

Dari optimasi material menuju kinerja struktur: identifikasi kebutuhan penelitian mengenai perilaku geser dan propagasi retak pada balok HS-SCC yang mengandung serbuk kaca limbah dan *silica fume*

Achmad Puspa Agung¹, Mochamad Teguh^{1,*}

¹Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

High-strength self-compacting concrete
Waste glass powder
Silica fume
Shear behavior
Crack propagation
Structural performance

Corresponding Author:

Mochamad Teguh
m.teguh@uii.ac.id

Abstract

This preliminary study was conducted to establish the scientific basis for evaluating the structural performance of High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC) beams incorporating Waste Glass Powder (WGP) and Silica Fume (SF) as partial cement replacements. The study represents a continuation of previous material optimization research and serves as a transition toward the investigation of structural behavior at the reinforced concrete member level. A structured literature review was carried out using recent national and international publications related to SCC, HS-SCC, WGP, SF, shear behavior of reinforced concrete beams, and crack propagation mechanisms. The reviewed studies were synthesized to identify the relationships between material characteristics and structural performance parameters, including compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, first cracking load, load–deflection response, shear capacity, crack development, stiffness degradation, ductility, and failure modes. The review confirms that both WGP and SF have the potential to improve the mechanical properties and sustainability of HS-SCC when used within appropriate replacement ranges. However, most previous studies have focused primarily on material properties and flexural behavior, while investigations concerning shear behavior and crack propagation remain limited. The study identifies a significant research gap regarding the structural performance of HS-SCC beams incorporating WGP and SF, particularly in relation to shear resistance, diagonal crack propagation, stiffness degradation, and ductility under varying stirrup spacing and shear span-to-depth ratios. Therefore, further experimental studies are required to establish the relationship between optimized sustainable concrete materials and the structural behavior of reinforced concrete beams. The findings of this study provide a framework for future experimental investigations on shear performance and crack development in HS-SCC beams containing WGP and SF.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan teknologi beton modern, *Self-Compacting Concrete* (SCC) terus disempurnakan untuk memenuhi tuntutan kinerja struktural yang lebih tinggi. Salah satu pengembangannya adalah *High-Strength Self-Compacting Concrete* (HS-SCC), yaitu beton yang

menggabungkan kemampuan mengalir dan memadat sendiri dengan karakteristik mekanik yang lebih unggul, terutama kuat tekan dan modulus elastisitas yang tinggi. Penelitian Wibowo dkk. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan metakaolin dan *steel slag* pada SCC mampu menghasilkan kuat tekan hingga 62,17 MPa,

sehingga berpotensi digunakan pada elemen struktur yang memerlukan kapasitas dan kekakuan yang lebih tinggi.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan teknis, produksi *HS-SCC* umumnya memerlukan kandungan semen yang relatif tinggi untuk mencapai tingkat *workability* dan kekuatan yang diinginkan. Kondisi ini menimbulkan tantangan dari aspek keberlanjutan karena industri semen merupakan salah satu sumber utama emisi karbon dioksida. Oleh sebab itu, pemanfaatan *supplementary cementitious materials (SCMs)* dan limbah industri sebagai substitusi parsial semen semakin banyak dikembangkan sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan semen sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

Salah satu bahan yang banyak digunakan adalah *silica fume (SF)*, yaitu produk samping industri silikon dan ferosilikon yang memiliki kandungan silika *amorf* yang sangat tinggi. Ukuran partikelnya yang sangat halus memungkinkan *SF* berfungsi sebagai *filler* sekaligus material pozzolanik yang mampu menghasilkan produk hidrasi tambahan. Kehadiran *SF* dapat meningkatkan kualitas zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone/ITZ*), meningkatkan kepadatan mikrostruktur, serta memperbaiki sifat mekanik beton, terutama kuat tekan dan kuat tarik.

Selain *silica fume*, *waste glass powder (WGP)* atau serbuk kaca limbah juga menunjukkan potensi besar sebagai material pengganti sebagian semen. Kandungan silika *amorf* yang tinggi pada serbuk kaca memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik apabila material digiling hingga ukuran yang cukup halus. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan *WGP* dalam proporsi tertentu mampu mempertahankan, bahkan meningkatkan, kekuatan beton, sedangkan penggunaan yang berlebihan cenderung menurunkan kinerja akibat berkurangnya kandungan semen aktif dalam campuran.

Penggunaan *SF* dan *WGP* tidak hanya memberikan manfaat dari sisi teknis, tetapi juga mendukung konsep konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan konsumsi semen Portland dan pemanfaatan limbah industri bernilai tambah. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Agung & Teguh (2024), kombinasi *silica fume* dan serbuk kaca pada *SCC* mutu tinggi menunjukkan potensi yang baik untuk menghasilkan karakteristik mekanik yang memenuhi kriteria *High-Strength Self-Compacting Concrete*. Namun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada evaluasi sifat material dan belum mengkaji implikasinya terhadap perilaku elemen struktur.

Pada tingkat struktur, balok beton bertulang merupakan komponen utama yang berfungsi menahan serta menyalurkan beban lentur dan geser. Dibandingkan dengan keruntuhan lentur yang umumnya memberikan tanda-tanda deformasi yang cukup jelas, keruntuhan geser cenderung bersifat getas dan terjadi secara tiba-tiba, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan maupun penelitian. Keruntuhan geser pada balok beton bertulang umumnya diawali oleh terbentuknya retak diagonal pada daerah yang mengalami tegangan geser tinggi, yang kemudian berkembang menuju titik pembebanan atau daerah tekan hingga menyebabkan kegagalan struktur. Respons geser balok dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kuat tekan dan kuat tarik beton, modulus elastisitas, rasio bentang geser terhadap tinggi efektif (a/d), konfigurasi tulangan geser, pola retak, kekakuan, daktilitas, serta kapasitas geser ultimit.

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi penggunaan *WGP* dan *SF* pada beton maupun balok beton bertulang, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada sifat material dan perilaku lentur. Kajian mengenai pengaruh kombinasi *WGP* dan *SF* terhadap perilaku geser serta perkembangan retak pada balok *HS-SCC* masih sangat terbatas. Selain itu,

belum banyak penelitian yang membandingkan secara langsung kinerja balok *HS-SCC* konvensional dan balok *HS-SCC* yang mengandung *WGP* dan *SF* pada kondisi geometri, penulangan, dan pembebanan yang setara.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian pendahuluan ini dilakukan untuk mengidentifikasi perkembangan penelitian terkini, mengevaluasi kesenjangan penelitian yang masih ada, serta menyusun dasar ilmiah bagi penelitian eksperimental lanjutan mengenai perilaku geser dan propagasi retak pada balok *HS-SCC* yang mengandung *waste glass powder* dan *silica fume*. Fokus utama diarahkan pada parameter *first cracking load*, perkembangan retak diagonal, respons beban–lendutan, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas geser ultimit sebagai indikator kinerja struktural balok.

Metode Investigasi

Seleksi literatur

Kajian ini menggunakan sumber literatur yang dipilih berdasarkan kriteria seleksi yang telah ditetapkan sebelumnya. Artikel yang dipertimbangkan merupakan publikasi ilmiah yang terbit pada periode 2019–2026 dalam bahasa Indonesia maupun bahasa Inggris. Literatur yang dipilih harus memiliki keterkaitan dengan topik *Self-Compacting Concrete (SCC)*, *High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC)*, *Waste Glass Powder (WGP)*, *Silica Fume (SF)*, serta perilaku geser dan perkembangan retak pada balok beton bertulang.

Selain relevansi topik, artikel yang diikutsertakan dalam kajian harus memuat informasi mengenai parameter yang berhubungan dengan kinerja material maupun respons struktur, seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, beban retak awal, pola dan propagasi retak, lendutan, kekakuan, daktilitas, kapasitas geser, serta rasio bentang geser terhadap tinggi efektif balok (*shear span-to-depth ratio*). Publikasi yang tidak memenuhi kriteria tersebut tidak digunakan dalam proses analisis.

Pendekatan penelitian

Penelitian ini merupakan studi pendahuluan yang dilakukan melalui kajian literatur terstruktur untuk memperoleh pemahaman mengenai perkembangan penelitian terkini serta mengidentifikasi peluang penelitian yang masih terbuka. Pendekatan yang digunakan mengacu pada prinsip *Systematic Literature Review (SLR)*, khususnya pada tahapan penelusuran, penyaringan, evaluasi, dan sintesis literatur yang relevan.

Berbeda dengan penelitian eksperimental yang menghasilkan data primer melalui pengujian laboratorium, penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah yang telah diterbitkan. Literatur yang dianalisis mencakup penelitian mengenai karakteristik *HS-SCC*, pemanfaatan *WGP* dan *SF* sebagai bahan pengganti sebagian semen, serta perilaku geser dan mekanisme pembentukan retak pada balok beton bertulang. Seluruh referensi diperoleh dari jurnal nasional dan internasional yang memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan penelitian.

Penelitian ini merupakan kajian awal yang dilakukan melalui tinjauan pustaka terstruktur. Pelaksanaannya, penelitian ini mengadopsi beberapa tahap metode *Systematic Literature Review (SLR)*, khususnya dalam proses identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis literatur. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian yang berkaitan dengan topik yang diteliti melalui pencarian dan analisis sistematis terhadap berbagai publikasi ilmiah.

Prosedur kajian literatur

Proses identifikasi dan seleksi literatur dilakukan dengan mengadopsi kerangka *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)*. Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa proses pemilihan referensi dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat ditelusuri. Melalui tahapan identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan

inklusi, diperoleh kumpulan literatur yang dianggap paling relevan untuk menggambarkan perkembangan penelitian mengenai *HS-SCC* berbasis *WGP* dan *SF* serta implikasinya terhadap perilaku geser dan propagasi retak pada balok beton bertulang. Kata kunci yang digunakan mencakup beberapa lapisan istilah material, seperti "*High-Strength Self-Compacting Concrete*" atau "*HS-SCC*", "*Waste Glass Powder*" atau "*WGP*", "*Silica Fume*" atau "*SF*". Istilah perilaku struktural, seperti "*shear behavior*," "*shear performance*," "*crack propagation*," "*flexural behavior*," dan "*reinforced concrete beam*". sumber literatur diperoleh dari *Google Scholar*, repositori DOI, serta beragam jurnal nasional dan internasional. Rangkuman proses seleksi literatur berdasarkan pendekatan PRISMA disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alur PRISMA

Tahap PRISMA	Penjelasan	Jumlah Artikel
Identifikasi	Pengumpulan artikel dari berbagai sumber ilmiah seperti jurnal nasional, jurnal internasional, database DOI, <i>Google Scholar</i> , dan publikasi <i>open access</i> yang berkaitan dengan <i>HS-SCC</i> , <i>WGP</i> , <i>silica fume</i> , perilaku geser, dan retak balok beton bertulang.	42
Penyaringan	Seleksi awal dilakukan berdasarkan tahun publikasi, kesesuaian judul dan abstrak, serta ketersediaan naskah lengkap (<i>full text</i>).	35
Kelayakan	Artikel yang lolos tahap penyaringan ditelaah lebih lanjut untuk memastikan kesesuaiannya dengan fokus penelitian.	29
Inklusi	Artikel yang memenuhi seluruh kriteria seleksi digunakan sebagai referensi utama dalam proses sintesis literatur.	22

Penerapan kerangka PRISMA dalam penelitian ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa proses identifikasi, seleksi, dan evaluasi referensi dilakukan secara sistematis dan objektif. Melalui

prosedur tersebut, diperoleh kumpulan literatur yang paling relevan untuk menggambarkan perkembangan penelitian mengenai penggunaan *Waste Glass Powder* (*WGP*) dan *Silica Fume* (*SF*) pada *High-Strength Self-Compacting Concrete* (*HS-SCC*), serta implikasinya terhadap perilaku struktur beton bertulang. Hasil sintesis literatur selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi area penelitian yang masih memerlukan kajian lebih lanjut, khususnya yang berkaitan dengan perilaku geser, perkembangan retak diagonal, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas geser ultimit balok. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat menyediakan dasar konseptual yang kuat bagi perancangan penelitian eksperimental lanjutan yang menghubungkan hasil optimasi material berkelanjutan dengan kinerja struktural elemen beton bertulang.

Hasil Investigasi

Karakteristik artikel yang dianalisis

Proses seleksi literatur menghasilkan 22 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan penelitian (Tabel 2). Sebanyak 7 artikel pada tahap kelayakan tidak diikutsertakan karena hanya berfokus pada pemodelan numerik tanpa validasi eksperimental, sehingga hasilnya bersifat prediktif dan belum memadai sebagai dasar penyusunan penelitian eksperimental.

Tabel 2. Karakteristik artikel

Klaster Topik	Jumlah Artikel	Fokus Kajian
<i>High Strength SCC</i> konvensional dan berbasis SCMs	6	Sifat beton segar <i>HS-SCC</i> , material pendukung, metakolin, SF
Beton dengan <i>Waste Glass Powder</i> (<i>WGP</i>)	5	Pengaruh <i>WGP</i> terhadap sifat mekanik dan strktural beton
Beton dengan <i>Silica Fume</i> (<i>SF</i>)	4	Pengaruh <i>SF</i> terhadap kekuatan, durabilitas, dan mikrostruktur
Perilaku geser balok beton bertulang	7	Kinerja geser balok dengan berbagai variasi parameter
Metode uji geser balok	4	Metode pengujian geser

Selanjutnya, artikel yang terpilih dikelompokkan ke dalam lima tema utama, yaitu *High-Strength Self-Compacting Concrete* (HS-SCC), pemanfaatan *Waste Glass Powder* (WGP), penggunaan *Silica*

Fume (SF), perilaku geser balok beton bertulang, serta metode pengujian kapasitas geser dan perkembangan retak.

Tabel 3. Matriks literatur yang dianalisis

No.	Penulis	Tahun	Judul Artikel	Fokus Kajian
1	Mohammed & Hama.	2023	<i>Effect of combination of waste glass powder and plastic aggregate on structural behavior of reinforced concrete beams</i>	Balok beton bertulang dengan WGP (15%) dan agregat plastik
2	Karalar dkk.	2025	<i>Utilizing recycled glass powder in reinforced concrete beams: comparison of shear performance</i>	Balok beton bertulang dengan WGP (10%, 20%, 30%)
3	Yassen dkk.	2023	<i>Shear behavior of reinforced concrete beams incorporating waste glass powder as partial replacement of cement</i>	Balok beton bertulang dengan WGP (0%, 10%, 15%)
4	Hama dkk.	2019	<i>Flexural behavior of reinforced concrete beam incorporating waste glass powder</i>	Balok beton bertulang dengan WGP (0%, 10%, 15%)
5	Choudhary dkk.	2021	<i>Mechanical and abrasion resistance performance of silica fume, marble slurry powder, and fly ash amalgamated high strength self-consolidating concrete</i>	HS-SCC dengan SF (5%), MSP, FA
6	Benaicha dkk.	2020	<i>Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self-compacting concrete</i>	SCC dengan SF (5-30%)
7	Özkılıç dkk.	2023	<i>Influence of ceramic waste powder on shear performance of environmentally friendly reinforced concrete beams</i>	Balok beton bertulang dengan CWP (10%, 20%, 30%) dan variasi spasi sengkang
8	Aksoyulu dkk.	2023	<i>Application of waste ceramic powder as a cement replacement in reinforced concrete beams</i>	Balok beton bertulang dengan CWP
9	Alshiekh dkk.	2021	<i>Experimental and Numerical Investigation of the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams without Stirrups</i>	Perilaku geser balok tanpa sengkang, pengaruh ukuran agregat dan rasio a/d
10	Romera dkk.	2020	<i>An alternative experimental methodology to determine the diagonal cracking resistance of steel-reinforced concrete beams</i>	Metode pengujian ketahanan retak diagonal dengan <i>strain gauge rosette</i>
11	Aryan dkk..	2021	<i>Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored fiber-reinforced polymer composites</i>	Perkuatan geser balok T dengan FRP
12	AL-Shalif dkk.	2022	<i>Strengthening of shear-critical reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored GFRP fabrics applications</i>	Perkuatan geser balok T dengan GFRP
13	Zhang dkk.	2022	<i>Shear Behavior of T-Shaped Concrete Beams Reinforced with FRP</i>	Perilaku geser balok T dengan FRP embedded
14	Hou dkk.	2023	<i>Experimental and Finite Element Study on the Shear Performance of Existing Super-Span Concrete T-Beams Retrofitted with GFRP</i>	Kinerja geser balok T bentang panjang dengan GFRP
15	Safitri dkk.	2023	<i>Shear Behaviour of High-Strength Self-Compacting Concrete (HSSCC) RC Beam with Metakaolin and Silica Fume</i>	Perilaku geser balok HS-SCC dengan metakaolin 12,5% dan SF (0-15%)
16	Agung & Teguh.	2024	Efek penambahan sika viscorete 1003, silica fume, dan substitusi serbuk kaca pada <i>self compacting concrete</i> (SCC) mutu tinggi	SCC mutu tinggi dengan SF dan serbuk kaca (0-15%)
17	Aziz dkk.	2024	<i>Enhancing sustainability in self-compacting concrete by optimizing blended supplementary cementitious materials</i>	SCC dengan MK dan <i>limestone powder</i> , RSM optimization
18	Wibowo dkk.	2022	Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi dengan Metakaolin 12,5% sebagai Semen dan Variasi <i>Steel Slag</i> sebagai Substitusi Agregat Halus	SCC mutu tinggi dengan metakaolin dan <i>steel slag</i>
19	Hosseinpoor dkk.	2021	<i>New diphasic insight into the restricted flowability and granular blocking of self-consolidating concrete</i>	Passing ability SCC dengan variasi agregat kasar
20	Navarrete dkk.	2021	<i>Multi-layer casting of self-consolidating concrete: Influence of mortar rheology and casting parameters</i>	Bond strength antar lapisan SCC
21	Bheel dkk.	2024	<i>Enhancing performance and sustainability of GGBFS-based self-compacting geopolymer concrete</i>	SCGC dengan MK dan CBA

No.	Penulis	Tahun	Judul Artikel	Fokus Kajian
22	Hamdouni dkk.	2024	<i>Optimizing self-compacting concrete: formulation approach enhanced by entropy method</i>	Optimasi SCC dengan SF, LF, VMA

Pengelompokan ini memberikan gambaran yang sistematis mengenai perkembangan penelitian, mulai dari aspek material hingga perilaku struktur. Karakteristik umum literatur disajikan pada Tabel 2, sedangkan hasil sintesis dan temuan utama setiap penelitian dirangkum pada Tabel 3 sebagai dasar identifikasi *research gap* dan penyusunan arah penelitian lanjutan.

Selain mengidentifikasi kecenderungan penelitian, sintesis literatur juga digunakan untuk menelusuri hubungan antara karakteristik material beton dan respons strukturalnya. Analisis ini menjadi dasar untuk mengevaluasi potensi pengaruh WGP dan SF terhadap perilaku geser serta perkembangan retak pada balok beton bertulang.

HS-SCC konvensional berbasis silica fume

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kinerja *High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC)* dapat dicapai melalui kombinasi pengaturan proporsi campuran dan penggunaan bahan pozzolanik berreaktivitas tinggi. Salah satu material yang paling banyak digunakan adalah *silica fume (SF)*, yang berperan dalam meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton serta kualitas zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone/ITZ*). Wibowo dkk. (2022) melaporkan bahwa pemanfaatan metakaolin dan *steel slag* pada SCC menghasilkan kuat tekan lebih dari 60 MPa, menunjukkan potensi pengembangan SCC menuju kategori beton mutu tinggi.

Peran positif SF terhadap sifat mekanik beton juga dilaporkan oleh Benaicha dkk. (2020), yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar SF cenderung meningkatkan kuat tekan dan modulus elastisitas SCC. Meskipun demikian, penambahan SF dalam jumlah besar dapat menurunkan tingkat *workability*, sehingga

memerlukan penyesuaian dosis *superplasticizer*. Temuan serupa juga disampaikan oleh Choudhary dkk. (2021), yang memperoleh kuat tekan optimum sebesar 62,56 MPa melalui kombinasi SF, *marble slurry powder (MSP)*, dan *fly ash (FA)*. Peningkatan kekuatan tersebut terutama dikaitkan dengan aktivitas pozzolanik SF dan efek pengisian rongga (*filler effect*) yang menghasilkan struktur pasta semen yang lebih padat.

Dari sisi perilaku struktur, manfaat penggunaan SF tidak hanya terlihat pada peningkatan kekuatan material, tetapi juga pada kapasitas elemen beton bertulang dalam menahan gaya geser. Safitri dkk. (2023) menunjukkan bahwa penambahan SF pada balok HS-SCC mampu meningkatkan kapasitas geser ultimit dibandingkan dengan balok tanpa SF. Peningkatan tersebut berkaitan dengan bertambahnya kuat tarik beton dan membaiknya kualitas ITZ, yang berkontribusi terhadap mekanisme transfer tegangan geser serta pengendalian perkembangan retak diagonal.

Beton dengan Waste Glass Powder (WGP)

Dalam beberapa tahun terakhir, *Waste Glass Powder (WGP)* semakin banyak dikaji sebagai alternatif material pengganti sebagian semen karena kandungan silika amorfnya yang tinggi serta potensi aktivitas pozzolanik yang dimilikinya. Selain memberikan manfaat lingkungan melalui pemanfaatan limbah kaca, penggunaan WGP juga berpotensi meningkatkan karakteristik mekanik beton apabila digunakan dalam proporsi yang tepat.

Penelitian Agung & Teguh (2024) menunjukkan bahwa SCC bermutu tinggi yang mengombinasikan SF dan WGP menghasilkan kinerja optimum pada kadar WGP yang relatif rendah. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kontribusi partikel kaca pozzolanik dapat meningkatkan

kekuatan beton, namun penggunaan dalam jumlah yang terlalu besar berpotensi menurunkan kinerja akibat berkurangnya kandungan semen aktif yang berperan dalam proses hidrasi.

Pengaruh *WGP* terhadap perilaku struktural juga telah dilaporkan oleh beberapa peneliti. Mohammed dan Hama (2023) menunjukkan bahwa kombinasi *WGP* dan agregat plastik dapat meningkatkan kapasitas beban ultimit, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi pada balok beton bertulang. Sementara itu, Yassen dkk. (2023) menemukan bahwa penggunaan *WGP* dalam proporsi tertentu mampu meningkatkan kapasitas beban ultimit dibandingkan dengan balok kontrol. Peningkatan tersebut dikaitkan dengan pembentukan produk hidrasi tambahan yang memperkuat ikatan antara pasta semen dan agregat.

Namun demikian, tidak semua penelitian menunjukkan tren peningkatan kinerja. Karalar dkk. (2025) melaporkan bahwa penggunaan *WGP* pada kadar tinggi dapat menyebabkan penurunan kapasitas geser, terutama pada balok dengan jarak sengkang yang lebih besar. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas *WGP* sangat dipengaruhi oleh proporsi penggunaannya serta interaksinya dengan parameter struktur lainnya.

Perilaku geser balok beton bertulang

Kapasitas geser balok beton bertulang dipengaruhi oleh kombinasi faktor material dan faktor geometrik. Selain kuat tekan beton, parameter seperti rasio bentang geser terhadap tinggi efektif (a/d), konfigurasi tulangan geser, dan karakteristik agregat turut berperan dalam menentukan mekanisme transfer gaya geser serta pola keruntuhan.

Penelitian Özkılıç dkk. (2023) menunjukkan bahwa perubahan jenis dan proporsi material pengganti semen dapat mempengaruhi kapasitas geser balok, terutama ketika dikombinasikan dengan variasi spasi sengkang. Penurunan kapasitas geser menjadi lebih signifikan pada balok dengan

jarak sengkang yang lebih besar, yang menunjukkan pentingnya kontribusi tulangan geser dalam mengendalikan perkembangan retak diagonal.

Selain faktor material, rasio a/d juga merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap perilaku geser. Alshiekh dkk. (2021) melaporkan bahwa pengaruh ukuran agregat maksimum terhadap kapasitas geser menjadi lebih dominan pada balok dengan rasio a/d yang rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme *aggregate interlock* dan transfer geser antarbidang retak berkontribusi secara berbeda, bergantung pada konfigurasi struktur yang digunakan.

Di sisi lain, Romera dkk. (2020) mengembangkan pendekatan eksperimental berbasis *Rosette Strain Gauge (RSG)* untuk mengidentifikasi terbentuknya retak diagonal secara lebih akurat. Metode ini memberikan alternatif yang lebih objektif dibandingkan dengan pengamatan visual dalam menentukan beban retak diagonal awal pada pengujian balok beton bertulang.

Metode uji geser balok

Pengujian perilaku geser pada balok beton bertulang umumnya dilakukan menggunakan skema pembebanan empat titik (*four-point loading*) dengan variasi rasio a/d untuk mengendalikan mode keruntuhan yang diharapkan. Rasio a/d sekitar 3 banyak digunakan karena mampu menghasilkan kondisi yang didominasi oleh keruntuhan geser sebelum terjadinya keruntuhan lentur.

Dalam pengujian geser, beberapa parameter utama yang umumnya diamati meliputi *first cracking load*, pola dan propagasi retak diagonal, respons beban–lendutan, kekakuan, daktilitas, serta kapasitas geser ultimit. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tidak hanya kekuatan maksimum balok, tetapi juga respons pasca-retak dan kemampuan elemen dalam mempertahankan kinerja struktur setelah terbentuknya retak geser.

Pembahasan

Perbandingan kinerja balok HS-SCC konvensional dengan HS-SCC berbasis WGP-SF

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa peningkatan kinerja *High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC)* dapat dicapai melalui dua pendekatan utama, yaitu optimasi campuran konvensional untuk memperoleh kekuatan awal yang tinggi dan penggunaan material pozzolanik sebagai pengganti sebagian semen untuk meningkatkan keberlanjutan serta kinerja jangka panjang. Dalam konteks ini, *silica fume (SF)* dan *Waste Glass Powder (WGP)* menjadi dua material yang menunjukkan potensi signifikan untuk diaplikasikan pada *HS-SCC*.

Secara umum, *HS-SCC* konvensional memiliki keunggulan dalam menghasilkan kuat tekan awal dan modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu memberikan kekakuan struktur yang baik pada umur beton yang relatif lebih muda. Namun demikian, penggunaan semen dalam jumlah besar menyebabkan tingkat keberlanjutan material menjadi relatif rendah. Sebaliknya, pemanfaatan *SF* mampu meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton melalui kombinasi aktivitas pozzolanik dan efek pengisian rongga (*filler effect*), sehingga meningkatkan kuat tekan, kuat tarik, dan kapasitas geser. Meskipun demikian, penambahan *SF* dalam jumlah tertentu dapat mengurangi *workability*, sehingga memerlukan penyesuaian penggunaan *superplasticizer*.

Di sisi lain, *WGP* menawarkan manfaat yang lebih besar dari aspek lingkungan karena memanfaatkan limbah kaca sebagai bahan penyusun beton. Pada kadar penggantian yang moderat, *WGP* mampu mempertahankan, bahkan meningkatkan, sifat mekanik beton melalui pembentukan produk hidrasi tambahan. Namun, efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh proporsi penggunaannya serta interaksinya dengan parameter struktur lainnya. Apabila

digunakan secara berlebihan, *WGP* berpotensi menurunkan kekuatan beton akibat berkurangnya kandungan semen aktif yang berperan dalam proses hidrasi.

Dari perspektif perilaku geser, literatur menunjukkan bahwa peningkatan kuat tarik beton dan kualitas *interfacial transition zone (ITZ)* berkontribusi langsung terhadap peningkatan kapasitas geser serta pengendalian perkembangan retak diagonal. Temuan Safitri dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan *SF* pada balok *HS-SCC* mampu meningkatkan kapasitas geser secara signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa perbaikan mikrostruktur beton tidak hanya berpengaruh terhadap sifat material, tetapi juga terhadap mekanisme transfer tegangan geser melalui *aggregate interlock* dan aksi pada tulangan.

Sementara itu, hasil penelitian Karalar dkk. (2025) menunjukkan bahwa pengaruh *WGP* terhadap kapasitas geser tidak dapat dipisahkan dari konfigurasi tulangan geser yang digunakan. Penurunan kapasitas geser yang lebih besar pada balok dengan spasi sengkang yang lebar menunjukkan bahwa kontribusi *WGP* terhadap ketahanan geser perlu dievaluasi bersama parameter struktur lainnya. Oleh karena itu, hubungan antara karakteristik material berbasis *WGP* dan respons struktural balok masih memerlukan kajian yang lebih komprehensif.

Implikasi karakteristik material terhadap perilaku struktur

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa perubahan karakteristik material akibat penggunaan *Silica Fume (SF)* dan *Waste Glass Powder (WGP)* berpotensi memberikan pengaruh langsung terhadap respons struktural balok beton bertulang. Peningkatan kuat tekan, kuat tarik, dan kualitas *interfacial transition zone (ITZ)* yang dilaporkan dalam berbagai penelitian diperkirakan dapat meningkatkan kapasitas transfer tegangan geser, menunda terbentuknya retak diagonal awal, serta meningkatkan ketahanan struktur terhadap

perkembangan retak setelah retak pertama terbentuk.

Selain itu, perubahan sifat mekanik beton juga berpotensi memengaruhi respons beban–lendutan, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas geser ultimit balok. Meskipun hubungan antara karakteristik material dan kinerja struktur telah banyak dibahas secara teoritis, bukti eksperimental yang secara langsung menghubungkan hasil optimasi campuran *HS-SCC* berbasis *WGP-SF* dengan perilaku geser balok beton bertulang masih sangat terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memverifikasi sejauh mana peningkatan kinerja material dapat diterjemahkan menjadi peningkatan kinerja struktural pada elemen balok.

Kesenjangan penelitian

Berdasarkan hasil kajian literatur, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak diteliti dan memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui penelitian eksperimental. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada evaluasi sifat material, seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, dan *workability*, sedangkan penelitian yang secara khusus membahas perilaku geser balok *HS-SCC* masih relatif terbatas. Kondisi ini menjadi lebih nyata pada beton yang mengombinasikan *WGP* dan *SF* sebagai bahan pengganti sebagian semen.

Selain itu, kajian yang mengevaluasi pengaruh kombinasi *WGP* dan *SF* terhadap mekanisme transfer geser, perkembangan retak diagonal, degradasi kekakuan, serta daktilitas balok beton bertulang masih sangat terbatas. Variasi parameter penting seperti persentase *WGP*, kadar *SF*, rasio bentang geser terhadap tinggi efektif (a/d), dan rasio tulangan sengkang umumnya diteliti secara terpisah, sehingga belum memberikan pemahaman yang menyeluruh mengenai interaksi antarparameter tersebut.

Kesenjangan penelitian lainnya terletak pada belum tersedianya studi eksperimental yang membandingkan secara langsung kinerja geser balok *HS-SCC* konvensional

dan balok *HS-SCC* berbasis *WGP-SF* dengan geometri, konfigurasi tulangan, serta kondisi pembebanan yang identik. Padahal, perbandingan langsung tersebut sangat penting untuk menilai sejauh mana optimasi material berkelanjutan dapat diterjemahkan menjadi peningkatan atau perubahan perilaku struktur. Oleh karena itu, penelitian eksperimental terintegrasi diperlukan untuk mengevaluasi *first cracking load*, propagasi retak diagonal, respons beban–lendutan, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas geser ultimit sebagai indikator utama kinerja balok.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC)* konvensional memiliki keunggulan dalam menghasilkan kuat tekan dan modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu memberikan kekakuan struktur yang baik pada umur beton relatif muda. Di sisi lain, penggunaan *Silica Fume (SF)* dan *Waste Glass Powder (WGP)* sebagai pengganti sebagian semen menunjukkan potensi untuk meningkatkan keberlanjutan material sekaligus mempertahankan bahkan meningkatkan kinerja mekanik beton apabila digunakan dalam proporsi yang sesuai. Berbagai penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa perbaikan mikrostruktur beton akibat aktivitas pozzolanik *SF* dan *WGP* berkontribusi terhadap peningkatan kuat tarik, kualitas *interfacial transition zone (ITZ)*, serta ketahanan terhadap mekanisme transfer tegangan geser.

Hasil sintesis literatur mengindikasikan bahwa perubahan karakteristik material berpotensi memengaruhi respons struktural balok beton bertulang, khususnya yang berkaitan dengan kapasitas geser, pembentukan retak diagonal, respons beban–lendutan, kekakuan, dan daktilitas. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang tersedia masih berfokus pada sifat material atau perilaku lentur, sehingga hubungan langsung antara

optimasi campuran *HS-SCC* berbasis *WGP-SF* dan kinerja geser elemen struktur belum dapat dijelaskan secara komprehensif.

Kajian ini juga menunjukkan bahwa penelitian mengenai perilaku geser balok *HS-SCC* yang mengombinasikan *WGP* dan *SF* masih sangat terbatas, terutama yang melibatkan variasi rasio bentang geser terhadap tinggi efektif (a/d), konfigurasi tulangan geser, serta evaluasi parameter kinerja seperti *first cracking load*, propagasi retak diagonal, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas geser ultimit. Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental yang membandingkan secara langsung balok *HS-SCC* konvensional dan balok *HS-SCC* berbasis *WGP-SF* pada kondisi geometri, penulangan, dan pembebanan yang setara. Penelitian tersebut diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana hasil optimasi material berkelanjutan dapat diterjemahkan menjadi peningkatan kinerja struktural pada elemen balok beton bertulang.

Daftar Pustaka

- Agung, A. P., & Teguh, M. (2024). Efek penambahan sika viscorete 1003, silica fume, dan substitusi serbuk kaca pada self-compacting concrete (SCC) mutu tinggi. Universitas Islam Indonesia.
- Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Arslan, M. H. (2023). Application of waste ceramic powder as a cement replacement in reinforced concrete beams toward sustainable usage in construction. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02444.
- Alshiekh, R., Wardeh, G., Hasan, H., & Debbaneh, N. (2021). Experimental and Numerical Investigation of the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams without Stirrups.
- AL-Shalif, S. A. H., Akin, A., Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2022). Strengthening of shear-critical reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored GFRP fabrics applications. *Structures*, 44, 809-827.
- Aryan, H., Gencturk, B., & Alkhdaji, T. (2023). Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Building Engineering*, 73, 106812.
- Aziz, A., Mehboob, S. S., Tayyab, A., Khan, D., Hayyat, K., Ali, A., & Qureshi, Q. B. I. L. (2024). Enhancing sustainability in self-compacting concrete by optimizing blended supplementary cementitious materials. *Scientific Reports*, 14(1), 12326.
- Benaicha, M., Roguiez, X., Jalbaud, O., Burtschell, Y., & Hafidi Alaoui, A. (2020). Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 103-110.
- Bheel, N., Alwetaishi, M., Jac, I. A., Syamsir, A., Alraeeini, A. S., Waheeb, S. A., Alkhattabi, L., & Benjeddou, O. (2024). Enhancing performance and sustainability of GGBFS-based self-compacting geopolymer concrete blended with coal bottom ash and metakaolin by using RSM modelling. *Scientific Reports*, 14(1), 19754.
- Choudhary, R., Gupta, R., Nagar, R., & Jain, A. (2021). Mechanical and abrasion resistance performance of silica fume, marble slurry powder, and fly ash amalgamated high strength self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 269, 121282.
- Hama, S. M., Mahmoud, A. S., & Yassen, M. M. (2019). Flexural behavior of reinforced concrete beam incorporating waste glass powder. *Structures*, 20, 510-518.
- Hamdouni, S., Benaicha, M., & Alaoui, A. H. (2024). Optimizing self-compacting concrete: formulation approach enhanced by entropy method. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 63.
- Hosseinpoor, M., Koura, B. I. O., & Yahia, A. (2021). New diphasic insight into the restricted flowability and granular blocking of self-consolidating concrete: Effect of morphological characteristics of coarse aggregate on passing ability of SCC. *Construction and Building Materials*, 308, 125001.
- Hou, D., Hu, T., & Zhang, G. (2023). Experimental and Finite Element Study on the Shear Performance of Existing Super-Span Concrete T-Beams Retrofitted with Glass Fiber-Reinforced Plastic. *Sustainability*, 15(3), 2768.
- Karalar, M., Başaran, B., Aksoylu, C., Zeybek, Ö., Althaqafi, E., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Umiye, O. A., & Özkılıç, Y. O. (2025). Utilizing recycled glass powder in reinforced concrete beams: comparison of shear performance. *Scientific Reports*, 15(1), 6919.
- Mohammed, T. K., & Hama, S. M. (2023). Effect of combination of waste glass powder and plastic aggregate on structural behavior of reinforced concrete beams. *Structures*, 52, 83-103.

- Navarrete, I., Lopez, M., & Kurama, Y. (2021). Multi-layer casting of self-consolidating concrete: Influence of mortar rheology and casting parameters on the inter-layer bond strength. *Construction and Building Materials*, 303, 124492.
- Özkılıç, Y. O., Althaqafi, E., Bahrami, A., Aksoylu, C., Karalar, M., Ozdoner, N., Shcherban, E. M., Stel'makh, S. A., Beskopylny, A., & Thomas, B. S. (2023). Influence of ceramic waste powder on shear performance of environmentally friendly reinforced concrete beams. *Scientific Reports*, 14(1), 10401.
- Romera, J. M., Marcos, I., Skaf, M., & Ortega-Lopez, V. (2020). An alternative experimental methodology to determine the diagonal cracking resistance of steel-reinforced concrete beams.
- Safitri, E., Wibowo, Saifullah, H. A., & Septian, F. G. (2023). Shear Behaviour of High-Strength Self-Compacting Concrete (HSSCC) RC Beam with Metakaolin and Silica Fume. *E3S Web of Conferences*, 445, 01016.
- Wibowo, W., Purwanto, P., & Syuja, M. N. (2022). Kajian Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas Pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi Dengan Metakaolin 12,5% Sebagai Semen Dan Variasi Steel Slag Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 222.
- Yassen, M. M., Hama, S. M., & Mahmoud, A. S. (2023). Shear behavior of reinforced concrete beams incorporating waste glass powder as partial replacement of cement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(5), 2194-2209.
- Zhang, Y., Li, N., Wang, Q., Li, Z., & Qin, X. (2022). Shear Behavior of T-Shaped Concrete Beams Reinforced with FRP. *Buildings*, 12(12), 2062.