E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 2134-2147
Volume 3 Nomor 3 Tahun 2026

Pengaruh Kombinasi Silica Fume dan Superplasticizer Polycarboxylate terhadap Kuat Lentur Beton

Annisa Prita Melinda[1], Ghani Rakshanda[2], Fauzan Marjanis[3]
[123]Program Studi S1 Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
e-mail: annisaprita@ft.unp.ac.id

Abstrak

Kuat lentur merupakan salah satu parameter mekanis penting pada beton. Parameter ini menggambarkan kemampuan beton menahan tegangan tarik akibat momen lentur hingga terjadi keruntuhan, sehingga relevan dalam mengevaluasi perilaku elemen struktural. Sebagian besar beton mutu sedang hanya memiliki kuat lentur berkisar 6%-21% dari kuat tekannya, sehingga berpotensi menjadi faktor pembatas kapasitas struktur apabila tidak diuji secara khusus. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi silica fume dan superplasticizer berbasis polycarboxylate terhadap nilai kuat lentur beton fc' 29 MPa serta menentukan komposisi optimum di antara enam variasi campuran yang diuji. Penelitian bersifat eksperimen laboratorium menggunakan benda uji balok berukuran 60 cm x 15 cm x 15 cm yang diuji pada umur 28 hari mengacu pada SNI 4431:2011 dengan metode pembebanan empat titik (four-point loading). Kadar silica fume divariasikan pada 6%, 8%, dan 10% dengan superplasticizer konstan 0,8%, sedangkan dosis superplasticizer divariasikan pada 0,6% dan 1,2% dengan silica fume konstan 8%. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat lentur meningkat seiring bertambahnya kadar silica fume, dari 3,16 MPa pada campuran kontrol menjadi 5,21 MPa pada kadar 10%, namun menurun menjadi 3,26 MPa ketika dosis superplasticizer dinaikkan menjadi 1,2% pada kadar silica fume tetap 8%. Komposisi silica fume 10% dan superplasticizer 0,8% terbukti menghasilkan kuat lentur tertinggi sekaligus menjadi komposisi paling optimal pada penelitian ini.
Kata kunci: Beton; kuat lentur; *four-point bending; silica fume*; *superplasticizer*

Abstract

Flexural strength was a critical mechanical parameter of concrete because it represented the capacity of a concrete cross-section to resist the bending moment caused by loads applied perpendicular to the specimen axis until failure occurred, making it particularly relevant for beam and slab elements that carried combined compressive and flexural loads. Most medium-grade concrete possessed a flexural strength of only 6%-21% of its compressive strength, potentially limiting structural capacity if not specifically tested. This study analyzed the effect of combining silica fume and polycarboxylate-based superplasticizer on the flexural strength of fc' 29 MPa concrete and determined the optimum composition among six mixture variations. The research used beam specimens of 60 cm x 15 cm x 15 cm, tested at 28 days following SNI 4431:2011 with the four-point loading method, under which maximum bending moment occurred constantly across the middle third of the specimen span. Silica fume content was varied at 6%, 8%, and 10% with a constant superplasticizer dosage of 0.8%, while

superplasticizer dosage was varied at 0.6% and 1.2% with a constant silica fume content of 8%. Test results showed that flexural strength increased along with higher silica fume content, from 3.16 MPa in the control mixture to 5.21 MPa at 10%, but decreased to 3.26 MPa when superplasticizer dosage was raised to 1.2% at a fixed silica fume content of 8%. The composition of 10% silica fume and 0.8% superplasticizer produced the highest flexural strength and was identified as the most mechanically optimal composition.
Keywords: *silica fume*; *polycarboxylate superplasticizer*; concrete flexural strength

LATAR BELAKANG

Pembangunan infrastruktur di Indonesia yang terus berkembang menuntut penggunaan beton mutu tinggi yang mampu memenuhi standar kekuatan dan keawetan pada struktur gedung bertingkat, jembatan, serta elemen pracetak. Beton fc' 29 MPa termasuk mutu yang banyak diterapkan pada struktur bangunan menengah hingga tinggi, mencakup kolom, balok, dan pelat struktural. Pencapaian mutu tersebut secara optimal masih menghadapi tantangan teknis terkait Faktor Air Semen (FAS); untuk memperoleh kuat tekan tinggi dibutuhkan FAS rendah berkisar 0,40-0,48, namun kondisi ini menurunkan *workability* secara signifikan sehingga menyulitkan proses pengerjaan dan pemadatan beton di lapangan.

Pada elemen balok dan pelat, kapasitas menahan lentur menjadi aspek yang sangat menentukan karena elemen tersebut umumnya memikul kombinasi beban tekan dan lentur sekaligus, sementara nilai kuat lentur beton pada umumnya hanya berkisar 6%-21% dari kuat tekannya (Abdullah dkk., 2022). Kondisi ini menjadikan pengujian kuat lentur sebagai bagian yang tidak dapat digantikan hanya dengan estimasi dari nilai kuat tekan, karena hubungan antar kedua parameter tersebut tidak selalu bersifat linear. Fenomena kerusakan dini pada struktur beton akibat kapasitas lentur yang tidak memadai berpotensi menimbulkan biaya perawatan dan perbaikan yang tinggi, sehingga pengembangan teknologi beton yang mampu meningkatkan kuat lentur sekaligus mempertahankan *workability* menjadi kebutuhan mendesak dalam industri konstruksi di Indonesia.

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan performa beton adalah penggunaan bahan tambah berupa silica fume sebagai mineral admixture dan superplasticizer berbasis polycarboxylate ether sebagai chemical admixture. Silica fume memiliki ukuran partikel yang sangat halus dan aktivitas pozzolanik yang dapat berkontribusi terhadap pembentukan calcium silicate hydrate (C–S–H) tambahan, sehingga berpotensi meningkatkan kepadatan dan kekuatan mekanis beton (Hamada dkk., 2023). Tinjauan penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa penggunaan silica fume dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan mendukung pengembangan campuran beton yang lebih berkelanjutan (Ahmad dkk., 2022; Alhajiri dan Akhtar, 2023). Sementara itu, superplasticizer tipe F berbasis polycarboxylate ether dapat

meningkatkan kemampuan alir campuran dan mengurangi kebutuhan air tanpa menurunkan workability beton segar (Ahmad Hudri dkk., 2025).

Beberapa kajian terdahulu secara khusus melaporkan pengaruh positif *silica fume* terhadap kuat lentur. Pada beton memadat sendiri mutu tinggi, kuat lentur pada umur 28 hari meningkat dari 5,17 MPa menjadi 6,41 MPa pada kadar optimum 11%, sebelum mengalami sedikit penurunan pada kadar yang lebih tinggi akibat berkurangnya homogenitas campuran (Safitri dkk., 2023). Tinjauan sistematis lain turut melaporkan bahwa kombinasi *silica fume* dengan *superplasticizer* mampu meningkatkan kuat lentur beton hingga 13,74% dibandingkan beton tanpa bahan tambah (Noorfauzi dkk., 2025). Meskipun demikian, penelitian yang secara khusus memvariasikan dosis *superplasticizer* secara bertahap sambil mengamati responnya terhadap kuat lentur beton struktural mutu sedang seperti fc' 29 MPa masih terbatas, sehingga dosis optimum antara *silica fume* dan *superplasticizer* terhadap kapasitas lentur belum sepenuhnya dapat dipastikan, terlebih hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur diketahui tidak selalu bersifat linear (Abdullah dkk., 2022).

Dalam konteks perencanaan struktur, SNI 2847:2019 menempatkan kekuatan dan kemampuan layan sebagai aspek penting dalam menjamin keandalan elemen beton struktural. Pada elemen yang menerima beban lentur, karakterisasi kuat lentur diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan beton menahan tegangan tarik sebelum terbentuknya retak. Pengujian kuat lentur dalam penelitian ini mengacu pada SNI 4431:2011 menggunakan dua titik pembebanan. Prinsip pengujian tersebut sejalan dengan ASTM C78/C78M, yaitu menempatkan dua titik pembebanan pada sepertiga bentang sehingga terbentuk daerah dengan momen maksimum konstan di antara kedua titik pembebanan. Penggunaan kedua standar tersebut memberikan dasar yang terstruktur dalam pemilihan metode pengujian serta memungkinkan hasil penelitian dibandingkan secara lebih proporsional dengan penelitian terdahulu yang menggunakan konfigurasi pembebanan serupa.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menyajikan secara khusus hasil pengujian kuat lentur dari penelitian yang lebih luas mengenai pengaruh kombinasi silica fume dan superplasticizer berbasis polycarboxylate terhadap sifat mekanis beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis kecenderungan perubahan kuat lentur beton fc′ 29 MPa akibat variasi bertahap kadar silica fume dan dosis superplasticizer, mengamati pola keruntuhan lentur benda uji, serta mengidentifikasi komposisi yang menghasilkan kuat lentur tertinggi di antara variasi campuran yang diuji.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium yang bertujuan mengetahui pengaruh perlakuan berupa variasi kombinasi *silica fume* dan *superplasticizer* terhadap kuat lentur beton. Sampel beton dibagi ke dalam beberapa kelompok perlakuan berdasarkan variasi persentase *silica fume* dan *superplasticizer*, serta satu kelompok kontrol tanpa penambahan bahan tersebut, sehingga faktor-faktor luar yang dapat memengaruhi hasil pengujian dapat diminimalkan. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Negeri Padang, menggunakan mesin uji lentur (*Universal Testing Machine*).

Bahan penyusun beton yang digunakan terdiri atas semen portland, agregat kasar yang memenuhi ketentuan SNI 03-2834-2000 dengan batas keausan maksimum 40% dan kandungan lumpur maksimum 5%. Bahan tambah yang digunakan adalah *silica fume* dengan kandungan SiO2 lebih dari 85% dan ukuran partikel 0,1-0,3 mikron sesuai ASTM C1240/ACI 234R, serta *superplasticizer polycarboxylate* tipe F dengan merek dagang Sika Viscocrete-3115 N sesuai klasifikasi ASTM C494, yang mampu mengurangi kebutuhan air pencampur tanpa menurunkan nilai *slump*. Karakteristik teknis kedua bahan tambah tersebut dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Teknis Bahan Tambah

Bahan Tambah	Jenis	Karakteristik Utama	Standar Acuan
Silica fume	Mineral admixture	Kandungan SiO2 lebih dari 85%, bersifat amorf, ukuran partikel 0,1-0,3 mikron, berbentuk bulat	ASTM C1240 / ACI 234R
Superplasticizer polycarboxylate (Sika Viscocrete-3115 N)	Chemical admixture tipe F	Mengurangi kebutuhan air pencampur tanpa menurunkan workability, berbasis Polycarboxylate Ether (PCE)	ASTM C494

(Sumber: Data Penelitian, 2026)

Benda uji kuat lentur berbentuk balok berukuran 60 cm x 15 cm x 15 cm, dengan rincian variasi campuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Benda Uji Kuat Lentur

Kelompok	Variasi	Jumlah Benda Uji	Dimensi (cm)
Kontrol	SF 0% ; SV 0%	1 balok	60 x 15 x 15
I (variasi silica fume)	SF 6% ; SV 0,8%	1 balok	60 x 15 x 15
I (variasi silica fume)	SF 8% ; SV 0,8%	1 balok	60 x 15 x 15

Kelompok	Variasi	Jumlah Benda Uji	Dimensi (cm)
I (variasi silica fume)	SF 10% ; SV 0,8%	1 balok	60 x 15 x 15
II (variasi superplasticizer)	SF 8% ; SV 0,6%	1 balok	60 x 15 x 15
II (variasi superplasticizer)	SF 8% ; SV 1,2%	1 balok	60 x 15 x 15

(Sumber: Data Penelitian, 2026)

Rancangan campuran terdiri atas satu campuran kontrol tanpa bahan tambah (SF 0% SV 0%), tiga variasi kadar *silica fume* (6%, 8%, 10% terhadap berat semen) dengan *superplasticizer* konstan 0,8%, serta dua variasi dosis *superplasticizer* (0,6% dan 1,2%) dengan *silica fume* konstan 8%. Kadar *silica fume* 6-10% dipilih berdasarkan temuan penelitian terdahulu pada beton busa, sedangkan dosis *superplasticizer* 0,8% mengacu pada dosis optimum yang ditemukan pada beton fc' 40 MPa, sehingga pendekatan variasi bertahap ini memungkinkan pengaruh masing-masing bahan tambah untuk diteliti secara terpisah. Setiap variasi campuran pada penelitian ini diwakili oleh satu benda uji balok. Jumlah tersebut merupakan keterbatasan dalam rancangan eksperimen karena belum memenuhi jumlah replikasi yang diperlukan untuk mengevaluasi variabilitas hasil dan melakukan analisis statistik. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diperlakukan sebagai kecenderungan eksploratif dari masing-masing variasi campuran dan belum dapat digunakan untuk menetapkan signifikansi perbedaan ataupun komposisi optimum yang berlaku secara umum. Pengujian dengan jumlah replikasi yang memadai diperlukan untuk mengonfirmasi konsistensi hasil yang diperoleh.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian kuat lentur meliputi mesin uji lentur, dua tumpuan (*support*), dua titik pembebanan, jangka sorong, meteran atau penggaris baja, serta timbangan. Pengujian kuat lentur mengacu pada SNI 4431:2011 dengan metode pembebanan empat titik (*four-point loading*), yaitu benda uji balok diletakkan di atas dua tumpuan dan diberi beban pada dua titik pembebanan yang berjarak sama dari masing-masing tumpuan, sehingga secara keseluruhan sistem pengujian memiliki empat titik kontak. Metode ini dipilih karena menghasilkan momen lentur maksimum yang konstan pada sepertiga tengah bentang balok uji, sehingga keruntuhan yang terjadi lebih representatif terhadap kondisi lentur murni dibandingkan metode satu titik pembebanan. Prinsip metode empat titik ini sejalan dengan ASTM C78/C78M-21 yang berlaku secara internasional, sehingga hasil pengujian dengan kedua standar tersebut relatif dapat diperbandingkan.

Tahapan pengujian dilakukan sebagai berikut: (1) benda uji yang telah dicuring selama 28 hari diangkat dan ditimbang untuk memperoleh berat basah, kemudian dikeringkan pada suhu

ruangan dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat kering; (2) dimensi benda uji diukur menggunakan jangka sorong dan meteran; (3) benda uji diletakkan pada dua tumpuan dengan jarak bentang yang telah diatur, dengan posisi sisi yang saat pengecoran berada di atas dijadikan sisi tekan saat pengujian; (4) dua titik pembebanan ditempatkan secara simetris sesuai ketentuan empat titik pembebanan; (5) beban diberikan secara kontinu menggunakan *UTM* hingga benda uji mengalami keruntuhan, sementara beban maksimum yang terindikasi dicatat; (6) lebar dan tinggi bidang patahan diukur kembali setelah keruntuhan; dan (7) nilai kuat lentur dihitung menggunakan persamaan yang telah ditentukan. Selama pengujian berlangsung, lokasi awal munculnya retak serta arah rambatannya turut diamati dan didokumentasikan untuk mengonfirmasi kesesuaian dengan mekanisme keruntuhan lentur yang umum terjadi pada balok beton normal.

Pada metode pembebanan empat titik, momen lentur bersifat konstan pada sepertiga tengah bentang benda uji dan mencapai nilai maksimumnya (Mmaks) pada daerah tersebut. Momen lentur maksimum dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Mmaks = (P \times L) / 6 \quad (1)$$

dengan Mmaks adalah momen lentur maksimum (N.mm), P adalah beban maksimum (N), dan L adalah panjang bentang antar tumpuan (mm). Nilai kuat lentur (fr), yang merepresentasikan tegangan tarik lentur maksimum pada serat terbawah penampang akibat momen tersebut, kemudian dihitung menggunakan persamaan modulus keruntuhan (*modulus of rupture*) untuk penampang persegi:

$$fr = (P \times L) / (b \times H^2) \quad (2)$$

dengan fr adalah kuat lentur (MPa), b adalah lebar balok (mm), dan H adalah tinggi balok (mm). Persamaan (2) diturunkan dari hubungan fr = Mmaks·c/I, dengan c = H/2 sebagai jarak dari garis netral ke serat terluar dan I = b·H^3/12 sebagai momen inersia penampang persegi, sehingga nilai kuat lentur secara langsung mencerminkan besarnya momen lentur maksimum yang mampu ditahan benda uji sebelum mengalami retak awal pada sisi tarik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kuat lentur pada keenam variasi campuran disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Kuat Lentur Beton pada Berbagai Variasi Campuran

Kode Variasi Campuran	Dimensi Benda Uji (cm)	Kuat Lentur, fr (MPa)
SF 0% ; SV 0% (kontrol)	60 x 15 x 15	3,16

Kode Variasi Campuran	Dimensi Benda Uji (cm)	Kuat Lentur, fr (MPa)
SF 6% ; SV 0,8%	60 x 15 x 15	4,08
SF 8% ; SV 0,8%	60 x 15 x 15	4,14
SF 10% ; SV 0,8%	60 x 15 x 15	5,21
SF 8% ; SV 0,6%	60 x 15 x 15	4,00
SF 8% ; SV 1,2%	60 x 15 x 15	3,26

(Sumber: Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian dari setiap benda uji, peningkatan kadar silica fume menunjukkan kecenderungan meningkatkan kuat lentur beton. Pada empat variasi pertama, kuat lentur naik secara bertahap seiring bertambahnya kadar *silica fume*, dari 3,16 MPa pada campuran kontrol menjadi 4,08 MPa pada kadar 6%, 4,14 MPa pada kadar 8%, hingga mencapai nilai tertinggi 5,21 MPa pada kadar *silica fume* 10% dan *superplasticizer* 0,8%, atau setara peningkatan sekitar 65% dibandingkan campuran kontrol. Peningkatan ini terjadi karena partikel *silica fume* yang sangat halus mengisi rongga mikro di antara butiran semen dan bereaksi membentuk ikatan tambahan, sehingga struktur beton menjadi lebih padat dan mampu menahan momen lentur yang lebih besar sebelum retak pertama muncul pada sisi tarik penampang. Temuan ini sejalan dengan Hamada dkk. (2023) yang menjelaskan bahwa penggunaan *silica fume* secara konsisten memperbaiki kepadatan struktur dalam beton serta memperkuat ikatan antara pasta semen dan agregat, dan juga konsisten dengan pola peningkatan kuat lentur pada kadar *silica fume* optimum yang dilaporkan oleh Safitri dkk. (2023) maupun Noorfauzi dkk. (2025).

Pada dua variasi dengan kadar *silica fume* tetap 8%, peningkatan dosis *superplasticizer* dari 0,6% menjadi 1,2% justru menurunkan nilai kuat lentur dari 4,00 MPa menjadi 3,26 MPa. Penurunan ini diduga terjadi karena kelebihan dosis *superplasticizer* menimbulkan rongga udara tambahan dalam campuran, sehingga struktur beton menjadi kurang padat meskipun adukan lebih mudah dikerjakan saat pengecoran. Rongga-rongga kecil tersebut menjadi titik lemah yang mempercepat terjadinya retak ketika benda uji menerima momen lentur, sehingga kapasitas lenturnya menurun. Kecenderungan ini sejalan dengan temuan Pujianto dan Cahyati (2024) yang melaporkan bahwa penambahan dosis *superplasticizer* melebihi batas optimum menurunkan kinerja mekanis beton yang mengandung *silica fume* akibat bertambahnya pori udara dalam campuran.

Perbaikan kepadatan mikrostruktur akibat penambahan silica fume juga berdampak pada zona transisi antar muka (*interfacial transition zone*, ITZ) antara pasta semen dan agregat, yang merupakan zona terlemah dalam matriks beton dan menjadi lokasi awal inisiasi retak mikro

sebelum retak makroskopis terlihat secara visual. Silica fume yang mengisi ruang pori pada ITZ menghasilkan zona transisi yang lebih padat dan lebih kuat, sehingga tegangan yang diperlukan untuk menginisiasi retak pada zona tersebut meningkat secara signifikan. Kondisi inilah yang menjelaskan mengapa peningkatan kuat lentur akibat silica fume pada penelitian ini (65%) jauh lebih besar dibandingkan angka yang dilaporkan pada kajian-kajian yang menggunakan beton dengan faktor air semen lebih tinggi, di mana ITZ yang sudah lebih berpori sejak awal memberikan ruang yang lebih terbatas bagi perbaikan lebih lanjut.

Secara mekanis, pengamatan selama pengujian menunjukkan bahwa keruntuhan lentur pada seluruh variasi diawali dengan munculnya retak kecil pada sisi tarik balok, yaitu pada serat terbawah yang mengalami tegangan tarik maksimum akibat momen lentur pada sepertiga tengah bentang. Retak tersebut kemudian merambat secara vertikal menuju garis netral penampang seiring bertambahnya beban, hingga akhirnya balok mengalami keruntuhan ketika retak telah melewati sebagian besar tinggi penampang. Pola retak vertikal yang berawal dari sisi tarik ini sesuai dengan mekanisme umum keruntuhan lentur pada balok beton normal yang juga diamati oleh Aprillia dkk. (2023) dalam kajian mengenai momen retak pada balok beton bertulang, di mana nilai momen retak eksperimen cenderung lebih tinggi dibandingkan prediksi teoritis namun pola retak yang teramati tetap didominasi oleh retak lentur vertikal.

Pengamatan pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa lokasi retak awal cenderung muncul di dalam zona sepertiga tengah bentang, sesuai dengan karakteristik metode empat titik pembebanan yang menghasilkan momen lentur konstan pada zona tersebut, berbeda dengan metode satu titik pembebanan yang memusatkan momen maksimum hanya pada satu penampang di tengah bentang. Konsentrasi retak pada zona momen konstan ini memperkuat validitas metode pengujian yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi lentur murni. Pada variasi dengan kadar *silica fume* lebih tinggi, retak awal secara visual teramati muncul pada tahap pembebanan yang lebih lanjut dan merambat dengan laju yang relatif lebih lambat menuju garis netral dibandingkan variasi kontrol, yang mengindikasikan bahwa matriks pasta semen yang lebih padat akibat reaksi pozzolan *silica fume* turut memperlambat proses perambatan retak, sejalan dengan mekanisme penguatan zona transisi antar muka yang telah diuraikan pada bagian latar belakang.

Selain nilai kuat lentur, hasil pengujian juga mencatat hubungan antara beban maksimum (P) dan *displacement* (lendutan) pada masing-masing benda uji, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Displacement dan Beban Maksimum pada Pengujian Kuat Lentur

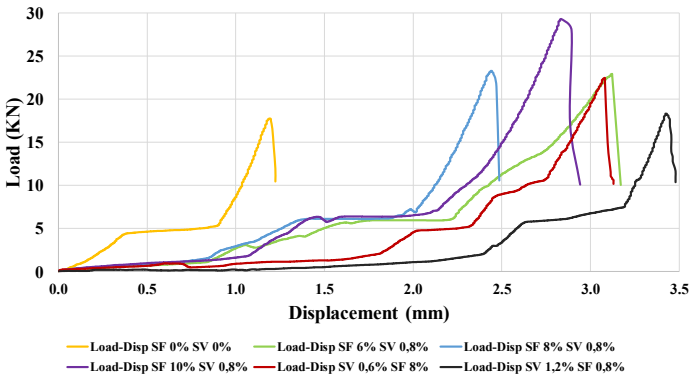
Kode Variasi Campuran	Displacement (mm)	Beban Maksimum, P (kN)
SF 0% ; SV 0% (kontrol)	1,19	17,76
SF 6% ; SV 0,8%	3,122	22,94
SF 8% ; SV 0,8%	2,445	23,28
SF 10% ; SV 0,8%	2,836	29,30
SF 8% ; SV 0,6%	3,081	22,48
SF 8% ; SV 1,2%	3,423	18,32

(Sumber: Data Penelitian, 2026)

Gambar 1 memperlihatkan konfigurasi benda uji pada saat pengujian kuat lentur. Gambar 2 menyajikan grafik hubungan antara beban maksimum (P) dan displacement/lendutan (mm) pada seluruh variasi campuran, yang memperlihatkan secara visual bahwa variasi silica fume 10% menghasilkan beban tertinggi sementara kelebihan dosis superplasticizer menurunkan kapasitas beban meskipun lendutan bertambah besar.



Gambar 1. Pengujian Kuat Lentur Balok



Gambar 2. Grafik Hubungan Beban vs Lendutan

Beton kontrol (SF 0% SV 0%) menghasilkan *displacement* sebesar 1,19 mm dengan beban maksimum 17,76 kN. Setelah penambahan *silica fume* 6% dengan *superplasticizer* 0,8%, *displacement* meningkat menjadi 3,122 mm dengan beban maksimum 22,94 kN. Pada kadar *silica fume* 8% dengan *superplasticizer* 0,8%, diperoleh *displacement* 2,445 mm dengan beban maksimum 23,28 kN, sedangkan variasi *silica fume* 10% dengan *superplasticizer* 0,8% menghasilkan beban maksimum tertinggi sebesar 29,30 kN dengan *displacement* 2,836 mm. Pada kelompok variasi dosis *superplasticizer*, penggunaan 0,6% menghasilkan *displacement* 3,081 mm dengan beban 22,48 kN, sedangkan dosis 1,2% menghasilkan *displacement* terbesar di antara seluruh variasi, yaitu 3,423 mm, namun dengan beban maksimum yang menurun menjadi 18,32 kN.

Data tersebut menunjukkan bahwa nilai *displacement* dan beban maksimum tidak selalu berbanding lurus; variasi dengan *displacement* terbesar (SF 8% SV 1,2%) justru tidak menghasilkan beban maksimum tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kelebihan dosis *superplasticizer* membuat benda uji mengalami deformasi lebih besar sebelum mencapai kondisi keruntuhan, namun kapasitas menahan momen lenturnya justru menurun akibat struktur beton yang kurang padat. Sebaliknya, komposisi *silica fume* 10% dengan *superplasticizer* 0,8% menghasilkan kombinasi beban maksimum tertinggi dengan *displacement* yang relatif moderat, menunjukkan bahwa komposisi ini memberikan kekakuan sekaligus kapasitas lentur yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya.

Kecenderungan nilai displacement yang lebih tinggi pada variasi dengan dosis superplasticizer 1,2% dapat dijelaskan melalui mekanisme reologi campuran beton segar. Kelebihan dosis superplasticizer berbasis polycarboxylate ether meningkatkan fluiditas campuran secara berlebihan, yang berpotensi menyebabkan segregasi partikel agregat halus dan distribusi void yang tidak merata dalam matriks beton setelah mengeras. Void yang tersebar tidak merata ini menurunkan modulus elastisitas efektif beton, sehingga benda uji lebih mudah berdeformasi di bawah beban yang sama, namun kekuatan ultimitnya (beban maksimum) justru lebih rendah dibandingkan variasi dengan dosis superplasticizer yang lebih terkendali. Fenomena ini konsisten dengan prinsip bahwa workability dan kekuatan beton memiliki hubungan trade-off yang perlu dikelola secara cermat melalui optimasi dosis bahan tambah.

Persentase peningkatan kuat lentur akibat penambahan *silica fume* pada penelitian ini (sekitar 65% pada rentang 0-10%) tergolong besar dibandingkan peningkatan yang dilaporkan pada tinjauan sistematis oleh Noorfauzi dkk. (2025) sebesar 13,74%, maupun peningkatan pada beton memadat mandiri mutu tinggi oleh Safitri dkk. (2023) yang mencapai sekitar 24% pada kadar optimum 11%. Perbedaan besaran peningkatan ini kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan jenis beton, metode pembebanan, serta kombinasi dosis *superplasticizer* yang digunakan pada masing-masing penelitian, sehingga menegaskan bahwa besarnya pengaruh *silica fume* terhadap kuat lentur bersifat spesifik terhadap komposisi campuran dan tidak dapat digeneralisasi secara langsung antar penelitian. Perbedaan ini juga sejalan dengan tinjauan Alhajiri dan Akhtar (2023) yang menyimpulkan bahwa kontribusi *silica fume* terhadap sifat mekanis beton, termasuk kuat lentur, sangat dipengaruhi oleh jenis semen, rasio air-semen, serta metode pengujian yang digunakan pada masing-masing studi, sehingga perbandingan lintas penelitian perlu memperhatikan konteks eksperimental masing-masing.

Untuk menilai efisiensi masing-masing bahan tambah, laju peningkatan kuat lentur dapat dihitung per satuan persentase penambahan. Pada kelompok variasi *silica fume* (0-10% dengan *superplasticizer* konstan 0,8%), kuat lentur naik dari 3,16 MPa menjadi 5,21 MPa, atau

rata-rata sekitar 0,21 MPa untuk setiap penambahan 1% *silica fume*. Laju peningkatan ini jauh lebih tinggi dibandingkan laju penurunan pada kelompok variasi *superplasticizer* (0,6-1,2% dengan *silica fume* konstan 8%), yaitu penurunan kuat lentur sebesar 4,00 MPa menjadi 3,26 MPa, atau rata-rata sekitar 1,23 MPa untuk setiap penambahan 1% *superplasticizer*. Perbandingan laju ini menunjukkan bahwa kapasitas lentur beton pada penelitian ini jauh lebih sensitif terhadap kelebihan dosis *superplasticizer* dibandingkan sensitivitasnya terhadap penambahan *silica fume*, sehingga pengendalian dosis *superplasticizer* secara presisi menjadi lebih kritis dibandingkan pengendalian kadar *silica fume* dalam upaya mengoptimalkan kapasitas lentur beton struktural.

Peningkatan kuat lentur sebesar 65% pada komposisi optimum dibandingkan beton kontrol memberikan indikasi bahwa penambahan *silica fume* dalam dosis yang tepat berpotensi meningkatkan momen retak (*cracking moment*) elemen balok dan pelat, sehingga elemen struktural dapat menahan beban layan yang lebih tinggi sebelum mengalami retak lentur awal. Kondisi ini relevan bagi elemen struktur yang memikul beban lentur dominan, seperti balok anak, pelat lantai bentang panjang, maupun elemen pracetak, di mana kapasitas lentur turut menentukan lebar retak dan lendutan pada kondisi layan sebagaimana disyaratkan dalam ketentuan perencanaan beton struktural (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Namun demikian, karena peningkatan dosis *superplasticizer* yang berlebihan justru menurunkan kapasitas lentur akibat bertambahnya rongga udara, penerapan komposisi *silica fume* 10% dengan *superplasticizer* 0,8% di lapangan perlu diimbangi dengan pengendalian mutu pencampuran dan pemadatan yang cermat agar manfaat peningkatan kuat lentur dapat tercapai secara konsisten pada skala produksi.

Beberapa keterbatasan perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian ini. Pertama, setiap variasi campuran hanya diwakili oleh satu benda uji balok, sehingga nilai kuat lentur yang dilaporkan belum mencerminkan variabilitas statistik antar ulangan sebagaimana lazim disyaratkan pada pengujian material dengan replikasi. Kedua, pengujian hanya dilakukan pada umur beton 28 hari, sehingga perkembangan kuat lentur pada umur yang lebih panjang akibat reaksi pozzolanik lanjutan dari *silica fume* belum tercakup dalam penelitian ini. Ketiga, dokumentasi pola retak dilakukan secara visual tanpa pengukuran lebar retak secara kuantitatif pada setiap tahap pembebanan, sehingga interpretasi mekanisme keruntuhan lentur pada bagian ini bersifat deskriptif dan memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui instrumentasi yang lebih rinci pada penelitian mendatang.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan disarankan menggunakan jumlah ulangan benda uji yang lebih banyak pada setiap variasi campuran untuk memperoleh nilai kuat lentur rata-rata beserta simpangan bakunya, sehingga signifikansi statistik antar variasi

dapat diuji secara lebih ketat. Pengujian pada umur beton yang lebih panjang, seperti 56 atau 90 hari, juga disarankan untuk mengetahui apakah pola peningkatan kuat lentur akibat *silica fume* tetap konsisten seiring berlanjutnya reaksi pozzolanik setelah umur 28 hari. Selain itu, instrumentasi tambahan berupa pengukuran lebar retak menggunakan *crack width gauge* atau pemantauan regangan menggunakan *strain gauge* pada sisi tarik dan sisi tekan benda uji akan memberikan data kuantitatif yang lebih rinci mengenai perkembangan retak lentur sejak tahap awal pembebanan hingga keruntuhan, sehingga hubungan antara momen lentur teoritis dan momen retak eksperimental dapat dikaji secara lebih mendalam, sebagaimana telah dirintis pada kajian Aprillia dkk. (2023) untuk balok beton bertulang. Penelitian lanjutan juga dapat mempertimbangkan variasi ukuran penampang balok uji untuk mengevaluasi konsistensi pengaruh *silica fume* dan *superplasticizer* terhadap kuat lentur pada skala elemen struktural yang lebih mendekati dimensi balok aktual di lapangan, mengingat efek skala pada perilaku lentur beton telah banyak dilaporkan memengaruhi hasil pengujian pada benda uji berskala laboratorium.

SIMPULAN

Berdasarkan variasi yang diuji, peningkatan kadar silica fume dari 6% hingga 10% pada dosis superplasticizer 0,8% menunjukkan kecenderungan meningkatkan kuat lentur beton. Nilai tertinggi sebesar 5,21 MPa diperoleh pada campuran dengan 10% silica fume dan 0,8% superplasticizer, atau sekitar 65% lebih tinggi daripada satu benda uji kontrol. Sebaliknya, peningkatan dosis superplasticizer menjadi 1,2% pada kadar silica fume 8% menghasilkan kuat lentur yang lebih rendah, yaitu 3,26 MPa. Hasil ini menunjukkan pentingnya pengendalian dosis bahan tambah dalam penerapan campuran beton. Namun, karena setiap variasi hanya diwakili oleh satu benda uji, komposisi tersebut belum dapat ditetapkan sebagai dosis optimum untuk penerapan umum. Pengujian dengan jumlah replikasi yang memadai, evaluasi sifat beton segar, pengamatan mikrostruktur, serta analisis biaya dan dampak lingkungan diperlukan sebelum komposisi tersebut direkomendasikan untuk penerapan lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, N., Ranian, C., Hardi, I., Kurniawan, & Syauki, M. (2022). Hubungan Kuat Tekan, Tarik Belah, dan Tarik Lentur Beton dengan Bahan Tambah Akibat Penggunaan Metode Perencanaan Campuran Beton yang Berbeda. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 89-94.

ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-19). American Concrete Institute.

Ahmad Hudri, H., Halim, A., & Irawan, D. (2025). Analisis Perbandingan Penambahan Sika Viscocrete Dan Penambahan Polycarboxylate Pce 520 Pada Beton Scc Terhadap Kuat Tekan. *Bouwplank Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 1-9.

Ahmad Iswahyudhi, Febryandi, & Debby Sinta Devi. (2024). Pengaruh Penambahan *Silica fume* Terhadap Kuat Tekan Beton Busa Menggunakan Sika Viscocrete 3115 N. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 8(1), 65-74.

Ahmad, J., Aslam, F., Martinez-Garcia, R., de-Prado-Gil, J., & Qaidi, S. (2022). A Review on the Use of Silica Fume in Cementitious Materials. *Sustainability*, 14(19), 12075.

Alhajiri, A. M., & Akhtar, M. N. (2023). Role of Silica Fume in Sustainable Concrete: A Review. *Civil Engineering Journal*, 9(10), 2175-2188.

Aprillia, W. N., Muhtar, & Gunasti, A. (2023). Komparasi Momen Retak Teoritis dan Eksperimen Balok Beton Bertulang Rangkap dengan Agregat Normal. *Jurnal Smart Teknologi*, 4(4), 100-102.

ASTM International. (2020). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures* (ASTM C1240-20). ASTM International.

ASTM International. (2019). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete* (ASTM C494/C494M-19). ASTM International.

ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Four-Point Loading)* (ASTM C78/C78M-21). ASTM International.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal* (SNI 03-2834-2000). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Spesifikasi Agregat Halus untuk Pekerjaan Adukan dan Plesteran dengan Bahan Dasar Semen* (SNI 03-6820-2002). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Cara Uji Kuat Lentur Beton dengan Dua Titik Pembebanan* (SNI 4431:2011). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan* (SNI 2847:2019). Badan Standardisasi Nasional.

Hamada, H. M., dkk. (2023). Effect of Silica Fume on the Properties of Sustainable Cement Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8887-8908.

Noorfauzi, A. R., Gaby, S. R. P., & Attamimi, T. A. (2025). *Silica fume* Sebagai Bahan Pengikat Tambahan Beton: Tinjauan Sistematis Peningkatan Kinerja dan Keberlanjutan. *Jurnal Rekayasa Konstruksi*, 4(1), 17-27.

Pujianto, A., & Cahyati, M. D. (2024). Optimization of Superplasticizer Dosage on Compressive Performance in Self-Compacting Concrete Mixtures with Silicafume as a Cementitious Material. *Bulletin of Civil Engineering*, 4(2), 47-54.

Rakshanda, G. (2026). *Pengaruh Kombinasi Silica Fume dan Superplasticizer Berbasis Polycarboxilate terhadap Kekuatan Mekanis Beton* (Tugas Akhir). Universitas Negeri Padang.

Safitri, E., Wibowo, W., & Fatahillah, A. (2023). Kajian Kuat Lentur pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi dengan Metakaolin 12,5% dan Variasi Silica fume. *Matriks Teknik Sipil*, 11(4), 398-404.