

BAB II

TINJAUN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam beberapa tahun terakhir, fokus penelitian beton modifikasi cenderung mengarah ke penggunaan agregat alternatif dan bahan tambah pozzolan untuk meningkatkan performa mekanik beton, termasuk tarik belah. Misalnya, penelitian menguji variasi komposisi agregat kasar (ukuran 0,5–1 cm dan 1–2 cm) terhadap sifat mekanik beton, meliputi kuat tekan dan kuat belah. Hasil menunjukkan kombinasi 50 % untuk masing-masing ukuran menghasilkan peningkatan kuat tekan dan kuat belah dibandingkan variasi ekstrem lainnya (100:0 atau 0:100) pada umur 28 hari, dengan faktor air semen 0,4 sebagai kontrol (Dasar et al., 2023). Penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa gradasi agregat kasar dapat memengaruhi distribusi tegangan dan jalur retak tarik belah, dan menjadi acuan penting ketika memilih fraksi agregat dalam beton andesit untuk menjaga kontinuitas struktur internal.

Fokus khusus pada agregat andesit sebagai substitusi agregat kasar juga mulai muncul dalam penelitian nasional. Sebagai contoh, studi *“Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan Agregat Kasar Batu Andesit”* (Panjaitan & Harahap, n.d.) meneliti bagaimana kinerja tekan beton bereaksi ketika menggunakan agregat andesit dan pengaruh perendaman dalam air sulfur terhadap degradasi mutu (Panjaitan & Harahap, n.d.-b). Meskipun penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada kuat tekan dan efek lingkungan agresif, hasilnya menunjukkan bahwa andesit mampu mempertahankan mutu tinggi dan bahwa kondisi lingkungan dapat memengaruhi kinerja beton andesit. Penelitian lain yaitu *“Analisis Variasi Ukuran Agregat Batu Andesit Scoria terhadap Hasil Uji ...”* (2021–2022) mengkaji pengaruh ukuran agregat andesit scoria terhadap sifat beton, menyatakan bahwa penggunaan andesit *scoria* secara umum dapat dipertimbangkan sebagai agregat, dan bahwa ukuran agregat memengaruhi distribusi gaya dan kepadatan campuran walau tidak langsung menguji tarik belah atau modifikasi silica fume, penelitian ini memberikan dasar penting untuk

memahami karakteristik andesit sebagai agregat kasar alternatif (Yuliansyah & Sujatmiko, 2019).

Berikutnya, penelitian tentang penggunaan silica fume dalam beton relatif lebih banyak, meskipun seringkali dalam konteks beton normal atau beton ringan, bukan khusus beton andesit. Misalnya, penelitian "*Pengaruh Silica Fume sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Beton*" pada beton mutu tinggi menggunakan variasi 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 %, dan 10 % silica fume menunjukkan bahwa penambahan silica fume mampu menurunkan permeabilitas, memperkecil porositas mikro, dan meningkatkan kuat tekan, terutama pada kadar moderat (Davendra & Trimurtiningrum, 2022b). Namun, peningkatan kadarnya di atas titik optimum cenderung mengurangi workability dan menyebabkan penurunan performa yang tidak diinginkan. Studi eksperimental lain di UGM mengenai beton berpori menunjukkan bahwa penambahan silica fume (3 %, 5 %, 7 %) menurunkan nilai slump secara signifikan, yang mengimplikasikan bahwa penggunaan silica fume menghadirkan tantangan dalam aspek pengerjaan beton (Cahya, 2025).

Penelitian di tingkat nasional juga telah menguji kombinasi pozzolan dengan bahan lain dalam memodifikasi sifat tarik/lentur beton atau mortar. Contohnya, studi "*Pengaruh Penambahan Silica Fume dan Fly Ash terhadap Kuad Lentur Mortar*" (2025) mengevaluasi kombinasi bahan tambah pada mortar dan menunjukkan bahwa struktur mikro yang lebih padat akibat reaksi pozzolan membantu peningkatan kuat lentur dalam mortar modifikasi (Eniarti et al., 2025). Walaupun bukan langsung pada beton andesit dan uji tarik belah, prinsip mekanisme padat mikrostruktur dan pengaruh kombinasi bahan tambah dapat diadaptasi dalam kerangka penelitian ini.

Penelitian tentang agregat alternatif dan substitusi juga dapat dijadikan pembandingan, terutama untuk memahami perilaku modifikasi beton terhadap agregat non-konvensional. Misalnya, penelitian (Rahma et al., 2024) "*Optimasi Komposisi Silica Fume dalam Meningkatkan Mutu Beton Agregat Daur Ulang*" menguji kekuatan tekan beton dengan substitusi agregat daur ulang dan silica fume. Hasilnya menunjukkan bahwa kadar silica fume sekitar 12 % memberikan

kekuatan tertinggi dibanding variasi lainnya. Walaupun objeknya adalah agregat daur ulang, mekanisme pengisian mikrostruktur dan efek pozzolan dari silica fume tetap relevan sebagai dasar mekanistik untuk prediksi kuat tarik belah juga dalam kasus agregat andesit.

Secara sintetis, kajian-kajian terdahulu tersebut mengarah pada beberapa kesimpulan penting: bahwa struktur agregat (gradasi dan ukuran) mempengaruhi jalur retak dan pembebanan tarik belah (Dasar Amry, Tanriwali Agung Gunawan, et al., 2023) bahwa andesit sebagai agregat kasar memiliki potensi mekanik yang baik dan relatif stabil di kondisi lingkungan tertentu (Panjaitan & Harahap, n.d.-c) dan bahwa silica fume sebagai bahan tambah mampu meningkatkan densitas mikro dan mengurangi porositas dalam beton, (Davendra & Trimurtiningrum, 2022c). Namun demikian, sedikit penelitian yang secara eksplisit menggabungkan beton andesit + variasi silica fume pada uji tarik belah di skala laboratorium lokal. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengisi celah tersebut dengan menyajikan data empiris, menentukan proporsi optimum, dan memverifikasi mekanisme peningkatan tarik belah melalui mikrostruktur pada konteks lokal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian beton

Beton merupakan material komposit yang terbentuk dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan (admixture) yang mengalami proses hidrasi (Putra, n.d.) Kekuatan utama beton terletak pada kemampuannya menahan beban tekan, namun beton memiliki kelemahan dalam menahan gaya tarik. Kekuatan tarik belah (split tensile strength) umumnya berkisar antara 8–15 % dari kuat tekan beton (Mujiyati et al., n.d.). Kelemahan inilah yang menjadi dasar perlunya penambahan bahan aditif untuk memperbaiki struktur mikro beton agar lebih mampu menahan retak akibat gaya tarik.

a. Kelebihan beton

- 1. Kekuatan tekan yang tinggi**

- a. Beton memiliki kekuatan tekan (*compressive strength*) yang sangat baik, sehingga cocok digunakan pada struktur yang menahan beban besar seperti pondasi, kolom, balok, dan pelat lantai.
 - b. Kekuatan tekan bisa mencapai lebih dari 60 MPa untuk beton mutu tinggi.
2. Daya Tahan Lama (*Durability*)
- a. Beton tahan terhadap cuaca ekstrem, air, dan api.
 - b. Jika dibuat dan dirawat dengan benar, umur beton bisa mencapai 50–100 tahun atau lebih.
3. Bisa Dibentuk Sesuai Kebutuhan
- a. Saat masih segar, beton mudah dibentuk menjadi berbagai bentuk (balok, kolom, kubah, lantai, jembatan, dll).
 - b. Sangat fleksibel untuk desain arsitektur dan struktur.
4. Bahan Lokal dan Ekonomis
- a. Bahan penyusunnya (semen, air, pasir, kerikil) mudah didapat di berbagai tempat.
 - b. Harga relatif lebih murah dibandingkan baja atau material konstruksi lain.
5. Tahan Api dan Air
- a. Tidak mudah terbakar dan memiliki ketahanan yang baik terhadap panas tinggi.
 - b. Beton juga tahan terhadap air, cocok untuk bendungan, jembatan, pelabuhan, atau basement.
6. Perawatan Rendah
- Beton tidak memerlukan perawatan rutin seperti pelapisan cat antikorosi, berbeda dengan baja.
- b. Kelemahan beton
 1. Kekuatan Tarik Rendah

Beton kuat terhadap tekan, tetapi lemah terhadap tarik dan lentur. Karena itu, sering diperkuat dengan baja tulangan (beton bertulang/reinforced concrete).
 2. Berat Sendiri yang Besar

Berat jenis beton sekitar 2.400 kg/m³, membuatnya cukup berat. Hal ini meningkatkan beban struktur dan biaya pondasi.

3. Mudah Retak

Retak bisa terjadi akibat susut, suhu, atau beban berlebih. Oleh karena itu, perlu kontrol kualitas dan perawatan (curing) yang baik.

4. Proses Pengerjaan Relatif Lama

Beton butuh waktu untuk mengeras dan mencapai kekuatan penuh (biasanya 28 hari). Sehingga, tidak cocok untuk pekerjaan yang membutuhkan hasil cepat.

5. Sulit Diperbaiki

- a. Jika terjadi kerusakan struktural, perbaikan beton bisa rumit dan mahal.
- b. Permukaan beton yang sudah mengeras sulit diubah atau dimodifikasi.

6. Ramah Lingkungan yang Terbatas

Produksi semen menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar. Namun, hal ini bisa dikurangi dengan penggunaan bahan tambahan seperti fly ash atau silica fume.

2.2.2 Material Penyusun Beton

a. Semen portland

Semen adalah pengikat utama yang menyatukan agregat melalui hidrasi. Penelitian ini memakai Semen Portland Tipe I (SNI 2049:2015) untuk beton normal. Komponen utamanya C_3S – C_2S (penyumbang kuat tekan) serta C_3A – C_4AF yang memengaruhi waktu ikat dan ketahanan terhadap sulfat (Mulyono, 2020).

Reaksi hidrasi semen menghasilkan kalsium silikat hidrat (C – S – H) sebagai produk utama yang memberikan kekuatan, serta kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sebagai produk sekunder yang dapat bereaksi dengan bahan pozzolan seperti silica fume untuk membentuk C – S – H tambahan, sehingga memperkuat beton. Rincian tentang komposisi semen portland dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Komposisi semen portland

Oksida	Kandungan (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0,5 – 0,6
MgO	0,1 – 4
0,1 – 4	0,2 – 1,3
SO ₃	1 – 3

Sumber: *A.M. Neville Concrete Technology*, 1987 dalam (Surya, 2017)

b. Air

Air berfungsi sebagai media reaksi kimia antara semen dan pozzolan, serta sebagai pelumas yang memudahkan pengerjaan campuran beton. Air yang digunakan harus bebas dari zat organik, minyak, asam, atau garam yang dapat mengganggu proses hidrasi semen. Berdasarkan SNI 03-7063-2004, air yang layak digunakan untuk beton adalah air yang memenuhi standar air minum.

Jumlah air yang ditambahkan dalam campuran sangat berpengaruh terhadap kekuatan beton. Rasio air terhadap semen (water-cement ratio) yang terlalu tinggi akan meningkatkan porositas beton dan menurunkan kekuatan tekan maupun tarikannya. Dalam penelitian ini digunakan rasio air-semen tetap sebesar 0,45 agar menghasilkan kepadatan dan kekuatan yang optimal

c. Agregat Halus (Pasir)

Agregat halus adalah material berbutir halus (umumnya berupa pasir alam atau pasir hasil pemecah batu) yang digunakan sebagai salah satu penyusun utama beton. Ukuran butir agregat halus umumnya berada pada rentang sekitar 0,075 mm sampai 5 mm, dan bagian yang sangat halus

(lolos ayakan sangat kecil) dibatasi agar tidak berlebihan karena dapat mengganggu mutu beton (Laia & Nurmaidah, 2023). Dalam praktik campuran beton, pasir berperan sebagai bahan pengisi (filler) yang mengisi rongga di antara agregat kasar sehingga susunan beton menjadi lebih rapat (Prabowo & Sofia, 2024). Berdasarkan SNI 03-2461-2002, pasir yang digunakan harus memiliki modulus kehalusan (FM) antara 2,3–3,1 dan kadar lumpur tidak melebihi 5 %.

Kualitas agregat halus sangat memengaruhi kepadatan dan ikatan antar partikel pada zona transisi. Pasir alami yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sungai Tapparan Rantetayo, dengan gradasi yang memenuhi standar untuk beton normal.

d. Agregat Kasar (Batu andesit)

Batu andesit merupakan batuan beku vulkanik ekstrusif dengan komposisi menengah (intermediate) yang terbentuk dari magma yang membeku di permukaan bumi atau dekat permukaan. Batuan ini umumnya berwarna abu-abu hingga gelap, bertekstur halus sampai porfiritik, serta mengandung mineral utama seperti plagioklas, piroksen, dan hornblende. Kandungan silika batu andesit berada AS berkisar antara 52–63 persen, sehingga sifatnya berada di antara andesit dan dasit. Karakteristik tersebut menjadikan batu andesit banyak dijumpai pada daerah gunung api aktif dan busur vulkanik (Geology.com, 2023).

Secara teoritis, pembentukan batu andesit erat kaitannya dengan aktivitas tektonik di zona subduksi. Pada zona ini, lempeng samudera yang menunjam ke bawah lempeng benua mengalami pelelehan sebagian akibat peningkatan tekanan dan temperatur, menghasilkan magma dengan komposisi andesitik. Selain itu, batu andesit juga dapat terbentuk melalui proses fraksionasi kristal dari magma andesitik, di mana mineral-mineral berat mengkristal lebih awal dan terpisah dari magma induk sehingga sisa magma menjadi lebih kaya silika. Proses lain yang turut berperan adalah pencampuran magma (magma mixing) antara magma andesitik dan

magma yang lebih kaya silika di dalam dapur magma gunung api (Science, 2023).

Dari sisi kinerja beton, penggunaan agregat kasar andesit berpotensi meningkatkan sifat mekanik bila kualitas agregatnya baik (misalnya keausan rendah dan batuan cukup kuat). Pada penelitian beton kuat awal yang memvariasikan persentase agregat kasar batu andesit (Ladung), peningkatan persentase andesit dilaporkan dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah (split tensile) beton; selain itu, metode curing rendam penuh menghasilkan nilai sifat mekanik yang lebih tinggi dibanding metode curing siklus basah–kering (Koso & Nurwidayanti, 2022). Peneliti juga mengaitkan peningkatan ini dengan nilai keausan agregat andesit yang dinilai “cukup baik” (sekitar 13%) (Koso & Nurwidayanti, 2022)

Walau demikian, kualitas andesit dapat turun bila batuan sudah mengalami pelapukan. Dalam studi breksi andesit sebagai material agregat beton, disebutkan bahwa nilai kuat tekan batuan dapat berbeda signifikan antara kondisi batuan segar dan batuan lapuk; tingkat pelapukan dan porositas menjadi faktor yang dominan memengaruhi kuat tekan dari sisi mekanik (Manik et al., 2023). Karena itu, untuk penelitian beton (termasuk uji kuat tarik belah), andesit yang digunakan sebaiknya berasal dari sumber yang terkontrol, serta dibarengi pengujian material agregat (misalnya abrasi, penyerapan, dan gradasi) agar hasil uji beton merepresentasikan pengaruh material secara benar (Manik et al., 2023).



Gambar 2. 1 Batu andesit

e. Bahan Tambah (Silica Fume)

Silica fume atau mikrosilica merupakan hasil samping dari industri ferrosilikon atau silikon metal. Berbentuk serbuk sangat halus (ukuran partikel $< 0,1 \mu\text{m}$), silica fume memiliki luas permukaan spesifik sangat tinggi dan kadar $\text{SiO}_2 > 85 \%$. Dalam campuran beton, silica fume berperan sebagai bahan pozzolan aktif yang bereaksi dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen membentuk C–S–H sekunder yang meningkatkan kekuatan beton dan memperbaiki kerapatan mikrostruktur (Anggraini & Solikin, 2023).

Penambahan silica fume terbukti meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada dosis optimum 10–15 % dari berat semen (Rahma et al., 2024). Namun, dosis yang terlalu tinggi dapat menurunkan workability akibat meningkatnya kebutuhan air. Oleh karena itu, pengendalian rasio air-semen menjadi penting untuk menjaga keseimbangan antara kelecakan dan kekuatan. Berikut contoh gambar silica fume dapat dilihat gambar 2.2



Gambar 2. 2 Silica fume

Kelebihan Silica Fume

1. Meningkatkan kekuatan beton
Silica fume berbutir sangat halus dan sangat reaktif, sehingga dapat memperbaiki mikrostruktur pasta semen dan zona transisi agregat–pasta (ITZ). Dampaknya, kekuatan beton dapat meningkat bila kadar dan rancangan campuran tepat (Solikin et al., 2024).
2. Meningkatkan ketahanan terhadap permeabilitas dan serangan ion agresif
Pada beton dengan bahan tambah silica fume, pori-pori cenderung lebih rapat sehingga nilai absorpsi dan penetrasi ion klorida dapat menjadi lebih rendah dibanding beton tanpa silica fume (Solikin & Ariska, 2023).
3. Meningkatkan ketahanan pada lingkungan sulfat
Penelitian pada SCC dengan variasi silica fume (0%, 8%, 10%) menunjukkan kadar optimum 8% dapat meningkatkan kuat tekan pada kondisi perendaman sulfat serta menurunkan ekspansi (uji perubahan panjang), sedangkan 10% membantu menekan kehilangan berat (Solikin et al., 2024).
4. Berpotensi meningkatkan ketahanan aus/abrasi dan durabilitas umum
Tinjauan sistematis pada studi-studi silica fume menyimpulkan pemakaian silica fume dapat meningkatkan performa durabilitas tertentu (termasuk aspek yang sering diuji seperti abrasi), terutama karena densifikasi mikrostruktur beton (Noorfauzi et al., 2025a).

Kekurangan Silica Fume

1. Workability (kemudahan pengerjaan) cenderung turun tanpa pengaturan campuran
Karena butirannya sangat halus, kebutuhan air/risiko campuran menjadi lebih kental dapat meningkat. Karena itu, beberapa literatur nasional merekomendasikan penggunaan silica fume (mis. 10–15%) disertai superplasticizer agar workability tetap terjaga (Noorfauzi et al., 2025a).
2. Harus memperhatikan kadar optimum (kelebihan dosis bisa berdampak negatif)
Jika kadar silica fume terlalu tinggi, campuran bisa tidak lagi optimal. Pada beton busa, dilaporkan bahwa kadar silica fume yang berlebihan (lebih dari nilai optimum yang diuji) dapat meningkatkan penyerapan air, mengganggu proses hidrasi, dan akhirnya dapat menurunkan kuat tekan (Iswahyudhi et al., 2024). Tinjauan sistematis juga mencatat tren umum bahwa peningkatan kinerja terjadi sampai kadar optimal tertentu, lalu dapat menurun setelah melewati batas tersebut (Noorfauzi et al., 2025a).
3. Perubahan waktu ikat (setting) bisa lebih cepat pada kondisi tertentu
Pada penelitian beton busa dengan variasi silica fume, salah satu campuran menunjukkan waktu ikat lebih cepat (dilaporkan sekitar 180 menit pada variasi tertentu), sehingga dalam praktik perlu pengendalian pengecoran dan curing agar tidak memicu masalah pengerjaan atau retak awal (Iswahyudhi et al., 2024).
4. Butuh kontrol pelaksanaan (pencampuran dan curing) yang lebih disiplin
Karena silica fume sangat halus, distribusinya harus merata agar tidak terjadi variasi mutu dalam satu batch. Selain itu, praktik curing yang baik tetap penting. Pada studi beton busa, juga dicatat bahwa penggunaan superplasticizer yang berlebihan dapat terkait dengan penyusutan lebih cepat dan membuat beton lebih berpori/kropos (Iswahyudhi et al., 2024).

2.2.3 Kuat Tarik Belah Beton

1. Pengertian Kuat Tarik Beton

Kuat tarik beton merupakan salah satu parameter penting untuk menilai kemampuan beton menahan gaya tarik, khususnya karena beton pada dasarnya kuat terhadap tekan namun lemah terhadap tarik. Secara umum, kuat tarik beton hanya berkisar 8–15% dari kuat tekannya, sehingga beton cenderung mengalami retak lebih awal ketika menerima beban tarik atau lentur (Mulyono, 2020). Kondisi ini membuat aspek kuat tarik sangat relevan dalam evaluasi kinerja layan (*serviceability*), karena retak dapat mempercepat masuknya air dan zat agresif, menurunkan kekakuan elemen, serta memicu degradasi jangka panjang pada struktur. Oleh sebab itu, pengujian kuat tarik diperlukan untuk memahami perilaku retak (*cracking behavior*), ketahanan terhadap beban dinamis, serta respons beton terhadap gaya eksternal seperti beban berulang, kejutan, atau variasi temperatur yang dapat meningkatkan risiko retak pada zona tarik (Mulyono, 2020).

Dalam praktik pengujian, kuat tarik beton sering ditentukan melalui uji kuat tarik belah (*split tensile strength*) karena lebih mudah dilakukan dibanding uji tarik langsung, namun tetap representatif untuk menggambarkan kapasitas tarik dan kecenderungan retak material beton. Di Indonesia, prosedur pengujian kuat tarik belah untuk benda uji silinder diatur dalam SNI 2491:2014, yang menjelaskan cara pembebanan dan perhitungan kuat tarik belah sebagai parameter mutu beton (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2014). Nilai kuat tarik belah juga sangat dipengaruhi oleh kualitas interaksi pasta semen–agregat, porositas, serta proses perawatan beton (*curing*). Perawatan yang baik akan membantu hidrasi semen berjalan lebih optimal sehingga mikrostruktur menjadi lebih rapat dan kemampuan beton menahan retak pada zona tarik meningkat; sebaliknya, *curing* yang kurang memadai dapat menurunkan performa kuat tarik dan mempercepat munculnya retak (Mujiyati, 2022).

2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik belah beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Komposisi campuran beton (*mix design*)

Rasio air-semen (w/c ratio) dan perbandingan agregat halus-kasar sangat berpengaruh terhadap kepadatan dan kekuatan ikatan antar partikel beton. Semakin rendah rasio air-semen, semakin tinggi kekuatan tarik belahnya (Ekafitri et al., n.d.).

2. Jenis dan kualitas agregat

Batu andesit sebagai agregat kasar memiliki kekuatan dan densitas tinggi, namun permukaan yang halus dapat menurunkan daya lekat dengan pasta semen. Hal ini berpotensi mengurangi kemampuan beton menahan gaya tarik, kecuali jika diperbaiki dengan bahan tambahan seperti silica fume (Panjaitan & Harahap, 2023).

3. Bahan tambah (*admixture*)

Bahan tambah (*admixture*) adalah material tambahan yang dicampurkan ke dalam beton untuk memodifikasi sifat beton segar maupun beton keras sesuai kebutuhan (misalnya meningkatkan kekuatan, *durabilitas*, atau *workability*). Salah satu bahan tambah mineral yang banyak digunakan adalah silica fume. Silica fume memiliki ukuran partikel sangat halus sehingga dapat berperan sebagai filler yang mengisi rongga-rongga mikro pada pasta semen dan zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone/ITZ*) di sekitar agregat. Pemadatan struktur mikro ini membuat pori-pori menjadi lebih kecil dan total volume pori menurun, sehingga ikatan pasta-agregat cenderung membaik (Davendra & Trimurtiningrum, 2022).

Selain efek filler, silica fume juga bekerja melalui reaksi pozzolan. Pada proses hidrasi semen, terbentuk kalsium hidroksida Ca(OH)_2 sebagai produk samping. Silica fume yang kaya SiO_2 bereaksi dengan Ca(OH)_2 membentuk C-S-H (*calcium silicate hydrate*) tambahan. Produk C-S-H sekunder ini memperkuat dan memperpadat mikrostruktur beton, khususnya pada ITZ, sehingga

beton menjadi lebih rapat dan potensi retak mikro berkurang (Davendra & Trimurtiningrum, 2022; Putra & Widodo, 2024).

Dari sisi performa mekanik, tinjauan sistematis terhadap berbagai penelitian periode 2020–2024 menunjukkan bahwa penggunaan silica fume dalam kisaran tertentu (sering dilaporkan sekitar 10–15% terhadap berat semen pada banyak studi) dapat meningkatkan kinerja beton, termasuk kenaikan kuat tarik belah yang dijelaskan melalui kombinasi reaksi pozzolan dan efek pengisian pori (Noorfauzi et al., 2025b). Namun demikian, efektivitas silica fume tetap sangat dipengaruhi oleh proporsi campuran, faktor air-semen, dan kondisi pengerjaan/curing, sehingga penentuan kadar optimum perlu mengacu pada desain penelitian yang digunakan.

4. Proses *curing* dan umur beton

Beton yang dirawat (*curing*) dengan baik pada suhu dan kelembaban ideal akan menghasilkan reaksi hidrasi sempurna sehingga meningkatkan kekuatan tarik belah seiring bertambahnya umur beton.

3. Peranan Silica Fume terhadap Kuat Tarik Belah Beton

Silica fume memiliki dua mekanisme utama dalam meningkatkan kuat tarik belah beton:

- a. Efek pengisian: Partikel halus silica fume mengisi rongga mikro di antara butiran semen dan agregat, meningkatkan kepadatan dan mengurangi porositas beton.
- b. Reaksi kimia sekunder: Silica fume bereaksi dengan Ca(OH)_2 membentuk C–S–H tambahan yang meningkatkan ikatan antar partikel serta memperkuat zona transisi (ITZ) antara agregat andesit dan pasta semen.

Penelitian Rahma et al. (2024) menunjukkan bahwa penambahan 10–12% silica fume dari berat semen menghasilkan peningkatan kuat tarik belah beton hingga 15% dibanding beton tanpa bahan tambahan. Efek ini paling

signifikan pada beton dengan agregat keras seperti andesit karena memperbaiki ikatan antarmuka yang sebelumnya lemah.

4. Silica Fume Sebagian Bahan Tambah Pozzolan

Silica fume merupakan hasil samping industri silikon atau ferrosilikon yang berwujud serbuk sangat halus (*mikrosilika*). Kandungan utama silica fume adalah silika amorf (SiO_2) lebih dari 85 %, yang bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H) sekunder. Reaksi ini meningkatkan densitas mikrostruktur beton dan menurunkan porositas, sehingga berkontribusi pada peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah (Davendra & Trimurtiningrum, 2022d).

Penelitian pengaruh silica fume sebagai bahan tambah terhadap karakteristik beton menunjukkan bahwa variasi penambahan 5–10 % dari berat semen mampu meningkatkan kuat tekan hingga 20 % dan kuat tarik belah sekitar 12 % dibanding beton kontrol. Namun, peningkatan kadar di atas 10 % menurunkan workability karena sifat partikel yang sangat halus menyerap air pencampur (Davendra & Trimurtiningrum, 2022e).

5. Mekanisme Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik belah beton merupakan parameter penting dalam menilai ketahanan beton terhadap retak akibat beban tarik tidak langsung. Pengujian dilakukan dengan menempatkan beban tekan pada dua garis sejajar di sisi silinder beton sehingga menghasilkan gaya tarik di tengah penampang (SNI 2491:2014). (Subandi, 2019). Nilai kuat tarik belah beton dipengaruhi oleh komposisi campuran, jenis agregat, tingkat kepadatan, dan reaksi kimia antara bahan tambah dengan semen. Penelitian oleh (Rahma et al., 2024c) menyatakan bahwa penambahan silica fume pada kadar optimum (10–12 %) dapat meningkatkan kuat tarik belah hingga 15 % karena terbentuknya ikatan mikro yang lebih kuat di dalam pasta semen.

Rumus untuk menghitung kuat tarik belah adalah:

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

Keterangan:

1. f_{ct} = kuat tarik belah beton (MPa)
2. P = beban maksimum saat benda uji pecah (N)
3. D = diameter benda uji silinder (mm)
4. L = panjang benda uji silinder (mm)
5. π = konstanta (3.14)