

EVALUASI KINERJA BETON NORMAL DENGAN KOMBINASI FLY ASH DAN SILICA FUME PADA PERAWATAN AIR TAWAR DAN AIR LAUT

Setia Afan Efendi Ramadhan¹, Akhmad Suryadi², Bobby Asukmajaya Raharjo³

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Kontruksi Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

Email : afanefendi175@gmail.com¹ . akhmad.suryadi@polinema.ac.id². bobbyasukma@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Produksi semen *Portland* sebagai bahan utama beton menyumbang emisi karbon dioksida yang tinggi, sehingga pemanfaatan material *pozzolan* seperti *fly ash* dan *silica fume* sebagai substitusi sebagian semen menjadi alternatif untuk menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis sifat fisik material penyusun serta pengaruh kombinasi *fly ash* dan *silica fume* terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton normal mutu rencana $f_c' 20$ MPa dengan media perawatan air tawar dan air laut. Penelitian menggunakan tiga variasi, yaitu beton normal 0%, 15% *fly ash* + 5% *silica fume*, dan 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* dengan total benda uji yaitu 108 buah. Pengujian meliputi karakteristik fisik agregat dan bahan tambah, analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF), tegangan-regangan pasta semen, kuat tekan pada umur 7, 21, dan 28 hari, serta kuat tarik belah pada umur 28 hari, dengan media curing air tawar, air laut Pantai Ngliyep, dan air laut Pantai Sendang Biru. Hasil penelitian menunjukkan seluruh material memenuhi standar SNI dan ASTM, dengan *fly ash* tergolong tipe F kadar $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sebesar 82,25%. Variasi 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* menunjukkan kinerja terbaik dan berhasil mencapai mutu rencana $f_c' 20$ MPa pada umur 28 hari, dengan kuat tekan tertinggi 21,21 MPa pada curing air tawar dan 20,12 MPa pada curing air laut Ngliyep, serta kuat tarik belah tertinggi 2,66 MPa pada curing air laut. Curing air tawar secara umum menghasilkan perkembangan kuat tekan yang lebih stabil dibandingkan air laut. Kombinasi *fly ash* dan *silica fume* terbukti memperbaiki kerapatan mikrostruktur beton melalui reaksi pozzolanik sekunder, meningkatkan ketahanan terhadap serangan klorida dan sulfat di lingkungan laut, serta menurunkan biaya produksi akibat berkurangnya kebutuhan semen.

Kata Kunci: beton normal, *fly ash*, *silica fume*, kuat tekan, curing air laut.

ABSTRACT

The production of *Portland* cement as the main constituent of concrete contributes significantly to global carbon dioxide emissions. Therefore, the use of pozzolanic materials such as *fly ash* and *silica fume* as partial cement replacements has become a promising approach to producing more sustainable concrete. This study aims to evaluate the physical properties of the constituent materials and investigate the effect of *fly ash* and *silica fume* on the compressive strength and splitting tensile strength of normal concrete with a design strength of 20 MPa under freshwater and seawater curing conditions. Three concrete mixtures were prepared: normal concrete 0%, 15% *fly ash* + 5% *silica fume*, and 17.5% *fly ash* + 8% *silica fume* the study utilized a total of 108 test specimens. The experimental program included physical property testing of aggregates and supplementary cementitious materials, *X-Ray Fluorescence* (XRF) analysis, stress-strain testing of cement paste, compressive strength tests at 7, 21, and 28 days, and splitting tensile strength tests at 28 days. The specimens were cured in freshwater, seawater from Ngliyep Beach, and seawater from Sendang Biru Beach. The results showed that all materials satisfied the requirements of SNI and ASTM standards. The *fly ash* was classified as Class F, with a combined $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ content of 82.25%. The mixture containing 17.5% *fly ash* and 8% *silica fume* produced the best overall performance, achieving a compressive strength of 21.21 MPa under freshwater curing and 20.12 MPa under Ngliyep seawater curing at 28 days, while the highest splitting tensile strength reached 2.66 MPa under seawater curing. Freshwater curing generally resulted in more stable strength development than seawater curing. In addition, the incorporation of *fly ash* and *silica fume* improved the concrete microstructure through secondary pozzolanic reactions, enhanced resistance to chloride and sulfate exposure in marine environments, and reduced cement consumption, contributing to lower production costs.

Keywords: normal concrete, *fly ash*, *silica fume*, compressive strength, seawater curing.

1. PENDAHULUAN

Pesatnya kemajuan sektor pembangunan di Indonesia mendorong permintaan material bangunan, dengan beton sebagai bahan baku utama. Produksi semen *Portland* sebagai bahan pokok beton memakan banyak energi serta menyumbang emisi karbon dioksida yang tinggi, mencapai 7-8% dari total emisi CO₂ global. Oleh karena itu, pemanfaatan material substitusi semen seperti *fly ash* dan *silica fume* menjadi alternatif potensial untuk mengurangi penggunaan semen *Portland* sekaligus menekan emisi karbon pada industri konstruksi[1].

Fly ash merupakan material sisa pembakaran batu bara yang bersifat pozzolan dan mampu memperbaiki kualitas beton, sedangkan *silica fume* yang dihasilkan sebagai limbah produksi ferrosilikon memiliki partikel sangat halus dengan reaktivitas pozzolan tinggi sehingga efektif memadatkan mikrostruktur beton[2]. Kombinasi keduanya pada beton *fc'* 20 MPa diharapkan menghasilkan struktur mikro yang lebih rapat, menurunkan permeabilitas, serta meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida dan sulfat, baik pada *curing* air tawar maupun air laut[3]. Kombinasi *fly ash* dan *silica fume* sebagai substitusi semen telah banyak diteliti dan terbukti meningkatkan kinerja mekanik serta durabilitas beton, namun mayoritas kajian yang ada masih terbatas pada beton mutu menengah sampai dengan tinggi dengan *curing* air tawar[3]. Penelitian mengenai pengaruh *curing* air laut pada beton yang mengandung *fly ash* dan *silica fume* masih sangat terbatas.

Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan menganalisis sifat fisik material penyusun, pengaruh kombinasi *fly ash* dan *silica fume* dengan variasi 0%, 15% *fly ash* + 5% *silica fume* dan 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* terhadap kuat tekan umur 7, 21, dan 28 hari serta kuat tarik belah umur 28 hari, dan membandingkan performa *curing* air tawar dengan air laut Pantai Ngliyep dan Pantai Sendang Biru pada beton normal *fc'* 20 MPa.

2. METODE

Bahan substitusi (*filler*) berperan penting dalam memodifikasi karakteristik beton, baik saat masih dalam kondisi segar maupun setelah mengeras. Secara umum, bahan tambah dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama. Pertama, *filler* seperti ampas tebu, batu kapur, *fly ash* yang berfungsi untuk meningkatkan *workability* atau kemudahan pengerjaan beton segar. Dengan penggunaan yang tepat, bahan-bahan ini mampu mengoptimalkan performa beton sesuai kebutuhan teknis dan lingkungan. Kedua, bahan substitusi semen, contohnya *fly ash* dan *silica fume*, yang tidak hanya berfungsi sebagai pengganti parsial semen tetapi juga bertujuan meningkatkan kinerja beton

secara menyeluruh, seperti meningkatkan kekuatan, mengurangi porositas.

Fly Ash



Gambar 1 *Fly Ash*

Sumber: Dok. Pengujian Laboratorium

Fly ash tergolong sebagai bahan pozzolanik. *Fly ash* sangat diminati untuk menjadi bahan campuran beton dikarenakan memiliki beberapa sifat kimiawi yang serupa dengan semen, sehingga dianggap menggantikan fungsi sebagian dari semen. Pemanfaatan *fly ash* dalam beton memberikan keuntungan bagi lingkungan karena berkontribusi mengurangi dampak limbah industri batu bara[4].

Silica Fume



Gambar 2 *Silica Fume*

Sumber: Dok. Pengujian Laboratorium

Secara fisik, partikel ultrahalusnya berfungsi sebagai *microfiller* yang mengisi rongga antar-partikel semen sehingga matriks menjadi lebih rapat dan rendah porositas. Secara kimia, kandungan silikanya bereaksi cepat dengan sisa hidrasi melalui reaksi pozzolanik untuk membentuk gel C-S-H tambahan. Kombinasi efek fisik dan kimia ini tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanis, tetapi juga memperbaiki distribusi pori dan menurunkan permeabilitas, yang pada akhirnya mendorong durabilitas beton di lingkungan ekstrem[2].

Penelitian ini menggunakan pengujian laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan Teknik

Sipil, Politeknik Negeri Malang. Tahapan penelitian meliputi pengujian sifat fisik agregat dan bahan substitusi, perencanaan *mix design* f_c' 20 MPa berdasarkan SNI 03-2834-2000, pengujian pasta semen, pembuatan benda uji silinder 150x300 mm, pengujian *slump* sesuai SNI 1972:2008, *curing* benda uji, hingga pengujian kuat tekan SNI 1974:2011 pada umur 7, 21, dan 28 hari serta kuat tarik belah pada umur 28 hari dengan total 108 buah benda uji silinder.

Variabel bebas penelitian terdiri atas variasi persentase bahan pengganti semen beton normal 0%; 15% *fly ash* + 5% *silica fume*; 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* dan metode *curing* menggunakan air tawar, air laut Pantai Ngliyep, dan air laut Pantai Sendang Biru, sedangkan variabel terikat berupa kuat tekan beton dan kuat tarik belah.

Modulus elastisitas, kuat tekan, dan kuat tarik belah beton dihitung berdasarkan persamaan (1), (2), dan (3).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2)$$

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3)$$

Pengujian Kuat Tekan Pasta

Pengujian tegangan regangan pasta dilakukan menggunakan benda uji silinder pasta berukuran $\varnothing 20 \times 40$ mm melalui pengujian tekan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Nilai modulus elastisitas dihitung berdasarkan *modulus secant* yang diperoleh dari hubungan tegangan-regangan pada daerah elastis. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekakuan pasta sebagai penyusun utama beton sebelum dipengaruhi oleh keberadaan agregat.



Gambar 3 Pengujian pasta silinder menggunakan UTM
Sumber: Dok. Pengujian Laboratorium

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder yang diberi beban tekan secara bertahap hingga beton tersebut hancur.



Gambar 4 Pengujian kuat tekan beton
Sumber: Dok. Pengujian Laboratorium

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sifat Fisik Material

Hasil rekapitulasi pengujian sifat fisik agregat dan bahan pengikat ditunjukkan pada Tabel 1. Seluruh parameter yang diuji, meliputi pengujian sifat fisik agregat halus dan agregat kasar serta berat jenis semen, *fly ash*, dan *silica fume* sesuai persyaratan standar SNI dan ASTM. Hal ini menunjukkan bahwa material penyusun layak digunakan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 1 Parameter Pengujian Sifat Fisik

Parameter	Hasil	Nilai Acuan	Standar	Ket.
Gradasi pasir (FM)	2,20	1,5 - 3,8	ASTM C136	Memenuhi
Gradasi kerikil (FM)	6,74	6 - 7,5	ASTM C136	Memenuhi
Kadar air pasir	8,39%	-	SNI 1971:2011	Memenuhi
Kadar air kerikil	1,75%	-	SNI 1971	Memenuhi
BJ SSD pasir	2,64	2,4 - 2,9	SNI 1970	Memenuhi
BJ SSD kerikil	2,71	2,5 - 3,0	SNI 1969	Memenuhi
Penyerapan pasir	1,75%	Maks. 3%	SNI 1970	Memenuhi
Penyerapan kerikil	2,07%	Maks. 2-3%	SNI 1969	Memenuhi
Keausan Los Angeles	10,56%	Maks. 40%	SNI 2417	Memenuhi

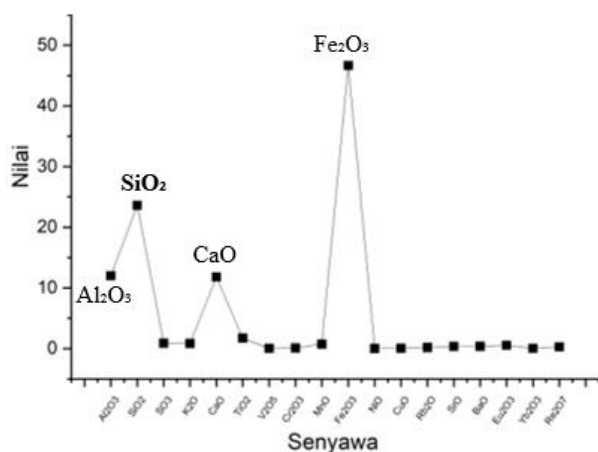
Parameter	Hasil	Nilai Acuan	Standar	Ket.
Kekerasan Agregat	24,08 %	-	SNI 3407	Memenuhi
Kadar Lumpur	4,23 %	Maks 5%	SNI ASTM C117	Memenuhi
BJ Semen	2,94	2,9 - 3,15	SNI 2049	Memenuhi
BJ Fly Ash	2,70	2 - 3 gr/cm3	SNI 2460:2014	Memenuhi
BJ Silica Fume	2,26	2,20 - 2,3	ASTM C1240	Memenuhi

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Secara keseluruhan, hasil pengujian sifat fisik agregat dan bahan pengikat menunjukkan bahwa seluruh material telah memenuhi standar yang berlaku. Dengan demikian, material yang digunakan dapat dinyatakan layak untuk proses pembuatan benda uji.

3.2 Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) Fly Ash

Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi oksida utama fly ash[5]. Berikut komposisi senyawa yang terkandung dalam Fly Ash yang digunakan :



Gambar 5 Grafik sample result XRF Fly Ash

Gambar 5 menunjukkan hasil uji XRF sampel yang didominasi oleh empat oksida utama: Fe_2O_3 sebesar 46,65%, SiO_2 sebesar 23,6%, dan Al_2O_3 sebesar 12%, dan CaO 11,8%. Tingginya kadar Fe_2O_3 yang hampir mencapai setengah dari total komposisi menandakan material ini kaya akan unsur besi dengan densitas yang tinggi. Sementara itu, kombinasi silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang cukup signifikan berpotensi menghasilkan ikatan kimia yang baik untuk stabilitas struktural dan sifat pozzolanik saat bereaksi. Kehadiran CaO dalam jumlah sedang juga memberikan

kontribusi pada sifat membuat material tersebut mengeras atau mengikat seperti semen ketika terkena air, sedangkan senyawa-senyawa minor lainnya hanya terdeteksi dalam jumlah yang sangat kecil sesuai dengan pembahasan[6].

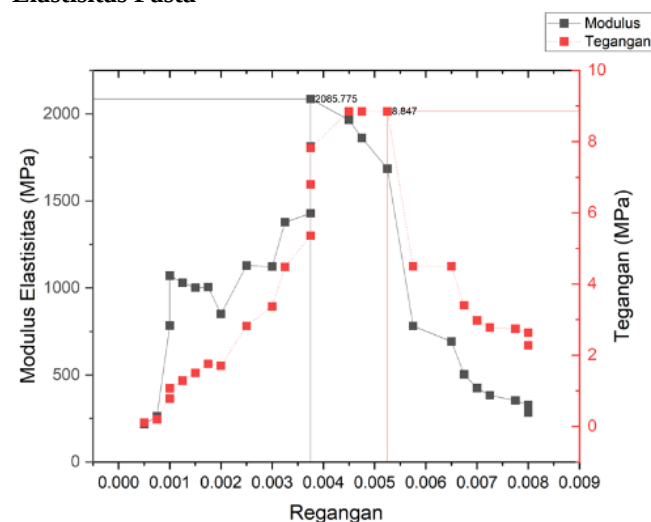
Tabel 2 Parameter Pengujian XRF Fly Ash

Parameter	Hasil XRF	Syarat ASTM C618	Keterangan
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	82,25%	Class F: $\geq 70\%$	Memenuhi Class F
CaO	11,8%	Class F: umumnya $< 10\%$	Kalsium sedang
SO_3	0,88%	Maks. 5%	Memenuhi
Fe_2O_3	46,65%	-	Sangat tinggi

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

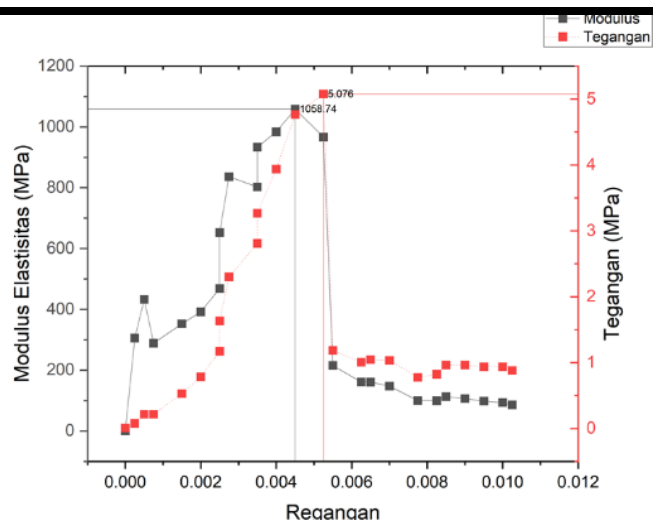
Tabel 2 menunjukkan bahwa total kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 mencapai 82,25%, memenuhi syarat minimum ASTM C618 untuk fly ash tipe F sebesar 70%, dengan kandungan kadar CaO sedang 11,8%. Hasil ini mengindikasikan fly ash memiliki aktivitas pozzolanik tinggi yang berpotensi meningkatkan kualitas pasta semen serta durabilitas beton.

3.3 Hubungan Tegangan - Regangan dan Modulus Elastisitas Pasta



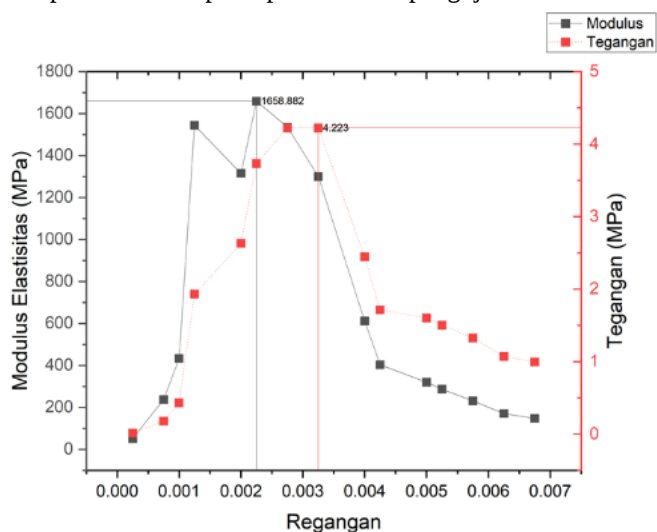
Gambar 6 Grafik Modulus Elastisitas Pasta Normal

Modulus elastisitas maksimum tercapai sebesar 2.085,77 MPa pada regangan 0,00375, sedangkan tegangan puncak berada di angka 8,847 MPa pada regangan 0,005. Setelah melewati fase puncak ini, struktur internal material mulai mengalami kerusakan akibat retak mikro (*microcracks*), yang ditandai dengan penurunan tegangan dan modulus elastisitas.



Gambar 7 Grafik Modulus Elastisitas Pasta var 1

Pasta dengan 15% *fly ash* dan 5% *silica fume* memiliki nilai modulus maksimum mencapai 1.058,74 MPa pada regangan 0,004, sedangkan tegangan puncak berada di angka 5,076 MPa pada regangan 0,00525. Capaian yang lebih rendah dari pasta normal ini menunjukkan bahwa substitusi kedua substitusi belum mampu meningkatkan kekuatan maupun kekakuan pasta pada kondisi pengujian ini.



Gambar 8 Grafik Modulus Elastisitas Pasta var 2

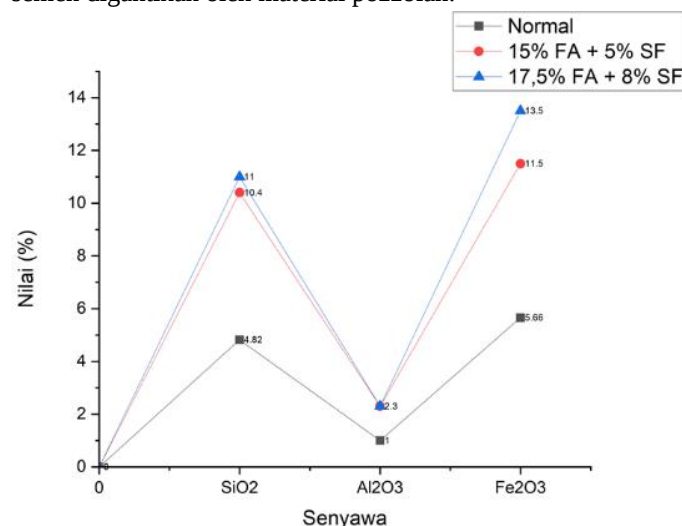
Pada variasi 17,5% *fly ash* dan 8% *silica fume*, modulus elastisitas maksimum mencapai 1.658,882 MPa dengan regangan 0,00275, sementara tegangan puncaknya berada di angka 4,229 MPa dengan regangan 0,00325 dibandingkan variasi sebelumnya. Namun belum mampu mendorong kekuatan tekannya sehingga tetap lebih rendah dari pasta normal.

Penambahan *fly ash* dan *silica fume* memengaruhi modulus elastisitas pasta, di mana variasi dengan kadar pozzolan lebih tinggi menunjukkan peningkatan kekakuan

pada umur lanjut. Hal ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik yang menghasilkan gel C-S-H sekunder sehingga mikrostruktur pasta menjadi lebih rapat dan porositas berkurang. Meskipun modulus elastisitas relatif lebih rendah akibat berkurangnya hidrasi primer semen, nilainya meningkat seiring berkembangnya reaksi pozzolanik, yang turut mendukung peningkatan sifat mekanik beton.

3.4 Senyawa Pasta Variasi

Analisis senyawa pasta dilakukan menggunakan pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui perubahan komposisi oksida akibat variasi penambahan *fly ash* dan *silica fume*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan kedua material pozzolan meningkatkan kandungan oksida silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) pada pasta dibandingkan pasta normal, sedangkan proporsi kalsium oksida (CaO) cenderung menurun karena sebagian semen digantikan oleh material pozzolan.



Gambar 9 Grafik Senyawa

Peningkatan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 mendorong pembentukan gel C-S-H sekunder yang memperbaiki kerapatan mikrostruktur pasta, sedangkan penurunan CaO menunjukkan berkurangnya Ca(OH)_2 bebas akibat reaksi pozzolanik. Perubahan komposisi tersebut menghasilkan pasta yang lebih padat dan stabil sehingga mendukung peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah.

Namun, pada umur 7 dan 21 hari beton normal masih menunjukkan nilai tertinggi. Pada umur 28 hari, Variasi 2 (17,5% *fly ash* + 8% *silica fume*) mengalami peningkatan kuat tekan akibat berkembangnya reaksi pozzolanik yang menghasilkan gel C-S-H tambahan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh senyawa pozzolan terhadap kuat tekan bergantung pada umur beton, karena reaksi pozzolanik berlangsung secara bertahap sesuai dengan pembahasan [6].

3.5 Kuat Tekan Beton

Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan pada umur 7, 21, dan 28 hari untuk ketiga variasi campuran dan tiga media curing ditunjukkan pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5.

Tabel 3 Kuat Tekan Rata-rata Umur 7 Hari (MPa)

Variasi	Air Tawar	Air Laut Sendang Biru	Air Laut Ngliyep
Normal (0%)	14,97	10,78	10,89
15% FA + 5% SF	15,31	14,51	15,10
17,5% FA + 8% SF	10,79	9,62	10,85

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Variasi 15% FA + 5% SF menghasilkan kuat tekan tertinggi di semua jenis, melampaui beton normal (0%). Hal ini didorong oleh filler effect dan aktivitas pozzolanik tinggi dari Silica Fume pada fase awal hidrasi.

Tabel 4 Kuat Tekan Rata-rata Umur 21 Hari (MPa)

Variasi	Air Tawar	Air Laut Sendang Biru	Air Laut Ngliyep
Normal (0%)	22,40	20,36	22,65
15% FA + 5% SF	18,21	17,91	17,23
17,5% FA + 8% SF	16,99	16,72	16,49

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Selisih nilai kuat tekan antar jenis air pada umur 21 hari mulai menyempit di setiap variasi, menunjukkan mulainya pembentukan kerapatan pori.

Tabel 5 Kuat Tekan Rata-rata Umur 28 Hari (MPa)

Variasi	Air Tawar	Air Laut Sendang Biru	Air Laut Ngliyep
Normal (0%)	23,14	23,16	22,85
15% FA + 5% SF	19,72	18,46	18,83
17,5% FA + 8% SF	21,21	19,93	20,12

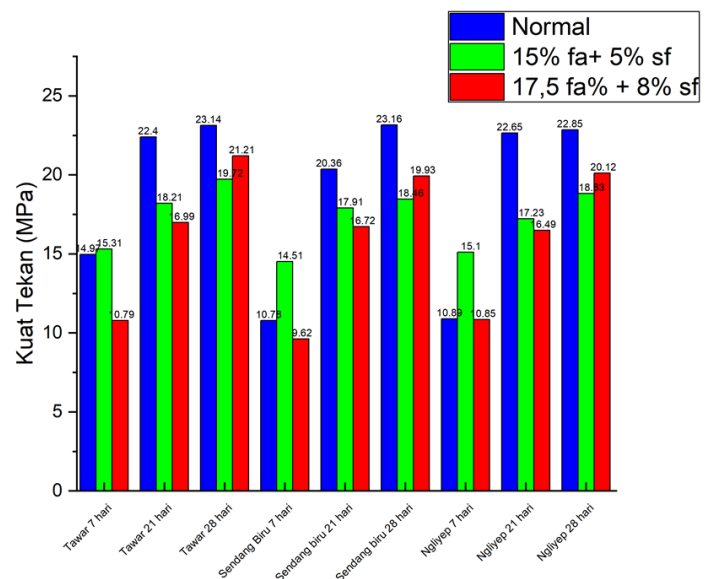
Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Pengujian mekanis hingga umur 28 hari menunjukkan bahwa seluruh variasi beton mengalami peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya waktu hidrasi. Tetapi beton normal masih memiliki kuat tekan tertinggi dari semua media perawatan. Fenomena ini mengonfirmasi adanya reaktivitas pozzolanik sekunder yang tertunda (*delayed pozzolanik reaction*), di mana kandungan Fly Ash yang lebih tinggi memerlukan waktu hidrasi yang lebih lama untuk berkontribusi optimal terhadap kekuatan struktural beton.

Secara keseluruhan pada umur 7 hari, variasi 15% fly ash + 5% silica fume mencatatkan kuat tekan tertinggi pada

seluruh media curing, sedangkan variasi 17,5% fly ash + 8% silica fume menunjukkan perkembangan kuat tekan awal yang lebih rendah akibat berkurangnya kadar semen yang tersedia untuk hidrasi awal. Pada umur 21 hari, kuat tekan masih lebih rendah dibanding dengan beton normal seiring meningkatnya persentase fly ash dan silica fume. Pada umur 28 hari, beton normal tetap menghasilkan kuat tekan tertinggi pada seluruh media curing (22,85 pada air Ngliyep, 23,14 pada air Tawar dan 23,16 MPa pada air Sendang Biru), namun variasi 17,5% fly ash + 8% silica fume berhasil mencapai dan melampaui mutu rencana f_c' 20 MPa, dengan nilai tertinggi 21,21 MPa pada curing air tawar dan 20,12 MPa pada curing air laut Ngliyep. Hal ini membuktikan bahwa reaksi pozzolanik sekunder dari kombinasi fly ash dan silica fume berlangsung lebih optimal pada umur lanjut, sejalan dengan penelitian [7] dan [8] yang juga melaporkan peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari akibat reaksi pozzolan yang berlangsung lambat namun progresif.

Berikut rekapitulasi nilai rata rata Kuat Tekan Beton, disajikan pada Gambar 10 :



Gambar 10 Rekapitulasi Kuat Tekan Beton

3.6 Kuat Tarik Belah Beton

Hasil pengujian kuat tarik belah umur 28 hari disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Kuat Tarik Belah Rata-rata Umur 28 Hari

Variasi	Air Tawar	Air Laut Sendang Biru	Air Laut Ngliyep
Normal (0%)	2,31	2,23	2,32
15% FA + 5% SF	2,36	2,14	2,31

Variasi	Air Tawar	Air Laut Sendang Biru	Air Laut Ngliep
17,5% FA + 8% SF	2,24	2,52	2,66

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Secara umum, *curing* menggunakan air tawar menghasilkan kuat tekan yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan curing air laut, karena tidak mengandung ion klorida dan sulfat dalam konsentrasi tinggi yang dapat memengaruhi proses hidrasi[9]. Meskipun demikian, pada variasi 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume*, *curing* air laut masih mampu menghasilkan kuat tekan yang mendekati air tawar, sehingga air laut berpotensi menjadi alternatif media *curing* di wilayah pesisir yang mengalami keterbatasan air bersih, sejalan dengan temuan [10].

3.7 Pengaruh Media Curing Air Laut dibandingkan dengan Air Tawar

Perbedaan kinerja antar media air laut ini diduga kuat dipicu oleh variasi salinitas dan karakteristik ion di masing-masing lokasi pantai. Untuk membuktikannya, tingkat salinitas diukur menggunakan refraktometer berbasis indeks bias cahaya, di mana data kadar garam terlarut ini menjadi parameter pendukung utama untuk menjelaskan perbedaan tren kenaikan kuat tekan beton. Berikut tabel data salinitas air laut Sendang Biru dan air laut Ngliep :

Tabel 7 Data Salinitas Air Laut Ngliep dan Sendang Biru

Air Laut Sendang Biru		Air Laut Ngliep	
Tanggal	Salinitas (%)	Tanggal	Salinitas (%)
18 Maret	3,4	18 Maret	3,6
27 Maret	3,4	27 Maret	3,9
31 Maret	3,6	31 Maret	3,9
6 April	3,7	6 April	4,0
8 April	3,9	8 April	3,9
10 April	3,9	10 April	3,9
13 April	3,8	13 April	4,0
16 April	3,8	16 April	3,8
27 April	3,8	27 April	3,7
4 Mei	3,9	4 Mei	3,4
11 Mei	4,0	11 Mei	3,6
18 Mei	3,9	18 Mei	4,4
25 Mei	3,5	25 Mei	4,5

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

3.8 Analisis Efektivitas Biaya

Berdasarkan total jumlah benda uji yaitu 108 buah yang digunakan selama penelitian, diperoleh kebutuhan material keseluruhan meliputi agregat halus sebanyak 451,73 kg, agregat kasar 598,81 kg, semen 165,91 kg, *fly ash* 21,19 kg, *silica fume* 9,00 kg, dan air 89,17 liter. Diperoleh total biaya

material sebesar Rp1.505.368,87. Selain biaya material utama, penelitian juga memerlukan biaya pendukung berupa 10 kg belerang senilai Rp200.000,00 dan 1 liter oli senilai Rp30.000,00. Dengan demikian, total biaya keseluruhan yang dibutuhkan untuk pelaksanaan penelitian adalah sebesar Rp1.735.368,87. Secara umum, penggunaan *fly ash* dan *silica fume* sebagai material substitusi semen tidak hanya berpotensi meningkatkan kinerja beton, tetapi juga dapat mengurangi kebutuhan semen sehingga biaya produksi beton menjadi lebih ekonomis dibandingkan beton normal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Seluruh material memenuhi persyaratan SNI dan ASTM. Hasil XRF menunjukkan *fly ash* tergolong tipe F dengan kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 82,25%, sehingga memiliki aktivitas pozzolanik yang baik dan layak digunakan sebagai bahan substitusi semen.
2. Penambahan *fly ash* dan *silica fume* memengaruhi perilaku tegangan-regangan serta modulus elastisitas pasta. Meskipun pasta normal memiliki kekakuan tertinggi, penggunaan kedua bahan pozzolan mampu memengaruhi perilaku tegangan-regangan dan meningkatkan kualitas mikrostruktur pasta pada umur lanjut..
3. Variasi 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* memberikan kinerja terbaik dengan kuat tekan 21,21 MPa pada umur 28 hari dan kuat tarik belah tertinggi 2,66 MPa. Peningkatan ini dipengaruhi oleh reaksi pozzolanik yang menghasilkan struktur beton lebih padat.
4. Media *curing* memengaruhi perkembangan kuat tekan beton. Air tawar memberikan hasil yang lebih stabil, sedangkan air laut Pantai Ngliep menunjukkan performa lebih baik dibandingkan Pantai Sendang Biru dan masih berpotensi digunakan sebagai alternatif *curing* di wilayah pesisir.
5. Kombinasi *fly ash* dan *silica fume* berpotensi meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan laut dengan memperbaiki mikrostruktur dan mengurangi penetrasi ion agresif. Variasi 17,5% *fly ash* + 8% *silica fume* menunjukkan performa terbaik sehingga berpotensi diterapkan pada konstruksi di kawasan pesisir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Junianto and D. Sumiarsa, "The Possibility of Achieving Zero CO₂ Emission in the Indonesian Cement Industry by 2050 : A Stakeholder System Dynamic Perspective," 2023.
- [2] A. R. Noorfauzi, S. Rona, P. Gaby, and T. A.

- Attamimi, "SILICA FUME SEBAGAI BAHAN PENGIKAT TAMBAHAN BETON : TINJAUAN SISTEMASTIS PENINGKATAN KINERJA DAN KEBERLAJUTAN," vol. 4, no. 1, pp. 17–27, 2025.
- [3] L. Sulaiman, R. Muhammad, E. Ramadhan, and R. Citra, "Performance of treated recycled coarse aggregate concrete incorporating seawater : Mechanical properties and microstructural analysis," no. 100, 2025.
- [4] F. F. Bahar, S. Wiranto, U. Jambi, and U. Jambi, "Inovasi Material dalam Beton Berkelanjutan : Studi Literatur tentang Pemanfaatan Fly Ash dengan Peningkatan Kekuatan Beton," vol. 6, 2024.
- [5] I. D. Ana, "X-Ray Fluorescence (XRF)".
- [6] F. Elyasigorji *et al.*, "Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods," 2023.
- [7] M. Fahri, F. Misdalena, and V. K. Yakub, "Pengaruh Jenis Air Perawatan terhadap Kuat Tekan Beton pada Usia 28 Hari," no. 2021, pp. 259–265, 2025, doi: 10.33364/konstruksi/v.23-2.2446.
- [8] H. R. Dantje, "Pengaruh Waktu Perendaman Air Laut Terhadap Kuat Tekan Beton Menggunakan Semen Kupang dengan Bahan," vol. 3, no. 1, pp. 19–23, 2023.
- [9] S. Elia H, "PENGARUH MASA PERAWATAN (CURING) MENGGUNAKAN AIR LAUT TERHADAP KUAT TEKAN DAN ABSORPSI BETON," vol. III, no. 2, pp. 103–110, 2014.
- [10] S. V Odeyemi and O. Ogunmakinde, "Effect of seawater use on the physical and mechanical properties of self - compacting concrete," *Discov. Civ. Eng.*, 2025, doi: 10.1007/s44290-025-00197-w.