

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai peningkatan kuat lentur beton melalui variasi agregat kasar dan penggunaan bahan tambahan pozzolan seperti silica fume telah banyak dilakukan. Hasil-hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi antara agregat berkualitas tinggi seperti batu andesit dan bahan tambahan mineral dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton secara signifikan. Dalam beton nasional, Pala'langan, Sariman, dan Mulyani (2025) mempublikasikan artikel di *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi* yang dapat diakses dalam bentuk pdf melalui situs jurnal Unibos. Penelitian ini mengeksplorasi substitusi *silica fume* sebagai pengganti sebagian semen bersama dengan tambahan bubuk kertas dan *superplasticizer*. Dalam penelitian tersebut digunakan *silica fume* berat semen, serta variasi tambahan (5%, 10 %, 15 %). Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi *silica fume* saja mampu meningkatkan kuat tekan sebesar 3,36 % dan kuat lentur sebesar 7,24 % dibanding beton kontrol, sedangkan kombinasi dengan bubuk kertas cenderung menurunkan performa jika tidak diimbangi proporsinya. Hasil ini penting sebagai pembandingan langsung terhadap penelitianmu, meskipun agregat yang digunakan bukan andesit (Pala'langan et al., 2025).

Penelitian ini fokus pada perbandingan antara beton normal dan beton dengan penambahan silica fume 10% menggunakan agregat andesit sebagai bahan utama. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat lentur meningkat sebesar 22,5% pada umur beton 28 hari. Selain itu, beton dengan silica fume memiliki penyerapan air lebih rendah dan lebih tahan terhadap retak akibat beban berulang. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) tambahan hasil reaksi pozzolanik antara silica fume dan kalsium hidroksida.

Penelitiannya tentang pengaruh penambahan silica fume terhadap kuat lentur beton, Pratama dan Suryawan menggunakan variasi penambahan silica fume sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat lentur beton pada kadar silica fume hingga 10%, sedangkan pada

penambahan lebih dari itu, kekuatan justru menurun akibat menurunnya workability dan meningkatnya porositas mikro. Dengan demikian, kadar optimum silica fume berada pada kisaran 8–10% untuk mencapai peningkatan kuat lentur maksimal. Dalam penelitian tersebut beton diuji dalam kondisi perendaman air tawar dan air laut, dan hasil menunjukkan bahwa beton dengan agregat andesit memberikan nilai kuat lentur lebih tinggi (sekitar 5,9%) dibandingkan beton dengan agregat andesit, khususnya pada kondisi perendaman laut. Penelitian ini secara implisit menunjukkan bahwa agregat andesit memiliki resistensi terhadap reaksi alkali-silika yang lebih baik, sehingga lebih stabil dalam mempertahankan kekuatan lentur. Temuan ini menjadi landasan penting ketika mempertimbangkan penggunaan andesit dalam penelitian yang memadukan *silica fume* (Labib et al., 2016).

Selain itu, tinjauan sistematis mengenai *silica fume* dalam beton dari JRK Politala juga tersedia dalam pdf di situs jurnalnya. Artikel tersebut membahas berbagai studi nasional dan internasional mengenai penggunaan *silica fume* sebagai bahan pengikat tambahan beton, mekanisme efeknya (filler, reaksi pozzolanik), rentang dosis efektif (umumnya 5 %–15 %), dan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil akhir seperti metode pencampuran, waktu curing, dan karakteristik agregat. Artikel ini menjadi rujukan yang sangat baik untuk ulasan pustaka secara metodologis dan teoritis (Noorfauzi et al., 2025).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun atas campuran semen, air, agregat halus, dan agregat kasar yang saling berikatan melalui proses hidrasi semen. Proses ini menghasilkan pasta semen yang berfungsi sebagai pengikat antarpartikel agregat sehingga membentuk massa yang keras dan kuat (Mulyono, 2020). Sifat beton sangat dipengaruhi oleh kualitas dan komposisi bahan penyusunnya, perbandingan air terhadap semen (*water-cement ratio*), serta proses perawatan (*curing*). Beton memiliki kuat tekan yang tinggi, namun kelemahannya terletak pada kemampuan menahan beban tarik dan lentur yang relatif rendah (Neville, 2019). Oleh karena itu, dalam rekayasa struktur, peningkatan kuat lentur menjadi

perhatian penting agar elemen beton seperti balok dapat menahan momen yang bekerja secara optimal, namun beton memiliki kelemahan dan Keunggulan Beton:

a. Keunggulan Beton

1. Kekuatan Tinggi: Beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, sehingga mampu menahan beban struktur yang besar.
2. Tahan Lama: Beton memiliki daya tahan terhadap cuaca, korosi, dan serangan kimia jika dirancang dengan baik.
3. Fleksibilitas Bentuk: Beton dapat dicetak dalam berbagai bentuk sesuai kebutuhan arsitektur dan struktur.
4. Perawatan Minimal: Struktur beton relatif membutuhkan perawatan yang lebih sedikit dibanding material lain seperti kayu atau baja.
5. Ketersediaan Bahan Lokal: Bahan penyusun beton, seperti semen, pasir, dan agregat, umumnya mudah diperoleh secara lokal.
6. Tahan Api: Beton bersifat tahan api karena tidak mudah terbakar, sehingga meningkatkan keamanan bangunan.
7. Kinerja Baik dalam Tekanan: Beton memiliki kekuatan tekan yang jauh lebih tinggi dibanding kekuatan tariknya, sehingga ideal untuk elemen struktural yang menerima beban tekan.
8. Kemampuan Kombinasi dengan Material Lain: Beton dapat diperkuat dengan baja (*reinforced concrete*) atau bahan tambahan seperti silika fume untuk meningkatkan performa mekanik.

b. Kelemahan Beton

1. Kekuatan Tarik Rendah: Beton memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dibanding kekuatan tekan, sehingga rentan terhadap retak akibat beban tarik.
2. Rapuh (Brittle): Beton cenderung patah secara tiba-tiba tanpa peringatan jika melebihi kapasitas beban.
3. Berat: Beton memiliki massa jenis yang tinggi, sehingga memerlukan fondasi kuat dan biaya transportasi lebih besar.
4. Waktu Pengerasan Lama: Beton memerlukan waktu curing yang cukup lama untuk mencapai kekuatan optimal (biasanya 28 hari).

5. Sensitif terhadap Perubahan Suhu dan Kelembapan: Beton bisa mengalami retak atau penyusutan akibat perubahan suhu dan kelembapan yang ekstrem.
6. Biaya Bahan Tambahan: Untuk meningkatkan sifat mekanik atau durabilitas, sering diperlukan bahan tambahan seperti silica fume, fly ash, atau admixtures, yang menambah biaya produksi.
7. Perlu Perancangan yang Teliti: Proporsi campuran yang tidak tepat dapat menyebabkan segregasi, porositas tinggi, dan rendahnya kuat tekan/lentur.

2.2.2 Jenis-Jenis Beton

Menurut Tobi dan Bahar (2005), beton dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan berat jenis, fungsi, dan tujuan penggunaannya. Setiap jenis beton memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda sesuai kebutuhan struktur. Adapun jenis-jenis beton tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Beton Ringan

Beton ringan adalah beton yang memiliki berat jenis kurang dari 1.900 kg/m^3 . Beton jenis ini umumnya digunakan untuk elemen non-struktural, seperti dinding pemisah (*partition wall*), panel pracetak ringan, serta elemen arsitektural yang tidak menahan beban berat.

Pembuatan beton ringan dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain:

1. Membentuk gelembung udara (air-entrained) di dalam campuran beton untuk mengurangi berat volume.
2. Menggunakan agregat ringan, seperti batu apung (pumice), tanah liat bakar (expanded clay), atau slag ringan.
3. Membuat beton tanpa pasir (no-fines concrete), yaitu beton yang tidak menggunakan agregat halus sehingga menghasilkan pori-pori besar dan bobot lebih ringan.

Meskipun memiliki berat yang lebih rendah, beton ringan umumnya memiliki kuat tekan lebih rendah dibandingkan beton normal. Oleh karena itu, penggunaannya lebih difokuskan pada elemen-elemen yang tidak memerlukan kekuatan struktural tinggi namun membutuhkan efisiensi beban dan insulasi termal yang baik.

2. Beton normal

Beton normal merupakan jenis beton yang paling umum digunakan dalam konstruksi. Beton ini memiliki berat jenis berkisar antara 2.200 kg/m³ hingga 2.500 kg/m³, dengan kekuatan tekan yang bervariasi tergantung pada perbandingan campuran (*mix design*), kualitas bahan penyusun, serta metode perawatan (*curing*).

Beton normal banyak digunakan untuk berbagai elemen struktural, seperti balok, kolom, pelat lantai, dan pondasi. Beton ini dibuat dari campuran standar semen Portland, agregat halus, agregat kasar, dan air, tanpa bahan tambahan khusus.

Menurut SNI 7656:2012, beton normal digunakan dalam hampir seluruh pekerjaan beton bertulang karena memiliki keseimbangan antara kekuatan, berat jenis, dan keawetan, serta mudah dikerjakan di lapangan.

3. Beton berat

Beton berat adalah beton dengan berat jenis lebih dari 2.500 kg/m³. Beton jenis ini dibuat dengan menggunakan agregat berat seperti barit (barium sulfate), hematit (iron ore), atau magnetit (iron oxide) yang memiliki densitas tinggi.

Beton berat umumnya digunakan pada struktur khusus, seperti:

- Bangunan atau pelindung yang memerlukan ketahanan terhadap radiasi nuklir (misalnya ruang reaktor atau fasilitas medis radiologi).
- Struktur yang memerlukan massa besar untuk stabilitas, seperti penyeimbang getaran (*counterweight*) atau pelindung balistik.

Karena berat jenisnya tinggi, beton berat memiliki ketahanan terhadap radiasi dan energi kinetik yang jauh lebih baik dibandingkan beton normal, namun biaya produksinya juga lebih besar.

4. Beton jenis

Beton jenis lain merupakan kelompok beton yang digunakan pada struktur dengan persyaratan khusus atau kondisi kerja tertentu yang tidak dapat dipenuhi oleh beton normal. Jenis-jenis beton ini dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan teknis tertentu, baik dari segi kekuatan, keawetan, berat, maupun estetika.

Beberapa contoh beton jenis khusus antara lain:

1. Beton Massa, digunakan pada struktur berukuran besar seperti bendungan dan fondasi masif, di mana pengendalian panas hidrasi menjadi hal penting.
2. Fero semen, yaitu beton tipis yang diperkuat dengan jaring kawat baja halus untuk meningkatkan ketahanan tarik dan daktilitas.
3. Beton Serat (Fiber Concrete), beton yang dicampur dengan serat baja, plastik, atau serat alami untuk meningkatkan ketahanan terhadap retak dan beban kejut.
4. Beton Siklop (Cyclopean Concrete), yaitu beton dengan tambahan batu besar (boulder) untuk menghemat semen pada struktur volume besar.
5. Beton Hampa (Vacuum Concrete), dibuat dengan menyedot air berlebih dari beton segar menggunakan pompa vakum, menghasilkan beton yang lebih rapat dan kuat.
6. Beton Ekspos (Exposed Concrete), digunakan untuk elemen arsitektural dengan permukaan akhir yang menonjolkan tekstur alami beton tanpa plesteran tambahan.

Selain berdasarkan jenis penggunaannya, beton juga dapat diklasifikasikan berdasarkan kuat tekan (mutu beton). Klasifikasi ini menggambarkan kemampuan beton menahan beban tekan maksimum per satuan luas dan menjadi dasar dalam perancangan struktur.

2.2.3 Material Penyusun Beton

Beton merupakan material komposit yang terbentuk dari campuran beberapa bahan utama, yaitu semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan (*admixture* maupun *additive*). Setiap bahan memiliki fungsi dan karakteristik yang berperan penting dalam menentukan sifat fisik, mekanik, serta durabilitas beton. Kualitas beton yang baik sangat bergantung pada mutu dan proporsi material penyusunnya (Mulyono, 2020).

1. Semen Portland

Semen adalah bahan campuran yang secara kimiawi menjadi aktif setelah bersentuhan dengan air. Meskipun agregat tidak berperan langsung dalam reaksi kimia tersebut, ia berfungsi sebagai pengisi mineral yang membantu mencegah perubahan volume beton setelah proses pencampuran dan meningkatkan daya tahan beton yang dihasilkan (Mulyono, 2018). Fungsi utama semen adalah mengikat

butiran agregat sehingga terbentuk massa yang padat. Selain itu, semen juga mengisi rongga di antara butiran agregat. Meskipun semen hanya menyumbang sekitar 10% dari total volume beton, perannya yang aktif membuatnya penting untuk dipelajari dan diawasi secara ilmiah (Tjokrodimuljo, 2008). Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland, yang merupakan jenis semen hidrolik berfungsi sebagai perekat dalam komposisi beton. Jenis semen ini memerlukan air agar reaksi kimiawi selama proses hidrasi dapat berlangsung. Selama hidrasi, semen mengeras dan mengikat bahan-bahan penyusun beton, membentuk massa padat. Semen Portland pertama kali ditemukan di dekat kota Dorset, Inggris, dan merupakan bahan yang umum digunakan untuk tujuan ini (Dipohusodo, 1994).

Semen Portland yang dipakai harus memenuhi syarat (SLI & Teori, 1990) dibagi menjadi 5 type yaitu adalah sebagai berikut (Mulyono, 2004).

1. Tipe I, semen Portland yang dalam penggunaannya tidak memerlukan persyaratan khusus seperti jenis-jenis lainnya.
2. Tipe II, semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang
3. Tipe III, semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan awal yang tinggi dalam fase permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Tipe IV, semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan panas hidrasi yang rendah.
5. Tipe V, semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang lebih tinggi terhadap sulfat.

Semen Portland yang dipakai untuk struktur harus mempunyai kualitas tertentu yang telah ditentukan agar dapat berfungsi secara efektif. Pemeriksaan secara berkala perlu dilakukan, baik masih berbentuk bubuk kering maupun yang pasta. Berikut komposisi semen dapat dilihat dalam table 2.1

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
Alkalis	0,2 – 1,3
SO ₃	1 – 3

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

2. Air

Air memiliki fungsi penting dalam campuran beton, yaitu sebagai pemicu reaksi hidrasi semen dan sebagai pelumas yang memberikan kelecakan (*workability*) pada campuran beton segar. Air yang digunakan harus memenuhi persyaratan air bersih, bebas dari minyak, garam, lumpur, serta zat organik yang dapat mengganggu reaksi hidrasi (Mulyono, 2020). Kualitas beton sangat ditentukan oleh faktor air-semen (*w/c ratio*). Jika air terlalu banyak, beton akan memiliki porositas tinggi dan kekuatannya menurun; sebaliknya, jika terlalu sedikit, campuran akan sulit dikerjakan dan terjadi ikatan tidak sempurna. Oleh karena itu, keseimbangan antara kebutuhan air dan kekuatan beton sangat penting untuk dicapai (Triwibowo & Arifin, 2021).

3. Agregat

Sesuai dengan SNI 7656:2012, didefinisikan sebagai material granular seperti pasir, kerikil, batu pecah, maupun *slag*, yang digunakan bersama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton atau adukan semen hidrolik. Berdasarkan sumbernya, agregat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu agregat alami dan agregat buatan. Agregat alami umumnya berasal dari proses pelapukan dan pengendapan alam, seperti pasir dan kerikil, sedangkan agregat buatan diperoleh melalui proses industri, seperti hasil pemecahan batu (*stone crushing*), residu terak tanur tinggi, pecahan genteng, serta pecahan beton (Mulyono, 2004).

Penggunaan agregat dalam campuran beton memiliki beberapa tujuan penting, antara lain:

1. Mengurangi penggunaan semen Portland agar lebih ekonomis.

2. Meningkatkan kekuatan serta stabilitas volume beton.
3. Meminimalkan penyusutan beton selama proses pengerasan (*hardening*).
4. Menciptakan susunan beton yang padat dengan gradasi yang baik sehingga memudahkan proses pengerjaan.
5. Menjaga *workability* adukan beton agar mudah dikerjakan tanpa mengurangi kekuatan yang dihasilkan.

Berdasarkan ukuran butirannya, agregat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat halus dan agregat kasar, sebagaimana dijelaskan dalam SNI 03-28472002 tentang *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*.

1. Agregat Halus

Menurut SNI 03-2834-2000, agregat halus adalah butiran mineral alami yang lolos saringan 4,75 mm, sedangkan agregat kasar [batu andesit] adalah butiran yang tertahan pada saringan tersebut. Fungsi agregat halus adalah mengisi rongga di antara butir agregat kasar serta memperbaiki kerapatan dan kelekatan pasta semen.

Sifat agregat halus yang baik mencakup ukuran butiran seragam, bebas dari bahan organik, dan memiliki kekasaran permukaan yang cukup untuk meningkatkan daya lekat dengan pasta semen. Dalam praktik konstruksi, penambangan pasir alam secara berlebihan menyebabkan kerusakan lingkungan, sehingga perlu dicari material alternatif seperti abu batu atau serbuk batu hasil proses *stone crusher*.

2. 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 beradaAS berkisar antara 52–63 persen, sehingga sifatnya berada di antara andesitt 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)

Bentuk batu andesit sangat beragam, mulai dari wujud alaminya hingga hasil pengolahan untuk kebutuhan estetika bangunan. di alam bebas, andesit umumnya ditemukan dalam bentuk bongkahan besar(boulder) dilereng gunung atau aliran sungai, serta dalam bentuk batuan masif dibawah permukaan tanah yang terbentuk dari permukaan lava. Karakteristik dasarnya yang padat dan keras membuat batu ini menjadi bahan baku yang sangat fleksibel untuk dibentuk kembali menjadi berbagai material konstruksi dan dekorasi. Dalam industri batu alam, andesit diolah menjadi bentuk lempengan atau ubin (slab) dengan berbagai jenis permukaan seperti rata mesin yang halus untuk kesan modern atau rata alam yang menonjolkan kesan alami dan kokoh. Selain itu, terdapat untuk susun sirih yang terdiri dari potongan potongan tipis memanjang yang diaplikasikan pada dinding bangunan.

Secara umum batu andesit dapat ditentukan melalui pengamatan karakteristik fisik (makroskopis) batuan di lapangan. Batu andesit umumnya memiliki bentuk keras, dengan warna dominan abu-abu hingga kehitaman, tekstur kompak (padat dan keras tanpa rongga) hingga porfiritik, yaitu adanya kristal-kristal mineral berukuran lebih besar yang tertanam dalam massa dasar yang lebih halus. Selain itu, batuan ini tidak berlapis, memiliki struktur masif (batuan berbentuk secara seragam tanpa pengaruh pengendapan berlapis seperti pada batuan sedimen) permukaan batuan biasanya kasar dan tidak mudah hancur yang menunjukkan sifat batuan beku yang terbentuk dari proses pendinginan magma secara cepat di permukaan bumi. Berdasarkan kesesuaian karakteristik fisik tersebut, batuan dapat diidentifikasi sebagai batu andesit secara makroskopis.

Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk batu andesit sebagai bahan bangunan umumnya mengacu pada ketentuan agregat dan batu alam dalam konstruksi, seperti SNI 03-2834 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton dan SNI 1969:2008 tentang cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar. Dalam standar tersebut, batu andesit yang digunakan harus memenuhi persyaratan fisik tertentu, antara lain memiliki kekuatan tekan yang tinggi, struktur yang padat dan tidak berpori besar, serta tidak mengandung retakan atau bahan organik yang dapat mengganggu kekuatan beton. Selain itu, batu andesit harus memiliki nilai penyerapan air yang rendah (umumnya kurang dari 3%), berat jenis yang cukup tinggi (sekitar 2,5–2,7), serta ketahanan terhadap keausan yang baik yang biasanya diuji dengan metode abrasi (misalnya uji Los Angeles). Secara visual, batu harus bersih, keras, dan memiliki ukuran butir sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan. Dengan memenuhi persyaratan tersebut, batu andesit dapat digunakan sebagai agregat atau bahan konstruksi yang sesuai dengan standar mutu SNI. Secara visual, bentuk batu andesit Toraja cenderung memberikan kesan kokoh, alami, dan estetis, sehingga tidak hanya berfungsi sebagai material struktural tetapi juga sebagai elemen arsitektural. Keunikan tekstur dan warnanya yang khas menjadi nilai tambah dalam penerapan desain tradisional maupun modern. Dengan demikian, bentuk batu andesit Toraja dapat dipahami dari dua aspek, yaitu bentuk

alami hasil proses geologi dan bentuk olahan yang disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi serta estetika bangunan.

Dalam kaitannya dengan kuat lentur beton, agregat kasar batu andesit berperan sebagai elemen penahan utama terhadap gaya tarik tidak langsung yang terjadi akibat pembebanan lentur. Bentuk agregat yang bersudut meningkatkan interlocking antar butir agregat, sehingga beton menjadi lebih stabil dan mampu menahan retak awal. Hal ini sangat relevan pada pengujian kuat lentur balok beton. Ketersediaan batu andesit yang melimpah di Indonesia juga menjadi nilai tambah dalam penggunaannya sebagai agregat kasar beton. Batu andesit dapat diperoleh dengan mudah dari berbagai daerah, sehingga biaya pengadaan relatif ekonomis dan mendukung penggunaan material lokal.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan batu andesit sebagai agregat kasar tetap memerlukan pengujian sifat fisik dan mekanis, seperti analisis gradasi, berat jenis, dan keausan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa agregat memenuhi standar yang ditetapkan dan mampu memberikan performa optimal dalam campuran beton.

Berikut contoh gambar batu andesit dapat di lihat gambar 2.1:



Gambar 2. 1 batu andesit

Batu Andesit memiliki kelebihan dan kekurangan:

a. Kelebihan Batu Andesit

Batu andesit memiliki kekuatan dan daya tahan yang tinggi. Sifat fisiknya yang keras membuat batu andesit mampu menahan beban berat serta tekanan mekanis yang besar, sehingga sangat sesuai digunakan sebagai material konstruksi, seperti

pondasi, dinding, dan perkerasan jalan. Ketahanan ini juga menjadikan batu andesit tidak mudah retak atau aus meskipun digunakan dalam jangka waktu yang lama. Selain memiliki kekuatan yang baik, batu andesit juga dikenal memiliki ketahanan terhadap perubahan cuaca dan lingkungan. Batu ini relatif tahan terhadap panas, hujan, dan kelembapan, sehingga tidak mudah mengalami pelapukan. Oleh karena itu, batu andesit sering digunakan pada bangunan luar ruangan, seperti trotoar, taman, dan pelapis fasad bangunan, karena mampu mempertahankan kualitas dan bentuknya meskipun terpapar kondisi alam secara terus-menerus. Kelebihan lain dari batu andesit adalah nilai estetika yang tinggi. Batu ini umumnya berwarna abu-abu hingga kehitaman dengan tekstur alami yang memberikan kesan kokoh dan elegan. Tampilan tersebut membuat batu andesit banyak diminati sebagai material finishing pada bangunan modern maupun tradisional. Selain itu, batu andesit dapat diolah dalam berbagai bentuk dan ukuran, sehingga fleksibel untuk kebutuhan desain arsitektur. Dari segi ketersediaan, batu andesit juga memiliki keunggulan ekonomis dan mudah diperoleh, khususnya di Indonesia yang memiliki banyak daerah penghasil batu andesit. Ketersediaan yang melimpah menyebabkan biaya pengadaan relatif lebih terjangkau dibandingkan beberapa jenis batu alam lainnya. Hal ini menjadikan batu andesit sebagai pilihan material yang efisien baik dari sisi teknis maupun ekonomi.

b. kekurangan batu andesit

Kekurangan lain dari batu andesit adalah tingkat kesulitan dalam proses pengolahan dan pemasangan. Karena sifatnya yang keras, batu andesit memerlukan peralatan khusus untuk pemotongan dan pembentukan. Hal ini dapat meningkatkan biaya produksi serta waktu pengerjaan dibandingkan dengan material bangunan lain yang lebih mudah dibentuk. Selain itu, pemasangan yang kurang tepat dapat menyebabkan hasil akhir tidak maksimal atau tidak presisi.

4. Bahan Tambah [Silica Fume]

Silica fume merupakan bahan tambahan mineral yang dihasilkan sebagai produk samping dari industri ferrosilikon atau silikon metal. Material ini berupa serbuk sangat halus dengan ukuran partikel sekitar 0,1 mikron, jauh lebih kecil daripada semen Portland (Noorfauzi et al., 2025). Penambahan silica fume dalam

campuran beton menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) mengacu pada ketentuan umum bahan tambah dan perencanaan beton, seperti SNI 2495:2014 tentang bahan tambah beton dan SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural. Dalam praktiknya, silica fume digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan kadar penambahan umumnya berkisar antara 5% hingga 15% dari berat semen, tergantung pada kebutuhan mutu beton yang diinginkan. *Silica fume* memiliki kandungan SiO_2 lebih dari 85%, yang membuatnya sangat reaktif secara pozzolanik. Reaksi pozzolanik *silica fume* dan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dari hasil hidrasi semen menghasilkan senyawa *calcium silicate hydrate* (*C-S-H*) tambahan yang memperkuat ikatan dalam pasta semen (Noorfauzi et al., 2025). Selain itu, karena ukurannya yang sangat halus, *silica fume* juga berperan sebagai *micro-filler* yang mengisi rongga-rongga antarpartikel semen, sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan beton (Pala'langan et al., 2025).

Silica fume berbentuk serbuk yang sangat halus, jauh lebih halus dibandingkan semen. Secara visual, *silica fume* tampak seperti tepung atau abu berwarna abu-abu tua hingga kehitaman, dan ketika disentuh terasa sangat lembut serta mudah beterbangan karena partikelnya sangat ringan. Bentuk dan ukurannya yang sangat kecil membuat *silica fume* mampu mengisi rongga-rongga mikro di dalam campuran beton, sehingga struktur beton menjadi lebih rapat dan padat. Inilah sebabnya *silica fume* sering digunakan untuk beton mutu tinggi, karena dapat meningkatkan kekuatan, mengurangi pori-pori, dan memperbaiki daya tahan beton terhadap air dan bahan kimia.

Berikut contoh gambar *silica fume* dapat di lihat gambar 2.2:



Gambar 2. 2 silica fume

Silica fume memiliki kelebihan dan kekurangan:

a. Kelebihan Silica Fume

Silica fume memiliki banyak kelebihan yang menjadikannya bahan tambahan penting dalam pembuatan beton berkinerja tinggi. Kelebihan utamanya terletak pada kemampuannya meningkatkan kekuatan tekan dan tarik beton secara signifikan. Karena memiliki partikel yang sangat halus, silica fume mampu mengisi ronggarongga mikro di antara partikel semen, sehingga struktur beton menjadi lebih padat dan rapat. Hal ini juga menyebabkan beton menjadi lebih tahan terhadap penetrasi air dan zat kimia berbahaya, seperti ion klorida, sulfat, maupun karbonasi, yang biasanya menjadi penyebab kerusakan pada beton.

Selain itu, penggunaan silica fume membuat beton lebih tahan terhadap abrasi dan keausan, menjadikannya ideal untuk konstruksi yang memerlukan daya tahan tinggi seperti jembatan, pelabuhan, bendungan, dan jalan raya. Bahan ini juga meningkatkan daya lekat antara pasta semen dan agregat, menghasilkan beton yang lebih homogen dan kuat. Keunggulan lain dari silica fume adalah kemampuannya mengurangi reaksi alkali-silika (ASR) yang sering menyebabkan retak pada beton, sehingga memperpanjang umur struktur. Dengan demikian, beton yang menggunakan silica fume memiliki ketahanan dan durabilitas yang jauh lebih baik dibanding beton konvensional, menjadikannya pilihan utama untuk proyek-proyek konstruksi yang membutuhkan kualitas dan keandalan tinggi.

b. Kekurangan Silica Fume

Silica fume memiliki beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan dalam penggunaannya pada campuran beton. Salah satu kelemahan utamanya adalah menurunnya workability atau kemudahan pengerjaan karena partikel-partikelnya yang sangat halus membuat campuran beton menjadi lebih kental dan cepat mengeras. Hal ini menyebabkan beton lebih sulit diolah tanpa penambahan bahan kimia seperti superplasticizer. Selain itu, harga silica fume relatif lebih mahal dibandingkan bahan tambahan lain seperti fly ash atau slag, sehingga meningkatkan biaya produksi beton.

Silica fume juga memiliki risiko menyebabkan retak susut plastis yang lebih tinggi akibat reaksi hidrasi yang cepat dan panas yang dihasilkan selama proses pengerasan. Jika tidak dilakukan perawatan (curing) dengan baik, retak ini dapat

mengurangi daya tahan beton. Penggunaannya juga memerlukan kontrol yang sangat ketat dalam proses pencampuran, karena distribusi yang tidak merata dapat menyebabkan beton tidak homogen dan menurunkan kekuatannya. Selain itu, karena luas permukaan partikel silica fume yang sangat besar, campuran beton menjadi membutuhkan air lebih banyak untuk mencapai tingkat kelecakan yang diinginkan. Secara keseluruhan, meskipun silica fume dapat meningkatkan kualitas beton, penggunaannya membutuhkan pengendalian teknis yang cermat agar kekurangannya tidak memengaruhi hasil akhir.

2.2.4 Kuat lentur beton

1. Pengertian kuat lentur beton

Kuat lentur beton merupakan kemampuan beton menahan gaya lentur akibat beban transversal. Berdasarkan SNI 4431:2011, pengujian kuat lentur dilakukan dengan metode pembebanan dua titik pada balok uji berukuran standar, untuk menentukan modulus of rupture yang dihitung berdasarkan momen maksimum sebelum benda uji mengalami keretakan. Nilai kuat lentur sangat dipengaruhi oleh homogenitas campuran, kepadatan beton, kualitas adhesi antara pasta dan agregat, serta adanya cacat mikro seperti pori atau retak rambut.

Rumus pada pengujian kuat lentur berdasarkan SNI 4433:2011:

- a. Untuk pengujian dimana bidang patahanan terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), maka kuat lentur dihitung menurut persamaan sebagai berikut:

$$f_r = \frac{P \times L}{b \times h^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

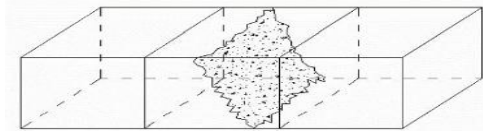
f_r = Kuat lentur (Mpa)

P = Beban yang bekerja (N)

L = Jarak (bentang) antara dua perletakan

(mm) b = Lebar balok (mm) h = Tinggi
balok (mm)

Pada gambar 2.1 menunjukkan dimana balok mengalami patah pada 1/3 bentangan yang mengakibatkan bagian tengah balok mengalami tegangan tarik terbesar di serat bawah.



Gambar 2. 3 Patah pada 1/3 bentangan

- b. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan maka kuat lentur beton dihitung dengan persamaan 2.3

$$f_r = \frac{3 \times P \times a}{b \times h^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

f_r = Kuat Lentur (Mpa)

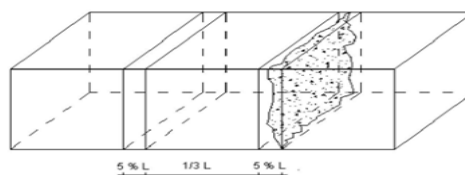
P = Beban yang bekerja

a = Jarak rata-rata antara tampang limbah patah dan tumpuan luar yang terdekat (mm)

b = Lebar balok (mm)

h = Tinggi balok (mm)

Pada gambar 2.2 menunjukkan patahan balok yang terjadi di luar 1/3 bentangan tengah dan garis patah pada < 5% dari bentangan. Hal ini terjadi karena selain gaya lentur, di daerah tersebut juga mengalami gaya geser yang cukup besar.



Gambar 2. 4 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentangan

Penelitian oleh Chau et al., (2025) menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dan bentonit pada campuran beton mampu meningkatkan kuat lentur

hingga 15% dibandingkan beton normal, meskipun kuat tekan relatif menurun. Hal ini memperkuat pandangan bahwa partikel halus dapat memperbaiki keutuhan struktur mikro beton yang berperan langsung terhadap daya tahan terhadap lenturan.

Dalam konteks elemen struktural, kuat lentur menjadi salah satu parameter utama dalam perancangan balok beton bertulang. Kuat lentur beton yang baik memungkinkan balok menahan momen maksimum sebelum terjadi retak pertama (*first crack*), yang pada akhirnya mempengaruhi daktilitas dan keandalan struktur. Oleh karena itu, peningkatan kuat lentur melalui pengaturan komposisi bahan tambah seperti abu batu andesit menjadi aspek yang relevan baik secara teoritis maupun praktis.

2. Faktor -faktor yang mempengaruhi kuat lentur beton

1. Jenis dan Kualitas Agregat Kasar (Batu Andesit) Batu andesit memiliki tekstur keras, padat, dan permukaan kasar yang meningkatkan daya lekat dengan pasta semen. Kualitas batu andesit yang baik berperan penting dalam meningkatkan kuat lentur beton.
2. Kandungan dan Kualitas Silica Fume Penambahan silica fume dalam jumlah optimum (sekitar 5–15% dari berat semen) dapat meningkatkan kekuatan lentur karena partikel halusnya mengisi pori-pori mikro dan bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa C–S–H yang memperkuat struktur beton.
3. Rasio Air terhadap Semen (Water-Cement Ratio / w/c) Nilai w/c yang terlalu tinggi meningkatkan porositas beton dan menurunkan kekuatan lentur, sedangkan rasio terlalu rendah membuat campuran sulit dikerjakan. Rasio optimum diperlukan untuk menghasilkan beton padat dan homogen.
4. Proporsi Campuran Beton Komposisi antara semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan sangat memengaruhi kekuatan lentur. Proporsi yang tepat menghasilkan keseimbangan antara kepadatan, workability, dan kekuatan.
5. Proses Pencampuran (Mixing) Pencampuran yang merata memastikan distribusi silica fume dan agregat andesit homogen di seluruh campuran beton. Campuran yang tidak homogen akan menurunkan kekuatan lentur karena adanya perbedaan distribusi bahan.

6. **Pemadatan (Compaction)** Pemadatan yang baik mengeluarkan udara terperangkap dan mengurangi rongga dalam beton. Beton yang kurang padat memiliki kekuatan lentur yang rendah dan mudah mengalami retak awal.
7. **Proses Perawatan Beton (Curing)** Curing yang baik menjaga kelembaban selama proses hidrasi. Tanpa perawatan yang cukup, beton dapat kehilangan air terlalu cepat sehingga reaksi pozzolanik dari silica fume tidak berlangsung sempurna dan kekuatan lentur berkurang.
8. **Umur Beton Saat Pengujian Kekuatan lentur** meningkat seiring bertambahnya umur beton. Umumnya pengujian dilakukan pada umur 28 hari untuk melihat perkembangan kekuatan akibat pengaruh silica fume dan agregat andesit.
9. **Suhu dan Kondisi Lingkungan** Suhu tinggi mempercepat penguapan air dan meningkatkan risiko retak, sedangkan suhu rendah memperlambat reaksi hidrasi. Kondisi lingkungan yang stabil membantu pembentukan struktur beton yang lebih padat dan kuat.
10. **Dimensi dan Kondisi Benda Uji** Ukuran benda uji (misalnya balok $15 \times 15 \times 60$ cm) serta cara penempatan dan pembebanan saat uji lentur sangat berpengaruh terhadap hasil pengujian. Ketidaktepatan pada dimensi atau posisi dapat menimbulkan hasil yang tidak akurat.

3. Peranan Silica Fume terhadap Kuat Lentur Beton Berbahan Agregat Kasar Batu Andesit

1. Meningkatkan Kepadatan Struktur Beton Partikel silica fume berukuran sangat halus (sekitar 100 kali lebih kecil dari partikel semen), sehingga mampu mengisi pori-pori mikro dalam pasta semen. Hal ini membuat struktur beton menjadi lebih padat dan rapat, sehingga meningkatkan kemampuan beton menahan beban lentur.
2. **Reaksi Pozzolanik yang Memperkuat Beton** Silica fume bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen dan membentuk Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) tambahan. Senyawa C-S-H ini berperan utama dalam memperkuat ikatan antarpartikel semen dan agregat, sehingga kuat lentur beton meningkat.

3. Meningkatkan Adhesi antara Pasta Semen dan Agregat Andesit Agregat batu andesit memiliki permukaan yang kasar dan keras. Dengan adanya silica fume, ikatan antara pasta semen dan permukaan agregat menjadi lebih kuat karena terbentuknya lapisan perekat yang lebih halus dan padat.
4. Mengurangi Porositas dan Mikroretak Karena silica fume mengisi rongga mikro dalam beton, jumlah pori berkurang dan risiko terbentuknya retak halus (microcrack) akibat tegangan tarik berlebih menjadi lebih kecil. Hal ini meningkatkan daya tahan beton terhadap pembebanan lentur berulang.
5. Meningkatkan Ketahanan terhadap Beban Tarik Tidak Langsung Kuat lentur berhubungan dengan kemampuan beton menahan gaya tarik.

Penelitian oleh Pujiastuti dkk.(2023) menunjukkan bahwa penggunaan agregat silica fume dapat meningkatkan kuat lentur beton hingga 18% dibanding beton normal, Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa penambahan silica fume sebagai agregat halus berpotensi menghasilkan efek serupa terhadap peningkatan kuat lentur. Berikut dapat dilihat standar waktu pengadukan minimal

Tabel 2. 2 Waktu Pengadukan Minimal (Mulyono,2004)

NO	Kapasitas Dari <i>Mixer</i> (m3)	ASTM C.94 dan ACI 318
1	0,8 – 3,1	1 Menit
2	3,8 – 4,6	2 Menit
3	7,6	3 Menit