

SILICA FUME SEBAGAI BAHAN PENGIKAT TAMBAHAN BETON: TINJAUAN SISTEMASTIS PENINGKATAN KINERJA DAN KEBERLAJUTAN

Ahmad Ridhani Noorfauzi (ahmadridhani@politala.ac.id)

Septia Rona Puspita Gaby (septia@politala.ac.id)

Taufik Abdullah Attamimi (taufik@politala.ac.id)

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji efektivitas *silica fume* sebagai bahan pengikat tambahan (SCMs) melalui pendekatan *systematic literature review* dengan metode *PRISMA*. Sebanyak 12 artikel dari rentang tahun 2020–2024 dianalisis setelah disaring dari total 50 artikel yang teridentifikasi pada database *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Springer*, dan *IEEE Xplore*. Ditemukan bahwa penggunaan *silica fume* dalam proporsi 10–15% terhadap berat semen secara konsisten meningkatkan performa beton pada berbagai aplikasi. Peningkatan kuat tekan tertinggi tercatat sebesar 20,14%, sedangkan kuat tarik belah dan kuat lentur masing-masing meningkat hingga 12,73% dan 13,74%. Efektivitas ini dijelaskan melalui reaksi pozzolan yang menghasilkan gel C-S-H sekunder serta efek pengisi fisik yang memperhalus pori dan memperkuat mikrostruktur. Mayoritas studi berfokus pada beton berpori, menandakan urgensi dalam pengembangan infrastruktur ramah lingkungan, khususnya dalam manajemen air permukaan. Selain itu, permeabilitas berkurang secara signifikan dan durabilitas terhadap siklus beku-cair meningkat. Penggunaan *silica fume* sebagai produk sampingan industri ferrosilikon dinilai relevan untuk mendukung reduksi limbah dan emisi karbon. Disarankan pemanfaatan *silica fume* 10–15% disertai *superplasticizer* untuk mencapai performa optimal dalam praktik konstruksi berkelanjutan.

Kata Kunci: *Silica Fume*, Beton Berkelanjutan, Bahan Pengikat Tambahan, Beton Berpori, Tinjauan Studi Sistematis

ABSTRACT

This research was conducted to assess the effectiveness of silica fume as a supplementary cementitious material (SCMs) through a systematic literature review approach using the PRISMA method. 12 articles from 2020-2024 were analysed after being screened from 50 articles identified on Google Scholar, ScienceDirect, Springer, and IEEE Xplore databases. It was found that using silica fume in the proportion of 10-15% by weight of cement consistently improved concrete performance in various applications. The highest increase in compressive strength was recorded at 20.14%, while split tensile and flexural strengths increased by 12.73% and 13.74%, respectively. This effectiveness is explained through pozzolanic reactions that produce secondary C-S-H gels as well as the effect of physical fillers that refine pores and strengthen the microstructure. The majority of studies focus on porous concrete, signalling the urgency in the development of green infrastructure, particularly in surface water management. In addition, permeability is significantly reduced and durability against freeze-thaw cycles is increased. The use of silica fume as a by-product of the ferrosilicon industry is considered relevant to support waste reduction and carbon emissions. It is recommended to use 10-15% silica fume with superplasticiser to achieve optimum performance in sustainable construction practices.

Key Words: *Silica Fume*, Sustainable Concrete, Supplementary Cementitious Materials, Pervious Concrete, Systematic Literature Review

PENDAHULUAN

Industri konstruksi global menghadapi tantangan yang kompleks dalam upaya mengurangi dampak lingkungan tanpa mengurangi kualitas material bangunan. Beton, sebagai material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia, memerlukan inovasi berkelanjutan untuk memenuhi standar kinerja yang semakin tinggi dan dampak lingkungan yang semakin ketat. Salah satu pendekatan yang mendapat perhatian luas dalam penelitian dan pengembangan teknologi beton modern adalah pemanfaatan bahan tambahan semen (*supplementary cementitious materials/SCMs*). Penggunaan *SCMs* dinilai mampu meningkatkan performa beton sekaligus berkontribusi terhadap keberlanjutan, seperti pengurangan karbon dan pemanfaatan limbah industri.

Silica fume merupakan produk sampingan dari proses produksi ferrosilikon dan silikon, telah menjadi fokus penting dalam penelitian di bidang teknik sipil karena perannya sebagai bahan pengikat tambahan (*SCMs*) yang efektif dalam meningkatkan kinerja beton. Material ini memiliki ukuran partikel yang sangat halus, berada pada skala nano hingga mikro, serta menunjukkan reaktivitas pozzolan yang tinggi. Sifat tersebut memungkinkan *silica fume* untuk mengisi pori-pori kapiler dalam matriks beton secara efisien dan bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen, sehingga membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Berdasarkan *state of the art* penelitian terkini, *silica fume* tidak hanya berfungsi sebagai pengisi fisik (*filler*), tetapi juga bertindak sebagai aktivator kimia yang berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan kekuatan mekanik, durabilitas, dan ketahanan beton terhadap pengaruh lingkungan agresif.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh *silica fume* terhadap berbagai sifat beton. Wang et al. (2020) meneliti penggunaan *silica fume* sebagai *foam cell stabilizer* dalam *foamed concrete* dan menemukan bahwa penambahan *silica fume* pada tahap *liquid foaming* menghasilkan stabilitas volumetrik yang lebih baik dibandingkan penambahan pada tahap lain. Dalam konteks beton porous, beberapa penelitian menunjukkan hasil yang beragam. Bilal et al. (2021) mengkaji pengaruh *silica fume*, metakaolin, dan *SBR latex* terhadap kinerja kekuatan dan durabilitas beton porous, dan menemukan bahwa penambahan 10% material pengikat tambahan memberikan hasil optimal untuk ketahanan terhadap siklus beku-cair dan pelindian kalsium. Sementara itu, Seenii et al. (2023) melaporkan bahwa penggantian semen dengan *silica fume* hingga 15% dapat meningkatkan kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur.

Tinjauan literatur ini memberikan nilai kebaruan dalam beberapa aspek. Pertama, penelitian ini menyediakan analisis komprehensif dan terstruktur mengenai penggunaan *silica fume* dalam berbagai jenis aplikasi beton, mulai dari beton konvensional hingga beton khusus seperti beton porous dan beton busa. Kedua, tinjauan ini mengintegrasikan aspek kinerja teknis dengan pertimbangan keberlanjutan lingkungan, memberikan perspektif holistik yang belum banyak dilakukan dalam penelitian sebelumnya. Tinjauan ini juga menyediakan analisis kuantitatif terhadap rentang optimal penggunaan *silica fume* berdasarkan sintesis dari berbagai studi, yang dapat menjadi panduan praktis bagi praktisi industri.

Dari perspektif keberlanjutan, pemanfaatan *silica fume* dalam campuran beton memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan limbah industri dengan mengalihkan residu proses ferrosilikon menjadi material konstruksi bernilai tambah. Secara ekonomi, optimalisasi penggunaan *silica fume* berpotensi menurunkan kebutuhan semen dalam campuran beton, yang pada gilirannya dapat mengurangi biaya produksi serta emisi karbon yang dihasilkan oleh industri

semen, sebagai salah satu penyumbang emisi terbesar di sektor konstruksi. Dengan demikian, integrasi *silica fume* dalam teknologi beton tidak hanya memberikan keuntungan teknis, tetapi juga mendukung pengembangan sistem konstruksi yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan ekonomis dalam jangka panjang.

TINJAUAN PUSTAKA

Silica Fume (SF)

Silica fume (SF) merupakan produk sampingan dari proses industri ferrosilikon dan silikon yang telah mendapat perhatian luas sebagai salah satu bahan tambahan semen (*supplementary cementitious material/SCM*) dalam pengembangan teknologi beton modern. Menurut Hamada et al. (2023), *silica fume* dihasilkan dalam jumlah besar sebagai limbah industri, namun memiliki potensi signifikan untuk dimanfaatkan kembali dalam produksi beton berkinerja tinggi (*high-performance concrete*) maupun beton dengan kinerja ultra tinggi (*ultra-high-performance concrete/UHPC*), sehingga dapat mengurangi beban pencemaran lingkungan. Karakteristik fisiknya yang sangat halus, dengan ukuran partikel berkisar antara 0,1–1,0 μm , memungkinkan *silica fume* berperan sebagai *filler* yang efektif dalam mengisi pori-pori mikro dalam matriks beton. Selain itu, kandungan silika amorf yang tinggi, yaitu lebih dari 85%, memberikan reaktivitas pozzolan yang sangat baik, yang berkontribusi pada pembentukan produk hidrasi sekunder dan peningkatan sifat mekanik serta durabilitas beton.

Mekanisme kerja *silica fume* dalam beton melibatkan dua aspek utama, yaitu efek fisik dan efek kimia. Dari sisi fisik, partikel *silica fume* yang sangat halus berperan sebagai *filler* mikro yang mampu mengisi ruang kosong di antara partikel semen, sehingga menghasilkan matriks beton yang lebih padat dan homogen. Efek ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan mekanik dan pengurangan porositas total. Secara kimia, *silica fume* menunjukkan reaktivitas pozzolan yang tinggi dengan bereaksi terhadap kalsium hidroksida (Ca(OH)_2), yaitu produk samping dari reaksi hidrasi semen, membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder. Pembentukan C-S-H tambahan ini tidak hanya meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga memperbaiki struktur pori serta menurunkan permeabilitas, sehingga meningkatkan durabilitas beton terhadap pengaruh lingkungan yang ekstrem.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review (SLR)* dengan pendekatan *PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)* yang terdiri dari empat tahapan utama, yaitu identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi

Identifikasi Database dan Sumber Pencarian

Database utama dari penelitian ini bersumber dari *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Springer*, dan *IEEE Xplore* dengan menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish* pada rentang waktu 2020-2024. Kata kunci pencarian primer adalah “*silica fume*” dengan diikuti kata kunci pencarian sekunder berupa “*concrete*” OR “*foamed concrete*” OR “*pervious concrete*” OR “*porous concrete*” sebanyak 50 artikel. Kriteria yang diambil adalah artikel eksperimental maupun *review article* yang membahas penggunaan *silica fume* dalam beton yang telah dipublikasi dalam Bahasa Inggris dan Indonesia.

Penyaringan Artikel

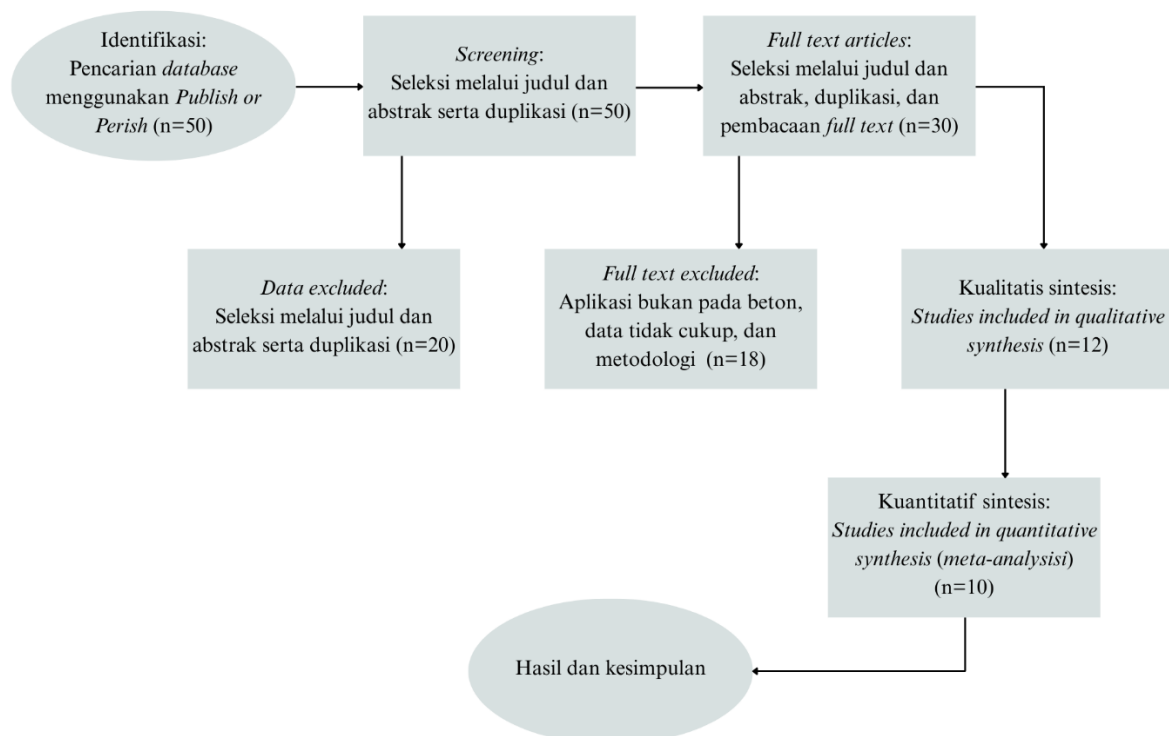
Tahapan seleksi artikel berdasarkan kepada judul dan abstrak dengan menerapkan kriteria inklusi, yaitu artikel eksperimen atau *review* yang relevan, dipublikasikan antara tahun 2020 hingga 2024, ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, tersedia dalam versi full-text, dan memiliki metodologi yang jelas. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut dieliminasi.

Kelayakan Artikel

Tahap kelayakan dilakukan dengan membaca *full text* untuk menilai kualitas metodologi dan relevansi isi. Selanjutnya proses ekstraksi data meliputi informasi bibliografi (penulis, tahun, jurnal, dan DOI), jenis beton yang diteliti, persentase *silica fume* yang digunakan, parameter yang diuji, dan metodologi penelitian, serta hasil utama penelitian dan kesimpulan.

Tahap Inklusi: Artikel yang Direview Lebih Lanjut

Pada tahap inklusi, sebanyak 12 artikel terpilih sebagai sumber utama untuk dianalisis setelah melalui proses seleksi teliti dan terstruktur. Artikel-artikel ini dipilih berdasarkan kesesuaian dengan kriteria inklusi, seperti fokus pada penggunaan *silica fume* dalam beton, kualitas metodologi yang memadai, serta ketersediaan data empiris yang relevan.



Gambar 1. Diagram Alir PRISMA untuk Systematic Literature Review Silica Fume
Sintesis dan Interpretasi Hasil

Identifikasi tema utama meliputi optimasi komposisi, mekanisme perbaikan, aplikasi spesifik, dan aspek keberlanjutan dengan *gap analysis* identifikasi area penelitian yang belum dieksplorasi, keterbatasan studi eksisting, dan rekomendasi penelitian di masa depan. Diperoleh persentase ideal *silica fume* dengan kadar 10%-15% dengan reaksi pozzolan dan perbaikan pori antara beton konvensional dan beton berpori (*pervious concrete*) serta penggunaan material limbah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Studi yang Dianalisis

Studi ini merupakan *systematic literature review* yang menganalisis 12 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dengan eksklusi literatur sebanyak 38 artikel dari total 50 artikel yang teridentifikasi setelah proses tahapan seleksi. Artikel-artikel yang dikeluarkan tidak menunjukkan keragaman geografis, metodologi, dan aplikasi yang memadai untuk memberikan gambaran komprehensif tentang penggunaan *silica fume* dalam berbagai jenis beton. Distribusi yang seimbang antara penelitian fundamental dan aplikatif juga memungkinkan analisis yang holistik terhadap mekanisme kerja dan implementasi praktis *silica fume* sebagai *supplementary cementitious material*.

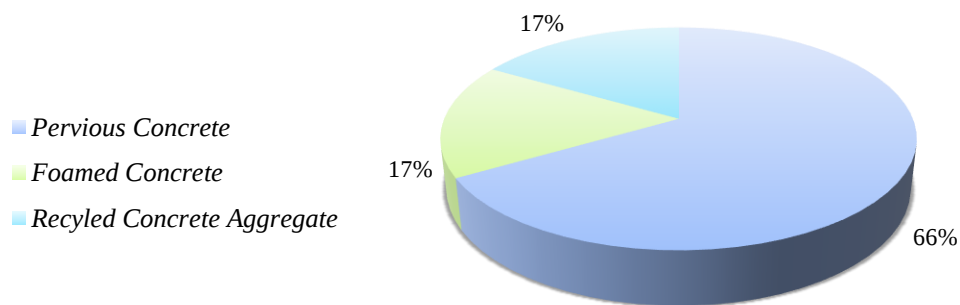
Distribusi artikel berdasarkan tahun publikasi menunjukkan tren peningkatan dalam jumlah penelitian, dengan satu artikel yang dipublikasikan pada tahun 2020, dua artikel masing-masing pada tahun 2021 dan 2022, empat artikel pada tahun 2023, serta tiga artikel pada tahun 2024. Informasi mengenai jumlah artikel berdasarkan tahun publikasi, jenis aplikasi beton, dan lokasi geografis penelitian dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Ringkasan Karakteristik dan Kontribusi Studi yang Dianalisis

No.	Penulis (Tahun)	Negara	Jenis Beton	Silica Fume (%)	Parameter Utama	Kontribusi Utama
1	Wang et al. (2020)	Cina	Foamed Concrete	Various	Stabilitas busa, kekuatan	SF optimal sebagai stabiliser pada tahap <i>liquid foaming</i>
2	Bilal et al. (2021)	Cina	Pervious Concrete	10%	Durabilitas, <i>freeze-thaw</i>	Peningkatan ketahanan siklus beku-cair dengan 10% SCMs
3	Sharma et al. (2021)	India	Porous Concrete	15%	Workability, permeabilitas	Suhu 10°C optimal, SF 15% maksimal kuat tekan
4	Pradhan & Behera (2022)	India	Pervious Concrete	4-12%	Abrasi, permeabilitas	Peningkatan performa abrasi pada rentang 4-12% SF
5	Tarangini et al. (2022)	India	Pervious Concrete	3% nano silika	Frost Resistance	Faktor ketahanan >70% dengan 3% nano-silika
6	Seenii et al. (2023)	India	Pervious Concrete	10-15%	Sifat fisik, mekanik, hidrologis	Peningkatan kuat tekan 20,14% pada 15% SF

7	Nabila et al. (2023)	Indonesia	<i>Porous Concrete</i>	15%	Karakteristik <i>porous concrete</i>	Kuat tekan tertinggi 21,327 MPa dengan 15% <i>SF</i>
8	Wibowo et al. (2023)	Indonesia	<i>Reactive Powder Concrete</i>	15%	Permeabilitas dengan variasi pasir kuarsa	Koefisien permeabilitas $1,93 \times 10^{-9} - 1,29 \times 10^{-8}$ cm/s
9	Benemaran et al. (2024)	Iran	<i>Recycled Aggregate Concrete</i>	15%	Kombinas <i>SF</i> dan <i>glass fibre</i>	Skor TOPSIS optimal 0,97803 dengan 15% <i>SF</i> + 2% <i>AR-GF</i>
No.	Penulis (Tahun)	Negara	Jenis Beton	Silica Fume (%)	Parameter Utama	Kontribusi Utama
10	Brasileiro et al. (2024)	Brasil	<i>Pervious Concrete</i>	10%	Agregat daur ulang dan <i>SF</i>	40% agregat daur ulang optimal dengan 10% <i>SF</i>
11	Sathiparan et al. (2024)	Sri Lanka	<i>Pervious Concrete</i>	Various	<i>Machine learning prediction</i>	Model <i>XGBoost</i> dengan $R^2 = 0,97$; <i>RMSE</i> = 2,21 MPa
12	Hamada et al. (2023)	Multinegara	<i>Sustainable Concrete</i>	Various	<i>Properties review</i>	Komprehensif reuiu efek <i>SF</i> pada beton berkelanjutan

Berdasarkan jenis aplikasinya, mayoritas studi berfokus pada beton berpori (*pervious/porous concrete*) sebanyak 66,7%, diikuti oleh beton busa (*foamed concrete*) dan beton konvensional/daur ulang masing-masing sebesar 16,7%. Dari segi lokasi geografis, India menyumbang empat artikel, diikuti oleh China dan Indonesia (masing-masing dua artikel), serta Brasil, Iran, Sri Lanka, dan studi multinegara (masing-masing satu artikel).



Gambar 2. Fokus Studi Berdasarkan Jenis Aplikasi Beton dalam Rentang Waktu 2020-2024

Rentang Persentase Silica Fume yang Diteliti

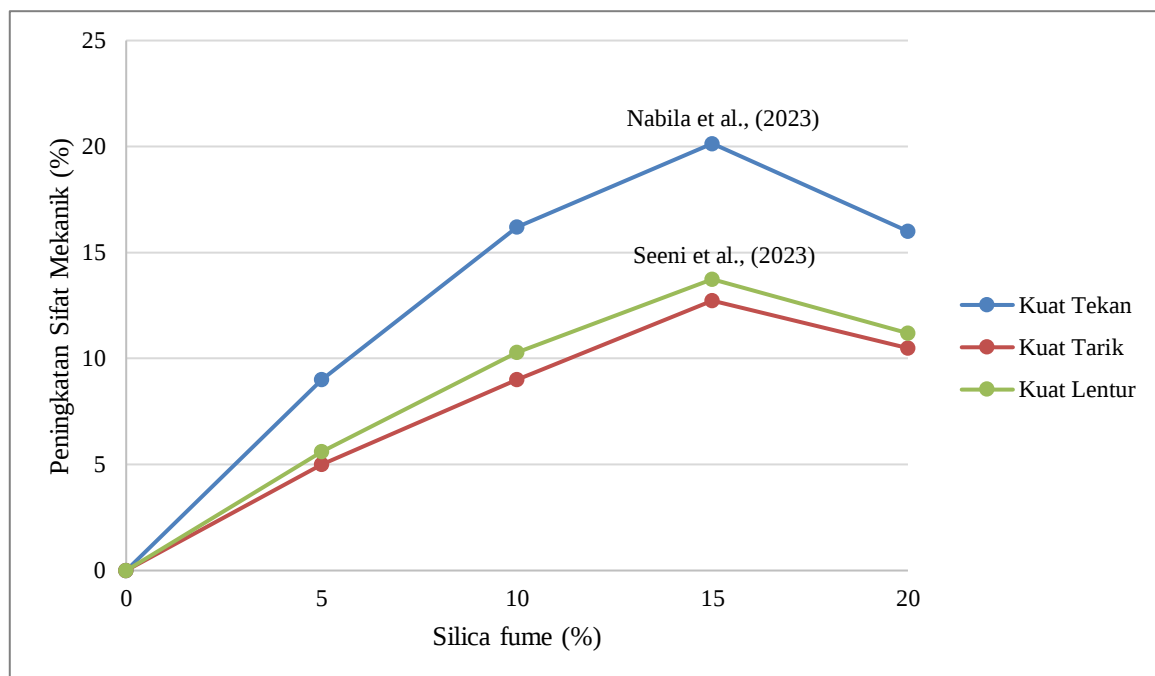
Analisis terhadap komposisi *silica fume* dalam studi yang dianalisis menunjukkan bahwa persentase penggunaannya bervariasi antara 0% (sebagai kontrol) hingga 20%. Rentang optimal yang diidentifikasi adalah antara 10% hingga 15%, dengan persentase paling umum adalah 15%,

sebagaimana ditemukan pada enam dari dua belas studi. Hal ini menunjukkan konsistensi efektivitas penggunaan *silica fume* dalam rentang tersebut terhadap peningkatan performa beton.

Parameter Kinerja yang Dianalisis

Sifat Mekanik

Pada aspek mekanik, peningkatan kuat tekan tertinggi sebesar 20,14% tercatat pada beton berpori dengan 15% *silica fume* (Seeni et al., 2023), sedangkan nilai absolut tertinggi yaitu 21,327 MPa dilaporkan oleh Nabila et al. (2023) pada *porous concrete* dengan komposisi yang sama. Secara umum, kuat tekan meningkat seiring peningkatan kadar *silica fume* hingga 15%, namun menurun setelah melewati batas tersebut. Untuk kuat tarik belah, peningkatan tertinggi mencapai 12,73% dengan penggunaan 15% *silica fume*, dan menunjukkan tren konsisten peningkatan hingga kadar optimal. Kuat lentur juga menunjukkan perbaikan signifikan dengan peningkatan tertinggi sebesar 13,74% pada beton berpori dengan kadar 15% *silica fume* (Seeni et al., 2023).



Gambar 3. Pengaruh Silica Fume Terhadap Sifat Mekanik Beton

Sifat Hidrologis

Dari sisi sifat hidrologis, nilai koefisien permeabilitas berkisar antara $1,93 \times 10^{-9}$ hingga $1,29 \times 10^{-8}$ cm/s (Wibowo et al., 2023), dengan nilai optimal sebesar 1,002 cm/s tercatat pada beton berpori dengan 15% *silica fume* (Nabila et al., 2023). Seluruh nilai tersebut berada dalam standar minimum yang ditetapkan ACI 522R-10 (0,14 cm/s). Porositas optimal berada dalam rentang 15-30%, dengan nilai tercatat 15,605% pada kadar 15% *silica fume*. Ditemukan korelasi terbalik antara porositas dan kuat tekan.

Durabilitas

Dari aspek durabilitas, studi menunjukkan bahwa beton dengan *silica fume* menunjukkan ketahanan terhadap siklus beku-cair yang lebih tinggi dengan *durability factor* >70% pada penggunaan 3% nano-silika (Tarangini et al., 2022). Kombinasi SCMs dalam rentang 10-15% juga memberikan peningkatan signifikan terhadap daya tahan (Bilal et al., 2021). Pada pengujian abrasi menggunakan *Cantabro Abrasion Test*, terjadi peningkatan performa pada rentang 4-12% *silica fume* (Pradhan & Behera, 2022), yang memiliki korelasi positif dengan kekuatan tekan.

Analisis Berdasarkan Jenis Aplikasi

Beton Busa (*Foamed Concrete*)

Dalam aplikasi *foamed concrete*, studi oleh Wang et al. (2020) menemukan bahwa *silica fume* berperan optimal sebagai penstabil busa pada tahap pembentukan awal (*liquid foaming stage*), dengan peningkatan rasio kekuatan terhadap berat terbaik pada tahap F1. Struktur seluler menjadi lebih stabil dan homogen. Penelitian oleh Sharma et al. (2021) menambahkan bahwa suhu pencampuran sebesar 10°C menghasilkan *workability* terbaik dan bahwa kadar *silica fume* sebesar 15% menghasilkan kekuatan tekan maksimum, dengan penurunan permeabilitas seiring peningkatan kandungan *silica fume*.

Beton Berpori (*Pervious Concrete*)

Studi terkait *pervious concrete* menunjukkan tren yang konsisten dalam penggunaan *silica fume* pada rentang 10-15%, yang menghasilkan keseimbangan optimal antara kekuatan dan permeabilitas. Peningkatan durabilitas terhadap siklus beku-cair serta perbaikan mikrostruktur melalui reaksi pozzolan juga dilaporkan secara umum. Validasi menggunakan pendekatan *machine learning* oleh Sathiparan et al. (2024) melalui model *eXtreme Gradient Boosting* (XGBoost) menunjukkan performa prediktif yang tinggi ($R^2 = 0,97$; RMSE = 2,21 MPa), dengan parameter paling berpengaruh adalah kandungan *admixture* dan periode *curing* berdasarkan analisis terhadap 222 dataset.

Recyled Aggregate Concrete

Dalam konteks penggunaan agregat daur ulang, studi oleh Benemaran et al. (2024) melaporkan kombinasi optimal antara 15% *silica fume* dan 2% *glass fiber* (AR-GF) dengan skor TOPSIS sebesar 0,97803. Penelitian ini mencakup 384 sampel beton dengan variasi umur 7 hingga 56 hari dan menunjukkan peningkatan signifikan dalam kuat tekan dan tarik belah.

Sejalan dengan temuan sebelumnya, penelitian oleh Brasileiro et al. (2024) mengonfirmasi efektivitas pemanfaatan agregat daur ulang dalam beton berpori. Studi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan 40% agregat daur ulang dalam campuran menghasilkan performa terbaik pada berbagai parameter yang dianalisis. Dalam kombinasi dengan 10% *silica fume* dan *superplasticizer*, peningkatan proporsi agregat daur ulang hingga 60% justru menyebabkan penurunan signifikan pada kuat tekan dibandingkan dengan beton kontrol. Temuan ini mengindikasikan adanya batas optimum dalam pemanfaatan agregat daur ulang, di mana keseimbangan proporsional antara *silica fume* dan agregat daur ulang menjadi kunci dalam mengoptimalkan kinerja mekanik beton berpori.

Pembahasan

Peningkatan performa beton dengan penambahan *silica fume* (*SF*) dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme utama, yaitu reaksi pozzolan, efek pengisian fisik, dan stabilisasi busa pada aplikasi khusus seperti *foamed concrete*. Reaksi pozzolan terjadi antara silika amorf dalam *SF* dan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen, menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder yang memperkuat matriks semen. Proses ini berkontribusi terhadap pengurangan porositas, peningkatan densitas mikrostruktur, dan perbaikan zona transisi antarfasal (*interfacial transition zone/ITZ*). Selain itu, ukuran partikel *SF* yang sangat halus ($0,1\text{--}0,2\ \mu\text{m}$) memberikan efek pengisian (*filler effect*) terhadap pori-pori makro, meningkatkan kepadatan pengemasan partikel, dan menurunkan jalur permeabilitas.

Pada aplikasi *foamed concrete*, *SF* berfungsi sebagai penstabil busa berbasis partikel (*particle-stabilized foam*) yang memperkuat struktur sel dan mengurangi fenomena koalesensi (proses di mana beberapa partikel bergabung menjadi satu massa yang lebih besar) serta *disproportionation*. Efek ini penting untuk menjaga kestabilan volumetrik dan distribusi pori selama proses *curing*.

Hasil studi menunjukkan bahwa rentang optimal kandungan *SF* untuk peningkatan kinerja beton adalah antara 10% hingga 15% terhadap berat semen. Konsistensi temuan ini terlihat pada berbagai jenis beton: *foamed concrete* (15%), *pervious concrete* (10–15%), dan *recycled aggregate concrete* (15%). Di luar rentang ini, terutama $>15\%$, terjadi penurunan performa akibat peningkatan kebutuhan air, risiko segregasi akibat akumulasi partikel halus, serta potensi penyusutan yang lebih tinggi. Faktor ekonomi juga menjadi pertimbangan, karena biaya penambahan *SF* tidak sebanding dengan peningkatan performa di atas batas optimal tersebut.

Secara aplikasi, dominasi penelitian pada *pervious concrete* (66,7% dari total studi) mencerminkan urgensi terhadap pengelolaan air permukaan dan kebutuhan konstruksi berkelanjutan di wilayah urban. Beton jenis ini menghadapi tantangan dualitas kinerja: kekuatan vs permeabilitas dan durabilitas vs porositas. Penambahan *SF* terbukti membantu mengoptimalkan keseimbangan ini melalui peningkatan kekuatan tekan tanpa pengorbanan besar terhadap permeabilitas, serta peningkatan ketahanan terhadap degradasi lingkungan.

Distribusi geografis studi yang dianalisis menunjukkan konsentrasi tinggi di wilayah Asia-Pasifik, mencerminkan kebutuhan infrastruktur regional dan tantangan iklim spesifik seperti curah hujan tinggi dan risiko banjir. Selain itu, tren integrasi teknologi canggih seperti pembelajaran mesin (*machine learning*) mulai terlihat. Misalnya, penggunaan algoritma *eXtreme Gradient Boosting* (*XGBoost*) dalam prediksi kekuatan beton telah menunjukkan kinerja prediktif yang sangat baik. Di sisi lain, penggunaan *nano-silica* dalam skala laboratorium menunjukkan potensi performa superior melalui rekayasa mikrostruktur, yang menjadi arah potensial penelitian masa depan.

Namun demikian, masih terdapat sejumlah keterbatasan dalam literatur saat ini. Variasi dalam metode pengujian, kondisi perawatan (*curing*), dan usia pengujian menyulitkan proses komparasi antar studi. Studi jangka panjang (>56 hari) serta validasi lapangan masih sangat terbatas. Aspek lingkungan dan ekonomi juga belum banyak dianalisis secara mendalam, misalnya melalui *life cycle assessment* atau analisis biaya-manfaat yang komprehensif.

Implikasi praktis dari temuan ini mencakup rekomendasi desain campuran dengan kandungan *SF* optimal 10–15% dan penggunaan *superplasticizer* untuk menjaga *workability*. Ketersediaan material, konsistensi kualitas *SF*, dan keterampilan teknis tenaga kerja menjadi tantangan implementasi di lapangan. Penelitian lanjutan diharapkan mengarah pada pendekatan pemodelan

multi-skala, pengembangan beton ramah lingkungan berbasis limbah industri lain, serta penerapan konsep *smart concrete* dengan integrasi sensor dan kemampuan penyembuhan diri (kemampuan penutupan retak mikro secara mandiri).

KESIMPULAN

Berdasarkan *systematic literature review* terhadap 12 artikel berkualitas dari rentang tahun 2020-2024, dapat disimpulkan beberapa poin utama sebagai berikut:

1. *Silica fume (SF)* terbukti menjadi *supplementary cementitious material (SCMs)* yang efektif untuk berbagai aplikasi beton dengan dosis optimal 10-15% terhadap berat semen yang memberikan peningkatan performa yang konsisten.
2. *SF* bekerja melalui dua mekanisme utama yaitu reaksi pozzolan yang menghasilkan tambahan *calcium silicate hydrate (C-S-H)* dan efek pengisi fisik yang menghaluskan mikrostruktur serta mengurangi porositas beton.
3. Penggunaan *SF* secara signifikan meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton, serta pada beton berpori mampu mengoptimalkan permeabilitas yang krusial untuk manajemen air permukaan dan konstruksi berkelanjutan.
4. Mayoritas studi menekankan aplikasi *SF* dalam beton berpori, mencerminkan meningkatnya kesadaran lingkungan, tantangan urbanisasi, dan kebutuhan infrastruktur yang adaptif terhadap perubahan iklim.
5. Integrasi pendekatan *machine learning* dalam perancangan campuran dan eksplorasi nanoteknologi seperti nano-silika menunjukkan arah pengembangan riset yang prospektif dan berpotensi tinggi untuk dikembangkan lebih lanjut.

Meski demikian, ditemukan sejumlah kesenjangan penelitian (*research gaps*), antara lain: keterbatasan data performa jangka panjang (lebih dari 56 hari), belum adanya analisis keekonomian secara komprehensif, serta kurangnya standarisasi dalam metode pengujian dan protokol perawatan. Oleh karena itu, studi lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi lebih dalam potensi penuh *silica fume* dalam mewujudkan konstruksi beton yang berkelanjutan (*sustainable concrete construction*).

Daftar Pustaka

- Benemaran, R. S., Esmaeili-Falak, M., & Kordlar, M. S. (2024). Improvement of recycled aggregate concrete using glass fiber and silica fume. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 7(3), 1895–1914. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00313-2>
- Bilal, H., Chen, T., Ren, M., Gao, X., & Su, A. (2021). Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 275, 122124. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122124>
- Brasileiro, K. P. T. V., Nahime, B. de O., Lima, E. C., Alves, M. M., Ferreira, W. P., Santos, I. S. dos, Filho, C. P. B., & Reis, I. C. dos. (2024). Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of pervious concrete. *Journal of Building Engineering*, 82, 108347. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108347>
- Hamada, H. M., Abed, F., Binti Katman, H. Y., Humada, A. M., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Thomas, B. S. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable

- cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8887–8908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.147>
- Nabila, L., Supriyadi, A., & Sutandar, E. (2023). Experimental Study On Increasing The Characteristics Of Porous Concrete With The Addition Of Silica Fume. *SCIREA Journal of Civil Engineering and Building Construction*. <https://doi.org/10.54647/cebc560128>
- Pradhan, S. K., & Behera, N. (2022). Performance assessment of pervious concrete road on strength and permeability by using silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 60, 559–568. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.018>
- Sathiparan, N., Jeyananthan, P., & Subramaniam, D. N. (2024). Silica fume as a supplementary cementitious material in pervious concrete: prediction of compressive strength through a machine learning approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(3), 2963–2977. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00956-z>
- Seeni, B. S., Madasamy, M., Chellapandian, M., & Arunachalam, N. (2023). Effect of silica fume on the physical, hydrological and mechanical properties of pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.473>
- Sharma, A. K., Pandey, S., Jain, A., & Shekhar, S. (2021). Effect of Water Temperature on the Compressive Strength of Silica Fumes based Porous Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2007/1/012071>
- Tarangini, D., Sravana, P., & Srinivasa Rao, P. (2022). Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*, 51, 2185–2189. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.132>
- Wang, X., Huang, J., Dai, S., Ma, B., & Jiang, Q. (2020). Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 237, 117514. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117514>
- Wibowo, W., Safitri, E., & Putri, S. R. S. (2023). Kajian permeabilitas dengan tekanan 1 kg/cm² apda beton bubuk reaktif dengan silica fume 15% dan variasi pasir kuarsa. *Matriks Teknik Sipil*, 11(3), 291–298. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v11i3.76538>