruhi tingkat workabilitas beton. Semakin tinggi persentase substitusi semen dengan *Fly Ash* di dalam campuran beton, semakin menurun tingkat workabilitas beton.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada PT. Indocemen Tunggal Prakarsa, Tbk yang telah mendukung penelitian ini.

Daftar Pustaka

- ACI. (1996). *Use of Fly Ash in concrete* (ACI 232.2R-96). Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Amalia, K. P., Budi, A. S., & Sunarmasto, S. (2018). Pengaruh kadar *Fly Ash* terhadap kuat tekan (f'_c) material pada High Volume *Fly Ash*-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC) usia 28 hari. *Matriks Teknik Sipil*, 6(3), 485-489. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v6i3.36555>
- Anwar, M., & Makhlof, A. A. (2021). Performance Of *Fly Ash* Concrete Against Sulfate Attack. *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering*, 49(2), 178–197. ASTM C88-2013. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- Basuki, A. (2015). Pengaruh penambahan *Fly Ash* dan silica fume terhadap daya tahan penetrasi air beton normal. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 5(1), 21-28. <https://doi.org/10.37209/jtbbt.v5i1.55>

- Budi, A. S., Santosa, B., Widodo, M. A., (2021). Kajian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas pada high volume *Fly Ash* (hvfa) dengan kadar *Fly Ash* 50%, 60%, dan 70% terhadap beton normal. *Matriks Teknik Sipil*, 9(4), 244-250.
<https://doi.org/10.20961/mateksi.v9i4.54787>
- Ghazali, N., Muthusamy, K., Embong, R., Rahim, I. S. A., Muhamad Razali, N. F., Yahaya, F. M., Ariffin, N. F., & Wan Ahmad, S. (2021). Effect of *Fly Ash* as Partial Cement Replacement on Workability and Compressive Strength of Palm Oil Clinker Lightweight Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012038>
- Guo, J. J., Liu, P. Q., Wu, C. L., & Wang, K. (2021). Effect of dry-wet cycle periods on properties of concrete under sulfate attack. *Applied Sciences* (Switzerland), 11(2), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/app11020888>
- Hendrawati, N., Rahmayanti, E. D., & Dyah Priapnasar, E. (2018). Studi Pembuatan Durable Cement dengan Penambahan Pozzolan Silica Fume. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 2(1), 21-39.
- Jaworska-Wędzińska, M., & Jasińska, I. (2022). Durability of mortars with *Fly Ash* subject to freezing and thawing cycles and sulfate attack. *Materials*, 15(1), 220,
<https://doi.org/10.3390/ma15010220>
- Kushartomo, W., & Prabowo, A. (2019). The Application of Sodium Acetate as Concrete Permeability-Reducing Admixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508 (1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012009>
- Kushartomo, W., Supartono, F.X., & Octavia, O. (2014). Influence Of Sulfate Attack To Reactive Powder Concrete. *The International Conference on Environmentally Friendly Civil Engineering Construction and Materials*, 177–183.
- Liu, J., Li, A., Yang, Y., Wang, X., & Yang, F. (2022). Dry-Wet Cyclic Sulfate Attack Mechanism of High-Volume *Fly Ash* Self-Compacting Concrete. *Sustainability*, 14(20), 13052.
<https://doi.org/10.3390/su142013052>
- Merida, A., & Kharchi, F. (2017). Effect Of Natural Pozzolan On Concrete Durability. *2nd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship*, 5, 449–452.
<https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2017>
- Neville, A. M. & Brooks, J. J. (2006). *Concrete technology*, Prencice Hall.
- Purwono, N. A. S., Sulistyawati, R., Wicaksono, A. C., & Utomo, W. W. (2020). Pengaruh *Fly Ash* terhadap kuat tekan beton non-pasir. *Jurnal Rekayasa*, 10(1), 56-71.
<https://doi.org/10.37037/jrftsp.v10i1.46>
- Purwono, N. A. S., Sulistyawati, R., Wicaksono, A. C., & Utomo, W. W. (2020). Pengaruh *Fly Ash* terhadap kuat tekan beton non-pasir. *Jurnal Rekayasa*, 10(1), 56-71.
<https://doi.org/10.37037/jrftsp.v10i1.46>
- Reddy, M. V. S., Reddy, I. V. R., Reddy, K. M. M., & Kumar, C. M. R. (2013). Durability aspects of standard concrete. *International Journal of Structure & Civil Engineering*, 2(1), 40-46.
<https://ijscer.com/uploadfile/2015/0427/20150427030157970.pdf>
- Setiawati, M. (2018). *Fly Ash* Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Seminar Nasional dan Teknologi*, 17, 1-8.
- SNI 2493-2011: Tata Cara Pembuatan Dan Perawatan Benda Uji Beton Di Laboratorium.
- SNI SNI 7656-2012: Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat Dan Beton Massa.
- Suhana, N., & Mualifah, A. (2017). Pengaruh Rendamana Air Asam Sulfat Pasca Curing Terhadap Kuat Tekan Beton. *Gema Wiralodra*, 8(1), 42–51.
- Sujatmiko, B. (2019). *Teknologi Beton Dan Bahan Bangunan*. Media Sahabat Cendekia.
- Suleiman, A. R. (2014). Physical Sulphate Attack on Concrete, *M.Sc. Thesis*, Canada: The University of Western Ontario.
- Torres, S. M. (2004). The Influence Of Chloride On The Thaumaside Form Of Sulfate Attack In Mortars Containing Calcium Carbonate, *PhD Thesis*, Inggris: The University of Sheffield.
- Walker, R., & Pavia, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(6), 1139–1150.
<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>