



OPTIMALISASI SUBSTITUSI *FLY ASH* DAN *SILICA FUME* TERHADAP PERFORMA BETON PADA DUA MEDIA PERAWATAN

Floren시오 Agustino Liku Ryan¹, Akhmad Suryadi², Rofila El Maghfiroh³

Mahasiswa Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan¹,
Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

Floren시오agustino1212@gmail.com¹ akhmad.suryadi@polinema.ac.id²,
rofila.elma@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *fly ash* dan *silica fume* sebagai substitusi semen terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada media perawatan air tawar dan air laut Pantai Ngliyep. Metode penelitian eksperimental dilakukan dengan variasi *fly ash* (15%, 17,5%) dan *silica fume* (5%, 8%) dan mutu rencana f_c' 20 Mpa dengan nilai sanilitas 3,4% hingga 4,5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *slump* seluruh variasi (70-85 mm) memenuhi standar operasional. Kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari dicapai oleh variasi *Silica Fume* 8% dengan perawatan air laut sebesar 23,28 MPa. Sebaliknya, substitusi *Fly Ash* 17,5% pada air laut menghasilkan kuat tekan terendah (15,42 MPa) yang tidak memenuhi target rencana. Analisis ekonomi menunjukkan penggunaan *Fly Ash* 17,5% menekan biaya produksi hingga Rp 834.140,07 per m³ dibandingkan beton normal.

Kata kunci : fly ash, silica fume, sanilitas, kuat tekan, kuat tarik belah, air laut

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of fly ash and silica fume as cement substitution on the compressive strength and split tensile strength of concrete in fresh water and beach Ngliyep sea water curing media. The experimental research method was carried out with variations of fly ash (15%, 17.5%) and silica fume (5%, 8%) and design strength of f_c' 20 Mpa with a sanility level ranging from 3,4% to 4,5%. Slump test results for all variations (70-85 mm) met the operational standards. The highest compressive strength at 28 days was achieved by the 8% Silica Fume variation with sea water

Article History

Received: September 2026

Reviewed: September 2026

Published: September 2026

Plagiarism Checker No
237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



curing at 23.28 MPa. Conversely, 17.5% Fly Ash substitution in sea water resulted in the lowest compressive strength (15.42 MPa) which did not meet the design target. Economic analysis shows that the use of 17.5% Fly Ash reduces production costs to IDR 834,140.07 per m³ compared to normal concrete

Keywords : *fly ash, silica fume, sanility, compressive strength, split tensile strength, sea water*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di wilayah pesisir memerlukan material yang tahan terhadap lingkungan agresif[1]. Beton konvensional memiliki porositas yang rentan terhadap penetrasi ion klorida dan sulfat dari air laut. Inovasi menggunakan bahan tambah mineral seperti *Fly Ash* (limbah PLTU Paiton) dan *Silica Fume* diharapkan dapat meningkatkan kerapatan mikrostruktur melalui reaksi pozzolanik[2].

Penelitian ini juga mendukung implementasi *United Nations Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya SDG 9: *Industry, Innovation and Infrastructure*, yang menekankan pentingnya pembangunan infrastruktur yang tangguh, berkelanjutan, serta mendorong inovasi dalam teknologi material konstruksi[3]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pemanfaatan limbah fly ash PLTU Nusantara Paiton dan silica fume sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton guna meningkatkan kuat tekan serta potensi durabilitas beton[4], khususnya untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan pada lingkungan agresif seperti wilayah pesisir[5].

2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental laboratoris menggunakan pendekatan kuantitatif di Laboratorium

Struktur Politeknik Negeri Malang. Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari pengujian sifat fisik material hingga pengujian mekanik beton keras[6].

Material dan Bahan

Bahan penyusun beton dalam penelitian ini meliputi:

1. Semen: Semen Portland Composite (PPC) produksi PT Semen Gresik.
2. Agregat Halus: Pasir alam dari Lumajang yang masuk dalam klasifikasi zona gradasi 2 (permukaan kasar) dengan nilai modulus kehalusan 2,72.
3. Agregat Kasar: Batu pecah dari Pasuruan dengan ukuran butiran maksimal 20 mm dan nilai keausan rata-rata (Los Angeles) sebesar 24,08%.
4. Bahan Tambah Mineral: *Fly ash* tipe F dari PLTU Nusantara Paiton dan *silica fume* dari PT Sika Gresik.
5. Air: Air tawar bersih dan air laut yang diambil dari Pantai Ngliyep tanpa analisis kandungan kimia tambahan

Variabel dan Proporsi Campuran

Penelitian ini melibatkan tiga jenis variabel utama:

1. Variabel Bebas: Substitusi *fly ash* (0%, 15%, 17,5%), substitusi *silica fume* (0%, 5%, 8%), dan media perawatan (air tawar dan air laut).



2. Variabel Terikat: Nilai kuat tekan beton dan kuat tarik belah beton.
3. Variabel Kontrol: Target mutu beton f_c' 20 MPa, faktor air semen (FAS), serta bentuk dan ukuran benda uji silinder (15 cm x 300 cm).

Total benda uji yang disiapkan adalah 120 sampel silinder, yang didistribusikan untuk pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari, serta pengujian kuat tarik belah pada umur 28 hari.

Prosedur Eksperimen

Tahapan penelitian meliputi:

1. Pengujian Sifat Fisik Agregat: Meliputi uji kadar air, berat jenis, penyerapan, gradasi, berat isi, serta kadar organik sesuai standar SNI terkait[7].
2. Perencanaan Campuran (*Mix Design*): Mengacu pada SNI 03-2834-2000 dengan target kuat tekan rata-rata (f'_{cr}) sebesar 31 MPa (mutu rencana 20 MPa ditambah margin 11 MPa).
3. Pengujian Beton Segar: Dilakukan uji *slump* mengacu pada SNI 1972:2008 untuk memastikan kemudahan pengerjaan adukan beton dalam rentang target 60-180 mm[8].
4. Perawatan (*Curing*): Sampel beton direndam secara kontinu dalam bak air tawar dan bak air laut sesuai durasi umur rencana (7, 14, 28 hari)[9].
5. Analisis Kimia (XRF): Pengujian *X-Ray Fluorescence* dilakukan pada pasta beton untuk mengidentifikasi persentase kandungan oksida utama seperti CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 .

Pengujian Mekanik

a. Kuat Tekan Beton

Menurut SNI 03-1974-2011[10], kuat tekan beton merupakan besarnya beban maksimum persatuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur pada tekanan tertentu yang diberikan oleh mesin uji tekan[11]. Berikut merupakan rumus kuat tekan beton dilihat pada **persamaan 1**

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

(1)

Keterangan :

f_c' = Kuat Tekan Beton (MPa)

P = Beban Maksimum (N)

A = Luas Penampang Benda Uji (mm^2)

b. Kuat Tarik Belah Beton

Menurut SNI 03-2491-2002[12], Kekuatan tarik belah berfungsi untuk mengevaluasi ketahanan geser dari elemen struktur yang terbuat dari beton dengan bahan agregat ringan. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung kuat Tarik belah beton berdasarkan **persamaan 2**

$$f_{ct} = \frac{2 \times P}{L \times D}$$

(2)

f_{ct} = Kuat Tarik Belah Beton (MPa)

Keterangan :

P = Beban Maksimum (N)

L = Panjang Benda Uji (mm)

D = Diameter Benda Uji (mm)

X-Ray Fluorescence

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia material penyusun beton, yaitu semen Portland, fly ash, dan silica fume[13]. Pengujian ini bertujuan mengidentifikasi kandungan oksida utama



seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , dan oksida lainnya yang berpengaruh terhadap sifat pozzolanik material. Hasil pengujian digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi karakteristik material substitusi sebelum digunakan dalam campuran beton.[14] Analisis komposisi kimia semen mengacu pada ASTM C114 - *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*[15], sedangkan evaluasi komposisi kimia fly ash mengacu pada ASTM C618 - *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*[16].

Salinitas Air Laut

Pengukuran salinitas mengacu pada ASTM D1125 - *Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water*[17], di mana nilai konduktivitas air digunakan sebagai dasar dalam penentuan karakteristik salinitas[15]. Pengukuran dilakukan menggunakan salinity meter (atau refraktometer, sesuaikan dengan alat yang kamu gunakan) sebelum proses curing. Nilai salinitas dinyatakan dalam satuan parts *per thousand* (ppt) atau %.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

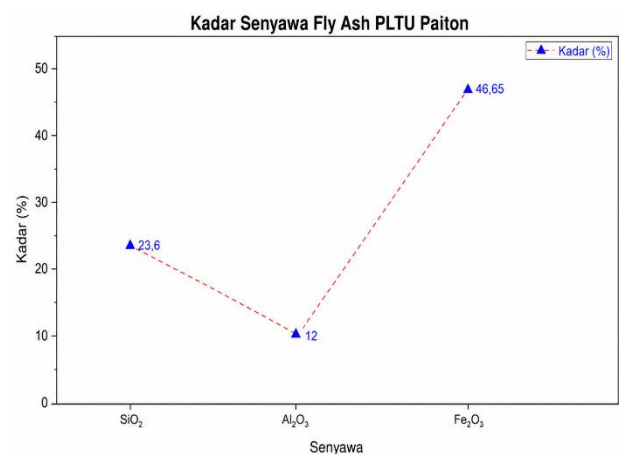
Fly Ash

Tabel 1 Hasil Pengujian Senyawa Fly Ash PLTU Paiton

Fly Ash	
Senyawa	Kadar (%)
SiO_2	23,60
Al_2O_3	12,00
Fe_2O_3	46,65
Jumlah	82,25

Sumber : Hasil pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian XRF Limbah Fly Ash PLTU Paiton pada **Tabel 1** Menurut ASTM C618, fly ash dikategorikan sebagai Tipe F apabila memiliki jumlah kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimal 70%. Berdasarkan hasil uji XRF, fly ash yang digunakan memiliki total kandungan sebesar 82,25%, sehingga memenuhi kriteria sebagai Fly Ash Tipe F. Sementara itu, variasi Silica Fume 8% menunjukkan kandungan SiO_2 tertinggi sebesar 9,93%, yang mendukung pembentukan gel C-S-H sekunder dan meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton. Berikut grafik kadar senyawa Fly Ash PLTU Paiton pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Grafik Kadar Senyawa Fly Ash

Sumber : Hasil perhitungan, 2026

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) Pada Pasta

Tabel 1 Hasil Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) Pasta

Kandungan Senyawa Pasta				
Variasi Pasta	CaO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)
Pasta Normal	77,07	7,31	1,89	8,09

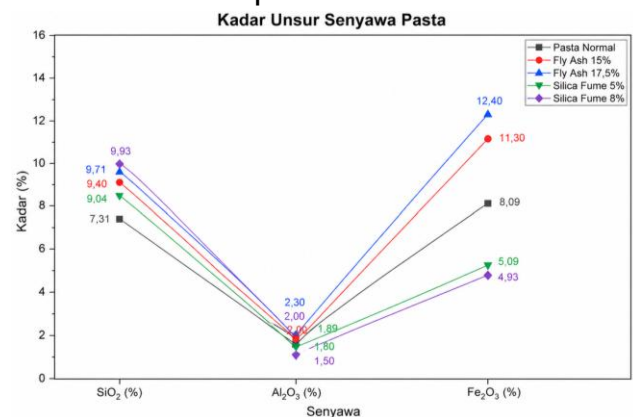


Fly Ash 15%	70,6	9,4	2	11,3
Fly Ash 17,5%	69	9,71	2,3	12,4
Silica Fume 5%	78,01	9,04	1,8	5,09
Silica Fume 8%	77,59	9,93	1,5	4,93

Sumber : Hasil pengujian, 2026

Berikut hasil pengujian XRF setiap pasta pada **Tabel 6** menunjukkan bahwa seluruh variasi pasta didominasi oleh senyawa CaO, dengan kadar tertinggi terdapat pada Silica Fume 5% (78,01%), sedangkan kadar terendah terdapat pada Fly Ash 17,5% (69,00%). Penambahan fly ash menyebabkan penurunan kadar CaO seiring meningkatnya persentase substitusi semen, yang mengindikasikan berkurangnya kandungan kalsium akibat karakteristik fly ash sebagai material pozzolan. Sebaliknya, kadar SiO₂ mengalami peningkatan pada seluruh variasi bahan tambah, dengan nilai tertinggi diperoleh pada Silica Fume 8% (9,93%), diikuti Fly Ash 17,5% (9,71%), menunjukkan kontribusi silika yang tinggi dari kedua material tersebut. Kandungan Al₂O₃ dan Fe₂O₃ relatif lebih tinggi pada variasi fly ash dibandingkan silica fume. Nilai Al₂O₃ tertinggi terdapat pada Fly Ash 17,5% (2,30%), sedangkan Fe₂O₃ tertinggi mencapai 12,40% pada variasi yang sama. Sebaliknya, pasta dengan silica fume memiliki kadar Fe₂O₃ yang lebih rendah, yaitu 5,09% pada Silica Fume 5% dan 4,93% pada Silica Fume 8%. Hasil ini menunjukkan bahwa fly ash memberikan kontribusi oksida aluminium dan besi yang lebih besar, sedangkan silica fume lebih berperan dalam meningkatkan kandungan silika pada pasta. Secara keseluruhan, peningkatan

kandungan SiO₂ pada variasi Silica Fume 8% menunjukkan potensi reaktivitas pozzolanik yang lebih tinggi sehingga mampu mendukung pembentukan gel Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) secara lebih optimal. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian kuat tekan, di mana variasi Silica Fume 8% menghasilkan performa mekanik yang paling baik dibandingkan variasi lainnya. Berikut grafik kadar senyawa Fly Ash PLTU Paiton pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Grafik Kandungan Senyawa Pasta
Sumber : Hasil perhitungan, 2026

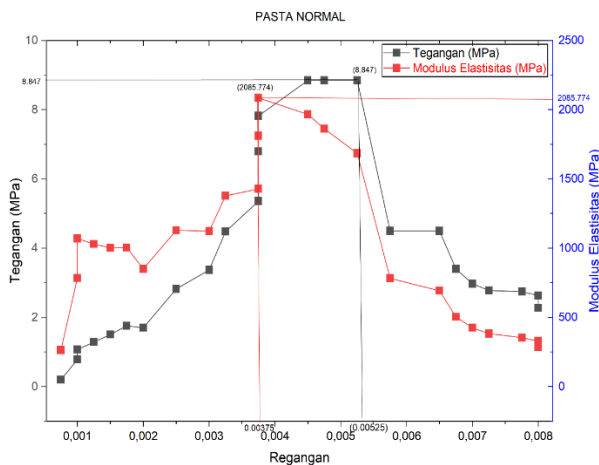
Berdasarkan hasil pengujian XRF dan kuat tekan beton, variasi silica fume 8% menunjukkan komposisi kimia yang paling mendukung pembentukan produk hidrasi sekunder karena memiliki kandungan SiO₂ tertinggi sebesar 9,93%. Sebaliknya, variasi fly ash 17,5% menunjukkan penurunan kandungan CaO hingga 69,00% yang berdampak pada rendahnya perkembangan kekuatan beton. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pengujian kuat tekan yang menunjukkan bahwa beton variasi fly ash 17,5% memiliki kuat tekan terendah dan tidak memenuhi kuat tekan rencana sebesar 20 Mpa.

Pengujian Tegangan, Regangan Dan Modulus Elastisitas Pada Pasta

Pengujian tegangan, regangan, dan modulus elastisitas dilakukan untuk



mengevaluasi perilaku mekanik pasta semen terhadap pembebanan tekan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan pasta dalam menahan beban, besarnya deformasi yang terjadi akibat pembebanan, serta tingkat kekakuan material berdasarkan hubungan antara tegangan dan regangan. Nilai tegangan tekan dihitung berdasarkan SNI 03-6825-2002 tentang Metode Pengujian Kekuatan Tekan Pasta Semen Hidraulis, yaitu dengan membandingkan beban maksimum yang diterima benda uji terhadap luas penampang benda uji. Selanjutnya, regangan (strain) dan modulus elastisitas ditentukan berdasarkan hubungan tegangan-regangan sesuai dengan ASTM C469/C469M, yang digunakan untuk menentukan deformasi dan kekakuan material pada daerah elastis.



Gambar 3 Grafik Hubungan Tegangan - Regangan Dan Modulus Elastisitas

Sumber : Hasil perhitungan, 2026

Berdasarkan **Gambar 3** tegangan-regangan pasta normal menunjukkan bahwa tegangan meningkat seiring bertambahnya regangan hingga mencapai tegangan maksimum sebesar 8,847 MPa pada regangan sekitar 0,00525. Sebelum mencapai tegangan

puncak, material masih berada pada daerah elastis dengan modulus elastisitas maksimum sebesar 2085,774 MPa yang terjadi pada regangan sekitar 0,00375. Setelah melewati titik puncak, tegangan mengalami penurunan yang cukup tajam meskipun regangan terus bertambah, yang mengindikasikan terjadinya kerusakan internal dan perilaku pasca-puncak (post-peak).

Pengujian Beton Segar

Pengujian Sanilitas Pada Beton Air Laut

Pengujian salinitas air laut bertujuan untuk mengetahui kadar garam terlarut (*salinity*) pada air laut yang digunakan sebagai media curing beton. Berikut hasil pengujian sanilitas beton variasi air laut pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Hasil Pengujian Sanilitas Air Laut

Air Laut Ngliep	
Tanggal	Salinitas (%)
18 Maret	3,6
27 Maret	3,9
31 Maret	3,9
06-Apr	4,0
08-Apr	3,9
10-Apr	3,9
13-Apr	4,0
16-Apr	3,8
27-Apr	3,7
4 Mei	3,4
11 Mei	3,6
18 Mei	4,4
25 Mei	4,5

Sumber : Hasil pengujian, 2026

Berdasarkan pada **Tabel 2** Hasil pengujian salinitas air laut Ngliep menunjukkan bahwa kadar salinitas selama periode perawatan benda uji berkisar antara 3,4-4,5%, dengan nilai rata-rata



sekitar 3,9%. Nilai tersebut masih berada pada kisaran salinitas alami air laut, sehingga media perawatan dapat dikatakan relatif stabil. Meskipun demikian, terdapat fluktuasi salinitas yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti curah hujan, penguapan, dan pasang surut air laut. Salinitas air laut berpengaruh terhadap perkembangan kuat tekan beton karena kandungan ion klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}), magnesium (Mg^{2+}), dan natrium (Na^+) dapat memengaruhi proses hidrasi semen. Pada salinitas yang masih normal ($\pm 3,5-4,0\%$), ion-ion tersebut dapat mempercepat hidrasi awal sehingga kuat tekan awal cenderung meningkat. Namun, pada salinitas yang lebih tinggi, seperti 4,4-4,5% yang tercatat pada akhir pengujian, konsentrasi garam yang lebih besar berpotensi mengganggu pembentukan produk hidrasi, terutama gel Calcium Silicate Hydrate (C-S-H), serta meningkatkan risiko pembentukan mikroretak akibat reaksi kimia antara ion sulfat dan magnesium dengan pasta semen. Kondisi tersebut dapat menghambat peningkatan kuat tekan pada umur lanjut. Pada penelitian ini, pengaruh salinitas terhadap kuat tekan juga dipengaruhi oleh penggunaan bahan tambah pozzolan. Silica fume 8% menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan air laut karena kandungan SiO_2 yang tinggi menghasilkan gel C-S-H tambahan dan memperbaiki kepadatan mikrostruktur pasta, sehingga penetrasi ion klorida dan sulfat menjadi lebih terbatas. Sebaliknya, variasi Fly Ash 17,5% menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah, yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar fly ash pada penelitian ini belum mampu mengimbangi pengaruh lingkungan

air laut terhadap perkembangan kekuatan pasta.

Pengujian Kuat Tekan Beton Air Tawar Dan Air Laut

Tabel 3 Hasil Uji Kuat Tekan Beton

No	Variasi Beton	Rata-Rata Umur Beton Rendaman Beton		
		7 Hari	14 Hari	28 Hari
1	Beton Normal Air Tawar	14,97	20,23	23,14
2	Beton Normal Air Laut	10,89	14,19	22,85
3	Beton Variasi Fly Ash 15% Air Tawar	14,02	14,17	21,65
4	Beton Variasi Fly Ash 15% Air Laut	13,51	14,00	20,01
5	Beton Variasi Fly Ash 17,5% Air Tawar	11,25	13,19	18,65
6	Beton Variasi Fly Ash 17,5% Air Laut	13,87	14,06	15,42
7	Beton Variasi Silica Fume 5% Air Tawar	11,46	15,25	21,44
8	Beton Variasi Silica Fume 5% Air Laut	15,53	18,04	22,67
9	Beton Variasi Silica Fume 8% Air Tawar	12,44	18,64	19,72
10	Beton Variasi Silica Fume 8% Air Laut	14,97	19,44	23,28

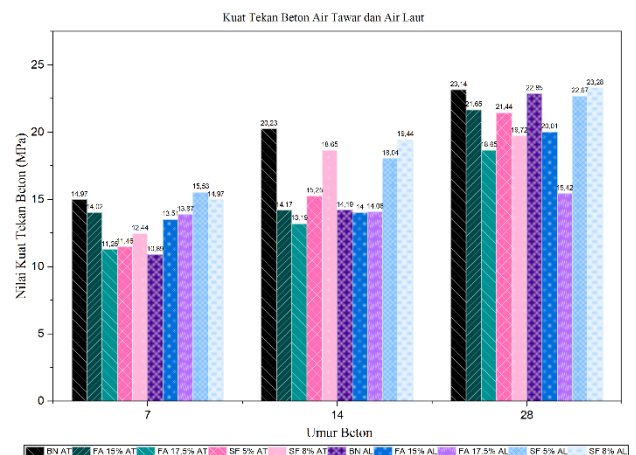


Sumber : Hasil perhitungan, 2026

Pengujian kuat tekan beton air tawar pada usia 7, 14, dan 28 hari, dengan tiga sampel uji tiap variasi. Berikut adalah lampiran grafik tekanan beton yang terdapat dalam

Berdasarkan **Tabel 3**, terlihat bahwa seluruh variasi beton mengalami peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur beton dari 7 hari hingga 28 hari. Pada umur 7 hari, nilai kuat tekan masih berada pada rentang 10,74-14,97 MPa. Variasi SF 8% AT menunjukkan kuat tekan tertinggi sebesar 14,97 MPa, sedangkan BN AT memiliki nilai terendah sebesar 10,74 MPa. Peningkatan kuat tekan yang signifikan pada umur awal menunjukkan bahwa proses hidrasi semen berlangsung dengan baik pada seluruh variasi campuran. Pada umur 14 hari, sebagian besar variasi mengalami kenaikan kuat tekan yang cukup signifikan. Nilai tertinggi dicapai oleh FA 17,5% AT sebesar 20,23 MPa, diikuti oleh SF 8% AT sebesar 18,65 MPa dan SF 8% AL sebesar 19,44 MPa. Sebaliknya, FA 17,5% AL menunjukkan perkembangan kuat tekan yang paling rendah, yaitu sebesar 14,06 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan fly ash sebesar 17,5% pada beton yang menggunakan air laut belum mampu memberikan kontribusi optimal terhadap perkembangan kekuatan pada umur menengah. Pada umur 28 hari, hampir seluruh variasi mencapai kuat tekan di atas 18 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi SF 8% AL sebesar 23,28 MPa, diikuti BN AL sebesar 22,94 MPa dan BN AT sebesar 22,67 MPa. Variasi SF 5% AL dan FA 15% AL juga menunjukkan hasil yang cukup baik dengan kuat tekan masing-masing

sebesar 22,36 MPa dan 21,65 MPa. Sementara itu, nilai kuat tekan terendah masih ditunjukkan oleh FA 17,5% AL sebesar 15,42 MPa, yang tidak memenuhi target kuat tekan rencana 20 Mpa. Secara umum, penggunaan silica fume memberikan pengaruh yang lebih positif terhadap peningkatan kuat tekan beton dibandingkan penggunaan fly ash. Variasi silica fume 8% terutama pada beton dengan air laut menghasilkan performa terbaik pada umur 28 hari, menunjukkan bahwa reaksi pozzolanik silica fume mampu meningkatkan densitas mikrostruktur beton sehingga kekuatan yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, penambahan fly ash sebesar 17,5% cenderung menurunkan kuat tekan, khususnya pada beton yang menggunakan air laut, sehingga persentase tersebut dapat dianggap kurang optimal untuk mencapai mutu beton yang direncanakan.



Gambar 4 Grafik Rekap Kuat Tekan Beton Pada Dua Media Perawatan

Sumber : Hasil perhitungan, 2026

Berdasarkan **Gambar 4** memperlihatkan hubungan antara umur beton terhadap nilai kuat tekan beton pada berbagai variasi campuran yang direndam dalam air tawar (AT) dan air laut (AL).



Secara umum, seluruh variasi menunjukkan kecenderungan peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur beton dari 7 hari, 14 hari, hingga 28 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi semen berlangsung secara kontinu sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan beton. Pada beton yang direndam dalam air tawar, beton normal (BN AT) mengalami peningkatan kuat tekan dari 14,97 MPa pada umur 7 hari menjadi 20,23 MPa pada umur 14 hari, dan mencapai 23,14 MPa pada umur 28 hari. Peningkatan serupa juga terjadi pada variasi campuran dengan penambahan fly ash (FA) dan silica fume (SF). Variasi dengan silica fume menunjukkan nilai kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan fly ash, khususnya pada umur 28 hari. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel silica fume yang sangat halus sehingga mampu mengisi pori-pori beton (filler effect) dan meningkatkan reaksi pozzolan secara lebih efektif. Sementara itu, pada beton yang direndam dalam air laut, tren peningkatan kuat tekan juga terlihat, meskipun pada umur awal (7 hari) nilai kuat tekan cenderung lebih rendah dibandingkan dengan beton air. Berdasarkan **Gambar 4** kuat tekan beton dengan variasi silica fume 8% mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur beton pada kedua metode curing. Pada umur 7 hari, beton yang dirawat menggunakan air tawar menunjukkan kuat tekan lebih tinggi yaitu 14,97 MPa dibandingkan beton yang dirawat menggunakan air laut sebesar 10,89 MPa. Namun, pada umur 14 hari terjadi peningkatan yang signifikan pada beton curing air laut hingga mencapai 19,44 MPa, sedikit lebih tinggi dibandingkan beton curing air tawar yang mencapai 18,65 MPa.

Pada umur 28 hari, beton yang dirawat menggunakan air laut menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 23,28 MPa, sedangkan beton yang dirawat menggunakan air tawar mencapai 19,72 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun beton curing air tawar memiliki kuat tekan awal yang lebih tinggi, penggunaan air laut sebagai media curing mampu meningkatkan perkembangan kuat tekan beton lebih optimal.

Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Air Tawar Dan Air Laut

Uji kuat Tarik belah beton adalah pengujian untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya Tarik tidak langsung. Fungsinya untuk mengetahui sejauh mana beton mampu menahan gaya Tarik belah beton cenderung lemah terhadap tarik. Kuat Tarik belah beton diuji pada umur 28 hari dengan jumlah benda uji sebanyak 30 sampel. Grafik pengujian kuat Tarik belah beton dua media perawatan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton.

No	Variasi Beton Terhadap Kuat Tarik Belah	Umur Beton 28 Hari			
		Benda Uji 1 (MPa)	Benda Uji 2 (MPa)	Benda Uji 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	Beton Normal Air Tawar	2,48	1,98	2,48	2,31
2	Beton Normal Air Laut	2,62	2,41	1,92	2,32
3	Beton Variasi Fly Ash 15% Air Tawar	2,62	2,59	2,59	2,6
4	Beton Variasi Fly	2,84	2,5	2,26	2,53



	Ash 15% Air Laut				
5	Beton Variasi Fly Ash 17,5% Air Tawar	2,44	1,94	1,81	2,06
6	Beton Variasi Fly Ash 17,5% Air Laut	1,81	1,94	2,01	1,92
7	Beton Variasi Silica Fume 5% Air Tawar	2,36	2,52	2,14	2,34
8	Beton Variasi Silica Fume 5% Air Laut	2,21	2,97	2,87	2,68
9	Beton Variasi Silica Fume 8% Air Tawar	2,36	2,42	2,41	2,4
10	Beton Variasi Silica Fume 8% Air Laut	3,06	3,3	3,69	3,35

Sumber : Hasil perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 5** rekap kuat tarik belah beton umur 28 hari, terlihat adanya perbedaan nilai kuat tarik belah antara beton yang menggunakan air tawar dan air laut pada setiap variasi campuran. Pada beton normal, nilai kuat tarik belah beton air tawar sebesar 2,31 MPa, sedangkan beton air laut sebesar 2,32 MPa. Pada variasi Fly Ash 15%, kuat tarik belah meningkat menjadi 2,60 MPa untuk air tawar dan 2,53 MPa untuk air laut. Namun, ketika kadar Fly Ash ditingkatkan menjadi 17,5%, nilai kuat tarik belah mengalami penurunan menjadi 2,06 MPa pada air tawar dan 1,92 MPa pada air laut. Penurunan ini

menunjukkan bahwa penambahan Fly Ash yang terlalu tinggi dapat mengurangi kemampuan beton dalam menahan gaya tarik belah. Pada variasi Silica Fume, terjadi peningkatan nilai kuat tarik belah dibandingkan variasi Fly Ash 17,5%. Penggunaan Silica Fume 5% menghasilkan nilai kuat tarik belah sebesar 2,34 MPa pada beton air tawar dan 2,68 MPa pada beton air laut. Selanjutnya, pada variasi Silica Fume 8%, nilai kuat tarik belah meningkat menjadi 2,40 MPa untuk beton air tawar dan 3,35 MPa untuk beton air laut. Nilai tersebut merupakan yang tertinggi dari seluruh variasi yang diuji. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan Silica Fume memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap peningkatan kuat tarik belah beton, khususnya pada beton yang menggunakan air laut. Secara keseluruhan, variasi Fly Ash 15% memberikan nilai kuat tarik belah optimum pada beton air tawar sebesar 2,60 MPa, sedangkan pada beton air laut nilai optimum diperoleh pada variasi Silica Fume 8% sebesar 3,35 MPa. Perbandingan ini menunjukkan bahwa penggunaan Silica Fume 8% pada beton air laut mampu menghasilkan kuat tarik belah yang lebih tinggi dibandingkan seluruh variasi lainnya, sehingga dapat dikatakan sebagai variasi yang paling efektif dalam meningkatkan kinerja beton terhadap gaya tarik belah pada umur 28 hari.

Analisis Biaya (RAB)

Berdasarkan hasil perhitungan, beton normal memiliki total biaya sebesar Rp1.794.850,89/m³. Komponen biaya terbesar berasal dari penggunaan semen, yaitu sekitar Rp889.032,00, atau hampir 50% dari total biaya produksi. Hal ini menunjukkan bahwa semen masih menjadi



material dengan kontribusi biaya paling dominan dibandingkan agregat, air, maupun material lainnya. Sementara itu, biaya agregat halus, agregat kasar, dan air relatif kecil sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap total biaya. Pada variasi Fly Ash 15%, total biaya meningkat menjadi sekitar Rp1.979.695,25/m³. Peningkatan biaya ini terutama disebabkan oleh penambahan fly ash sebagai bahan substitusi semen. Meskipun jumlah semen berkurang, harga fly ash yang digunakan pada penelitian ini masih memberikan tambahan biaya sehingga total RAB menjadi lebih tinggi dibandingkan beton normal. Namun demikian, berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, variasi ini masih mampu menghasilkan kuat tekan yang cukup baik, yaitu mencapai 21,65 MPa pada curing air tawar dan 20,01 MPa pada curing air laut pada umur 28 hari. Dengan demikian, peningkatan biaya tersebut masih sebanding dengan peningkatan kualitas beton, terutama pada aspek durabilitas dan keberlanjutan karena penggunaan limbah industri sebagai material pozzolan. Pada variasi Fly Ash 17,5%, total biaya kembali menurun menjadi sekitar Rp847.033,47/m³. Penurunan biaya ini dipengaruhi oleh semakin berkurangnya penggunaan semen sebagai material dengan harga tertinggi dalam campuran. Namun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi ini menghasilkan kuat tekan paling rendah dibandingkan variasi lainnya, yaitu 18,65 MPa pada curing air tawar dan 15,42 MPa pada curing air laut pada umur 28 hari. Hal tersebut mengindikasikan bahwa meskipun biaya produksi menjadi lebih ekonomis, peningkatan kadar fly ash hingga 17,5% belum mampu memberikan reaksi pozzolanik yang optimal dalam umur

pengujian 28 hari sehingga terjadi penurunan performa mekanik. Secara umum, analisis RAB menunjukkan bahwa penggunaan material pozzolan tidak hanya memengaruhi sifat mekanik beton, tetapi juga biaya produksi. Variasi dengan kadar bahan tambah yang lebih tinggi belum tentu menghasilkan biaya yang lebih besar ataupun performa yang lebih baik. Oleh karena itu, pemilihan komposisi campuran perlu mempertimbangkan keseimbangan antara aspek teknis (kuat tekan dan durabilitas) dengan aspek ekonomis (biaya produksi). Berdasarkan hasil penelitian ini, variasi Fly Ash 15% dapat dikatakan memberikan kompromi yang cukup baik antara peningkatan mutu beton dan biaya yang masih relatif kompetitif, sedangkan penggunaan Fly Ash 17,5% lebih menguntungkan dari sisi efisiensi biaya, namun menghasilkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan sehingga perlu dipertimbangkan kembali untuk aplikasi struktural. Beton normal memiliki biaya produksi Rp 1.797.958,39/m³. Substitusi Fly Ash 17,5% secara signifikan menurunkan biaya menjadi Rp 834.140,07/m³, menjadikannya pilihan paling ekonomis meskipun kekuatannya menurun di lingkungan laut

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

- a. Hasil pengujian sifat fisik material menunjukkan bahwa seluruh material penyusun beton memenuhi persyaratan standar dan layak digunakan dalam penelitian. Agregat halus berupa pasir Lumajang memenuhi standar SNI dinyatakan OK. Pada agregat kasar



kerikil Pasuruan diperoleh nilai berat jenis $2,810 \text{ gr/cm}^3$, penyerapan 2,07%, berat isi lepas $1,32 \text{ gr/cm}^3$, berat isi tumbuk $1,49 \text{ gr/cm}^3$, berat isi goyang $1,45 \text{ gr/cm}^3$, kadar air 1,75%, keausan 1,936%, dan kekerasan 24,08%. Seluruh hasil tersebut masih berada dalam batas persyaratan SNI 03-2834-2000, sehingga agregat kasar dinyatakan OK. Pengujian berat jenis material pengikat menunjukkan bahwa semen memiliki berat jenis $2,94 \text{ gr/cm}^3$, fly ash sebesar $2,72 \text{ gr/cm}^3$, dan silica fume sebesar $2,27 \text{ gr/cm}^3$, yang masih sesuai dengan rentang standar masing-masing material berdasarkan SNI 2531:2015, SNI 03-6863-2002, dan SNI 6880:2016, sehingga seluruh material dinyatakan OK. Selain itu, hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) pada fly ash menunjukkan kandungan SiO_2 sebesar 23,60%, Al_2O_3 sebesar 12,00%, dan Fe_2O_3 sebesar 46,65%, sehingga jumlah ketiga oksida utama mencapai 82,25%, dengan kandungan CaO sebesar 11,80%. Karena jumlah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ melebihi 70%, maka fly ash yang digunakan memenuhi klasifikasi Fly Ash Tipe F berdasarkan ASTM C618.

b. Variasi penggunaan fly ash sebesar 15% dan 17,5% serta silica fume sebesar 5% dan 8% memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik pasta. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, hubungan tegangan-regangan, modulus elastisitas, dan analisis X-Ray Fluorescence (XRF), variasi silica fume 8% menunjukkan performa mekanik terbaik dibandingkan variasi lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh tegangan maksimum sebesar 10,592 MPa pada regangan sekitar 0,00725 serta modulus elastisitas

maksimum sebesar 1461,014 MPa. Selain itu, hasil pengujian XRF menunjukkan bahwa pasta silica fume 8% memiliki kandungan CaO sebesar 77,59%, SiO_2 sebesar 9,93%, Al_2O_3 sebesar 1,50%, dan Fe_2O_3 sebesar 4,93%, yang mengindikasikan terbentuknya mikrostruktur pasta yang lebih padat akibat meningkatnya reaksi pozzolanik dan pembentukan gel Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). Sebaliknya, penggunaan fly ash 17,5% menunjukkan performa mekanik yang lebih rendah karena reaksi pozzolanik fly ash berkembang lebih lambat pada umur pengujian. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa substitusi silica fume sebesar 8% merupakan variasi yang paling optimum dalam meningkatkan sifat mekanik pasta pada penelitian ini.

c. Penggunaan fly ash (0%, 15%, dan 17,5%) serta silica fume (0%, 5%, dan 8%) sebagai substitusi sebagian semen memberikan pengaruh terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada media perawatan air tawar maupun air laut. Berdasarkan hasil pengujian umur 28 hari, variasi silica fume 8% dengan perawatan air laut menunjukkan performa terbaik dengan kuat tekan sebesar 23,28 MPa dan kuat tarik belah sebesar 3,35 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi fly ash 17,5% dengan perawatan air laut, yaitu kuat tekan sebesar 15,42 MPa dan kuat tarik belah sebesar 1,92 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan silica fume 8% lebih efektif dalam meningkatkan sifat mekanik beton dibandingkan penggunaan fly ash pada variasi penelitian.

d. Biaya produksi Beton Normal (BN) adalah sekitar Rp 1.797.958,39 per m^3 ,



sedangkan beton dengan substitusi Fly Ash 17,5% jauh lebih ekonomis dengan total harga sekitar Rp. 834,140,07

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. R. Miling, J. Tanijaya, and D. Sandy, "Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ) Penggunaan Silika Fume dan Viscocrete Sebagai Bahan Tambah Pada Beton SCC (Self Compacting Concrete)," vol. 6, no. 4, pp. 619-627, 2024.
- [2] L. A. Indriyanto, A. Saputra, and D. Sulisty, "Pengaruh Air Laut Pada Masa Perawatan Terhadap Infiltrasi Ion Klorida Pada Beton Dengan Penambahan Fly Ash 12,5%," *J. Ris. Rekayasa Sipil*, vol. 3, no. 2, p. 61, 2020, doi: 10.20961/jrrs.v3i2.40955.
- [3] W. Sutrisno, G. Ghewa, and P. Suprobo, "Sorptivity and Chloride Penetrability Evaluation of Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume," *J. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 2, p. 68, 2019, doi: 10.12962/j20861206.v34i2.6576.
- [4] N. NGUDIYONO, N. N. KENCANAWATI, and R. PRAKARSA, "Pemanfaatan Fly Ash sebagai Bahan Substitusi Parsial Semen pada Beton Memadat Sendiri," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 23, no. 1, pp. 055-061, 2022, doi: 10.29122/jtl.v23i1.5130.
- [5] A. Zahlim, E. Bachtiar, and R. Makbul, "Efek Curing Air Laut Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Yang Menggunakan Fly Ash Sebagai Substitusi Pasir," *Borneo Eng. J. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 2022, doi: 10.35334/be.v1i1.2161.
- [6] D. Budiawati, E. Arifi, and C. R. Nainggolan, "Pengaruh Penggunaan Silica Fume dan Fly Ash sebagai Pengganti Semen terhadap Keausan Beton Porous yang Menggunakan RCA (Recycled Coarse Aggregate)," *J. Mhs. Jur. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, p. pp-725, 2018.
- [7] M. Khozi, A. Budiati, A. W. Priambada, B. Sabariman, and A. Suryadi, "Kuat Tekan Beton Dengan Dan Tanpa Penambahan Silica Fume Dalam Rendaman Air Laut," *Inter Tech*, vol. 3, no. 1, pp. 23-32, 2025, doi: 10.54732/i.v3i1.1246.
- [8] N. Pourdolat, "Mechanical and Microstructural Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Activated by Silica Fume-Derived Sodium Silicate," 2026.
- [9] D. Sekar, K. R. B. Udhayakumar, C. Dyson, M. Karuppusamy, S. Natarajan, and K. Annamalai, "The influence of supplementary cementitious materials on concrete properties," *Rev. Mater.*, vol. 30, 2025, doi: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0873.
- [10] I. Aghajanzadeh, N. Khodadadi, P. Suraneni, and A. Nanni, "Seawater-mixed concrete - A review with focus on durability properties," *Appl. Ocean Res.*, vol. 166, no. March 2025, p. 104878, 2026, doi: 10.1016/j.apor.2025.104878.
- [11] Sari, "Kajian Kuat Tarik Belah Pada Perencanaan Beton Dengan Additive Silica Fume Menggunakan Metoda American Concrete Institute (Agregat Halus Gunung Sugih Dan Agregat Kasar Tanjungan)," vol. 5, no. 2, pp. 118-129, 2016.
- [12] Y. N. Wibowo, T. Tatas, Y. Tajunnisa, A. F. Mawardi, and M. Zannah,



- “Compressive Strength Performance of High-Volume Fly Ash Concrete with CaCO₃ Addition,” *IPTEK J. Eng.*, vol. 11, no. 1, p. 12, 2025, doi: 10.12962/j23378557.v11i1.a22092.
- [13] M. Tumpu, P. R. Rangan, and M. Hasbi, “International Journal of Engineering and Science Applications Durability and Sustainability Assessment of Concrete Incorporating Sea Water and Sea Sand as Alternative Mixing Materials,” vol. 12, no. 2, pp. 68-76, 2025.
- [14] S. Prayogi, “Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Dan,” *J. Teras*, vol. 12, 2021.
- [15] D. Runganga and F. Okonta, “Research trends on high volume fly ash (HVFA) binders’ strength and durability: a global bibliometric and visualisation analysis,” *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 10, no. 4, pp. 1-22, 2025, doi: 10.1007/s41062-025-01884-4.
- [16] R. E. N. Rongcai, W. U. Guoxiong, and C. A. I. Ming, “No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title”.
- [17] K. Moolchandani, “Industrial byproducts in concrete: A state-of-the-art review,” *Next Mater.*, vol. 8, no. March, p. 100593, 2025, doi: 10.1016/j.nxmater.2025.100593.